“十四五”职业教育国家规划教材

中国民航出版社新经典教材文库

Fundamentals of Aviation Machinery (4th Edition)

李家宇 薛建海◎主 编　陶 理 高春瑾◎副主编

虞浩清◎主审

航空机械基础

（第四版）

“智慧职教”配套网络课程资源

扫描书中二维码辅助立体化教学

中国民航出版社有限公司

图书在版编目（CIP）数据

航空机械基础/李家宇，薛建海主编．—4版．
—北京：中国民航出版社有限公司，2021.1
ISBN 978-7-5128-0892-8

Ⅰ.①航… Ⅱ.①李… ②薛… Ⅲ.①航空-机械设备-高等职业教育-教材 Ⅳ.①V22

中国版本图书馆CIP数据核字（2021）第002163号

航空机械基础（第四版）

李家宇 薛建海 主 编

陶 理 高春瑾 副主编

责任编辑	陈 晨
出 版	中国民航出版社有限公司（010）64279457
地 址	北京市朝阳区光熙门北里甲31号楼（100028）
排 版	中国民航出版社有限公司录排室
印 刷	北京富泰印刷有限责任公司
发 行	中国民航出版社有限公司（010）64297307 64290477
开 本	787×1092 1/16
印 张	21.25
字 数	504千字
版 印 次	2021年2月第4版 2021年2月第1次印刷
书 号	ISBN 978-7-5128-0892-8
定 价	59.00元

官方微博 http://weibo.com/phcaac

淘宝网店 https://shop142257812.taobao.com

电子邮箱 phcaac@sina.com

普通高等院校民航特色专业“十四五”规划教材 · 航空工程专业

中国民航出版社新经典教材文库

本书第三版获评“十二五”职业教育国家规划教材

航空机械基础

（第四版）

主　编　李家宇　薛建海

副主编　陶　理　高春瑾

主　审　虞浩清

中国民航出版社有限公司

中国民航出版社有限公司版权所有

修订说明

一、修订原因

《航空机械基础》教材是广州民航职业技术学院的飞机机电设备维修、飞机发动机维修、飞机结构修理、飞机电子设备维修、航空地面设备维修、飞机部件维修和通用航空器维修等6个专业的人才培养方案中规定课程“（航空）机械基础”的唯一选用教材。

自1996年起，本教材的主要内容作为校内讲义应用于飞机维修专业教学。2007年，本教材正式由中国民航出版社出版；2012年进行了第1次修订，并于2013年1月出版第二版；2015年进行了第3次修订，并于2015年8月出版第三版，第三版教材经全国职业教育教材审定委员会审定，获评为“十二五”职业教育国家规划教材。教材应用至今，已七次印刷，共计发行约三万册。虽然近年来世界民航飞机维修业随着民用航空技术的进步而快速发展，但是其工作岗位要求的基础知识和技能并没有发生太大变化，所以本教材的内容基本是合适的。《航空机械基础》（第三版）是一本较高质量且符合该课程教学标准的教材，但是该教材仍有进一步修订和改进的空间。比如，新兴的飞机维修专业，如飞机部件维修、航空地面设备维修和通用航空器维修等对专业基础知识的不同需求；机械基础知识在民航飞机结构和系统中的应用实例；通信技术的发展对立体化教材的需求等。

二、修订原则

（1）基于民航规章（CCAR-66-R3），针对高职教育的特点，以满足民航飞机维修类工作岗位一线的飞机维修高级技术人员所需的基本知识和技能需求而编写本教材。

（2）根据民航相关院校飞机机电设备维修、飞机发动机维修、飞机结构修理、飞机电子设备维修、飞机部件维修、航空地面设备维修、通用航空器维修相关专业最新制定的人才培养方案和课程教学大纲，调整和补充教材的知识内容。

三、修订方案

在前三版内容的基础上，本次修订的主要内容有：

（1）适当补充机械基础知识在民航飞机结构和系统中的应用实例；

（2）每一章章前制作导学，每节节后制作知识小结和习题，并在教材中加入对应二维码，便于读者扫码学习；

（3）考虑教材内容较多，删去“第 4 章 液压传动”和“第 5 章 材料成型”的内容；

（4）书中涉及的国家标准，都更新为迄今为止的新国家标准；

（5）对第三版中少数不清晰的图表和错别字进行修改。

本次修订后，全书内容共计 6 章及附录和附表，依次是：

第 1 章　常用量具和手工工具；

第 2 章　常用机构；

第 3 章　机械传动；

第 4 章　航空紧固件；

第 5 章　航空机械零件；

第 6 章　润滑与密封；

附录 1　课程网络资源及教材中二维码使用说明；

附录 2　航空机械基础课程设计概述；

附录 3　航空机械基础课程设计课题任务书；

附表 1　机构运动简图用图形符号（GB/T 4460—2013）；

附表 2　公制螺纹直径与螺距标准组合系列、基本尺寸（GB/T 193—2003）；

附表 3　美制统一螺纹（UN）的标准系列（ASME B1. 1—2003）。

中国民航出版社有限公司版权所有

前言

本书是根据民航对飞机机电设备维修、飞机结构修理、飞机电子设备维修、飞机部件修理、航空地面设备维修和通用航空器维修等专业人才的培养要求而编写的。本书主要作为民航高等职业教育飞机机电设备、飞机发动机、飞机结构、飞机电子设备、飞机部件、航空地面设备和通用航空器维修及相关专业的专业技术基础课程教材，也可供民航相关企业职业教育培训使用。本书的参考学时为50~70学时。

本书编写的指导思想是一切从实际需要出发，围绕民航飞机维修、飞机结构修理及地面设备维修高级技术人员工作所需的基本知识和技能而编写教学内容。为此，按照“必需、够用”的原则，结合民航行业特点，精选本教材的教学内容。本书共分6章及附录和附表，分别为第1章 常用量具和手工工具；第2章 常用机构；第3章 机械传动；第4章 航空紧固件；第5章 航空机械零件；第6章 润滑与密封；附录为课程设计任务书；附表为相关标准。

本书建设了配套的网络学习资源，学习者可以通过智慧职教网站（https://www.icve.com.cn），免费注册学习账号，拓展学习网络课程资源。同时，在教材的每一章添加了该章导学的二维码，在每一节后面添加了该节知识总结和随堂练习的二维码，方便学习者课前预习和课后复习巩固。课程网络资源和二维码的详细使用方法参见本书附录1。

参与本书编写工作的均是广州民航职业技术学院具有丰富教学经验的一线教师。具体分工如下：李家宇编写绪论、第4章、第5章，薛建海编写第3章，陶理编写第1章、附录和附表，高春瑾编写第2章、第6章。

本书由李家宇、薛建海担任主编，陶理、高春瑾为副主编，虞浩清主审，李家宇统稿。

本书初版由华南理工大学吴诰珪教授和黎桂英副教授主审。在编写过程中还得到了原广州飞机维修工程有限公司培训部韩振山和孔海霞等同志的大力支持和帮助。此次改版过程中，广州民航职业技术学院的卢艳君、龚友根，中国民航大学的黄燕晓等给予了大力支持和帮助，并提出了宝贵的意见，在此表示衷心感谢。

编写一本适合民航高等职业教育飞机机电设备、飞机发动机、飞机结构、飞机电子设备、飞机部件、航空地面设备和通用航空器维修专业使用的机械基础教材，多年来一直是我们的心愿，但由于编者水平有限，错误和欠妥之处在所难免，恳请同行和广大读者给予批评指正。

编者

2021 年 1 月

中国民航出版社有限公司版权所有

目 录

修订说明

前言

绪论 …… (1)

第 1 章　常用量具和手工工具 …… (3)

1.1　游标卡尺 …… (3)
1.2　千分尺 …… (8)
1.3　百分表 …… (15)
1.4　组合量具和卡规 …… (18)
1.5　塞尺和螺距规 …… (20)
1.6　通用工具 …… (21)
1.7　金属切割工具 …… (31)
复习思考题 …… (38)

第 2 章　常用机构 …… (42)

2.1　概述 …… (42)
2.2　平面机构运动分析 …… (45)
2.3　平面连杆机构 …… (52)
2.4　凸轮机构 …… (60)
2.5　间歇运动机构 …… (64)
2.6　常用机构在飞机中的应用 …… (67)
复习思考题 …… (69)

中国民航出版社有限公司版权所有

第 3 章　机械传动 …… (73)

3.1　带传动 …… (74)
3.2　链传动 …… (87)
3.3　齿轮传动 …… (97)
3.4　蜗杆传动 …… (126)
3.5　轮系 …… (133)
3.6　螺旋传动 …… (144)
3.7　钢索传动和传动杆传动 …… (150)
复习思考题 …… (165)

第 4 章　航空紧固件 …… (170)

4.1　螺纹基础知识 …… (170)
4.2　美国航空螺纹紧固件 …… (179)
4.3　螺纹紧固件的安装和防松 …… (193)
4.4　转角拧紧式紧固件 …… (200)
4.5　铆钉 …… (203)
4.6　紧固件松动检查及修理 …… (213)
复习思考题 …… (214)

第 5 章　航空机械零件 …… (216)

5.1　弹簧 …… (216)
5.2　轴 …… (222)
5.3　轴承 …… (227)
5.4　键和花键 …… (244)
5.5　联轴器 …… (249)
5.6　离合器 …… (256)
5.7　管路系统 …… (260)
复习思考题 …… (270)

第 6 章　润滑与密封 …… (272)

6.1　润滑 …… (272)
6.2　密封 …… (284)
复习思考题 …… (297)

中国民航出版社有限公司版权所有

附录 …… (299)

附录 1　课程网络资源及教材中二维码使用说明 …… (299)
附录 2　航空机械基础课程设计概述 …… (301)
附录 3　航空机械基础课程设计课题任务书 …… (303)

附表 …… (318)

附表 1　机构运动简图用图形符号（GB/T 4460—2013） …… (318)
附表 2　公制螺纹直径与螺距标准组合系列、基本尺寸（GB/T 193—2003）
…… (324)
附表 3　美制统一螺纹（UN）的标准系列（ASME B1.1—2003） …… (325)

参考文献 …… (329)

中国民航出版社有限公司版权所有

中国民航出版社有限公司版权所有

绪 论

一、本课程的性质和内容

本课程是飞机机电设备维修、飞机发动机维修、飞机结构修理、飞机电子设备维修、飞机部件维修、航空地面设备维修和通用航空器维修专业的技术基础课程。

本课程包括：常用量具和手工工具、常用机构、常用机械传动、航空紧固件、航空机械零件、润滑与密封6大基本部分以及附录、附表。

常用量具和手工工具包括：游标卡尺、千分尺、组合量具、卡规、塞尺、手锤、螺丝刀、钳子、扳手、钢锯、锉刀、麻花钻、铰刀、丝锥和板牙等。

常用机构包括：平面机构运动分析、平面连杆机构、凸轮机构和间歇运动机构。

机械传动包括：带传动、链传动、齿轮传动、蜗杆传动、螺旋传动、钢索传动和传动杆传动。

航空紧固件包括：螺纹基础知识、美国航空螺纹紧固件、转角拧紧式紧固件和铆钉等。

航空机械零件包括：弹簧、键和花键、联轴器、离合器、轴、轴承、管路和接头等。

润滑与密封包括：常用润滑方式、航空润滑油、润滑脂、密封方式和常用密封件等。

上述内容是从事飞机机电设备维修、飞机结构修理、航空地面设备维修和通用航空器维修工作所必须具备的基本知识，也是今后学习专业课程的基础。因此学习本课程的必要性和重要性也就不言而喻了。

二、本课程的学习目的和学习方法

1. 学习目的

通过本课程的学习，学生应达到下列几点要求：

（1）掌握常用量具和工具的正确使用；

（2）熟悉和掌握常用机构与机械传动的构造、工作原理、特点、失效形式和维护知识；

（3）熟悉和掌握航空零件的工作原理、特点、规格标准的识别及使用注意事项；

（4）熟悉常用润滑油、润滑脂和密封件的种类、特点及应用；

中国民航出版社有限公司版权所有

（5）初步具有综合运用所学知识分析和解决生产实际问题的能力。

2. 学习方法

课程的学习方法与课程的特点有关。根据本课程的特点，在学习方法上应当注意以下几点：

（1）结合学习本课程及时复习和巩固有关先修课程的知识。

不少先修课，如物理、机械制图、工程力学等课程是学习本课程的基础。因此，结合学习本课程及时复习有关先修课程的知识对学好本课程起着重要的作用。

（2）要注重基本原理的学习和掌握。

无论一台机器或一架飞机的机械部分构造多复杂、结构形式如何不同，均可分解为若干个基本机构。因此，熟练掌握各机构的基本构造、基本工作原理，有助于分析和解决今后生产实际中遇到的问题。

（3）学习本课程要坚持理论联系实际。

本课程与生产实践有着紧密的联系。在相应的实训或者生产实践中，要注意运用本课程所述的理论、方法和注意事项指导实践。同时，应根据具体的问题进行具体的分析，切不可不顾实际条件生搬硬套书本上的公式和数据等。

（4）注意培养综合运用所学知识分析问题、解决问题的能力。

本课程是一门综合性课程，学习本课程的过程也是综合运用所学知识的过程。此外，在生产实际中所遇到的问题往往比较复杂，影响因素也较多，所以要注意培养综合运用所学知识全面地研究分析问题的能力，防止孤立地、片面地进行分析研究。

中国民航出版社有限公司版权所有

第 1 章　常用量具和手工工具

学习要求：

- 熟悉游标卡尺、千分尺、百分表组合量具、塞尺和卡规等量具的基本构造与原理；
- 掌握游标卡尺、千分尺、百分表组合量具、塞尺和卡规等量具的使用方法及注意事项；
- 掌握通用工具和金属切割工具的正确使用。

第 1 章　课程导学	

1.1　游标卡尺

游标卡尺（Vernier Caliper）是一种测量工件长度、深度和内外直径的量具，它的应用非常广泛。

1.1.1　游标卡尺的结构

游标卡尺有多种式样，如普通游标卡尺、深度游标卡尺和高度游标卡尺等，但它们的刻线原理及识读方法是相同的。现以 0~150 mm 规格的普通游标卡尺为例，加以说明。

普通游标卡尺主要由主尺和游标两部分构成，如图 1.1 所示。主尺具有上下两个卡爪，在主尺的正面刻有刻度线和数字，其反面制有长槽供容纳测深杆。游标又称为副尺，它也具有上下两个卡爪，这两个卡爪分别与主尺上的上下卡爪组成内测量爪和外测量爪。

中国民航出版社有限公司版权所有

内测量爪通常用来测量内径、沟槽的宽度和孔距；外测量爪通常用来测量外径、长度和孔距。游标上也刻有刻度线和标有数字。游标装附在主尺上，并能够在其上左右滑动。在游标与尺身之间有一弹簧片，利用弹簧片的弹力使游标与主尺既保持一定的紧度又可轻便滑动。游标的上部有一颗紧定螺钉，可将游标固定在尺身上的任意位置。测深杆是根具有矩形截面的长杆，它固定在游标上，能随着游标一起滑动。测深杆可用来测量孔和沟槽的深度。

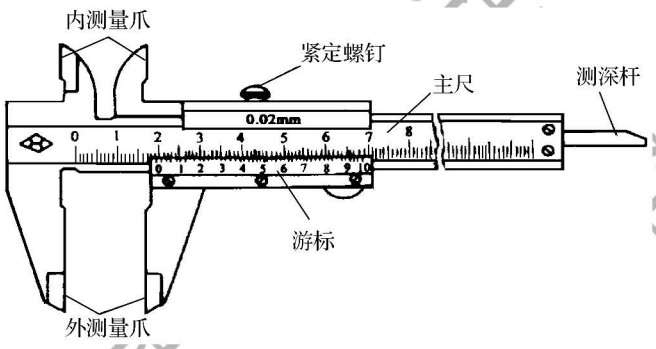
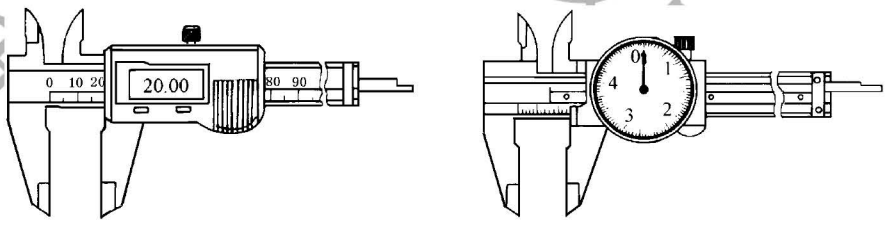


图 1.1　游标卡尺

除了普通游标卡尺外，还有数显式游标卡尺和指针式游标卡尺，它们的构造与普通游标卡尺基本相同，其式样如图 1.2 所示。数显式游标卡尺，在其游标上装有一个电子数字测量显示器，其测量的结果能够直接显示出来，如图 1.2（a）所示。指针式游标卡尺，在其游标上装有一个指示表，表上的齿轮与主尺上沟槽中的齿条啮合，当移动游标时，通过齿轮齿条传动使指针转动而指示读数，如图 1.2（b）所示。



（a）数显式游标卡尺　　（b）指针式游标卡尺

图 1.2　具有数字显示和指示表显示的游标卡尺

1.1.2　游标卡尺的刻线原理及识读方法

1. 游标卡尺的刻线原理

常用游标卡尺按其精度可分为 3 种，即 0.02 mm、0.05 mm 和 0.1 mm。这三种精度的游标卡尺，其主尺刻度线的间距均为 1 mm，即每格宽度为 1 mm；游标上刻度线的间距

和格数则视其精度不同而不同。现以 0.02 mm 精度的游标卡尺为例说明其刻线原理，如图 1.3 所示。

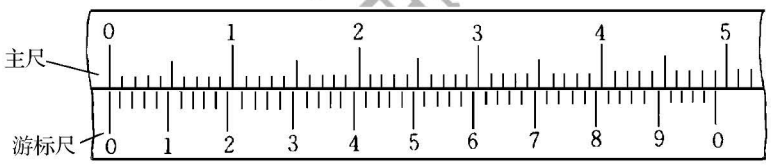


图 1.3　0.02 mm 精度游标卡尺的刻线原理

主尺正面刻有间距为 1 mm 的刻度线，其左边第一根标有数字“0”的刻度线称为零线。从零线往右第 10 根及其整数倍的刻度线上分别标有 1、2、3 等序列数字，它们分别表示 10 mm、20 mm、30 mm，依次类推。

游标上也刻有刻度线，其左边第一根标有数字“0”的刻度线也称为零线。当主尺与游标上的两个测量爪并拢时，游标上的零线与主尺上的零线对准。游标上最右边标有“0”数字的刻线称为终线，它与主尺上 49 mm 的刻度线对准，即游标上零线与终线之间的距离为 49 mm，再将这段长度等分为 50 等份，即：

游标尺上每一等份（即每一格）的宽度 = 49/50 = 0.98 mm；

主尺刻线间距与游标刻线每格相差 = 1−0.98 = 0.02 mm；

0.02 mm 即为此种游标卡尺的精度值。

当游标向右移动 0.02 mm 时，游标零线就向右偏离主尺零线 0.02 mm，因为游标上每一格的宽度为 0.98 mm，所以，游标零线后的第 1 根刻线与主尺刻线对准；当游标向右移动 0.04 mm 时，游标零线向右偏离主尺零线 0.04 mm，此时，游标零线后的第 2 根刻线与主尺刻线对准，依次类推。若游标向右移动 0.9 mm，此时零线靠近主尺上 1 mm 的那根刻线，游标上零线后的第 45 根刻线与主尺的刻线对准，即 0.02 mm×45 = 0.9 mm。当游标零线偏离主尺上的刻线且不足 1 mm 的距离内时，游标上总有一根刻线与主尺的刻线对准。在这种情况下，虽不能直接从主尺读出其所对应的读数，但可以从与主尺刻线对准的某一根游标刻线的序数乘以其精度值而读出游标零线偏离主尺刻线的数值。换言之，当游标移动的距离在 1 mm 的范围内时，其移动的距离可用游标卡尺的精度值 0.02 乘以对准刻线的序数来表示。当游标向右移动 1 mm 时，游标上的零线与主尺上 1 mm 刻线对准，同时，游标上的终线也与主尺上的刻线对准。

为了读数方便，游标的零线、零线后的第 5 根刻线及其整倍数的刻线比其他刻线长一些。零线后的这些长刻线处分别依次标注数字 1、2、…、9 和 0，数字 1 至 9 分别对应表示 0.1 mm、0.2 mm、…、0.9 mm，由此也可认为，游标上的一格代表 0.02 mm。

2. 游标卡尺的识读方法

识读游标卡尺，通常可以按以下三个步骤进行：

（1）读出主尺尺寸，根据游标零线所对主尺刻线的位置，读取主尺读数；

（2）读出游标尺寸，根据与主尺刻线对准的游标刻线的数字和格数，读出游标读数；

（3）将主尺读数和游标读数相加即为游标卡尺测量的尺寸数值。

上述识读游标卡尺的步骤，可根据游标与主尺的相对位置灵活运用。当用游标卡尺测量工件时，游标与主尺的相对位置存在以下三种情况：

（1）游标零线与主尺某根刻线对准；

（2）游标零线不对准主尺某根刻线，但是游标上标有数字的长刻线与主尺上的刻线对准；

（3）游标零线不对准主尺某根刻线，游标上标有数字的长刻线也不与主尺上的刻线对准，只是游标的一般刻线与主尺上的刻线对准。

针对上述三种情况，下面分别举例说明 0.02 mm 精度游标卡尺的识读。

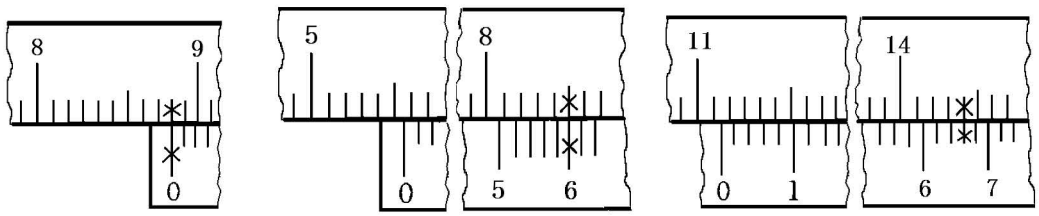
第一种情况，如图 1.4（a）所示，游标零线与主尺某根刻线对准（注：为了清楚表达，将对准的刻线作打叉标记）。此种情况，直接读出游标零线所对准的主尺刻线代表的数值即可，本例的读数为 88.00 mm。

第二种情况，如图 1.4（b）所示，游标零线不对准主尺某根刻线，但是游标上标有数字的刻线与主尺上的刻线对准。遇到这种情况，先读出零线左边主尺刻线的数值；再读出与主尺刻线对准的那根游标刻线所示的数值；最后将上述两读数相加即得测量读数。

本例中，游标零线对在主尺 55 mm 与 56 mm 之间，则先读出位于零线左边主尺刻线的数值 55 mm；再读游标上与主尺刻线对准的、标有数字“6”那根刻线所示的数值，即读出其读数 0.60 mm；最后将上述两读数相加，即 55+0.60=55.60 mm。

第三种情况，如图 1.4（c）所示，游标零线不对准主尺某根刻线，游标上标有数字的长刻线也不与主尺上的刻线对准，只是游标的一般刻线与主尺上的刻线对准。遇到这种情况，先读出游标零线左边主尺刻线的数值；再读出游标上对准刻线左边长刻线标有的数值；然后，读出与主尺刻线对准的那根刻线与该标有数字刻线之间的格数并且将格数乘以 0.02 的数值；最后将上述三个数值相加，即得到尺寸读数。

本例中，先读出主尺的数值为 111 mm；再读出游标上对准刻线左边的标有数字“6”刻线的数值 0.60 mm；然后，读出游标上的对准刻线距数字“6”刻线有 3 格，即 3×0.02=0.06 mm；最后将这三个数值相加，111+0.6+0.06=111.66 mm，即得到该尺寸读数。



（a）80+8=88.00 mm　　（b）55+0.60=55.60 mm　　（c）111+0.6+0.02×3=111.66 mm

图 1.4　0.02 mm 精度的游标卡尺所示的尺寸

对于数显式游标卡尺的识读，测量时，其测量所得的尺寸是直接以数字的形式显示出来的，识读时，直接读出即可。

对于具有指示表的游标卡尺的识读，先读出游标上基准刻线所对主尺的尺寸，再读出指示表中指针所示的尺寸，再将这两个尺寸相加，即得到测量尺寸。注意：对于英制的指示表，其表针转一圈为1 in，其表盘上制有内外两圈的刻线与数字，内圈是以每格1/64 in表示，可读出分数的尺寸；外圈以每格1/100 in表示，可读出纯小数的尺寸。

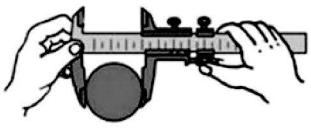
1.1.3　游标卡尺的使用方法及注意事项

1. 游标卡尺的使用方法

使用游标卡尺前，首先应根据被测项目、被测工件的尺寸精度和尺寸大小选择相应类型、尺寸精度和大小的游标卡尺；其次应对所用的游标卡尺进行“对零”。所谓对零，就是将游标卡尺的测量爪并拢后，检查其游标的零线是否与主尺的零线对齐。如果游标的零线与主尺的零线对准，就说明该游标卡尺正常，可以使用；反之，则不正常，不能使用。对于不对零的游标卡尺，需进行检查处理。工作中，有较多情况是因为测量面上有灰尘或铁屑而影响对零，此时将测量面擦干净，即可对零。

使用时，轻轻推动游标使两量爪接触被测量面，然后读出尺寸。当不便直接读出尺寸时，可紧固螺钉后轻轻移出，然后读出尺寸。图1.5所示为游标卡尺的使用方法。

（a）测量工件宽度



（b）测量工件外径

（c）测量工件内径

（d）测量工件深度

图1.5　游标卡尺的使用方法

2. 游标卡尺的使用注意事项

（1）检查量具有无检验合格证和产品合格证。注意：量具一般都有检验合格有效期。

超过检验合格有效期的量具，应视为不合格量具，因而不能使用。此注意事项对本书所述量具均有效。

（2）检查量具的精度值和测量范围能否满足所测零件的尺寸精度和尺寸大小的需要。

（3）保持测量表面和被测量表面清洁。

（4）测量过程中要防止卡爪偏斜。

（5）测量卡爪靠抵工件的测量力不可太大或太小。

（6）不能把游标卡尺当作其他工具使用，如用来勾切屑等。

知识总结	随堂练习

1.2 千分尺

千分尺（Micrometer）又称为分厘卡，它是一种精度比游标卡尺高的精密量具。

1.2.1 千分尺的构造

千分尺有外径千分尺、内径千分尺、深度千分尺、螺纹千分尺等，用途、构造和式样不同，但它们的刻线原理和读法是相同的。

现以常用的外径千分尺（Outside Micrometer）为例进行说明，如图 1.6 所示。

千分尺主要由尺身、固定套管（主尺）、活动套管（副尺）、测量杆和测量旋钮等零件构成。尺身 1 上安装固定有测量砧座 2 和固定套管 3。固定套管右端内装有轴套 4，轴套的内表面制有螺距为 0.5 mm 的内螺纹。活动套管 6 的左端面是主尺读数基准面，其圆锥表面刻有刻度线和数字。测量杆 7 的左端一段为光杆，其左端面是测量面，该测量面与测量砧座右端面构成两个测量面，用以测量零件。测量杆的右端制有一段螺距为 0.5 mm 的螺纹，该段螺纹与固定套管上轴套的螺纹配合。活动套管与测量杆通过锥面及罩壳 8 装配固定成一体。松开罩壳时，可使测量轴杆与活动套管分离，以便调整零线位置。活动套管和测量杆通过测量杆上的螺纹与装在固定套管内的轴套旋合装配在固定套管上。活动套管和测量杆可相对固定套管作转动和轴向移动。测量旋钮 11 用螺钉 12 与罩壳连接。转动

中国民航出版社有限公司版权所有

测量旋钮可使测量杆与活动套管一起转动并且沿其轴向移动。测量杆在转动时的松紧程度可用螺母5调节。欲使测量杆固定不动，可转动锁定手柄13通过偏心将测量杆锁紧。测量旋钮上制有棘轮盘与棘爪10组成棘轮机构。当测量杆左端测量面接触工件被测量面时，由于弹簧9的作用，测量旋钮上的棘轮盘在棘爪上滑过而发出吱吱声响，此时测量杆不再移动。这套棘轮机构保证测量砧面与工件被测量面的抵紧力始终限定在某一定值上，从而获得稳定的测量精度。如果测量旋钮反方向转动，则拨动棘爪带动活动套管和测量杆反方向转动，并且向右轴向移动，从而使测量面与被测量面脱开。

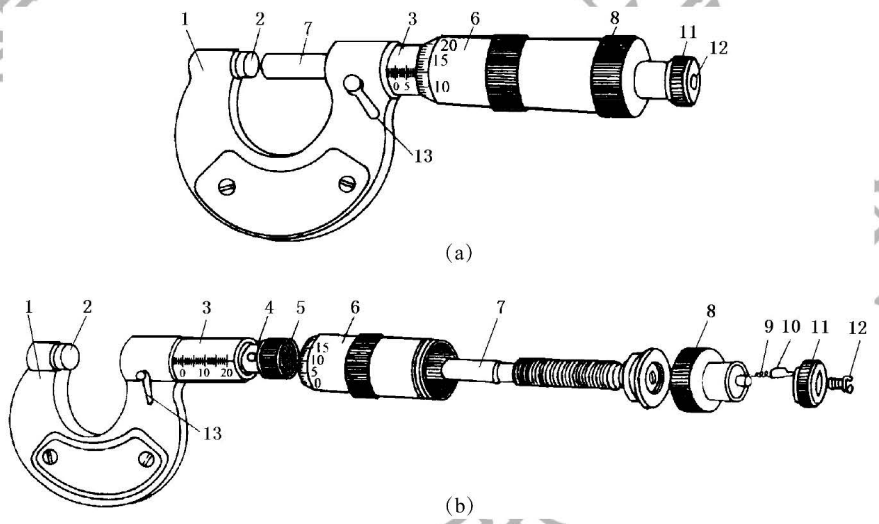


图1.6　外径千分尺的构造

1. 尺身；2. 测量砧座；3. 固定套管（主尺）；4. 轴套；5. 螺母；6. 活动套管（副尺）；7. 测量杆；8. 罩壳；9. 弹簧；10. 棘爪；11. 测量旋钮；12. 螺钉；13. 锁定手柄

1.2.2　千分尺的刻线原理及识读方法

1. 公制千分尺

根据测量范围的大小，公制千分尺制有0～25 mm、25～50 mm、75～100 mm等以25 mm为单位进阶的不同规格的千分尺。这些不同规格的千分尺测量尺寸的范围是不同的。例如，0～25 mm规格的千分尺，其中，0为可测量的起始尺寸，25为可测量的最大尺寸，即该规格的千分尺只能测量0～25 mm之间（含25 mm）的尺寸；其他规格的千分尺可测量的范围以此类推。虽然这些千分尺的规格不一样，但是，其刻线原理和识读方法都是相同的。

公制千分尺的固定套管相当于普通游标卡尺中的主尺，其上刻有一条纵向基准线。为了不使0.5 mm间距的刻线显得拥挤而方便识读，在纵向基准线的上下方分别错开刻有间距为1 mm的刻度线，从而形成纵向间距为0.5 mm的刻度线。纵向基准线上方左起第一

根刻线为零线，零线的上方刻有该尺可测量的起始尺寸的数字。为了识读方便，纵向基准线上方的零线、距零线 5 mm 及其整数倍的刻线比其他刻线长一些，同时，在这些长线处标有数字。例如，0~25 mm 规格的千分尺，在主尺上从零线开始在其相应长刻线的上方分别依次标出数字 0、5、10、15、20 和 25，这些数字分别表示 0 mm、5 mm、10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm。

活动套管相当于普通游标卡尺中的游标，其圆周表面上等分刻有 50 根刻线，即，将圆周等分为 50 等份。刻线中标有数字 0 的刻线为零线。零线、从零线起顺时针方向的第 5 根及其整数倍的刻线比其他刻线长一些，在这些长线的右侧分别依次标有数字 0、5、10、15、…、45，如图 1.7（a）所示。

因为测量杆 7 与螺套 4 相配合螺纹的螺距为 0.5 mm，所以，当活动套管转一整圈时，测量杆就轴向移动 0.5 mm。由于活动套管圆周等分了 50 格，因此 0.5÷50=0.01 mm，即活动套管上的一格刻线宽度代表 0.01 mm。0.01 mm 为公制千分尺的测量精度。换言之，当活动套管转过一格时，测量杆就轴向移动了 0.01 mm。与游标卡尺相似，当测量杆轴向每移动 0.01 mm 时，活动套管上就有一条刻线与主尺上的基准线对齐，因此，可测量出（读出）0.01 mm 精度的尺寸。

使用和识读千分尺之前，应进行对零。千分尺的对零是指千分尺的两测量面接触时，活动套管的左端主尺读数基准面与固定套管上的零线对准，同时，活动套管上的零线与主尺上的纵向基准线对准。

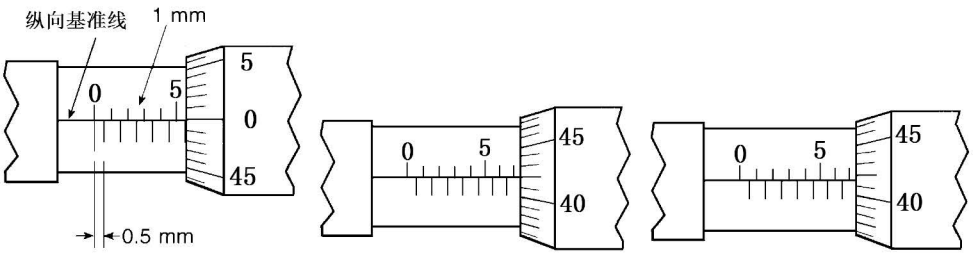
读公制千分尺的方法通常可分为以下三步：

第一步：读出主尺上的读数，即读出活动套管端面左边的固定套管上所露出刻线的数值；

第二步：读出副尺上的读数，即读出活动套管上与固定套管纵向基准线对齐的那根刻线所示的数值；

第三步：把上述两个读数加起来，即为千分尺所测得的尺寸。

上述识读公制千分尺的步骤，可根据副尺与主尺的相对位置而灵活运用。实际上，千分尺测量工件时，活动套管（副尺）与固定套管（主尺）的相对位置，可能存在着如图 1.7 所示的三种情况。



（a）5.50 mm　　（b）7+0.42=7.42 mm　　（c）7+0.42≈7.42 mm

图 1.7　外径千分尺的读数

第一种是副尺的零线与主尺的纵向基准线对准，如图 1.7（a）所示。这时可直接读出副尺左端读数基准面所对准的主尺读数。本例直接读出的读数为 5.50 mm。

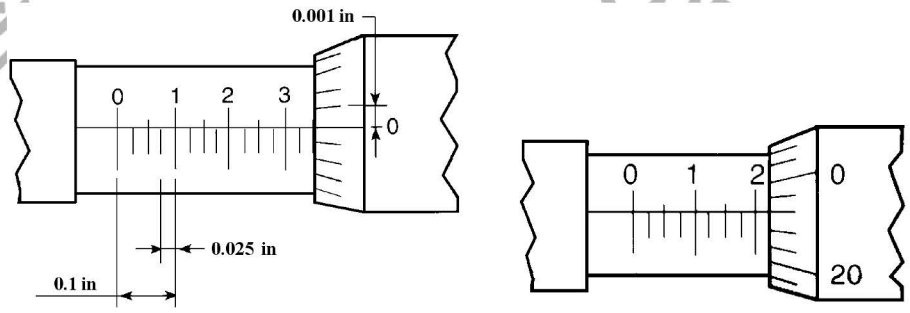
第二种是副尺的零线与主尺的纵向基准线不对准，但是副尺上其他刻线与主尺纵向基准线对准，如图 1.7（b）所示。遇到这种情况，先读出活动套管端面左边的固定套管上所露出刻线的数值；再读出副尺上与主尺纵向基准线对准的数值；然后，将上述两个数值相加，即得到尺寸读数。本例为：7+0.42=7.42 mm。

第三种是副尺上的刻线没有一条与主尺的纵向基准线对准的，如图 1.7（c）所示。遇到这种情况，先读出活动套管端面左边的固定套管上所露出刻线的数值；再估计读出与主尺纵向基准线靠近对准的副尺上刻线的数值；然后，将上述两个数值相加，即得到尺寸读数。本例为副尺上 42 那根刻线靠近对准主尺的纵向基准线，因此估计读出测量数值为：7+0.42≈7.42 mm。

2. 英制千分尺

目前，我国民航的飞机绝大多数是进口的，国外生产制造的飞机常采用英制单位来标注尺寸，其中最常用的计量单位是英寸（in）。同时，飞机维修单位所使用的维修工具大多数也是英制的，因此有必要介绍一下英制千分尺。

英制千分尺的形状和结构与公制千分尺是一样的，只是测量杆右端螺纹的螺距不同。英制千分尺测量轴右端螺纹的螺距为每英寸 40 牙，即当活动套管转一整圈时测量轴就轴向移动 0.025 in。固定套管上刻有刻线，每小格为 0.025 in。在起始刻线上方刻有数字 0，以后每 4 格刻线上刻上数字 1、2、3 等等。这些数字分别表示 0.1 in、0.2 in、0.3 in，依次类推。在活动套管的圆锥面上，等分刻有 25 格刻线。刻线中标有数字 0 的刻线为零线。零线、从零线起顺时针方向的第 5 根及其整数倍的刻线比其他刻线长一些，在这些长线的右侧分别依次标有相应的数字，如图 1.8 所示。



（a）0.350 in　　（b）0.2+0.023=0.223 in

图 1.8　英制千分尺的读数举例

因为活动套管转一整圈时，测量杆就轴向移动 0.025 in，所以，由于活动套管圆周等分了 25 格，就有 0.025÷25=0.001 in，即活动套管上的一格刻线宽度代表 0.001 in。

0.001 in 为英制千分尺的测量精度。换言之，当活动套管转过一格时，测量杆就轴向移动了 0.001 in。因此，活动套管刻线上标有的数字 5、10、15 和 20 分别表示 0.005 in、0.010 in、0.015 in 和 0.020 in。与公制千分尺的刻线原理相同，当测量杆轴向每移动 0.001 in 时，活动套管上就有一条刻线与主尺上的基准线对齐，因此，可测量出（读出）0.001 in 精度的尺寸。

读英制千分尺的方法可分为以下三步：

第一步：读固定套管上的读数，即读出活动套管端面左边的固定套管上所露出刻线的数值；

第二步：读活动套管上的读数，即读出活动套管上与固定套管上基准线对齐的那根刻线所示的数值；

第三步：把上述两个读数加起来，即为千分尺所测得的尺寸。

英制千分尺的读数举例，如图 1.8 所示。

一些英制千分尺在固定套管上还刻有游标尺刻线，使千分尺的精度值达到万分之一英寸，这种千分尺称为游标千分尺（Vernier Micrometer）。这个游标尺上共刻有 10 格刻线与活动套管上 9 格刻线相对，如图 1.9（a）所示。这样相当于把活动套管上的每小格（0.001 in）再等分成 10 等份，即每一等份为 0.0001 in。

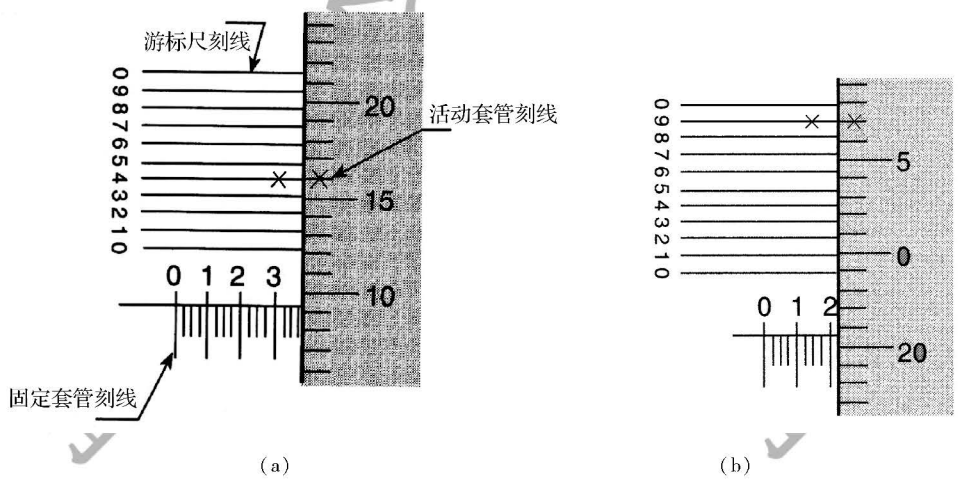


图 1.9　带游标的英制千分尺

识读时先按上例读出，再加上游标尺读数即为测量值。

例如：图 1.9（a）所示，其读数为 0.375+9×0.001+4×0.0001=0.3844 in；

图 1.9（b）所示，其读数为 0.2+20×0.001+9×0.0001=0.2209 in。

注意，实际上，在千分尺上的三个刻度是不能同时看见的，读游标尺时需转动整个千分尺。图 1.9 上的例子是有意将千分尺的固定套管和活动套管展成平面，以使所有三个刻度值能同时看到。

1.2.3　千分尺的使用方法和注意事项

1. 千分尺的使用方法

用单手使用外径千分尺时，可用大拇指和食指捏住活动套管，小指勾住尺架并压向手心上就可测量，如图 1.10 所示。

用双手测量时，可按图 1.11 所示的方法进行。

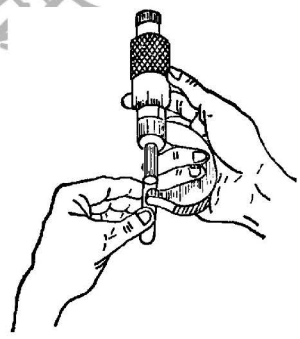


图 1.10　用单手使用外径千分尺

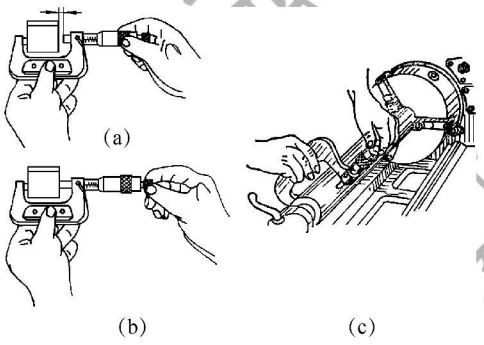


图 1.11　用双手使用外径千分尺

2. 千分尺的使用注意事项

（1）首先检查量具有无检验合格证和产品合格证。

（2）根据被测量件的尺寸大小，选择合适尺寸规格的千分尺。

（3）使用前应校准尺寸，对 0~25 mm 或 0~1 in 规格的千分尺应将两测量面接触，看一下活动套管上零线是否与固定套管上基准线对齐。如果没有对齐，应进行调整使之对齐。对 25~50 mm 或 1~2 in 规格或者以上的千分尺，则需用量具盒内的标准样棒来校准。

（4）千分尺的测量面和工件被测量面都应保持清洁，不能用千分尺去测量毛坯面。

（5）测量时，先转动活动套管。当测量面将接近工件时，改用转动棘轮，使测量面与被测工件接触，直到棘轮发出几声吱吱声响为止，如图 1.11（a）、（b）所示。

（6）测量时，千分尺要放正，并要注意温度的影响。

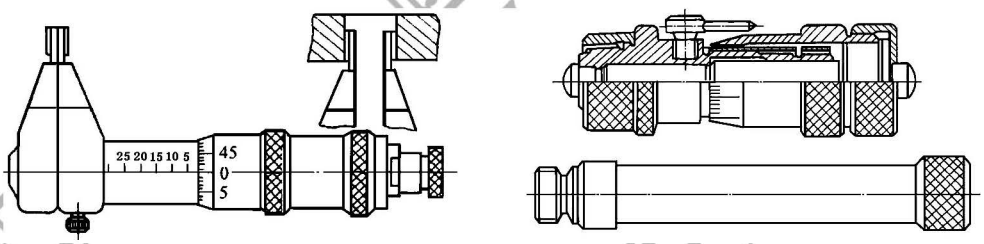
1.2.4　其他千分尺

1. 内径千分尺

内径千分尺（Inside Micrometers）用来测量内孔直径及槽宽等尺寸。常用的内径千分尺有普通内径千分尺和杆式内径千分尺两种，如图 1.12 所示。

这种千分尺的刻线方向与外径千分尺相反，因为当活动套管向相反方向转动时，固定

套管连同右面卡爪一起向右移动，尺寸增大。



（a）普通内径千分尺　　（b）杆式内径千分尺

图 1.12　内径千分尺

2. 深度千分尺

深度千分尺（Micrometer Depth Gage）用来测量工件阶台高度和沟槽或孔的深度。它的结构基本上与外径千分尺相同，如图 1.13 所示。但它的轴杆长度可根据工件尺寸不同，进行调换。

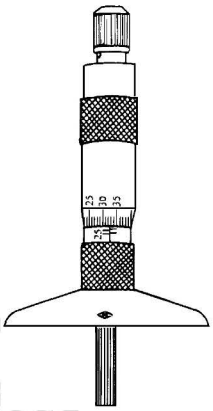


图 1.13　深度千分尺

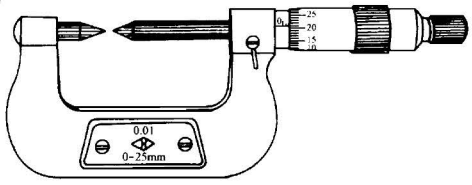


图1.14　尖头千分尺

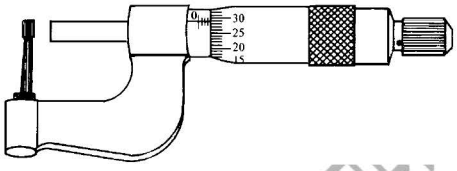


图 1.15　壁厚千分尺

3. 尖头千分尺

尖头千分尺（Point-contact Micrometer with Conical Tips）用来测量普通千分尺不能测量的小沟槽，如麻花钻头的螺旋槽直径，如图 1.14 所示。

4. 壁厚千分尺

壁厚千分尺（Micrometer for Measuring Pipe Wall Thicknesses）是用来测量精密管形零件壁厚的，如图 1.15 所示。它的测量面镶有硬质合金，以提高使用寿命。其用法与外径千分尺相同。

知识总结	随堂练习

1.3　百分表

百分表（Dial Gauge）是齿轮传动式测微量具，它是将测量杆的直线位移，通过齿条和齿轮传动系统转变为指针的角位移进行读数的测量工具。通常，百分表的最小度量值为0.01 mm，故称为百分表。百分表可用来检验设备精度和测量工件的圆度、跳动量和位置误差等。除百分表外，还有精度更高的最小度量值为0.001 mm的千分表，其用法和用途与百分表相同。本节仅介绍百分表的结构、工作原理和使用方法。

1.3.1　百分表的结构及工作原理

1. 百分表的结构

百分表按用途可分为内径百分表和外径百分表两类。按结构可分为齿条齿轮传动式百分表和杠杆式百分表两种。下面以齿条齿轮传动式百分表为例来说明它的构造，图1.16为齿条齿轮传动式外径百分表的实物图片。

图1.16　百分表实物图

百分表主要由表盘1、长指针3、短指针4、表壳体8、测量头10、测量杆11和传动齿轮系统等组成，如图1.17所示。表壳体8是百分表的基础件，表盘1和表圈2装在表壳体8上。表盘1沿圆周等分刻有100格刻度，每格刻度表示0.01 mm，长指针就指在此刻度上。表盘1上还刻有表示1 mm的刻度线，短指针指在此刻度线上。表圈2可带动表盘1相对表壳体8转动，这种转动

可将长指针调整到零位，以便读数。轴套 9 固定在表壳体上；带有齿条的测量杆 11 可相对轴套 9 移动；挡帽 5 装在测量杆的上端，主要用于限制测量杆的下移位置，也可在调整时，用它提起测量杆，以便重复观察示值的稳定性。测量头 10 安装在测量杆 11 的下端，它与工件的被测量面接触。齿轮 12 与测量杆的齿条啮合，齿轮 12 与 13 同轴。齿轮 13 与齿轮 7 啮合。齿轮 6 与齿轮 7 啮合。长指针 3 与齿轮 7 同轴，当齿轮 7 转动时，长指针 3 也一起转动。

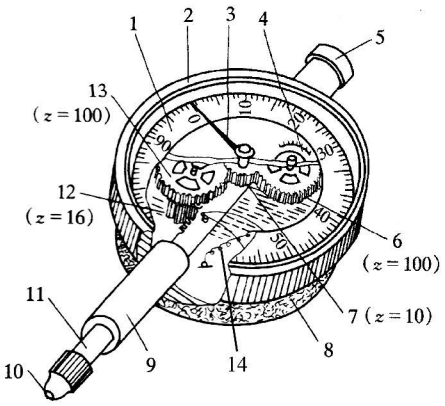


图 1.17　百分表的结构及工作原理

1. 表盘；2. 表圈；3. 长指针；4. 短指针；5. 挡帽；6. 齿轮；7. 齿轮；8. 表壳体；9. 轴套；10. 测量头；11. 测量杆；12. 齿轮；13. 齿轮；14. 拉簧

2. 百分表的工作原理

百分表的工作原理如图 1.17 所示。百分表内的齿条和齿轮的周节都是 0.625 mm，所以当测量杆移动 16 个齿，即 0.625 mm×16 = 10 mm 时，齿轮 12 和 13 刚好转一圈，并且带动齿轮 7 和长指针转 10 圈。因此，当测量杆移动 1 mm 时，长指针刚好转一圈，即 100 格，所以长指针每转一格即表示测量杆移动 0.01 mm，即百分表的测量精度为 0.01 mm。当长指针转一圈，短指针则转过表示 1 mm 的一格。拉簧 14 的作用是使测量杆 11 能回到原位，保证与测量工件表面可靠接触。

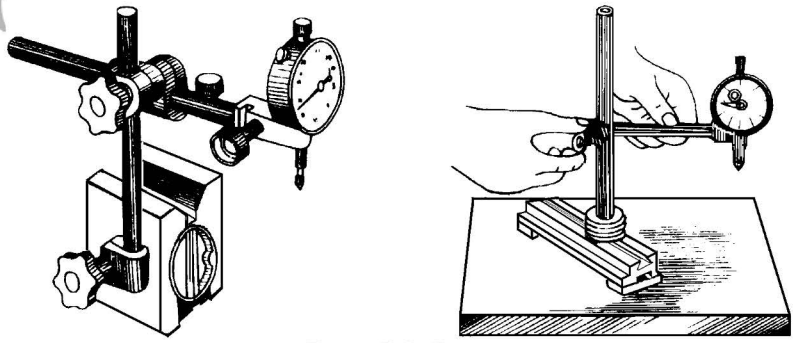
测量时，测量头 10 与工件的被测量面接触。如果被测量表面的形状、尺寸有变化，则测量杆就会移动。测量杆移动就带动齿轮 12、13、7 和 6 转动，这样就将测量杆的微小直线位移转变为长指针的角位移，由长指针从表盘 1 上某刻线转到另一刻线处将变化量（即测值）表示出来。

百分表的测量范围，一般有 0~3 mm、0~5 mm 和 0~10 mm 等几种规格。百分表的测量范围是指测量杆的最大移动量。

1.3.2　百分表的使用及注意事项

1. 百分表的使用

欲使用百分表时，要将百分表装夹到专用的表架上，如图 1.18 所示。表架底座上有一个开关，可控制底座有无磁性。当开关置于开的位置时，底座具有磁性，便可牢固地吸附在钢铁制件的基准面上，百分表在表架上可作上下、前后和角度的调整，使测量头接触被测表面。



（a）百分表在磁性表架上的安装　　（b）百分表在座架上的调节

图 1.18　百分表的安装

使用百分表之前，应将工件、百分表和基准面擦干净。同时要检查百分表的灵敏情况，用手轻轻提起挡帽，检查测量杆在轴套内移动的灵活性，不得有卡滞现象，并且在每次放松后，指针应恢复到原来的刻度位置。

测量时，应轻轻提起测量头，然后再把工件移至其下方后，缓慢放下测杆，使测量头与工件接触。注意，测量杆的压缩量不能为零，也不能太大，一般应使测量杆有 1 mm 左右的压缩量。百分表测量读数是指测量头的移动量，即被测工件的尺寸变动量。它应为长指针和短指针读数之和。

2. 使用注意事项

（1）首先检查百分表有无检验合格证，如果没有检验合格证，或者合格证已超过检定周期，则该百分表不能使用；

（2）测量时测量杆必须与被测工件表面相垂直；

（3）测量圆柱形工件时，测量杆轴线应通过圆柱形工件的中心；

（4）百分表不能用来测量粗糙表面。

知识总结	随堂练习

1.4 组合量具和卡规

1.4.1 组合量具

组合量具（Combination Square & Calipers）又称为万能角尺，它是一种多用途的量具。组合量具可以用来测量长度、深度、高度、倾斜度、角度以及求圆心等。

组合量具由直尺、中心头、分度规头、托盘头四个部件组成，如图 1.19 所示。

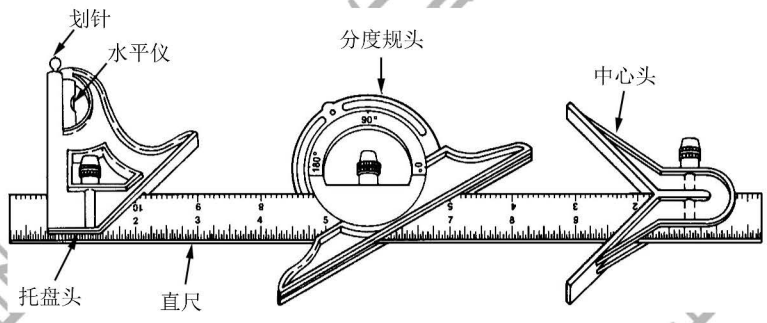


图 1.19 组合量具

1. 直尺

直尺（Ruler）是组合量具的基础件，其他三个附件分别与其配合使用。公制直尺的长度有 300 mm 和 400 mm 两种。英制直尺长度为 12 in。直尺正面刻有尺寸线，背面有一条长槽，用来安装其他附件。

2. 中心头

中心头（Center Head）又称中心规，它的两条边成 90°，装上直尺后，中心头的尺边与直尺成 45°。中心头与直尺配合可确定圆柱形工件的中心。使用时，将工件的圆周紧靠

中国民航出版社有限公司 版权所有

中心头的两条直角边，直尺平贴在工件的端面上，用划针沿直尺划出一条直线，然后转动工件约90°，按上述方法再划一条直线，两条直线的交点即为工件的中心。

3. 分度规头

分度规头（Protractor Head）又称量角器，由尺身和分度盘组成。分度盘上刻有0°到180°的等分刻线。分度盘可相对尺身转动，以构成各种角度，并且可通过锁紧螺钉固定在所需的角度上。分度规头常与直尺配合使用，用来测量工件角度或者划任意角度线。分度规头还具有一个水准泡，可作为水平仪使用。分度规头也可单独使用。例如，利用分度规头测量飞机操纵舵面的安装角度和偏转角度。

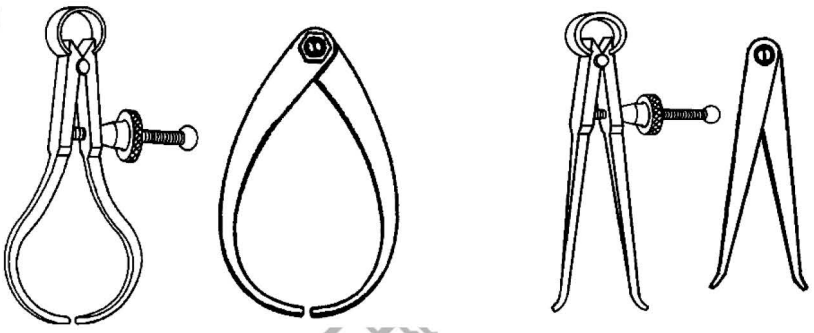
4. 托盘头

托盘头（Stock Head）又称为角度规，它由三个基准平面组成90°和45°两个角度，与直尺配合可作直角尺使用，并能测量工件的高度与深度，也可以划45°或90°的线。托盘头能沿着尺身滑动，并在所需的地方夹紧。托盘头上附装有水准泡，可作为水平仪。托盘头的水平仪能方便地检查工件表面的平直度，同时显示一边或另一边是否垂直或水平。托盘头也可从尺身上拆下，可单独作为水平仪使用。

1.4.2　卡规

卡规（Calipers）用于测量工件的直径和距离或对比距离和尺寸。常用的卡规有外卡规（Outside Caliper）和内卡规（Inside Caliper），如图1.20所示。外卡规用来测量外径，内卡规用来测量内径或者沟槽的宽度。

目前，卡规只用于游标卡尺或其他量具无法测量的场合。应用卡规测量工件不能直接得到测量数值，需要在有刻度值的量具上对换才能得到测量值。因此，使用卡规的测量精度较低。另外，为了能直接从卡规上读出测量值，一般都做成专用卡规。专用卡规上刻有刻度线和数值，可直接读出测量值。



（a）外卡规　　（b）内卡规

图1.20　卡规

知识总结	随堂练习

1.5 塞尺和螺距规

1.5.1 塞尺

塞尺（Thickness Gage）又称为厚薄规或间隙片，如图 1.21 所示。它可用来检验两个相结合面之间间隙的大小。

塞尺由多片厚薄尺寸不同的测量片组成，每片测量片具有两个平行的测量平面，其长度制成 50 mm、100 mm 或 200 mm 等几种。常用塞尺的规格有两种：一种厚度为 0.03～0.1 mm，各片厚度间隔为 0.01 mm；另一种厚度为 0.1～1 mm，各片厚度间隔为0.05 mm。不论哪种规格的塞尺，其每片测量片上都刻有该片厚度的尺寸数字。

塞尺是一种界限量规，使用它时，应根据被测量的间隙大小，用一片或数片测量片重叠在一起插入间隙内。例如用 0.04 mm 那一片能插入，而 0.05 mm 那一片不能插入，则说明该间隙在 0.04～0.05 mm 之间。

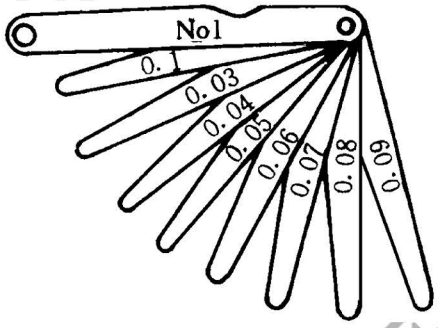


图 1.21 塞尺

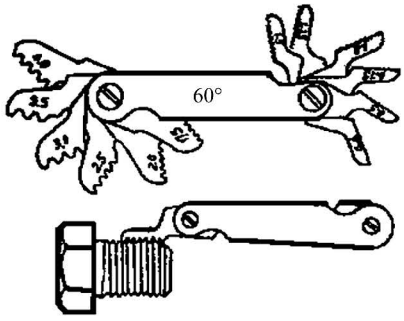


图 1.22 螺距规

使用塞尺须注意以下几点：

（1）使用前必须先清除塞尺和被测部位的灰尘和油污；

（2）重叠组合的片数尽可能少；

（3）测量时不能用力太大，以免弯曲；

（4）不能测量温度较高的工件。

1.5.2　螺距规

螺距规（Screw Pitch Gage）又称为螺纹规，它有公制和英制两种制式。它们由一套螺纹样板组成，如图1.22所示。公制螺距规用来测量公制螺纹的螺距，英制螺距规用来测量英制螺纹每英寸长度中的牙数。公制螺纹规的每一片螺纹样板上刻有螺距的数字。英制螺纹规的每一片螺纹样板上刻有直径和每英寸牙数。

使用时，先目测欲测量的螺距，然后选择相应螺距的一片螺距规来检测螺纹，如果螺距规与被测螺纹吻合严密，则该片的数字为所测螺纹的螺距或每英寸牙数。

知识总结	随堂练习

1.6　通用工具

1.6.1　手锤

手锤（Hammers）是錾切、铆接、矫正和装配等工作的敲击工具。根据锤头的制造材料，手锤可分为金属锤和非金属锤两大类。

1. 金属锤

金属锤（Metal Hammers）一般由碳素工具钢、中碳钢、紫铜、黄铜、硬铝、软铝等各种金属材料制成，其中由碳素工具钢和中碳钢制造的锤头，一般都经过锻造和淬火。

金属锤通常按照无手柄的锤头重量来定其规格。公制常用的规格有0.25 kg、0.5 kg、

中国民航出版社有限公司版权所有

1 kg 等几种；英制的常用磅（lb）来计量，常用的规格有 0.5 lb、1 lb 和 1.5 lb 等几种。

金属锤头一般制成如图 1.23（a）所示的形状。

钢锤一般用于錾切、铆接和敲击硬而不易变形的工件。有色金属锤一般用于矫正、装配和敲击较软的材料。

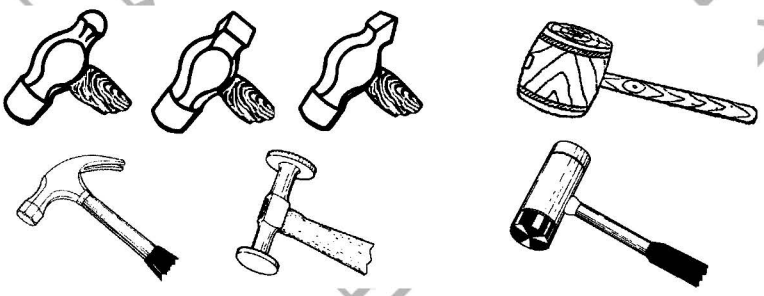
2. 非金属锤

非金属锤一般由硬木（如檀木、胡桃木）、夹布胶木、硬橡胶或塑料制成，其形状见图 1.23（b）。非金属锤适用于敲击薄形软金属件。

使用手锤的注意事项如下：

（1）要根据工作内容选择最合适的手锤；

（2）应保持手锤工作面光滑无压痕、无毛刺。

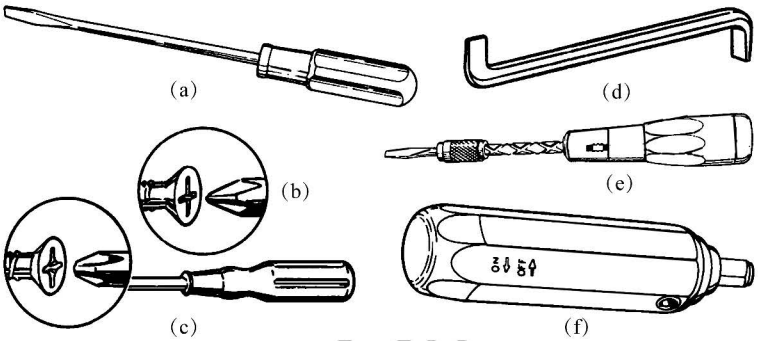


（a）　　（b）

图 1.23　手锤

1.6.2　螺丝刀

螺丝刀（Screwdrivers）是用来拧紧或松开螺钉以及转角式紧固件的。螺丝刀按它的形状、刀口类型以及刀口宽度分成以下几类，如图 1.24 所示。



（a）　（d）　（b）　（e）　（c）　（f）

图 1.24　螺丝刀

1. 普通型螺丝刀

普通型螺丝刀（Plain Screwdrivers）如图 1.24（a）所示。它用于一字槽头螺钉的拧紧或松开。使用时应注意刀口的宽度至少应塞满螺钉槽长度的 75%。

2. 尖十字螺丝刀

尖十字螺丝刀（Reed & Prince Screwdrivers）如图 1.24（b）所示。尖十字螺丝刀头形状较尖，它用于尖十字形十字槽埋头螺钉。尖十字形十字槽是完整的十字槽。

3. 十字螺丝刀

十字螺丝刀（Cross-point Screwdrivers）如图 1.24（c）所示。这种螺丝刀是钝头的，它用于 Phillips 型十字槽埋头螺钉。Phillips 型十字槽有较大的中心。注意：该型螺丝刀不能与尖十字螺丝刀互换使用。

4. 偏置螺丝刀

偏置螺丝刀（Offset Screwdrivers）如图 1.24（d）所示。当拧螺钉的垂直空间受限制时可使用偏置螺丝刀。偏置螺丝刀的两端头刀口与杆身成 90°，交替使用两头能使空间有限的螺钉拧紧或松开。

5. 棘轮螺旋式螺丝刀

棘轮螺旋式螺丝刀（Spiral-ratchet Screwdrivers）如图 1.24（e）所示。当用它拧螺钉时，手柄拉回再向前推，螺丝刀能快速转动。它可以顺时针或逆时针拧转螺钉，也可以对其锁定作为普通螺丝刀用。注意：当使用棘轮螺旋式螺丝刀时，需特别当心，要保持一定的压力，以防止刀口从螺钉头的槽中滑出而损伤周围的结构。

6. 手工冲击螺刀

手工冲击螺刀（Hand Impact Driver）［如图 1.24（f）所示］由螺刀把手和一套专用螺刀头组成。它主要用于拆卸因腐蚀或生锈而使螺钉紧固件变得十分难以拧动的场合。使用时，先根据所拧的螺钉，选择合适的螺刀头并安装于螺刀把手上，再放于螺钉槽口上。然后，使用铁锤敲击螺刀把柄端，从而使螺刀产生转动。敲击和突然的拧动将会使紧固件松动。注意：当使用冲击螺刀时，要戴防护眼镜。

1.6.3 钳子

飞机修理中最常用的钳子（Pliers）有斜口剪钳、尖嘴钳、鸭嘴钳和鲤鱼钳等。钳子的规格是指它们的整个长度，通常范围在 5~12 in 之间。

斜口剪钳（Diagonal-cutting Pliers）如图 1.25（a）所示，用于剪切金属丝、开口销和直径小的铆钉等，同时还常用于拆卸保险丝、开口销等。

尖嘴钳（Long-nose Pliers）如图 1.25（b）所示，常用于夹持较小物件。

鸭嘴钳（Duck-bill Pliers）如图 1.25（c）所示。它的钳口薄且平，形状像鸭嘴，是专门用来拧保险丝的。

鲤鱼钳（Slip-joint Pliers）如图 1.25（d）所示。它的钳口可张开得较宽，以便夹持较大直径或厚度的物体。

管钳（Water-pump Pliers，Channel-lock Pliers）如图 1.25（e）所示。它的钳口与钳柄呈一定角度，铰接点可以滑动调节，用于夹住管子、异形零件。

打保险丝钳（Safety-wire Twister/Cutters Pliers）如图 1.25（f）所示。它具有绞编保险丝辫结和剪切保险丝的功能，用于打保险丝的速度较快且绞编的辫结匀称，主要用于打稍长一些的保险丝。

大力钳（Vise-grip Pliers）如图 1.25（g）所示。它能通过转动手柄上的调节螺钉来调整钳口的宽度，从而能很好地夹紧较厚的工件。当工件被夹紧处于锁紧状态时，如欲松开钳口，需按动手柄上的释放杆使钳口松开。

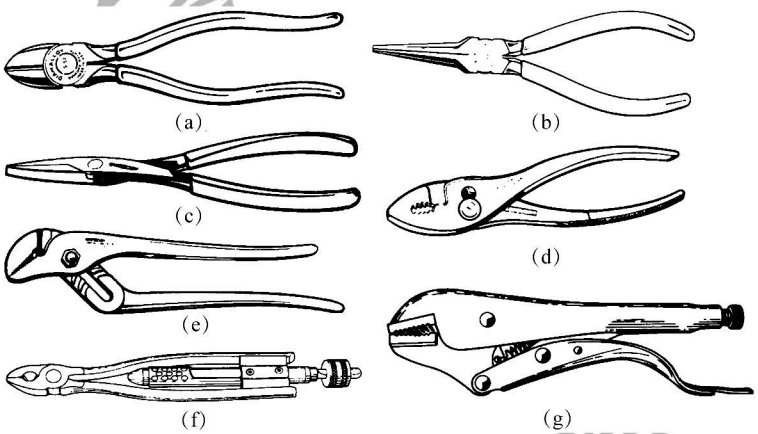


图 1.25　钳子

使用钳子时应注意：

（1）不要使钳子超出它们的能力；

（2）不要用来拧螺帽。

1.6.4　冲头

冲头（Punches）常用来定圆的中心、定钻孔的中心、去除铆钉和销子以及冲孔。冲头有实心冲头和空心冲头两大类，如图 1.26 所示。实心冲头按照冲尖的形状又可分为中心冲、针冲和销冲等。

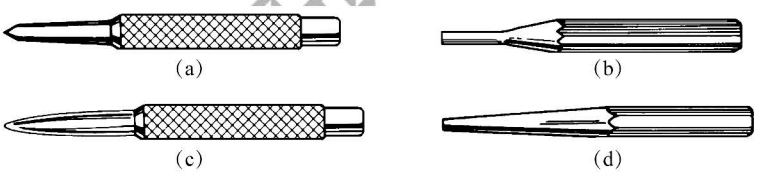


图 1.26　冲头

中心冲又称为样冲（Center Punch），如图 1.26（a）所示。它用来在圆心上打出冲眼，便于划圆或钻孔。它还常用于划线后，在线条上间隔地打出冲眼，以便于明晰所画图形。

销冲（Pin Punch）如图 1.26（b）所示。它用于冲出损坏的铆钉、销子和断在孔里的螺栓。去除铆钉时，应先用錾子或钻头将铆钉的一端头去除后，再用销冲将铆钉冲出。

针冲（Prick Punch）如图 1.26（c）所示。它的用途是在金属上定出参考基准。常用来将纸型上的尺寸直接标描到金属工件上。使用时，首先将纸型贴在金属上，再将针冲尖分别顶在纸轮廓图形的主要点上，然后用小榔头轻轻敲击针冲的柄端，使金属件上留下所描图形的冲痕。

起始冲（Starting Punch）如图 1.26（d）所示。欲松脱孔中的紧固件，可先用起始冲将其打松动，再用销冲将紧固件打出。

1.6.5　扳手

飞机维护中最常用的扳手有开口扳手、梅花扳手、套筒扳手、活动扳手和专用扳手。这些扳手有公制和英制两类。各种扳手的作用都是用来拧紧或松开螺母或螺栓。

1. 开口扳手

开口扳手（Open-end Wrenches）又称呆扳手。这种扳手的一端或两端有平行张开的扳手口，扳手口的距离是固定、不可调节的。

2. 梅花扳手

梅花扳手（Box-end Wrenches）又称眼眶扳手，扳手的两端都制有尺寸规格不同的眼眶，每个眼眶有 24 条内边、12 个尖角，如图 1.27（a）所示，可在有 15°摆动空间的小地方使用。此外，还有一端具有固定扳口，另一端具有梅花扳口的组合扳手（Combination Wrenches），如图 1.27（b）所示。

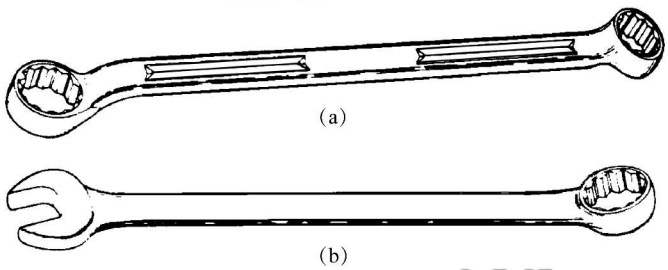


图 1.27　梅花扳手及组合扳手

3. 套筒扳手

套筒扳手（Set of Socket Wrenches）由手柄和套筒两部分组成，如图 1.28 所示。常用的手柄有快速手柄（Speed Handle）［见图 1.28（a）］、棘轮手柄（Ratchet Handle）［见图 1.28（b）］、铰接手柄（Hinge Handle）［见图 1.28（c）］、加长杆（Extension Bar）［见图 1.28（d）］。

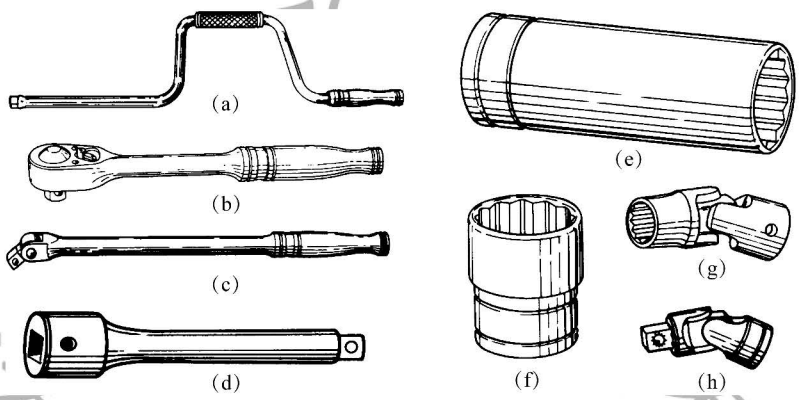


图 1.28　套筒扳手

套筒有各种不同规格以适合各种规格的螺母或者螺栓头。套筒的一端是四方空心头，另一端是梅花套筒。图 1.28（e）为长套筒（Deep Socket），图 1.28（f）为短套筒（Standard Socket），图 1.28（g）和（h）是万向转接头（Universal Joint）。可根据具体工作情况选择合适的手柄和套筒或者万向转接头组合使用。使用套筒扳手时，将手柄上的四方头插到套筒的四方空心头这端，梅花头一端套入螺母，然后转动即可。

4. 活动扳手

活动扳手（Adjustable Wrenches）的扳手口一边是固定的，另一边可通过手指旋转螺杆移动，以调节开口的大小。活动扳手使用比较方便，一个活动扳手可当若干个呆扳手

用。注意，使用活动扳手时，总是使固定扳手口的一边受拉力；另外，由于调节扳手开口的距离有时不合适（扳手开口与被拧螺母间隙太大），容易损坏螺母的六方边或损坏其他零件，所以在维护中应优先使用呆扳手、梅花扳手或套筒扳手。

5. 专用扳手

专用扳手（Special Purpose Wrenches）包括内六方扳手、钩头扳手和力矩扳手。

1）内六方扳手（Allen Wrenches）

它用于内六方螺钉的拧紧或松开。它是由六方棒材制成的，一般弯曲呈 L 形状。使用时，将内六方扳手插入内六方螺钉的凹槽中，定住螺钉，然后拧转螺母紧固。

2）钩头扳手（Hook Wrenches）

钩头扳手用于外缘上开四个槽的圆螺母。该扳手为弧形弯臂，端头有钩，如图 1.29 所示。使用时，将钩头插进螺母的一个槽里，然后转动手柄，即可紧固或者松开圆螺母。

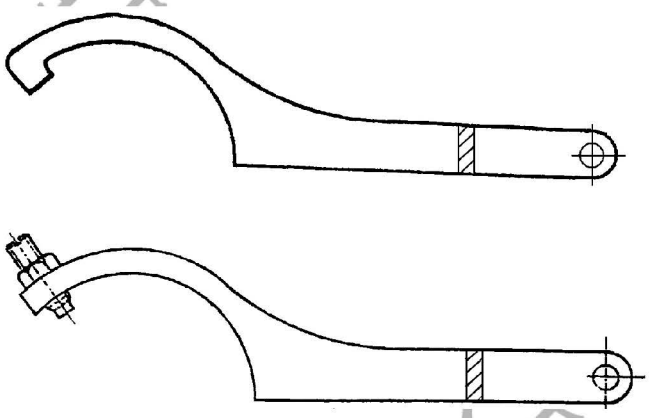


图 1.29　钩头扳手

3）力矩扳手（Torque Wrenches）

对于重要的螺栓连接，在装配时要严格控制其预紧力的数值。通常是采用力矩扳手来控制预紧力的大小。

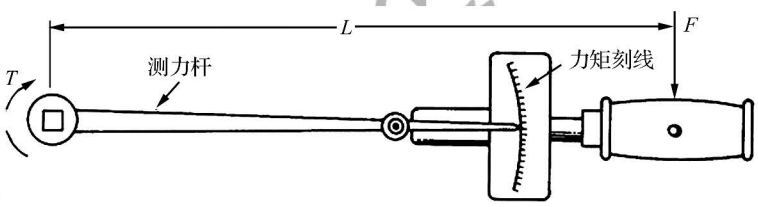
常用的力矩扳手有：偏移杆式力矩扳手（Deflecting Beam Torque Wrenches）、指示表式力矩扳手（Torsion-bar Type Torque Wrenches）和测微预调式力矩扳手（Toggle-type Torque Wrench），如图 1.30 所示。

当用偏移杆式和指示表式的力矩扳手时，力矩值由装在手柄上的指针或刻度，目视读出，如图 1.30（a）和（b）所示。

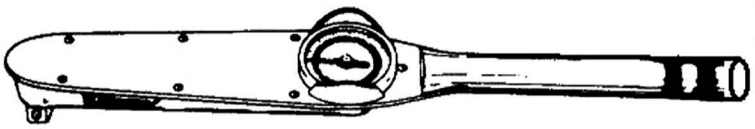
测微预调式力矩扳手中最常用的是棘轮往复测力扳手，如图 1.30（c）所示。测微预调式力矩扳手杆上刻有力矩数值。使用时，首先应松开把手上的锁销，转动把手，将扳手调整到规定的力矩数值，然后将把手锁定，即可在扳手头上套上套筒或扳头拧紧螺母或螺栓头。使用这种扳手时，用力要均匀，保持平稳而匀和的转动。如果用力过猛或急动不稳

中国民航出版社有限公司版权所有

则会造成不正确的紧固后果。当扭矩达到把手上预定力矩值时，扳手内的棘轮机构就会自动脱开，使扳手空转，这时操作者感受到脱开的感觉。注意：禁止使用力矩扳手来拆卸螺母和螺栓。

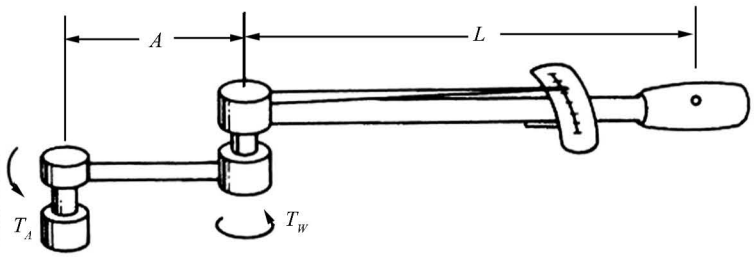


(a)



(b)

(c)



(d)

图 1.30　力矩扳手

力矩扳手是一种精密工具，必须定期校验。对于操作者来说，使用力矩扳手之前，应目视检查力矩扳手有无损坏，反应是否灵敏。另外要注意，不能在偏移杆式（又称可挠杆臂式）扭矩扳手的把手上加装接杆来拧螺母。因为，此时尺寸 L 发生变化，指针指示的数值不正确。对于指示表式和测微预调式两种扭力矩扳手即使加装接杆，对扭矩读数也没有影响。不过一般不在测微预调式力矩扳手的把手上加装接杆。只有在力矩很大的情况下，才在指示表式力矩扳手上加装规定的接杆来加长力臂以减小用力。

如果是在扳手的四方扭头上加上转动扳头，不论是哪种扳手，则必须按图 1.30（d）

所示和按公式 $T_W = \dfrac{T_A \times L}{L + A}$ 来计算扭矩。

式中：

T_W ——加接转动扳头后，在扳手上应该指示的扭矩读数；

T_A ——规定的扭矩数；

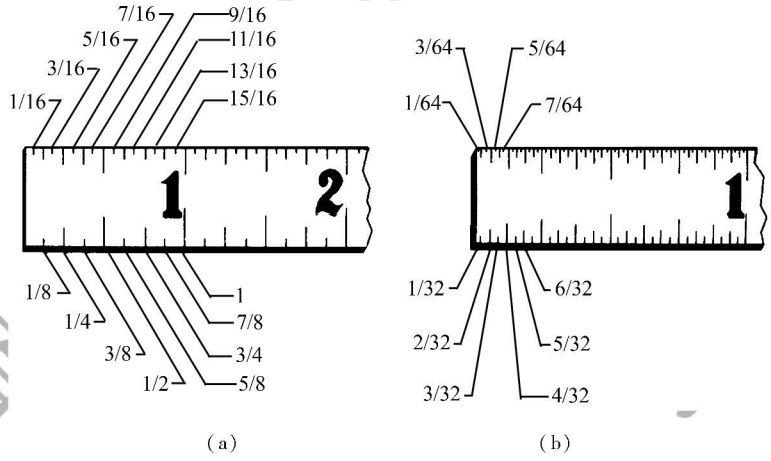
L ——扳手的原力臂长；

A ——加装转动扳头的力臂长。

1.6.6　划线工具

1. 钢尺

钢尺（Steel Ruler）有硬钢尺和柔性钢尺两类。钢尺上刻有刻线，刻线间隔的计量单位也有公制和英制两种。国外制造的飞机，通常采用英制，最常用的计量单位是英寸，1 in=25.4 mm，12 in=1 ft。英制钢尺的正反两面都刻有计量刻线，其刻线有每英寸 8 等分、16 等分、32 等分和 64 等分，如图 1.31 所示。每英寸 64 等分的刻线计量精度最高。钢尺能用作测量工具或作为直尺划线用。



(a)　　(b)

图 1.31　英制钢尺

2. 划针

划针（Scribers）是用来在金属表面上划线或作标记的。划针一般用工具钢制成，有 100~200 mm 长，直径为 3~6 mm，尖端磨成 15°~30°。常用的有直划针和弯头划针，如图 1.32 所示。弯头划针的两头是针尖，一端弯成 90°，可探入孔内作标记。使用划针划线时，划针朝运动的方向稍微倾斜，保持划针尖挨着直尺的引导边。划线时用力要适当，使划出的线既清楚又不过深。另外，要经常保持划针尖的锋利。

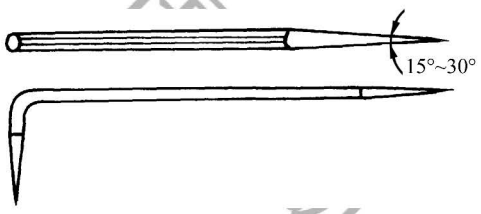


图 1.32　划针

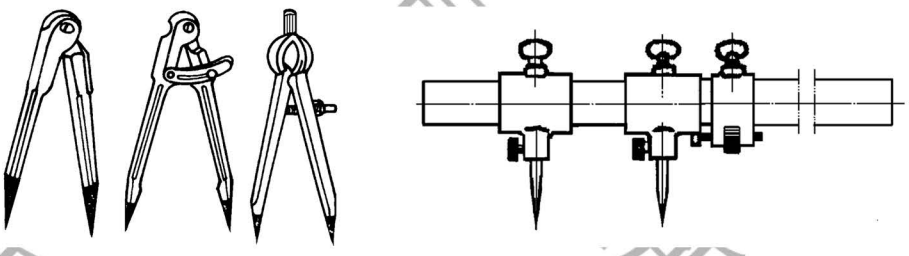
注意：如果用划针划的线条，在工件加工后，仍留在工件表面，这就属于工件划伤了；遇到这种情况应采用油性笔或铅笔划线，避免工件划伤。

3. 圆规

在金属表面划线的圆规（Dividers）也称为分规，可用来划圆、划圆弧、等分线段和等分角度以及量取尺寸等。

圆规是用中碳钢或工具钢制成的，两脚尖经热处理淬硬，也有的在两脚端部焊上一段硬质合金，然后磨尖。具有硬质合金脚尖的圆规经久耐用。

普通圆规，如图 1.33（a）所示。划大圆的圆规，如图 1.33（b）所示。



（a）　　（b）

图 1.33　圆规

知识总结	随堂练习

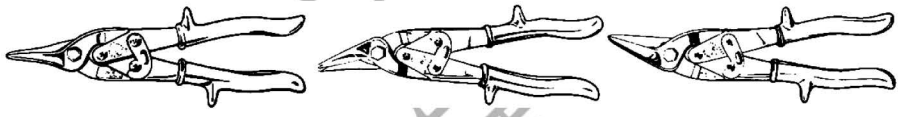
1.7　金属切割工具

金属切割工具用来切割金属材料或在金属材料上钻孔、铰孔和攻螺纹。常用的金属切割工具有剪刀、钢锯、钻头、锉刀、铰刀、丝锥和板牙。

1.7.1　剪刀

剪刀（Snips）用来剪切薄的金属板料，有各种不同类型的手剪刀以满足不同的需要。常用的有平剪、圆剪、鹰嘴剪和航空剪等。其中，航空剪（Aviation Snips）一套包括三件：直剪、右剪和左剪，如图1.34（a）、（b）、（c）所示。在航空剪的手柄上依次用黄色、绿色和红色的识别码来表示上述三种剪刀。

由于用剪刀剪切金属材料时，在切口处会出现微小的碎裂，所以切口应离开划线留约0.8 mm的余量，然后用锉刀锉到剪切线。



（a）直剪　　（b）右剪　　（c）左剪

图1.34　航空剪

1.7.2　钢锯

钢锯（Hacksaw）由弓架和锯条组成，弓架的手柄有弯把和直柄两种形式，如图1.35所示。

锯条有粗、中和细齿之分。对于英制的锯条指的是每英寸长度齿数的多少，它有每英寸14、18、24和32齿的几种，齿数少的为粗齿，多的为细齿。锯冷轧钢、结构钢，应优先选用粗齿锯条；锯割薄壁管和薄板料时，则应选用细齿锯条。在弓架上安装锯条时，要注意锯条齿应朝前，背离手柄，同时要注意安装锯条要松紧适当。

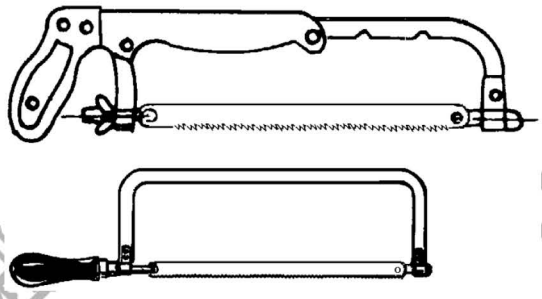


图1.35　钢锯

1.7.3 錾子

錾子（Chisel）用来切割和錾平任何比錾子本身软的金属。飞机维修中常用它来錾除铆钉头等。有各种不同形状的錾子以适应不同的用途，如图 1.36 所示。

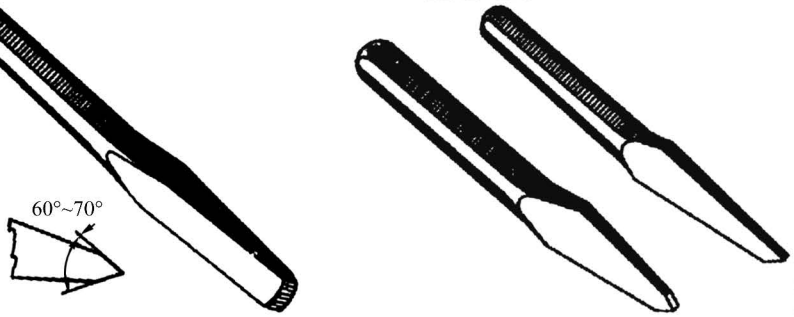


图 1.36 錾子

錾刃即切削刃，是两个刃面的交线，其夹角叫楔角。楔角的大小对錾切工作有直接的影响。通常，錾削硬金属材料时，楔角要大；切削软金属材料时，楔角要小。常用的楔角一般为 60°~70°。

錾子是用碳素工具钢锻造而成，经热处理后使用。使用錾子时，一只手紧握錾子，另一只手拿榔头对准錾子柄端垂直敲击。錾子刃口钝了要及时磨快。錾子柄端由于榔头敲击也会出现卷边和毛刺，这些卷边和毛刺应及时磨去，以免割伤手。

1.7.4 锉刀

锉刀（Files）用于锉削平面、倒圆角和去毛刺等，它用优质工具钢制成并经热处理淬硬，锉齿的硬度很高。锉刀由锉身和锉柄组成，如图 1.37 所示。

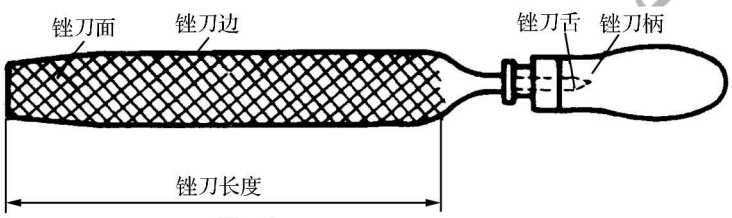


图 1.37 锉刀

锉身又由锉刀面和锉刀边组成。锉刀面上有许多锉齿，它是锉刀的主要工作面。锉刀边是锉刀的两个侧面，有的锉刀两侧面没有齿；有的锉刀一个侧面有齿，另一个侧面无齿。没有齿的侧面称为光面，在锉削内直角的一面时，不会碰伤另一相邻的面。

锉刀的规格是以锉身的长度来表示的（除圆锉刀的规格以直径大小表示，方锉刀的规格以方形截面尺寸表示外）。其长度一般有 100 mm、150 mm、200 mm、250 mm、300 mm、400 mm 等几种（英制用 4 in、6 in、8 in、10 in、12 in、16 in 表示）。

常见的锉刀的齿纹有单齿纹和双齿纹两种。

（1）单齿纹。锉刀上只有一个方向的齿纹称为单齿纹。单齿纹锉刀适用于锉削各种软材料。

（2）双齿纹。锉刀上有两个方向排列的深浅不同的齿纹称为双齿纹。浅的齿纹为底齿纹，深的齿纹为面齿纹。齿纹与锉刀中心线之间的夹角叫齿角，一般锉刀面齿纹的齿角为 65°，底齿纹的齿角为 45°。双齿纹锉刀一般用来锉削各种硬材料。

锉刀还有粗细之分，它是指齿纹的粗细，以锉刀齿纹的齿距大小来表示。齿纹的粗细等级分以下几种：

1 号：齿距为 0.8～2.3 mm，用于粗齿锉刀。

2 号：齿距为 0.42～0.77 mm，用于中齿锉刀。

3 号：齿距为 0.25～0.33 mm，用于细齿锉刀。

4 号：齿距为 0.20～0.25 mm，用于双细齿锉刀。

5 号：齿距为 0.16～0.2 mm，用于油光锉刀。

为了充分发挥锉刀的效能，在锉削时，必须正确地选择锉刀。一般的，锉刀粗细的选择主要取决于工件的加工余量和加工精度。通常，粗锉刀适用于锉削加工余量大、加工精度和表面光洁度要求低的工件；细锉刀适用于锉削加工余量小、加工精度和表面光洁度要求较高的工件。

此外，还有一种锉刀齿呈圆弧弯曲状的曲齿锉，这种锉刀主要用于锉削软金属和木材。

使用锉刀时应注意，由于锉刀硬度高、脆性较大，所以不能把锉刀作为敲击工具来敲打工件。另外，要防止锉刀从高处摔落，以免断裂。

1.7.5　手用钻及钻头

1. 手用钻

手用钻（Drill Motors）有手摇钻、胸压式手摇钻、气钻和电钻四种。其中又以气钻和电钻应用得最多。手用钻用来夹持并转动钻头进行钻孔加工。手用钻一般用来钻直径 13 mm以下的孔。采用手用钻钻出的孔，其尺寸精度和表面光洁度较低。

2. 钻头

飞机维修中常用的钻头（Drills）有麻花钻头和埋头钻。

1）麻花钻头（Twist Drill）

麻花钻头因其外形像麻花而得名，它由柄部、颈部和工作部分组成，如图 1.38 所示。

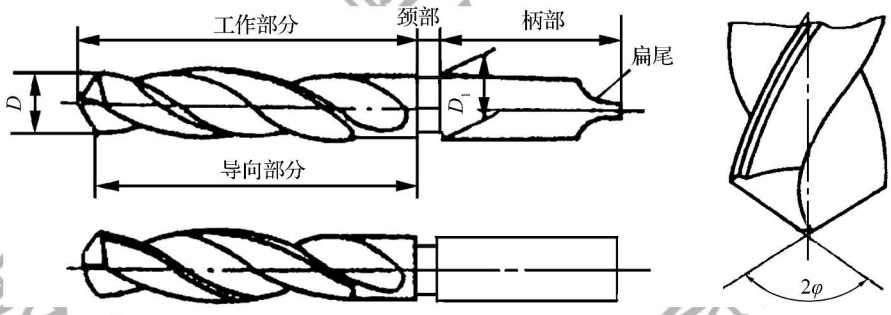


图 1.38　麻花钻头

柄部是麻花钻头的夹持部分，用来传递钻孔时的扭矩和轴向力。柄部有直柄和锥柄两种形式。钻头直径在 13 mm 以下的柄部一般都做成直柄，钻头直径在 13～20 mm 的柄部制成直柄和锥柄两种形式，钻头直径在 20 mm 以上的柄部一般都制成锥柄。具有锥柄的麻花钻头能传递较大的扭矩。

颈部是工作部分和柄部之间的联结部分（小直径的麻花钻一般无颈部），一般在颈部刻印上钻头的直径规格和生产厂的标记。

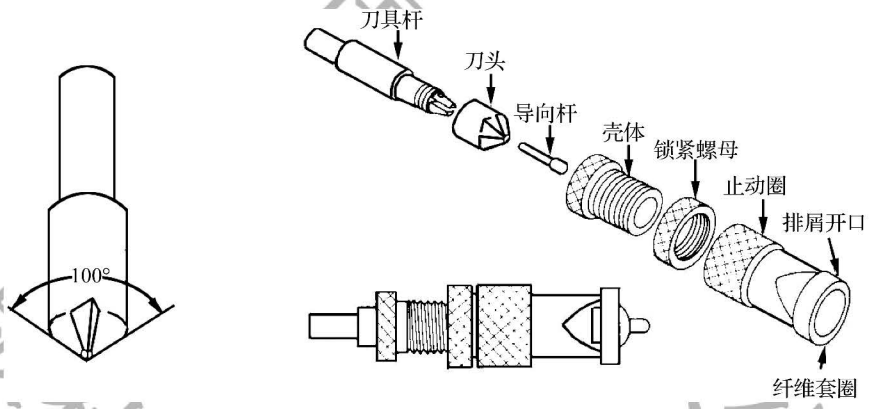
工作部分由切削部分和导向部分组成。切削部分主要起切削作用，它有两条主切削刃、两条副切削刃和一条横刃。螺旋槽表面为钻头的前刀面，切削部分顶端的曲面为后刀面。棱边为副后刀面。两个主后刀面的交线形成横刃，它连接两条主刀刃。

两条主切削刃之间的夹角称为顶角（2φ）。顶角又称为锋角或切削角。标准麻花钻的顶角为 118°。顶角大，钻尖强度高，但钻削时，轴向抗力也大。一般在硬材料上钻孔时，顶角磨得大些，钻头的转速也要慢一些；反之，在软材料上钻孔时，顶角应磨得小些，钻头的转速要快一些。如在铝等软的材料上钻孔，顶角一般为 90°。

麻花钻头的导向部分的作用是在钻削时起导向作用，也是切削部分的后备部分。麻花钻有两条对称的螺旋槽，用来形成切削刃及前角，并起排屑和输送切削液的作用。为了减小工作部分与孔壁的摩擦，其外径略带倒锥，前大后小，一般每 100 mm 长度上直径减小 0.03～0.12 mm。

2）埋头钻（Countersinks）

埋头钻按结构形式分为普通埋头钻（Plain Countersinks）和止动埋头钻（Stop Countersinks）两种，如图 1.39（a）、（b）所示。埋头钻用来钻制埋头窝，以供安装埋头铆钉或者埋头螺钉。埋头钻有多种角度以适应各种埋头铆钉或螺钉头的角度，常用标准埋头钻的角度是 100°。



（a）普通埋头钻　　（b）止动埋头钻

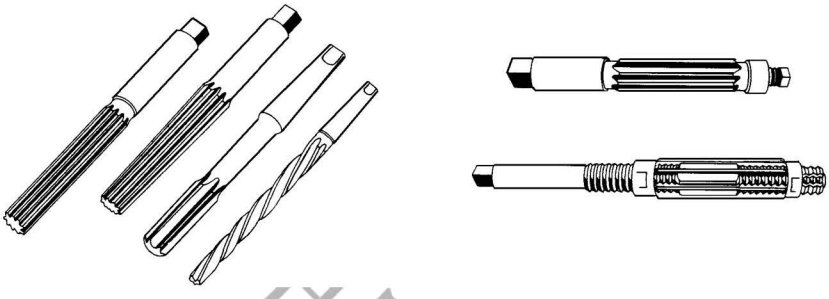
图 1.39　埋头钻

1.7.6　铰刀

铰刀（Reamers）是铰孔的刀具，如图 1.40 所示。铰孔是对已粗加工的孔进行精加工。铰孔可获得较高的尺寸精度和表面粗糙度。铰孔质量的好坏与铰削余量关系很大。一般的铰削余量应在 0.08~0.3 mm 之间。孔径小，应留的铰削余量小；孔径大，应留的铰削余量要大一些。

铰刀使用范围较广，种类也很多。按其使用方法，可分为手用铰刀和机用铰刀［见图 1.40（a）］两类。手用铰刀的柄部具有四方头，机用铰刀具有锥柄。按其外形分为圆柱铰刀和锥度铰刀两类。

按铰刀的直径能否微量调节，可分为固定式铰刀和可调式铰刀两种［见图 1.40（b）］。



（a）　　（b）

图 1.40　铰刀

用铰杠（Hand-tap Wrench）夹持住手用铰刀柄端的四方头并转动使铰刀进行切削。常用的铰杠如图 1.41 所示。铰杠的一端杆是固定的，另一端杆可转动，用来调节四方开口的大小，以便夹持铰刀的四方头。

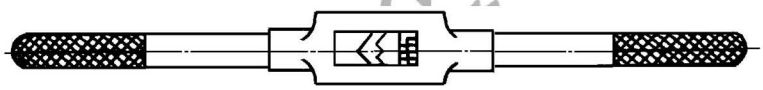


图 1.41　铰杠

1.7.7　丝锥和板牙

丝锥和板牙（Taps and Dies）是螺纹切削刀具。丝锥用于内孔攻内螺纹，而板牙用在圆杆上攻外螺纹。

1. 丝锥

丝锥（Taps）又称为螺丝攻。丝锥可分为手用丝锥和机用丝锥两类。使用手用丝锥时，考虑到手工的能力，同时减少攻丝阻力，把一个螺丝孔的攻丝工作，分成两次或三次进行。因此，手用丝锥一般由两只或三只组成一套，它们分别称为头号丝锥、二号丝锥和精攻丝锥，分别如图 1.42（a）、（b）和（c）所示。

（a）头号丝锥

（b）二号丝锥

（c）精攻丝锥

图 1.42　丝锥

手工攻丝时，必须利用铰杠夹住丝锥的柄部，扳动铰杠，带动丝锥旋转即可。开始攻丝时，首先要使用头号丝锥攻丝，然后再分别用二号丝锥和精攻丝锥攻丝。攻丝时要经常反方向旋转丝锥，以切断切屑并把切屑清出。同时还要加适当的润滑油，以冷却刀具和提高螺纹的表面粗糙度。

攻丝前底孔直径的确定方法如下：

（1）攻公制普通螺纹时，一般由经验公式计算：

对脆性材料：$d_0 = d - 1.2p$

对塑性材料：$d_0 = d - 1.1p$

式中，d_0——底孔直径，d——螺纹大径，p——螺距；单位：mm。

（2）攻美国国家标准3级中度配合螺纹时，可按表1-1选择螺纹底孔钻头。

表1-1　美国国家标准螺纹底孔钻头规格的选择

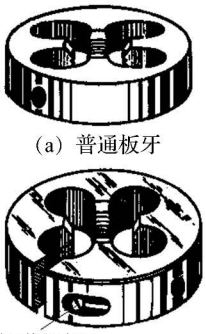
美国国家标准细牙螺纹（NF）3级				美国国家标准粗牙螺纹（NC）3级			
螺纹代号	螺纹的公称直径（in）	螺纹底孔直径（in）	钻螺纹底孔钻头	螺纹代号	螺纹的公称直径（in）	螺纹底孔直径（in）	钻螺纹底孔钻头
0—80	.060	.0472	3/64				
1—72	.073	.0591	#53	1—64	.073	.0575	#53
2—64	.086	.0700	#50	2—56	.086	.0682	#51
3—56	.099	.0810	#46	3—48	.099	.078	5/64
4—48	.112	.0911	#42	4—40	.112	.0866	#44
5—44	.125	.1024	#38	5—40	.125	.0995	#39
6—40	.138	.113	#33	6—32	.138	.1063	#36
8—36	.164	.136	#29	8—32	.164	.1324	#29
10—32	.190	.159	#21	10—24	.190	.1472	#26
12—28	.216	.180	#15	12—24	.216	.1732	#17
1/4—28	.250	.213	#3	1/4—20	.250	.1990	#8
5/16—24	.3125	.2703	I	5/16—18	.3125	.2559	#F
3/8—24	.375	.332	Q	3/8—16	.375	.3110	5/16
7/16—20	.4375	.386	W	7/16—14	.4375	.3642	U
1/2—20	.500	.449	7/16	1/2—13	.500	.4219	27/64
9/16—18	.5625	.506	1/2	9/16—12	.5625	.4776	31/64
5/8—18	.625	.568	9/16	5/8—11	.625	.5315	17/32
3/4—16	.750	.6688	11/16	3/4—10	.750	.6480	41/64
7/8—14	.875	.7822	51/64	7/8—9	875	.7307	49/64
1—14	1.000	.7969	59/64	1—8	1.000	.8376	7/8

2. 板牙（Dies）

板牙是一种加工外螺纹的刀具，其外形像一只圆螺母，在端面上钻有几个排屑孔，以形成刀刃并容纳和排出切屑，如图1.43所示。板牙有普通圆状开缝板牙和可调圆状开缝板牙两种。可调圆状开缝板牙是通过调节螺钉来微量调节螺纹直径的。

用板牙加工外螺纹的工作称为套扣。套扣时，要把板牙装到板牙架（Die Stock）的座孔中并且用紧定螺钉顶住板牙外圆上的小凹坑以防止板牙相对板牙架转动。然后，通过绞动板牙架带动板牙套扣出外螺纹。板牙架如图1.44所示。

中国民航出版社有限公司版权所有



（a）普通板牙

（b）可调板牙

图 1.43　板牙

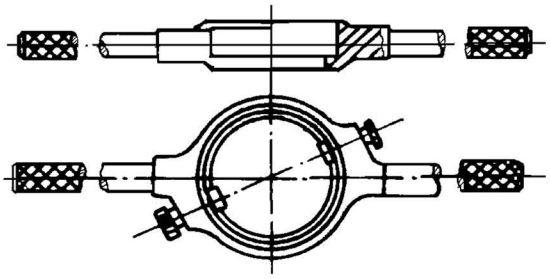


图 1.44　板牙架

转动板牙架带动板牙进行切削外螺纹。为防止板牙相对板牙架转动，在板牙的外圆周上制有一至两个浅锥孔，板牙架上的紧定螺钉拧紧时就顶入浅锥孔内从而防止它们相对转动。

套扣之前，圆杆直径一般可按下式计算：

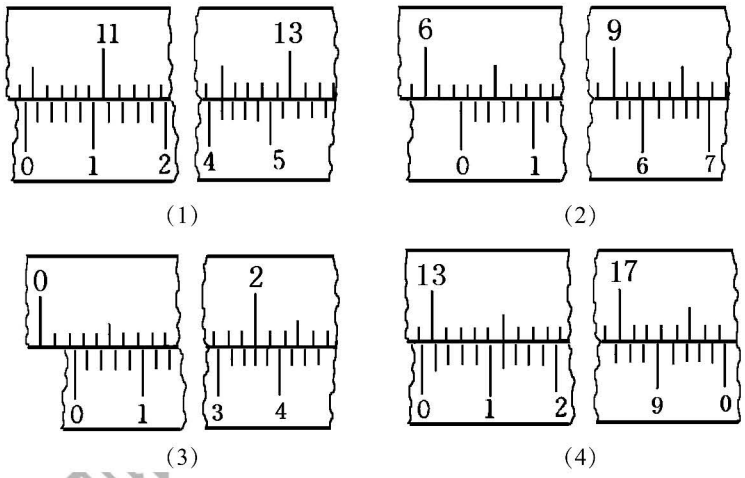
$$D = d - 0.13p$$

式中，D ——圆杆直径，d ——螺纹外径，p ——螺距；单位：mm。

知识总结	随堂练习

复习思考题

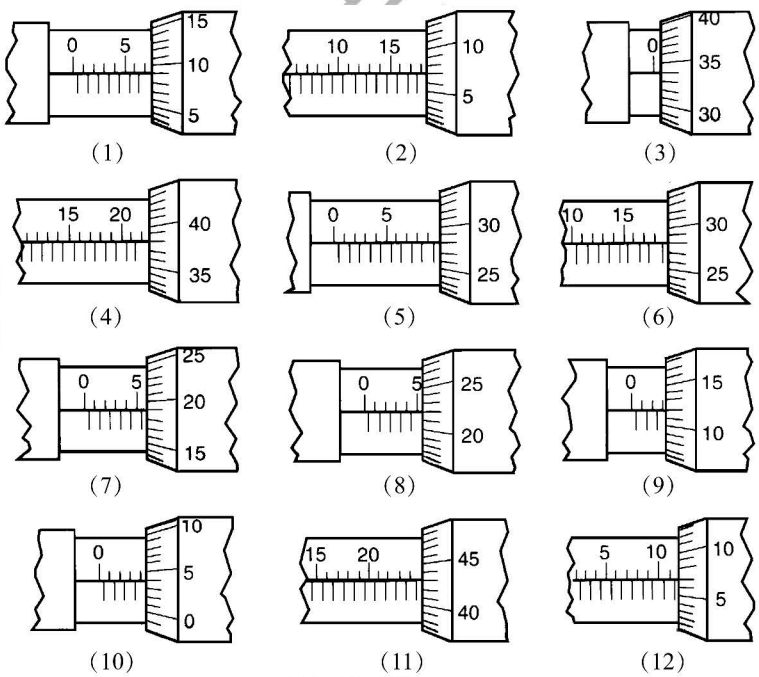
1. 试述精度为 0.02 mm 游标卡尺的刻线原理。
2. 读出题 2 图中游标卡尺所示的尺寸。



(1)　(2)　(3)　(4)

题 2 图

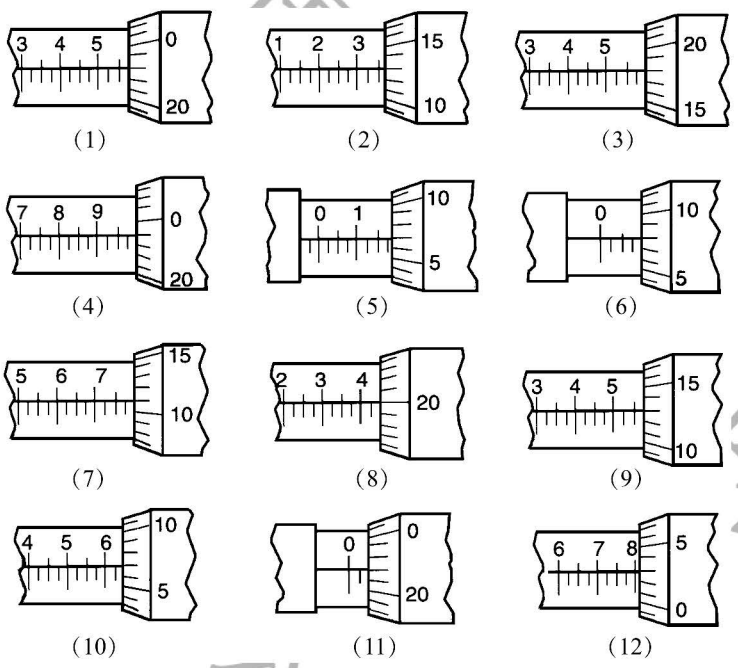
3. 使用游标卡尺时应注意哪些事项？
4. 试述公制千分尺和英制千分尺的刻线原理。
5. 读出题 5 图中公制千分尺所示的尺寸。



(1)　(2)　(3)
(4)　(5)　(6)
(7)　(8)　(9)
(10)　(11)　(12)

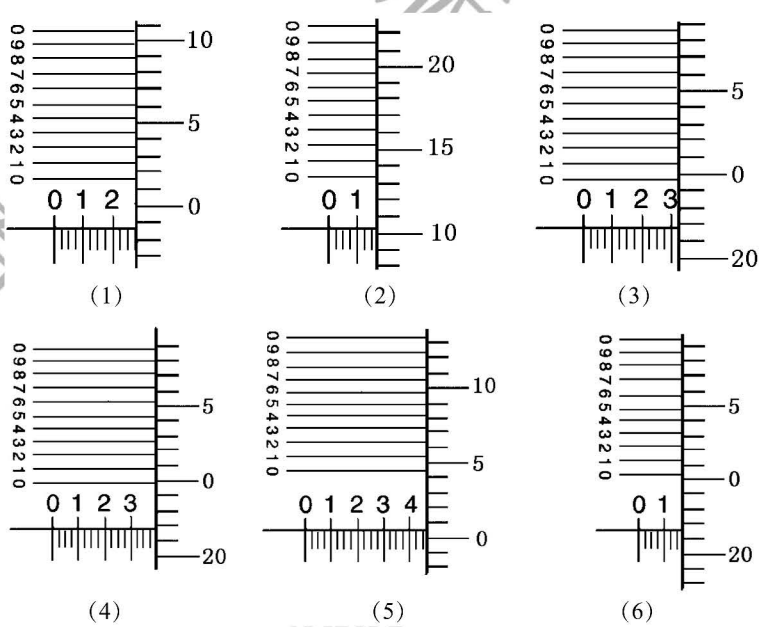
题 5 图

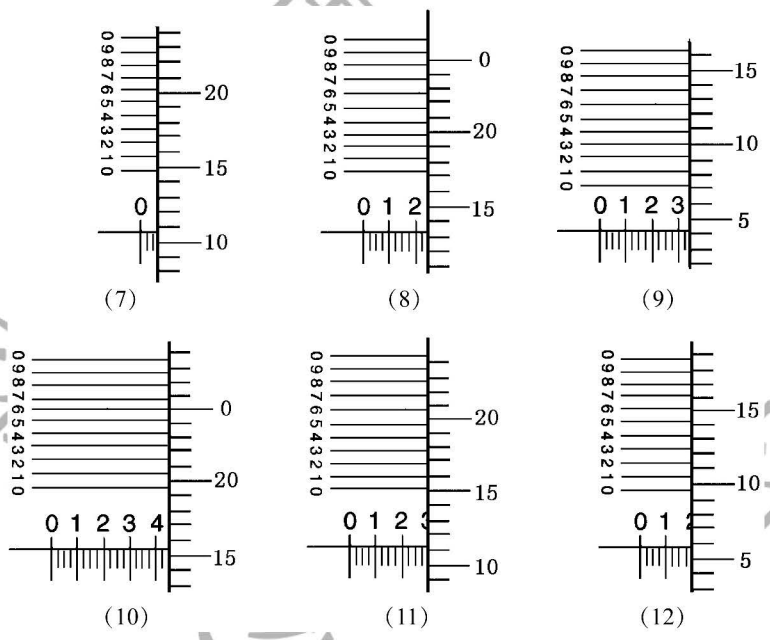
6. 读出题 6 图中英制千分尺所示的尺寸。



题 6 图

7. 读出题 7 图中英制千分尺所示的尺寸。





题 7 图

8. 使用千分尺时应注意哪些事项？
9. 如何使用百分表？使用时应注意哪些事项？
10. 试述组合量具中的中心头、分度规头和托盘头的用途。
11. 试述塞尺的作用及使用塞尺时的注意事项。
12. 如何用螺距规来测定某一螺纹的螺距？
13. 何种情况下应使用力矩扳手？如何使用棘轮往复式扭力扳手？
14. 如何选用锯条？安装锯条时应注意哪些事项？
15. 如何选用钻头的顶角大小及转速的高低？
16. 丝锥和板牙各有什么用途？
17. 钻孔与铰孔相比，哪种加工精度更高？
18. 如何确定攻丝前螺纹底孔直径？

第 2 章　常用机构

学习要求：

- 了解机械、机器、构件和零件等概念；
- 掌握运动副的概念和平面机构自由度的计算；
- 掌握平面四杆机构的类型、应用和传动特性；
- 熟悉凸轮、棘轮和槽轮等传动机构的构造和传动特性。

第 2 章　课程导学	

2.1　概述

为了提高劳动生产率，减轻人们的劳动强度，完成人力所不能完成的工作，人们广泛地应用着各种机器（Machine），如内燃机、起重机、拖拉机、汽车、飞机、机床、缝纫机和洗衣机等。

机器的种类繁多，其结构、性能和用途也各不相同，但它们都具有一些共同的特征。

图 2.1 所示为单缸内燃机。它由缸体 1、活塞 2、连杆 3、曲轴 4、齿轮 5 和 6、凸轮 7、进气阀推杆 8 等部件组成。

当燃气推动活塞 2 时，通过连杆 3 将运动传至曲轴 4，使曲轴 4 连续转动，从而将燃气的热能转换为曲轴转动的机械能。为了保证曲轴 4 连续转动，要求将燃气定时送入和排出气缸，这要通过进气阀和排气阀来完成，而进气阀和排气阀的启闭则是通过齿轮、凸轮、推杆和弹簧等来实现的。

中国民航出版社有限公司版权所有

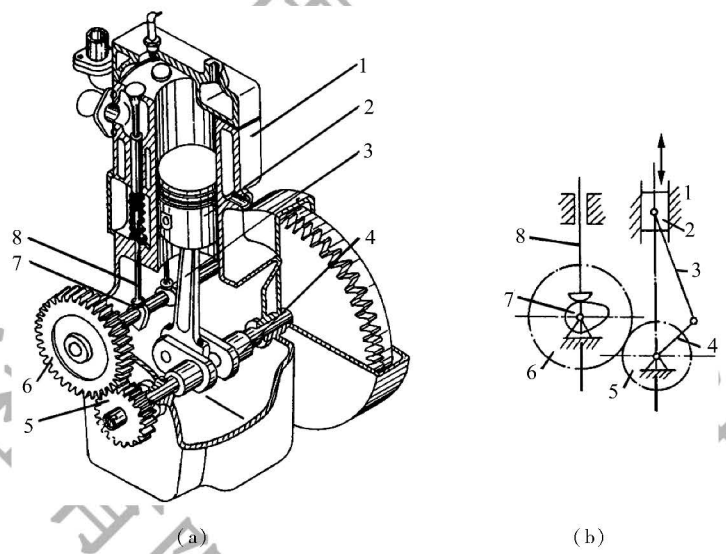


图 2.1　单缸内燃机

1. 缸体；2. 活塞；3. 连杆；4. 曲轴；5、6. 齿轮；7. 凸轮；8. 进气阀推杆

图 2.2 所示为牛头刨床。它由床身 1、齿轮 2 和 3、导杆 4、滑块 5、连杆 6、刨头 7 等部分组成。当电动机（图中未画出）驱动齿轮 2 带动齿轮 3 回转时，滑块 5 推动导杆 4 左右摆动，再经过连杆 6 带动刨头 7 作往复直线运动，使刨刀 8 切削工件 9 而作机械功。

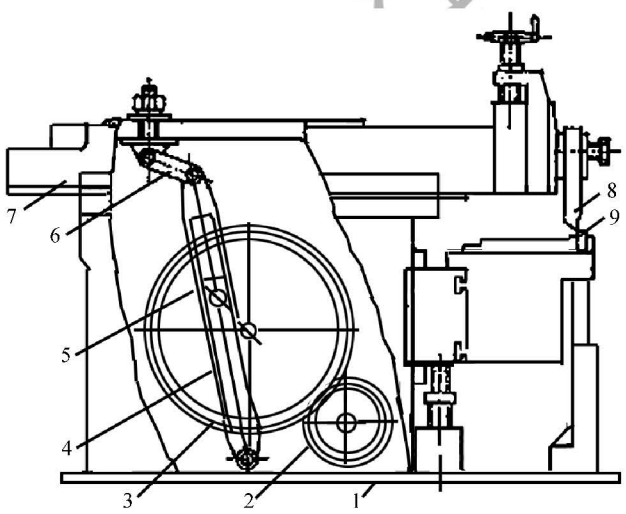


图 2.2　牛头刨床

1. 床身；2. 齿轮；3. 齿轮；4. 导杆；5. 滑块；6. 连杆；7. 刨头；8. 刨刀；9. 切削工件

由以上两个例子可知，机器具有以下三个共同特征：

（1）由多个构件组成；

（2）各构件间具有确定的相对运动；

（3）能代替或减轻人类的劳动来完成有用的机械功或转换机械能。

凡将其他形式的能量转换为机械能的机器称为原动机，如内燃机和电动机等。凡是利用机械能来完成有用功的机器称为工作机，如各种机床、起重机、汽车、纺织机、洗衣机等。

通过对上述两个例子的分析可知，一台完整的机器一般由原动部分、传动部分和执行部分所组成。原动部分为机器动力的来源，简称为原动机，应用最多的是电动机。传动部分是将原动机的动力和运动传到执行部分的中间环节。传动部分根据执行部分要求的运动规律和运动形式来改变原动机的速度、运动形式和运动方向等。执行部分为直接完成生产任务或预定要求的部分。

机构（Mechanism）具有机器的前两个特征。通常把具有确定相对运动、实现运动的传递或运动形式的转换的多构件组合称为机构。各种机械中普遍使用的机构称为常用机构，如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、间歇运动机构等。

如果仅从结构和运动的角度来看，机器和机构之间是没有区别的。因此，为了叙述方便，通常用“机械（Machinery）”一词作为“机器”和“机构”的总称。

机构中形成相对运动的各个运动单元称为构件（Member）。简言之，构件是指机器的运动单元。构件可能是一个零件，也可能是若干个零件的刚性组合体，如图 2.1 中内燃机的连杆、活塞、曲轴和缸体都是构件。零件（Part）则是机器的制造单元。机械零件分通用零件和专用零件两大类。通用零件是指各种机器经常用到的零件，如螺栓、螺母、齿轮、轴、弹簧、铆钉等，有些通用零件已系列化和标准化了，我们将这些通用零件称为标准零件（简称标准件）；专用零件是指某种机器才用到的零件，如内燃机的曲轴、飞机发动机的叶片等。

本章将介绍常用机构的工作原理、构造、运动和动力特性以及应用等基本知识。

知识总结	随堂练习

2.2　平面机构运动分析

机构有平面机构和空间机构之分，所有构件都在相互平行的平面内运动的机构称为平面机构，否则为空间机构。机械上使用最多的是平面机构。机构中有固定构件和运动构件两种构件。固定构件称为机架，是支持运动构件的构件。机架可固定在地基上，也可固定在如汽车、飞机等运动的机体上。运动构件，按照运动规律，分为主动件（或原动件）和从动件。由动力源直接驱动的构件为主动件，如内燃机作动行程中的活塞。随主动件运动的构件称为从动件，如内燃机中的连杆、曲轴等。

2.2.1　运动副

机构中的构件必须按一定的方式连接，而且被连接的两构件在连接处必须要有一定的相对运动。如图 2.1 所示的单缸内燃机中活塞和气缸体之间、轴和轴承之间、凸轮和进气阀推杆之间以及两齿轮的齿和齿之间所构成的连接，都是既有连接，连接构件间又保持了一定的相对运动。这种由两构件直接接触并能保持一定的相对运动的活动连接称为运动副（Kinematic Pair）。两构件上能够直接参加接触而构成运动副的部分称为运动副元素。运动副元素包括点、线、面。

当构件通过运动副连接后，构件的自由度受到限制，这种限制称为约束。不同性质的运动副有着不同的运动副元素，同时引入不同数量的约束，并保留了相应的自由度。

根据运动副对构件相对运动约束及两构件接触方式的不同，运动副可分为平面运动副和空间运动副。

1. 平面运动副

若运动副只允许两构件在同一平面或相互平行平面内作相对运动，则称该运动副为平面运动副。平面运动副又可分为低副和高副。

1）低副

两构件通过面接触组成的运动副称为低副。低副又可分为回转副和移动副。

（1）回转副。

若运动副只允许两构件作相对转动，则称该运动副为回转副，也称为转动副或铰链，如图 2.3（a）所示。如果回转副的两构件之一是固定不动的，则称该回转副为固定铰链，其运动简图符号如图 2.3（b）所示。若回转副两构件都是运动的，则称该回转副为活动铰链，其运动简图符号如图 2.3（c）所示。回转副若位于两构件之一的中部，其运动简图符号如图 2.3（d）所示。

（2）移动副。

若运动副只允许两构件沿某一直线作相对移动，则称该运动副为移动副，如图 2.4（a）所示。移动副的运动简图符号如图 2.4（b）和图 2.4（c）所示。图 2.4（b）表示两构件都是运动的，图 2.4（c）中的构件之一是固定不动的。

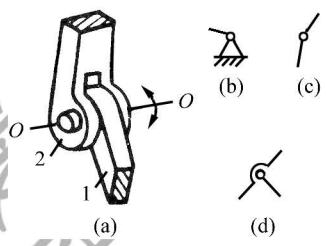


图 2.3　回转副及其简图

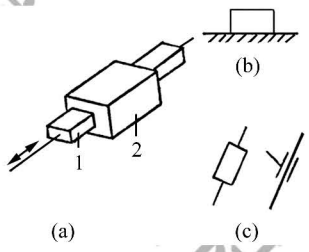


图 2.4　移动副及其简图

2）高副

两构件通过点或线接触构成的运动副称为高副。常见的高副是齿轮啮合传动和凸轮传动，如图 2.5 所示。齿轮的外啮合和内啮合传动为线接触；凸轮传动为点接触。

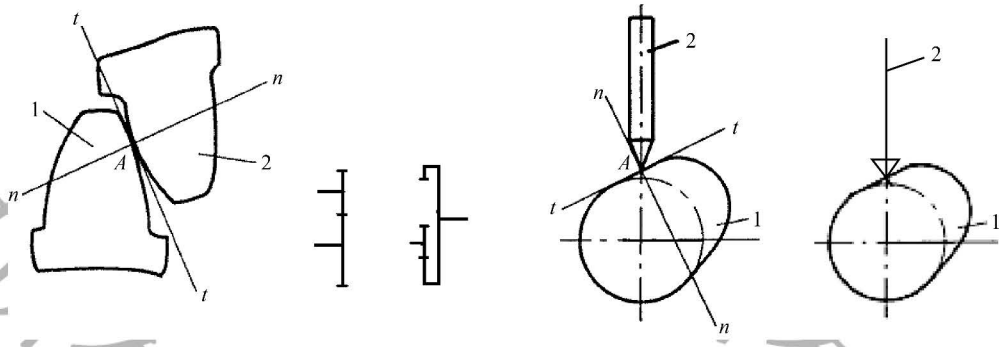
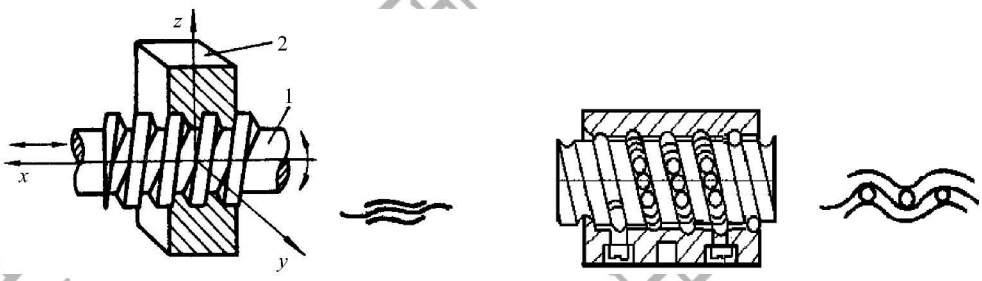


图 2.5　高副及其简图

2. 空间运动副

若运动副能允许两构件作空间相对运动，则称该运动副为空间运动副。

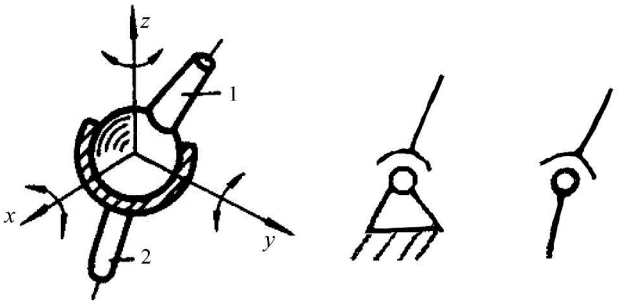
常用空间运动副有螺旋副和球面副。螺旋副又分滑动螺旋副和滚动螺旋副。滑动螺旋副及其运动简图符号，如图 2.6（a）和（b）所示；滚动螺旋副及其运动简图符号，如图 2.6（c）和（d）所示。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 2.6　螺旋副及其简图

球面副及其运动简图符号，如图 2.7 所示。图 2.7（b）表示构件之一是固定不动的，图 2.7（c）表示两构件都是运动的。



(a)　(b)　(c)

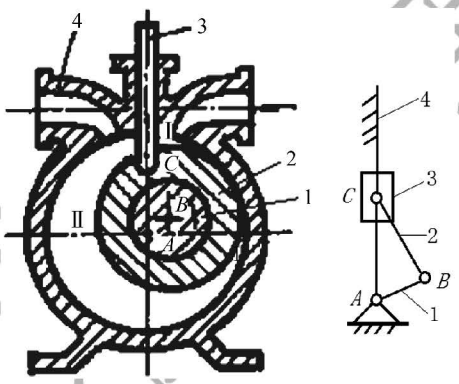
图 2.7　球面副及其简图

2.2.2　平面机构运动简图

平面机构的运动情况可通过平面机构运动简图来分析研究。用规定符号和线条表示机构中各构件间相对运动关系的简单图形称为机构运动简图。各构件及运动副的图形符号参见本书附表 1——机构运动简图用图形符号（GB/T 4460—2013）。机构运动简图与真实机构具有完全相同的运动特征，它充分表示出机构的传动原理，如图 2.1（b）所示。

绘制机构运动简图时，首先要弄清机构的实际构造和运动状况，找出机构的原动件、从动件和机架；然后循着传动路线弄清各构件的作用和各运动副的性质。在此基础上选择能够表达构件运动关系的视图平面，用运动副的符号和表示构件的线条，以适当的比例绘出机构运动简图。最后，在机构运动简图上的各个回转副中心标注大写的英文字母，各构件标注阿拉伯数字代号，用箭头标明机构的原动件以及注明绘图的尺寸比例。

下面举例说明机构运动简图的具体画法。



（a）　　（b）

图 2.8　液压泵及其机构运动简图

1. 偏心轴；2. 圆环；3. 隔板；4. 机架

例 2.1　图 2.8（a）所示为一个液压泵。该机构的原动件为偏心轴 1，其几何轴线 B 绕固定轴线 A 作圆周运动。2 空套在偏心轴 1 上，彼此有相对转动。3 的下端呈圆弧状与构件 2 相铰接，通过隔板 3 将泵内液体空间分隔为Ⅰ、Ⅱ两腔。随着机械运动，Ⅰ、Ⅱ两腔的压力发生变化，从而形成吸液和排液过程。试绘制该液压泵的机构运动简图。

解：该机构由偏心轴 1、圆环 2、隔板 3 和机架 4 共四个构件组成。偏心轴 1 与机架 4 在 A 点构成回转副，圆环 2 与偏心轴 1 在 B 处构成回转副，又与隔板 3 在 C 处构成回转副。隔板 3 与机架 4 构成移动副。偏心轴 1 上两回转副中心间的距离 L_{AB} 和 B、C 之间的距离 L_{BC} 都是构件运动特征尺寸。根据各构件的运动特征尺寸，按适当比例，依次定好每一构件上的运动副的相对位置，并用规定的代表符号，即可画出该液压泵的机构运动简图，如图 2.8（b）所示。

2.2.3　平面机构的自由度

1. 平面机构自由度的计算

平面机构中，每个活动构件在未组成运动副之前，都有三个自由度（Degrees of Freedom）。当两个构件组成运动副之后，它们的相对运动就受到约束，相应的自由度数目随之减少。回转副约束了两个移动的自由度，保留了一个转动的自由度；移动副只保留了一个方向移动的自由度，失去了两个自由度；高副则只约束了沿接触处公法线方向移动的自由度，保留了两个自由度。即在平面机构中，每个低副引入两个约束，使构件失去两个自由度；每个高副引入一个约束，使构件失去一个自由度。

若干构件以运动副连接而成的系统称为运动链（Kinematic Chain）。所谓机构的自由度，即机构所具有的独立运动数目，也就是运动链相对于机架的自由度。若一个平面机构共有 N 个构件，除去机架（固定件）外，机构中的活动构件数为 $n = N - 1$。未组成运动副之前，这些活动构件的自由度总数为 $3n$。当它们用 P_L 个低副和 P_H 个高副连成运动链后，因为每个低副引入两个约束，每个高副引入一个约束，所以，总共引入的约束数为 $2P_L + P_H$。活动构件的自由度总数减去约束总数即为机构的自由度，又称为机构的活动度，即：

$$F = 3n - 2P_L - P_H \tag{2-1}$$

应用式（2-1）可以计算平面机构的自由度。

2. 机构具有确定运动的条件

机构要能够运动，它的自由度必须大于零。通常机构中的每个原动件具有一个独立运动，如内燃机的活塞有一个独立的移动，电动机转子具有一个独立的转动。当机构自由度等于 1 时，只需要有一个原动件；当机构自由度等于 2 时，就需要有两个原动件。

机构具有确定运动的条件是：

（1）机构的自由度必须大于零；

（2）原动件的数目与机构的自由度必须相等。

由于机构原动件数是给定的已知条件，所以只要算出机构的自由度，就可以判断它的运动是否确定。

例 2.2　试计算图 2.1 所示单缸内燃机的自由度。

解：机构中曲轴 4 和齿轮 5 是同一构件，齿轮 6 和凸轮 7 是同一构件，所以该机构具有的活动构件数 $n = 6 - 1 = 5$；具有 4 个回转副和 2 个移动副，即 $P_L = 6$；具有 2 个高副，即 $P_H = 2$。由式（2-1）得：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 6 - 2 = 1$$

此机构只有一个原动件（活塞），因原动件数等于机构的自由度，故该机构的运动是确定的。

3. 计算机构自由度时应注意的事项

计算机构自由度时，应当注意以下情况。

1）复合铰链

两个以上的构件，在一处用回转副连接，就构成复合铰链。如图 2.9（a）所示，构件 1 与构件 2 和 3 组成 2 个回转副。当回转副轴线间的距离缩小到零时，两轴线重合在一起，便得到图 2.9（b）所示的复合铰链。3 个构件组成的复合铰链包含 2 个回转副，若由 m 个构件组成的复合铰链则应包含（$m - 1$）个回转副。

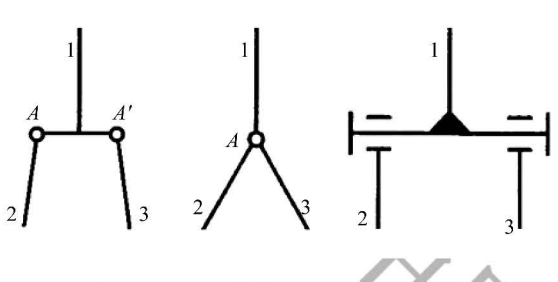


图 2.9　复合铰链

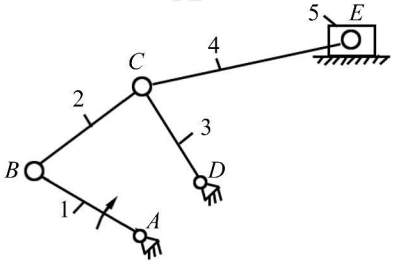


图 2.10　惯性筛机构

例 2.3　试计算图 2.10 所示惯性筛机构的自由度。

解：该机构活动构件数 $n = 5$，低副 $P_L = 7$，注意：C 处是由 3 个构件组成的复合铰链，含有 2 个回转副，$P_H = 0$，则机构自由度：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 7 = 1$$

2）局部自由度

机构中出现的一种对整个机构运动无关的自由度称为局部自由度或多余自由度。在计算机构的自由度时，应将它除去不计。

例 2.4　试计算图 2.11（a）所示滚子从动件凸轮机构的自由度。

解：该机构当原动件 1 转动时，通过滚子 2 驱动从动件 3 作一定规律的往复运动。

无论滚子 2 是否转动都不影响从动件 3 的运动，因此滚子绕其中心的转动是一个局部自由度。计算机构自由度时，应将滚子和从动件看作一个构件。因此，该机构活动构件数 $n = 2$，低副 $P_L = 2$，高副 $P_H = 1$，则机构自由度：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$$

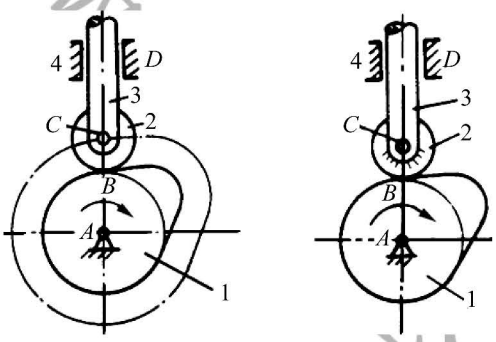


图 2.11　滚子从动件凸轮机构

局部自由度虽然不影响整个机构的运动，但可以使高副接触处的滑动摩擦变成滚动摩擦从而减少磨损。所以，在实际机构中常有局部自由度出现。

3）虚约束

机构中与其他约束作用相重复的约束称为重复约束或虚约束。计算机构自由度时，应将虚约束除去不计。

例 2.5　试计算图 2.12 所示铰接五杆机构自由度，其中构件长度 $L_{AB} = L_{CD} = L_{EF}$，$L_{BC} = L_{AD}$，$L_{CE} = L_{DF}$。

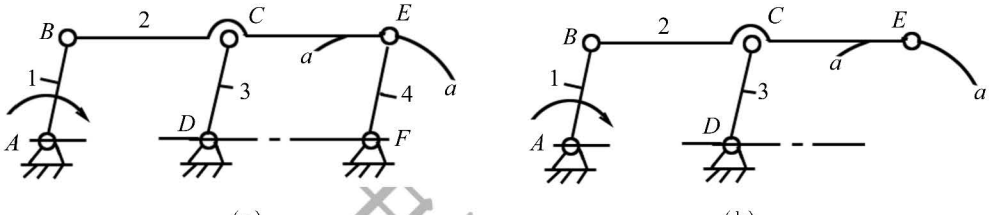


图 2.12　铰接五杆机构

解：该机构由 5 个构件，6 个回转副组成。即 $n = 5 - 1 = 4$，$P_L = 6$，$P_H = 0$。

其自由度：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$$

计算结果表明，该机构不能运动。显然，这是不符合实际情况的。进一步分析可以发现，若将构件 4 及回转副 E、F 拆除，得图 2.12（b）所示的机构运动简图。由给定构件长度关系可知，连杆 BC 作平动，其上任意点的轨迹相同。连杆 E 点的轨迹应是以 F 点为圆心，L_{EF} 为半径的圆。无论构件 4 及回转副 E、F 是否存在，对整个机构的运动都不会产生影响。因此构件 4 及回转副 E、F 引入的约束不起限制作用，因而它们是虚约束。

除去虚约束之后，由图 2.12（b）所示，$n = 3$，$P_L = 4$，$P_H = 0$，得机构自由度：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$$

这样，计算结果与实际情况一致。

平面机构的虚约束常出现于下列情况中：

（1）被连接件上点的轨迹与机构上连接点的轨迹重合时，这种连接将出现虚约束，如图 2.12（a）所示。

（2）两个构件组成多个移动副，若各移动副导路互相平行时，则只有一个移动副起约束作用，其余都是虚约束，如图 2.13（a）所示。

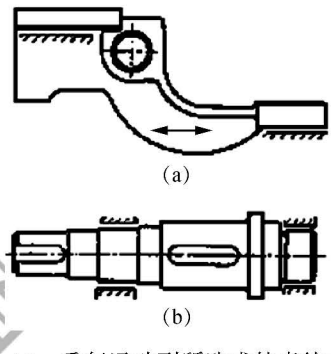


图 2.13　重复运动副所造成的虚约束

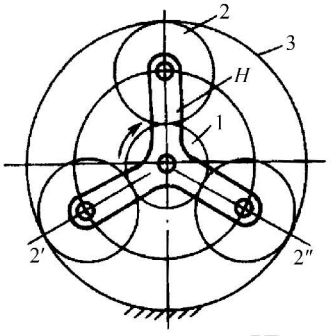


图 2.14　三个行星轮的行星轮系

（3）两个构件组成多个回转副，若各回转副的轴线重合时，则只有一个回转副起约束作用，其余都是虚约束，如图 2.13（b）所示。

（4）机构中对运动不起限制作用的对称部分。图 2.14 所示轮系中的行星架 H 上同时安装了 3 个对称布置的行星轮 2、2′、2″，从运动学观点来看采用一个行星轮就可以了，另外两个行星轮是对运动不起限制作用的对称部分，所造成的约束是虚约束。所以，在计算机构自由度时，应将行星轮 2′、2″，连同它们引入的运动副一起除去不计。该机构的自由度：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 2 = 1$$

虚约束对机构运动虽然不起作用，但它可以增加构件的刚性，改善其受力状况，因而在机构中常出现。

知识总结	随堂练习

2.3 平面连杆机构

平面连杆机构（Planar Linkages）是由一些刚性构件用平面低副连接而成的机构。它是一种常用机构，被广泛用于各种机构和仪表中。平面连杆机构又以四杆机构（Four-bar Linkages）应用最为广泛，而且一般的多杆机构都是在四杆机构的基础上发展而成的。

2.3.1 平面四杆机构的类型和应用

1. 铰接四杆机构的基本类型

当平面四杆机构中的运动副都是转动副时，则该机构称为铰接四杆机构，如图 2.15 所示。在该机构中，固定不动的杆 4 称为机架；与机架相连的杆 1 和杆 3 称为连架杆，不与机架直接相连的杆 2 称为连杆；如果连架杆能绕其机架回转副中心作整周回转，则称该连架杆为曲柄；若仅能在小于 360°的某一角度内摆动，则称其为摇杆。

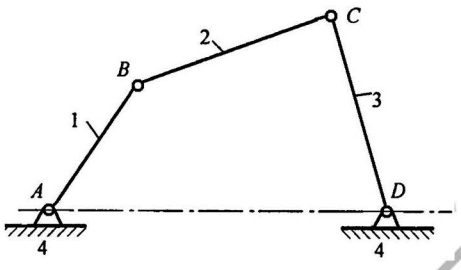


图 2.15 铰链四杆机构

根据机构中的连架杆是否为曲柄，可将铰接四杆机构分为：曲柄摇杆机构、双曲柄机构和双摇杆机构三种基本形式。

1）曲柄摇杆机构

在铰接四杆机构中，若两连架杆，一为曲柄，另一为摇杆，则此机构称为曲柄摇杆机构。

曲柄摇杆机构能将整周回转运动转换成往复摆动。图 2.16 所示为牛头刨床的横向自动进给机构。床身 1 为机架，当齿轮 2 转动时，驱动齿轮 3 带动曲柄 3′一起转动，再通过连杆 4 使摇杆 5 往复摆动，继而带动棘轮 6 和送进丝杠 7 作单向间歇运动。

曲柄摇杆机构也能使往复摆动转换为整周回转运动。图 2.17 所示为缝纫机踏板机构。当踏板 1 往复摆动时，通过连杆 2 驱动曲柄 3 作整周回转运动。

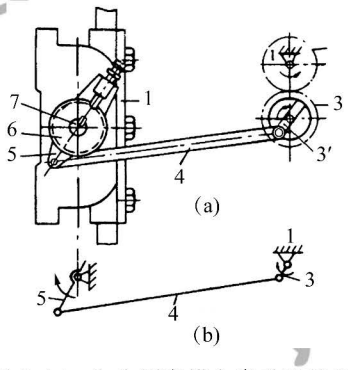


图 2.16　牛头刨床横向自动进给机构

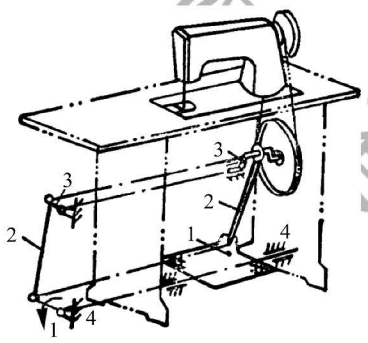


图 2.17　缝纫机踏板机构

2）双曲柄机构

在铰接四杆机构中，若两连架杆均为曲柄，则此机构称为双曲柄机构。图 2.18 所示的惯性筛机构就是双曲柄机构。当原动曲柄 AB 绕轴 A 等速转动一周时，从动曲柄 CD 绕轴 D 变速转动一周，使筛子具有更大的惯性，从而提高了筛选效率。

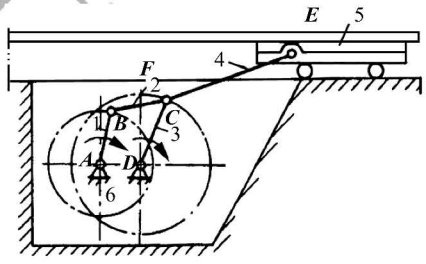


图 2.18　惯性筛

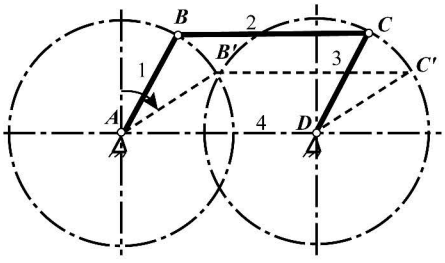


图 2.19　平行双曲柄机构

若两曲柄长度相等而且平行，连杆与机架长度也相等并且平行，则该机构称为平行双曲柄机构。图 2.19 所示为平行双曲柄机构。当原动曲柄 1 等速回转时，从动曲柄 3 也以相同的角速度沿相同方向回转。这种双曲柄机构应用较多，例如，图 2.20 所示的机车车

轮联动机构和图 2.21 所示的装载机的铲斗升降机构。

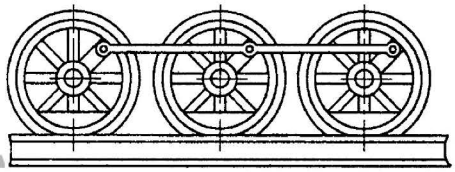


图 2.20　机车车轮联动机构

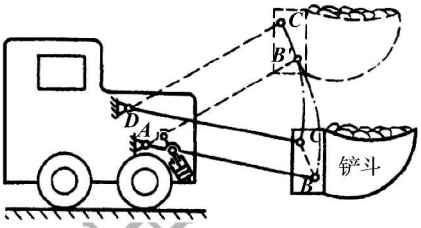


图 2.21　装载机铲斗升降机构

3）双摇杆机构

在铰接四杆机构中，若两个连架杆均为摇杆，则此机构称为双摇杆机构。如图 2.22 所示的门座式起重机的变幅机构。当摇杆 1 摆动时，摇杆 3 随之摆动，使悬挂在连杆 E 点上的重物能沿近似水平直线移动。这样，在搬运货物时，可以节省动力消耗。又如图 2.23 所示为某型飞机起落架机构运动简图。当驱动摇杆 1 使它摆动到图示 AB 实线位置时，与飞机轮相连的摇杆 3 将机轮放下处于工作位置。当摇杆 1 摆动到图示 AB' 虚线位置时，摇杆 3 使飞机轮处于收起位置。

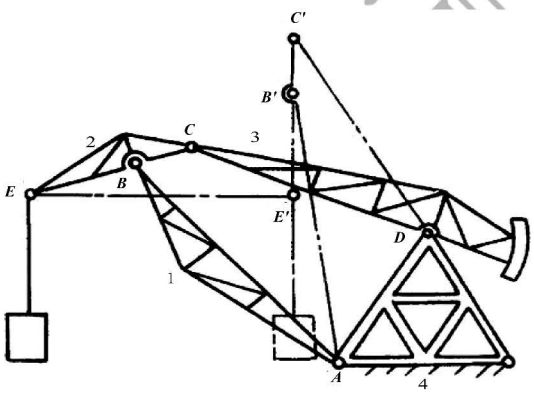


图 2.22　港口用起重机

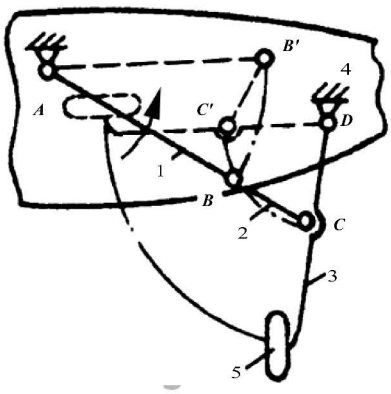


图 2.23　飞机起落架

2. 铰接四杆机构具有曲柄的条件

如前所述，铰接四杆机构中有的连架杆能作整周转动而成为曲柄，有的则不能，其原因是与各杆长度有关。下面分析一下铰接四杆机构中各杆的长度应满足什么条件才能具有曲柄。

在图 2.24 所示的铰接四杆机构中：AB 为曲柄，CD 为摇杆，AD 为机架，各杆长度分别为 a、b、c、d。由于 AB 为曲柄，因此可作出其作整周转动时，两次与连杆共线的位置，如图中 AB_1C_1D 和 AB_2C_2D 所示。当曲柄与连杆处于重叠而成共线的位置时，构成

$\triangle AC_1D$；而当曲柄与连杆处于相延长成共线的位置时，则构成 $\triangle AC_2D$。

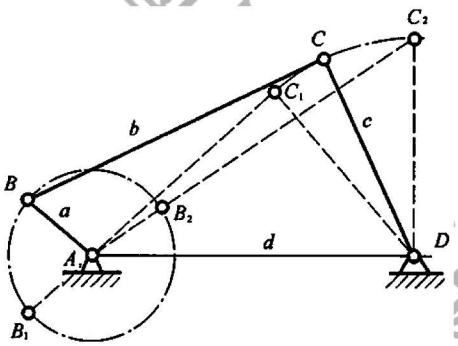


图 2.24　铰链四杆机构有曲柄的条件

根据三角形任意两边之和必大于第三边，因此由 $\triangle AC_1D$ 得：

$$c < (b - a) + d$$

$$d < (b - a) + c$$

移项得：

$$a + c < b + d$$

$$a + d < b + c$$

由 $\triangle AC_2D$ 得：

$$a + b < c + d$$

由于 $\triangle AC_1D$ 和 $\triangle AC_2D$ 的形状随各杆的相对长度不同而变化，考虑到允许有极限情况，则上面三式应改写为：

$$\left.\begin{aligned} a + c &\leqslant b + d \\ a + d &\leqslant b + c \\ a + b &\leqslant c + d \end{aligned}\right\} \tag{2-2}$$

将上述式（2-2）中，每两式相加并化简，可得

$$\left.\begin{aligned} a &\leqslant c \\ a &\leqslant b \\ a &\leqslant d \end{aligned}\right\} \tag{2-3}$$

由式（2-2）可知，最短杆 AB 与任一杆长度之和总是小于或等于其余两杆长度之和；又由式（2-3）可知，欲使连架杆 AB 成为曲柄，则连架杆 AB 应为最短杆。所以，铰接四杆机构有一个曲柄的条件是：

（1）曲柄为最短杆；

（2）最短杆与最长杆长度之和应小于或等于其余两杆长度之和。

中国民航出版社有限公司版权所有

根据曲柄存在条件还可作出以下推论：

（1）若最短杆与最长杆长度之和小于或等于其余两杆长度之和，则取最短杆为连架杆时，得曲柄摇杆机构；取最短杆为连杆时，得双摇杆机构；取最短杆为机架时，得双曲柄机构。对于图 2.19 所示的平行四边形机构，则无论取何杆为机架，均可得双曲柄机构。

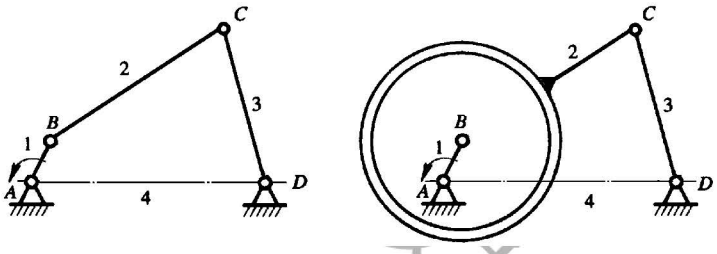
（2）最短杆与最长杆长度之和大于其余两杆长度之和，则无论取何杆为机架均无曲柄，因而只能得到双摇杆机构。

3. 铰接四杆机构的演化

以上介绍了铰接四杆机构的三种基本形式，根据实际工程中的需要，还可以通过改变铰接四杆机构中杆的长度、取不同杆为机架、改变运动副尺寸及类型等方式将其演化成其他形式的四杆机构。

1）扩大转动副演化为偏心轮

在图 2.25（a）所示的曲柄摇杆机构中，若将转动副 B 的销轴尺寸扩大，使其半径超过曲柄 AB 的长度，则如图 2.25（b）所示。



（a）　　（b）

图 2.25　曲柄摇杆机构演化成偏心轮机构

此时，曲柄 AB 变成一个几何中心为 B 的圆盘，仍然绕着 A 转动。虽然结构外形改变了，但由于 AB 长度未变，点 B 的运动轨迹仍是以 A 点为圆心、以 AB 为半径的圆。因此，各构件间的相对运动关系均未改变，演化后的机构为偏心轮机构。点 B 到点 A 的距离 e 称为偏心距，它等于曲柄长度 AB 。偏心轮机构是曲柄做成偏心轮形状的平面四杆机构。当曲柄 AB 长度较小时，能使得曲柄销承受较大的冲击载荷。

2）转动副转化成移动副

如图 2.26（a）所示的曲柄摇杆机构，因为摇杆 3 上 C 点的运动轨迹是以 D 点为圆心、以摇杆的长度为半径所作的圆弧，所以，图 2.26（a）所示曲柄摇杆机构也可做成图 2.26（b）所示的形式，即在机架上作出弧形槽，而把构件 3 作成弧形滑块与弧形槽密切配合。这样，图 2.26（a）和（b）所示机构，虽然转动副的形状不同，但机构运动的特性却完全相同。

又若将图 2.26（b）中的弧形槽的半径增加至无穷大，转动副 D 的中心移至无穷远

处，则弧形槽变成了直槽，而转动副也就转化成移动副，构件 3 由摇杆变成了滑块。此时，曲柄摇杆机构即演化成了曲柄滑块机构，如图 2.26（c）所示。图中 e 为铰链中心 A 至铰链中心 C 的轨迹线的垂直距离，称为偏距。$e \neq 0$ 的曲柄滑块机构称为偏置曲柄滑块机构，$e = 0$ 的曲柄滑块机构称为对心曲柄滑块机构，如图 2.26（d）所示。

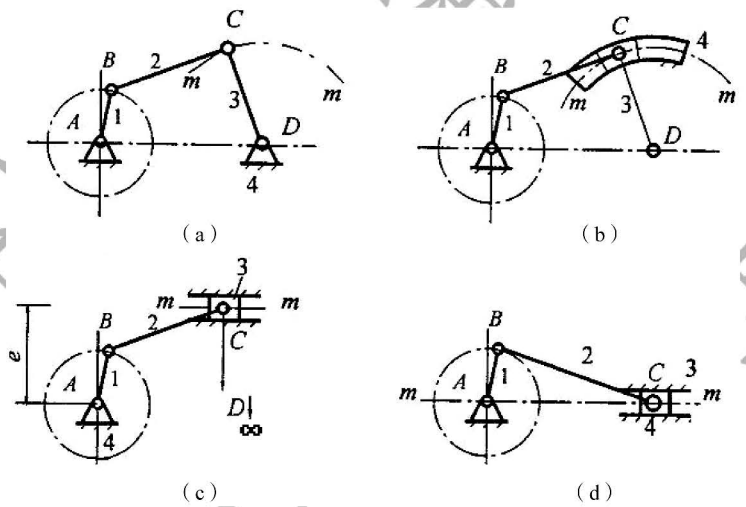


图 2.26　曲柄摇杆机构的演化

3）取不同构件作为机架

图 2.27（a）所示为曲柄滑块机构。若取其不同的构件为机架则可演化为不同形式的机构。

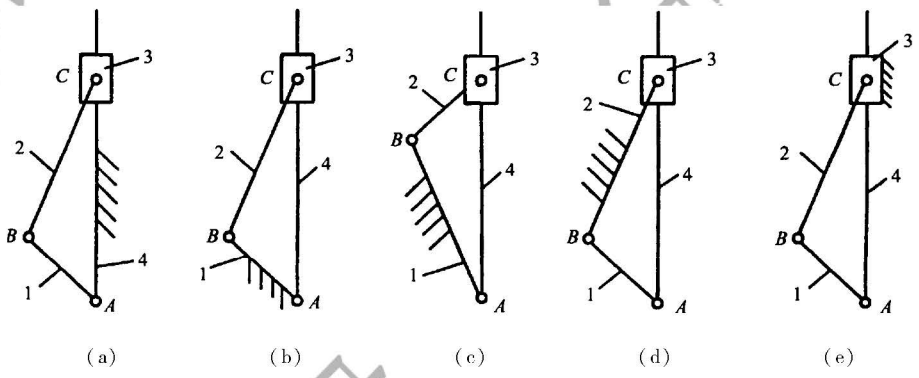


图 2.27　取不同构件为机架可得不同的机构

若取杆 1 为机架，根据杆 1 与杆 2 的长短不同，可分为转动导杆机构和摆动导杆机构。当杆 1 短于杆 2 时，则杆 2 作整周回转时，杆 4 也作整周回转，得到转动导杆机构，如图 2.27（b）所示。

当杆 1 长于杆 2 时，则杆 2 作整周回转时，杆 4 只能作往复摆动，从而得到摆动导杆机构，如图 2.27（c）所示。

若取杆 2 为机架，则杆 1 为曲柄，滑块 3 只能绕 C 点摆动而成为摇块，所以把它称为曲柄摇块机构，如图 2.27（d）所示。

若取滑块 3 为机架，则因杆 4 在滑块 3 中作往复移动，而得到移动导杆机构，如图 2.27（e）所示。

2.3.2 平面四杆机构的传动特性

1. 急回特性

在图 2.28 所示的曲柄摇杆机构中，当曲柄为原动件作等速回转时，摇杆 CD 为从动件作往复变速摆动。曲柄 AB 在回转一周的过程中有两次与连杆 BC 共线，摇杆 CD 分别处于极限位置 C_1D 和 C_2D。摇杆在极限位置的夹角 φ 称为摇杆的摆角。摇杆在两极限位置时，曲柄两位置间所夹的锐角 θ 称为极位夹角。当曲柄由 AB_1 顺时针转过 $\varphi_1 = 180° + \theta$ 到达 AB_2 时，摆杆由 C_1D 摆至 C_2D，经历的时间为 t_1，C 点的平均速度 $v_1 = \overset{\frown}{C_1C_2}/t_1$。曲柄再由 AB_2 转过 $\varphi_2 = 180° - \theta$ 回到 AB_1 时，摇杆自 C_2D 摆回至 C_1D，经历的时间为 t_2，C 点的平均速度 $v_2 = \overset{\frown}{C_2C_1}/t_2$。因为曲柄作匀速转动，其经历的时间与相应的转角成正比，所以 $\varphi_1 > \varphi_2$，$t_1 > t_2$，$v_2 > v_1$。摇杆摆回速度比摆去速度快的性质，称为急回特性。v_2 与 v_1 的比值，称为从动件的行程速比系数，以 k 表示。即

$$k = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\overset{\frown}{C_2C_1}/t_2}{\overset{\frown}{C_1C_2}/t_1} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{180° + \theta}{180° - \theta} \tag{2-4}$$

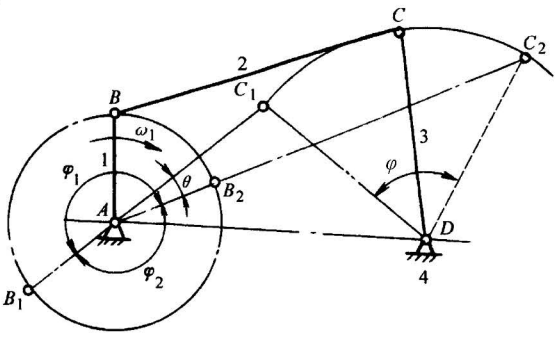


图 2.28　曲柄摇杆机构具有急回特性

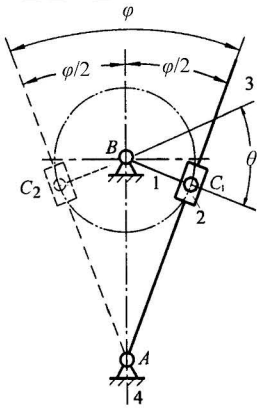


图 2.29　摆动导杆机构具有急回特性

k 的大小表示急回程度。k 愈大，机构急回特性愈明显。由式（2-4）可以看出，k 值大小取决于 θ 的大小。θ 愈大，k 愈大；反之，k 愈小；若 θ 为零，则机构没有急回特性。将式（2-4）整理后可得：

$$\theta = 180° \frac{k-1}{k+1} \tag{2-5}$$

设计机构时通常给定 k 值，算出 θ 角作为已知条件。一般 $k \leqslant 2$，θ 常为锐角。导杆机构、偏置曲柄滑块机构及双曲柄机构也具有急回特性。如图 2.29 所示，摆动导杆机构具有急回特性。

2. 压力角和传动角

平面连杆机构，不仅要保证实现预定的运动规律，而且希望传力性能好，效率高。图 2.30 所示为曲柄摇杆机构，若忽略各杆的质量和运动副中的摩擦影响，原动曲柄 1 通过连杆 2 作用在从动摇杆 3 上的力 F 是沿 BC 方向的。从动件所受力 F 与受力点速度 v_c 之间所夹的锐角 α 称为压力角。

将力 F 分解成沿速度 v_c 方向的分力 F_t 和垂直于 v_c 的分力 F_n。$F_t = F\cos\alpha$ 是推动摇杆绕 D 点转动的有效分力。压力角愈小，有效分力 F_t 就愈大。所以，判断连杆机构是否有良好的传力性能，可用压力角作为标志。为了度量方便，通常以压力角的余角 γ（即连杆与从动杆之间所夹的锐角）判断连杆机构的传力性能好坏。γ 称为传动角，因 $\gamma = 90° - \alpha$，故 α 愈小，γ 就愈大，则机构传力性能愈好；当 α 过大时，机构就不能传动。

机构运转过程中，传动角是变化的，为了保证机构能正常工作，通常取最小传动角 $\gamma_{min} \geqslant 40°$，传动功率大时，要取 $\gamma_{min} \geqslant 50°$。在一些控制机构、仪表机构中，$\gamma_{min}$ 也可以小于 40°。一般机构最小传动角出现在曲柄与机架共线的两个位置之中的一个位置。

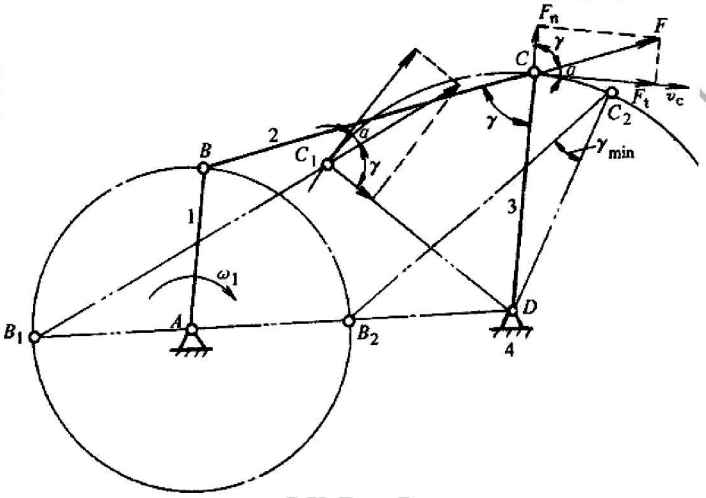


图 2.30　四杆机构的压力角和传动角

3. 死点

在图 2.28 所示的曲柄摇杆机构中，若取摇杆为原动件，曲柄为从动件，当摇杆摆到极限位置时，杆与曲柄共线，经过连杆传给曲柄的力，将通过铰链 A 的中心，因而不能使曲柄转动，整个机构处于静止状态。机构的这种位置称为死点。机构有死点，将使机构从动件出现卡死或运动不确定的现象，这对机构传动是不利的。为了消除死点的不利影响，可利用构件自身及飞轮的惯性使机构顺利通过死点；也可以采用两组机构错位排列的办法，使两机构不在同一死点位置。例如蒸汽机车的驱动机构，左右两侧机构曲柄位置相错 90°，如图 2.31 所示。

工程上也利用机构死点进行工作，如图 2.32 所示夹具。当工件被夹紧后，连杆 BC 与摇杆 CD 成一直线，机构处于死点。此时，无论工件反作用力 N 多大，都不能使摇杆转动。这是因为通过连杆 BC 传给摇杆 CD 的力通过回转中心 D 点。因此，当外力 F 去掉后，仍能夹紧工件。若要松开工件，则需给手柄向上的外力 F 。

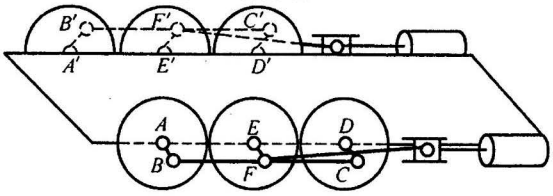


图 2.31　蒸汽机车车轮联动机构的错位排列

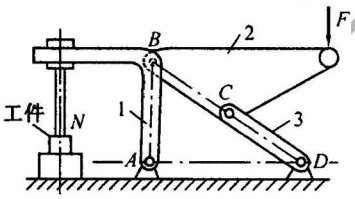


图 2.32　夹紧机构

知识总结	随堂练习

2.4　凸轮机构

2.4.1　概述

凸轮机构（Cam Mechanism）是由凸轮、从动件和机架三个基本构件所组成的高副机

构，如图 2.33 所示。

凸轮是一个具有曲线轮廓或凹槽的构件。凸轮通常作等速运动，也有作往复摆动或往复移动的。被凸轮直接推动的构件称为从动件。当凸轮运动时，通过其曲线轮廓与从动件高副接触，可以使从动件获得连续或不连续的任意预期的运动。

凸轮机构的最大优点是：只要适当地设计出凸轮的轮廓，就可以使从动件得到各种预期的运动规律，而且机构简单紧凑。所以在各种自动化机械、仪表、自动控制装置和飞机操纵系统中，凸轮机构得以广泛应用。

凸轮机构的缺点是凸轮轮廓与从动件之间为点或线接触，易于磨损，所以凸轮机构多用在传递动力不大的场合。

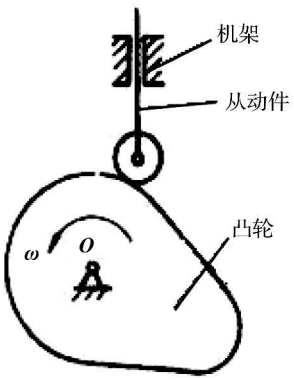


图 2.33　凸轮机构

2.4.2　凸轮机构的分类

凸轮机构的类型繁多，通常分类如下。

1. 按凸轮的形状分

1）盘形凸轮

盘形凸轮是一个具有变化半径的盘形构件，如图 2.34 中的件 1 所示。当凸轮绕固定轴线转动时，可推动从动件移动或摆动。盘形凸轮是凸轮的最基本形式。

盘形凸轮机构的结构比较简单，应用也广泛，但从动件的行程不能太大，否则将使凸轮的径向尺寸变化过大，对工作不利。所以，盘形凸轮机构多用在行程较短的传动中。

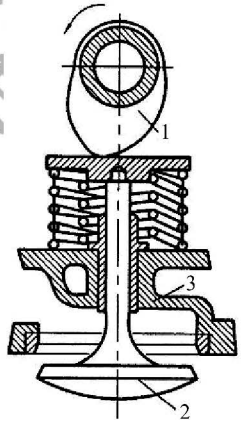


图 2.34　内燃机配气机构

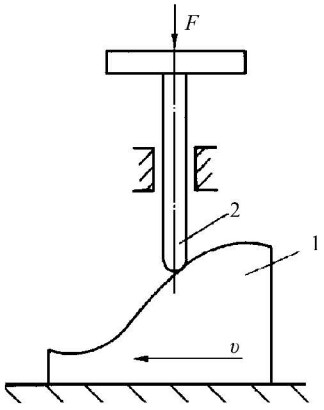


图 2.35　移动凸轮

2）移动凸轮

当盘形凸轮的回转中心趋于无穷远时，凸轮相对机架作直线运动，这种凸轮称为移动凸轮，如图 2.35 所示。当移动凸轮作直线往复运动时，将推动从动件在同一平面内作往复运动。有时也可以将凸轮固定，而从动件相对凸轮运动，如图 2.36 所示为靠模成型切削。图中凸轮 1 作为靠模被固定，当拖板 3 纵向移动时，凸轮的曲线轮廓迫使滚子从动件 2 带动刀架进退，从而切削出工件的复杂外形。

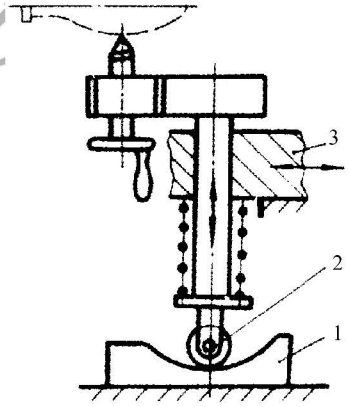


图 2.36　靠模成型切削

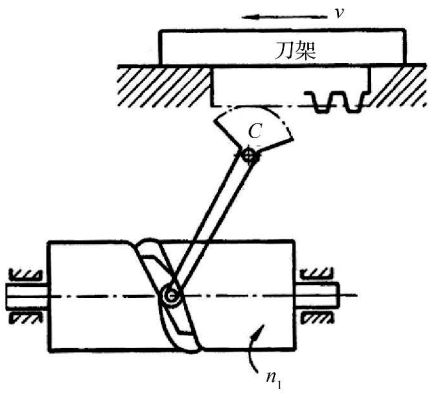


图 2.37　圆柱凸轮

3）圆柱凸轮

这种凸轮是在圆柱体的表面上加工出一定轮廓的凹槽，如图 2.37 所示。它可用于行程较大的传动中。

盘形凸轮和移动凸轮与从动件之间的相对运动为平面运动，所以它们属于平面凸轮机构；而圆柱凸轮与从动件之间的相对运动为空间运动，则它们属于空间凸轮机构。

2. 按从动件的形式分

1）尖顶从动件

如图 2.38（a）、（b）所示，这种从动件的尖顶能与复杂的凸轮轮廓保持接触，因而能实现任意预期的运动规律。但尖顶与凸轮是点接触滑动摩擦，磨损快，所以只适用于受力不大的低速凸轮机构。

2）滚子从动件

如图 2.38（c）、（d）所示，为了克服尖顶从动件的缺点，在从动件尖顶处装一个滚子，即成为滚子从动件。滚子与凸轮是线接触，并可以采用滚动轴承，因而耐磨损，可以承受大的载荷，所以是从动件最常用的一种形式。

3）平底从动件

如图 2.38（e）、（f）所示，这种从动件的底平面与凸轮之间易形成楔形油膜，故常

用于高速凸轮机构中。但不能用于凸轮轮廓呈凹形的场合。

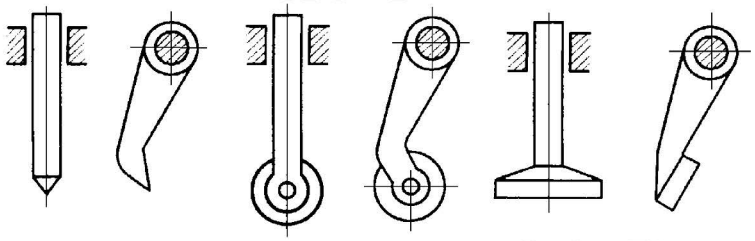


图 2.38　从动件分类

3. 按锁合方式分

为了使凸轮机构正常工作，必须使从动件与凸轮始终维持高副接触，称为锁合。锁合方式有以下两种：

(1) 外力锁合。利用从动件的重量、弹簧力或其他外力使从动件与凸轮保持接触。

(2) 几何锁合。依靠凸轮和从动件的特殊几何形状而始终维持接触，如图 2.39 所示。

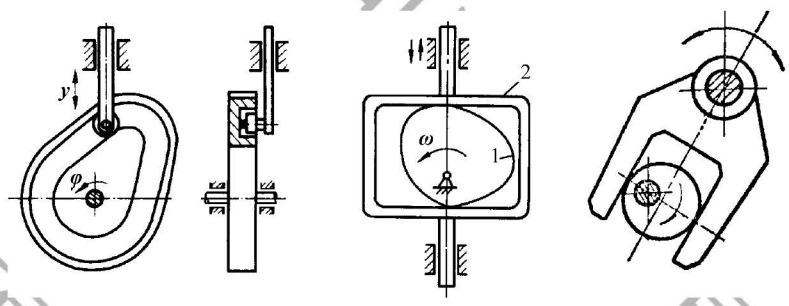


图 2.39　几何锁合式凸轮

2.4.3　凸轮机构的应用

在各种机械中，为了实现复杂的运动要求，广泛地应用凸轮机构。

图 2.34 所示为内燃机配气机构中的凸轮机构，当半径变化的凸轮轮廓与气阀平底接触时，气阀产生往复运动；而当半径不变的凸轮轮廓与气阀平底接触时，气阀静止不动。因此，凸轮 1 连续转动时，气阀 2 可获得间歇运动。而气阀的运动规律，则完全取决于凸轮轮廓的形状。

图 2.40 为三叉戟飞机襟翼操纵器中的活门操纵机构。当输入摇臂操纵槽形凸轮转动，

中国民航出版社有限公司版权所有

凸轮随动摇臂上的凸轮滚子在槽中向上或向下滚到两个半径不同的弧形槽上时，就使凸轮随动摇臂发生转动，从而操纵继动活门运动，打开液压马达的收上或放下襟翼的油路从而操纵襟翼。

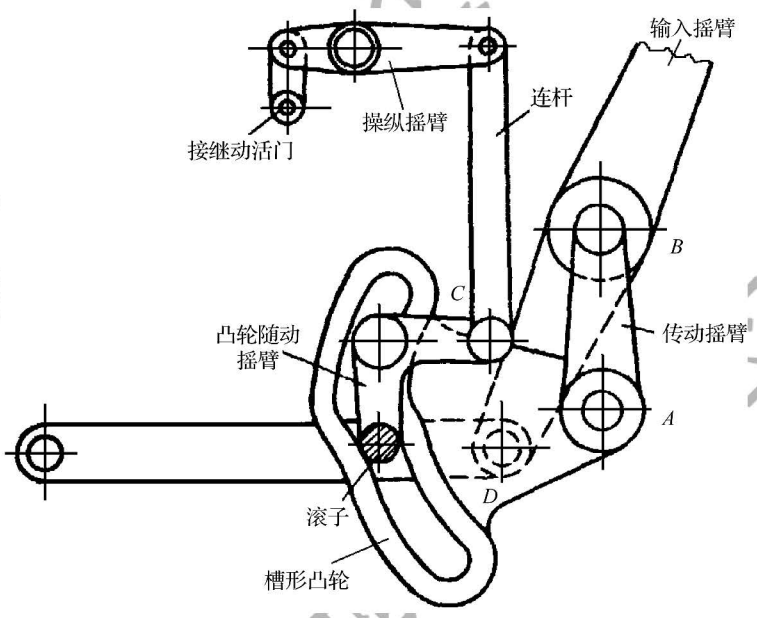


图 2.40　三叉戟飞机襟翼操纵中凸轮机构的应用

知识总结	随堂练习

2.5　间歇运动机构

在许多机械中，机器的动力部分或原动件一般都是作连续运动的，而工作部分或从动件往往需要作周期性的时动时停的间歇运动。能够把连续运动转变为间歇运动的机构，称

为间歇运动机构。间歇运动机构的类型很多，本节只介绍最常用的棘轮机构和槽轮机构的工作原理及应用。

2.5.1　棘轮机构

棘轮机构（Ratchet Mechanism）由棘轮、棘爪和机架组成，如图 2.41 所示。一般棘爪为主动件，棘轮为从动件。当杆 1 和棘爪 3 逆时针方向摆动时，棘爪 3 插入棘轮 2 的齿内推动棘轮转过某一角度。当杆 1 顺时针方向回摆时，棘爪 3 沿棘轮 2 的齿背滑过，此时，棘轮静止不动。棘爪 4 起阻止棘轮 2 顺时针方向转动的作用。所以当主动件杆 1 和棘爪 3 作连续的往复摆动时，棘轮 2 作单向的间歇运动。

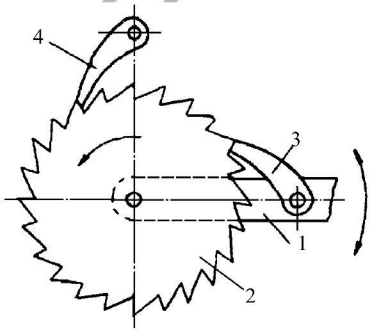


图 2.41　棘轮机构

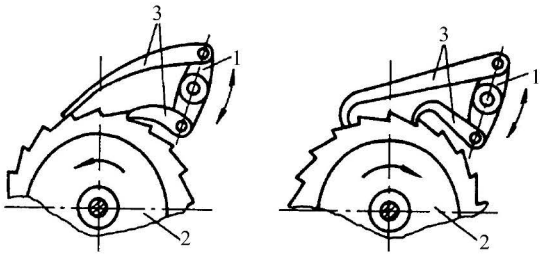


图 2.42　双动式棘轮机构

图 2.42 为双动式棘轮机构。主动件 1 往复摆动时，棘轮 2 朝同一方向转动。不过每次停歇时间很短，棘轮每次的转角也较小。棘爪 3 可以做成直的或者带钩的，如图 2.42（a）、（b）所示。

图 2.43 为一种可变向棘轮机构。当棘爪 3 在实线位置时，棘轮 2 沿逆时针方向作间歇运动；当棘爪 3 翻转到虚线位置时，棘轮沿顺时针方向作间歇运动。

图 2.44 为另一种可变向棘轮机构。当棘爪 2 在图示位置时，棘轮 1 沿逆时针方向作间歇运动；若将棘爪提起并绕本身轴线转 180°后再插入棘轮齿中，则使棘轮沿顺时针方向作间歇运动。

棘轮机构结构简单，制造方便，运转可靠，但传动的平稳性较差，故常用于低速、轻载且间歇转角不大的场合，如机械上的自动进给和自动送料等。在起重机设备中可用棘轮机构阻止鼓轮反转，如图 2.45 所示，鼓轮 1 和棘轮 2 固定在同一根轴上，棘爪 3 阻止棘轮反转。

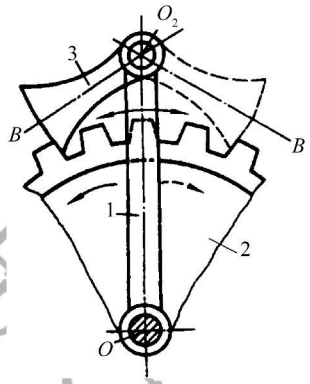


图 2.43　可变向棘轮机构

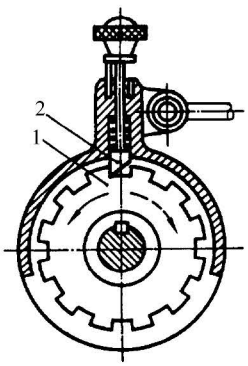


图 2.44　可变向棘轮机构

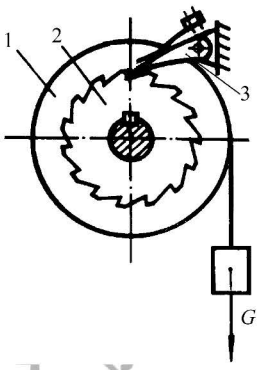
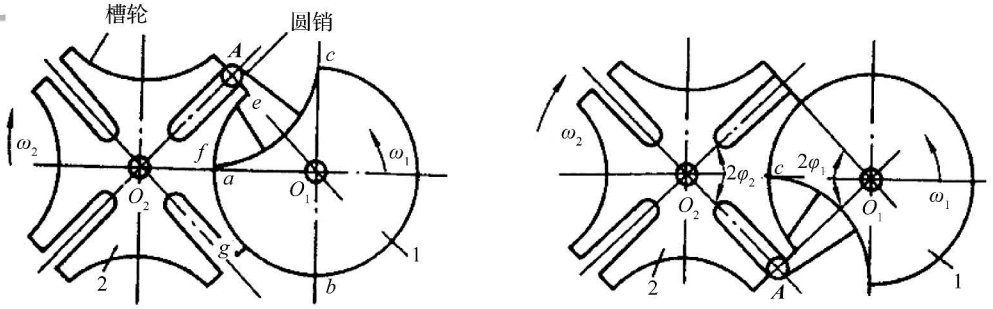


图 2.45　用棘轮机构阻止逆转

2.5.2　槽轮机构

槽轮机构（Geneva Mechanism）由带圆销 A 的曲柄 1、具有径向槽的槽轮 2 和机架组成，如图 2.46 所示。曲柄 1 为主动件，作匀速连续转动。在曲柄上的圆销 A 未进入槽轮的径向槽时，槽轮的内凹弧 efg（内锁住弧）被曲柄的外凸圆弧 abc（外锁住弧）卡住，槽轮静止不动。如图 2.46（a）所示，当圆销 A 开始进入槽轮的径向槽时，锁住弧被松开，槽轮被圆销 A 带动沿顺时针方向转动。如图 2.46（b）所示，当圆销 A 从槽轮的径向槽脱出时，槽轮的另一内锁住弧又被曲柄的外锁住弧卡住，不能转动。直到圆销 A 再进入槽轮的另一径向槽时，槽轮才又开始转动，这样就将曲柄 1 的连续转动变换为槽轮的间歇运动。



（a）　　（b）

图 2.46　槽轮机构

槽轮机构结构简单，机械效率高，能较平稳地进行转位，所以在自动机构中应用甚广。槽轮机构的缺点是在运动过程中的加速度变化较大，冲击较严重，运转中有较大动载

荷，特别是槽数少时更为严重。所以槽轮机构不宜用在高速转位的场合。通常取槽轮的槽数 $Z = 4 \sim 8$。

知识总结	随堂练习

2.6　常用机构在飞机中的应用

2.6.1　连杆机构在飞机起落架中的应用

飞机起落架用于在地面停放及滑行时支撑飞机，使飞机在地面上灵活运动，并吸收飞机运动时产生的撞击载荷，而当飞机处于空中时为减小飞行阻力，通常需要将起落架折叠收起。波音 737 飞机主起落架的收放机构主要由减震支柱、阻力杆、侧撑杆、反作用连杆、游动梁以及主起落架收放作动筒构成。波音 737 主起落架结构如图 2.47 所示，图示主起落架处于放下锁好状态。

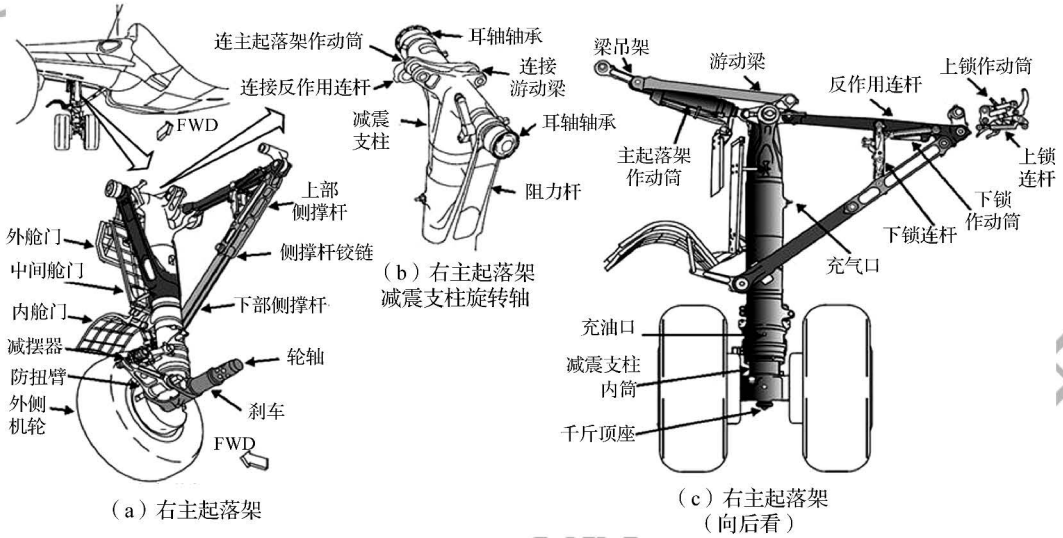


图 2.47　波音 737 主起落架结构

将主起落架收放机构绘制成平面连杆机构运动简图，如图 2.48 所示。在主起落架放下状态的简化机构中，如图 2.48（a）所示，C 和 I 处是 3 个构件相铰接的复合铰链，则 $n=9$，$P_L=13$，$P_H=0$，因此，自由度为：

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 9-2\times 13=1$$

当起落架完成解锁后，仅由主起落架收放作动筒驱动主起落架收放机构，机构原动件数等于机构自由度，机构具有确定运动，如图 2.48（b）所示。

（a）　　（b）

图 2.48　波音 737 主起落架收放机构运动简图

当主起落架处于放下锁好状态，如图 2.48（a）所示，此时上部侧撑杆 CF 杆、下部侧撑杆 BC 杆成一条直线，下锁连杆 CD 与 DE 也成一条直线，利用连杆机构的死点保持起落架处于放下锁定状态。收起落架时，如图 2.48（b）所示，由下锁作动筒伸出带动下锁连杆发生折叠，带动侧撑杆相互折叠，解除锁定状态，再由主起落架收放作动筒伸出，带动主起落架减振支柱旋转收上，由收上锁锁钩将锁滚轮勾住锁定。

2.6.2　凸轮机构在飞机操纵系统中的应用

副翼感觉定中和配平机构接受副翼钢索传给副翼操纵扇形盘的输入信号，并控制副翼动力控制单元（PCU）。当驾驶员操纵副翼时，感觉定中组件给驾驶员提供感觉力。当驾驶员松开驾驶盘时，感觉定中组件将驾驶盘拉回并保持在中立位置。当驾驶员进行副翼配平操作，副翼配平作动筒有输出时，感觉定中组件改变副翼和驾驶盘的中立位置，也就是改变整个副翼系统的中立位，实现配平操纵。

感觉定中组件安装于主起落架舱内的副翼操纵扇形盘组件上，在副翼输入轴的底部，副翼配平作动筒安装在副翼感觉定中组件上。如图 2.49 所示，副翼感觉定中组件由两个定中弹簧、一个定中凸轮和一个滚轮组成。定中凸轮由螺栓连接在输入轴上，滚轮通过滚轮臂连接在支撑结构上，两个弹簧连接在有支撑的滚轮臂上。定中弹簧保持滚轮压在定中凸轮的中

央。当驾驶盘转动时，凸轮随输入轴转动，无论往哪个方向操纵副翼，凸轮都要推开滚轮，定中弹簧被拉伸，使定中弹簧拉伸的作用力，就是需要施加到驾驶盘上的操纵感觉力。

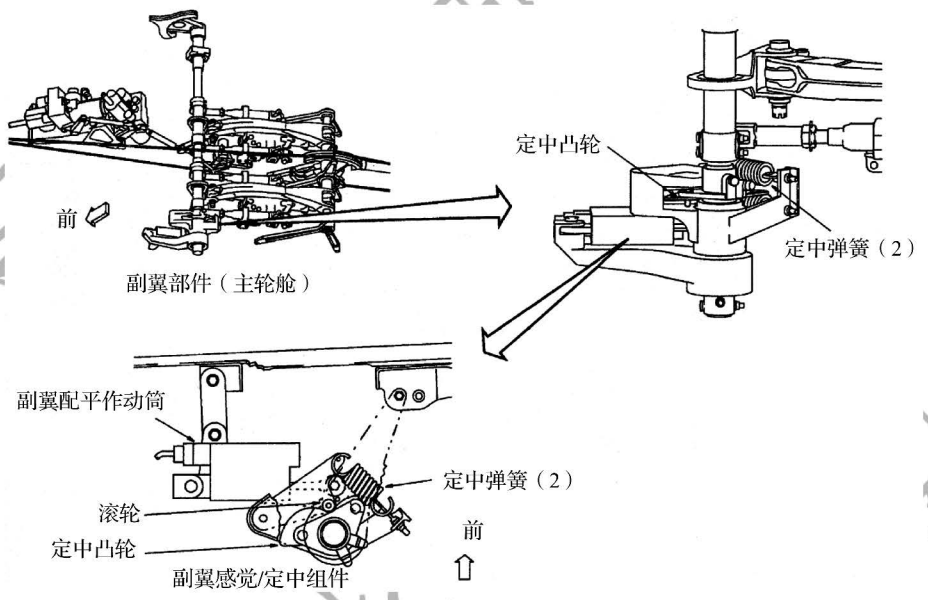


图 2.49　波音 737 副翼感觉定中和配平机构

当驾驶员松开驾驶盘，操纵力消失，定中弹簧拉动滚轮臂，使滚轮向定中凸轮的中央位置移动，迫使定中凸轮回转，当滚轮回到定中凸轮的最低点时，整个副翼系统也回到中立位。

知识总结	随堂练习

复习思考题

1. 什么叫运动副？什么叫低副？什么叫高副？通常使用的平面运动副有哪些？

2. 什么叫自由度？作平面运动的自由构件有几个自由度？

3. 什么叫机构运动简图？如何绘制机构运动简图？机构运动简图有什么用处？

4. 试写出平面机构自由度计算公式。计算时应注意哪些问题？

5. 何谓复合铰链、局部自由度和虚约束？计算机构自由度时如何处理它们？

6. 组成机构的必要条件是什么？

7. 铰接四杆机构的基本形式有哪几种？它们的运动特性是什么？

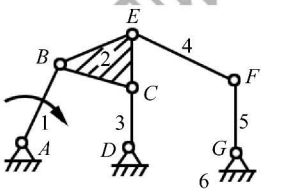
8. 铰接四杆机构曲柄存在条件是什么？

9. 何谓行程速比系数和极位夹角？两者之间有何关系？试说明 $k=1$ 和 $k>1$ 的含义。

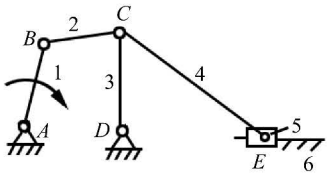
10. 何谓连杆机构的压力角和传动角？为何要限制最小传动角？

11. 何谓机构死点？如何使机构顺利通过死点？

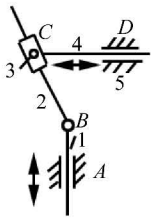
12. 试计算题 12 图示机构的自由度，如有复合铰链、局部自由度或虚约束，要逐一指出。



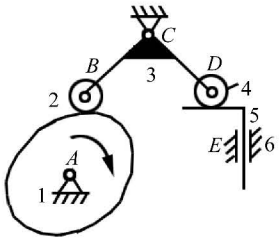
(a)



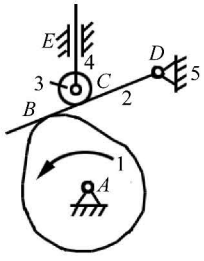
(b)



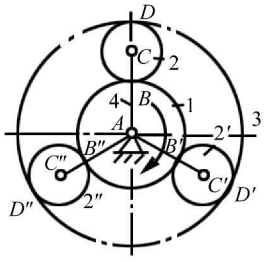
(c)



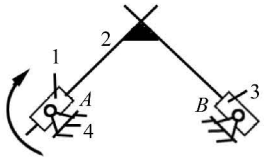
(d)



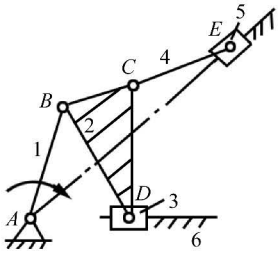
(e)



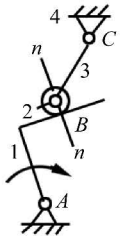
(f)



(g)



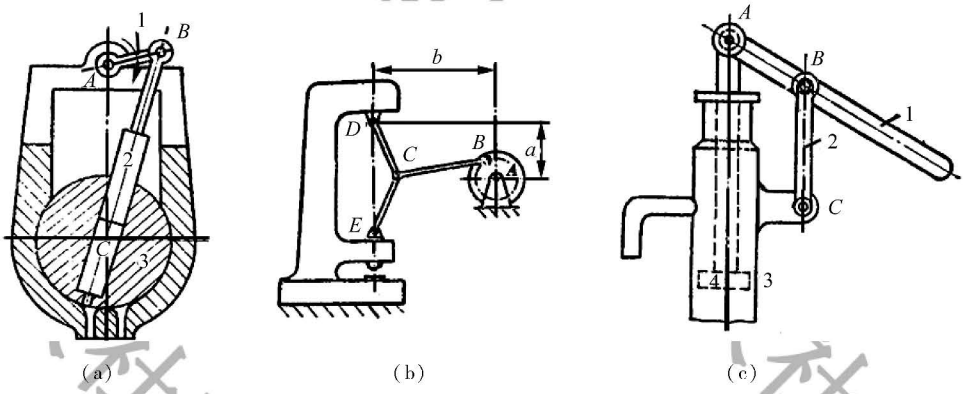
(h)



(i)

题 12 图

13. 试绘制题 13 图所示机构的运动简图并计算其自由度。

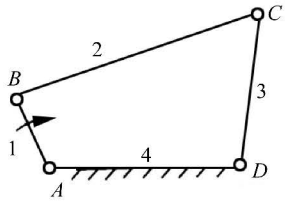


(a)　(b)　(c)

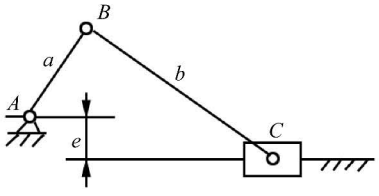
题 13 图

14. 已知四杆机构各杆长度为 $L_1=240$ mm，$L_2=600$ mm，$L_3=400$ mm，$L_4=500$ mm，试问：(1) 当取杆 AD 为机架时是否有曲柄存在？(2) 若各杆长度不变，能否以选不同杆为机架的办法获得双曲柄和双摇杆机构？如何获得（见题 14 图）？

15. 题 15 图示为一偏置曲柄滑块机构，试求以 AB 为曲柄的条件。当偏距 $e=0$ 时，AB 为曲柄的条件又如何？

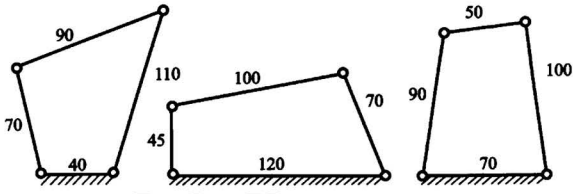


题 14 图



题 15 图

16. 试根据题 16 图中所注明的尺寸判别各铰接四杆机构的类型。

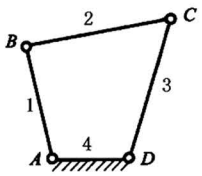


(a)　(b)　(c)

题 16 图

17. 试在题 15 图中标出滑块 C 点的压力角和传动角。

18. 在题 18 图所示的四杆机构中，已知 $L_1 = 70$ mm，$L_2 = 90$ mm，$L_4 = 40$ mm，且 AD 为机架，若机构为双曲柄机构，求 L_3 的数值。



题 18 图

19. 凸轮的形式有几种？盘形凸轮如何演变成移动凸轮？

20. 试比较尖顶、滚子和平底从动件的优缺点，并说明它们适用的场合。

21. 凸轮机构有何优缺点？它常适用于何种场合？

22. 何谓间歇运动机构？

23. 棘轮机构的工作原理是什么？有哪些特点？

24. 槽轮机构的工作原理是什么？有哪些特点？

25. 棘轮机构和槽轮机构常应用于什么场合？

中国民航出版社有限公司版权所有

第 3 章　机械传动

学习要求：

- 掌握带传动的组成、工作原理和工作特性；
- 熟悉齿轮传动的组成、传动类型和各类齿轮的构造；掌握齿廓啮合基本定律和渐开线齿轮正确啮合及连续传动条件；熟悉各类齿轮传动的特点，了解齿轮的加工、变位和齿轮的失效及检测；
- 熟悉蜗杆传动的组成、特点、传动比的计算和蜗杆传动的正确啮合条件及旋向的判定；
- 熟悉轮系功用和分类，掌握各类轮系传动比的计算；
- 了解螺旋传动的类型及应用；熟悉钢索传动和传动杆传动的组成、特点和应用。

第 3 章　课程导学	

机械中只有水泵、轴流式鼓风机和电风扇等少数几种机器是将原动机与工作机直接连接在一起的。绝大多数机械是在原动机与工作机之间装有一套传动装置以满足工作的需要。将能量由原动机传递到工作机的一套装置称为传动装置，也简称为传动。

采用传动装置的主要原因有以下几点：

（1）工作机的工作机构所需要的速度常常与原动机的输出速度不一致；

（2）工作机的工作机构的速度经常需要变换，而直接通过变换原动机的速度不经济，甚至不可能；

（3）工作机的工作机构在工作时常要改变运动形式，如匀速、变速、停车、顺转、逆转及转动与移动变换等。

在现代工业中，主要应用以下 4 种传动方式：

中国民航出版社有限公司版权所有

（1）机械传动（Mechanical Transmission）。采用带轮、轴、齿轮等机械零件组成的传动装置来进行能量的传递。

（2）液压传动（Hydraulic Transmission）。采用液压元件，利用液体作为工作介质，以其压力进行能量传递。

（3）气压传动（Pneumatic Drive）。采用气压元件，利用气体作为工作介质，以其压力进行能量传递。

（4）电气传动（Electric Drive）。采用电力设备和电气元件，利用调整其电参数（电压、电流和电阻），来实现能量的传递。

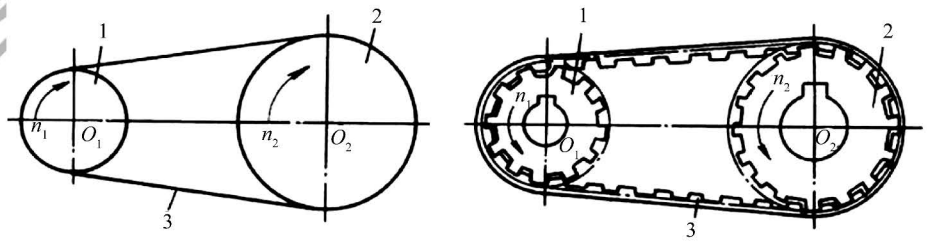
根据某种机械的具体情况可用上述其中一种传动方式，也可2种、3种或4种综合使用或分别使用。例如，飞机就应用了上述4种传动方式。目前，还是机械传动应用得最多、最普遍。限于专业的原因本章只介绍机械传动。

机械传动可按传递力的方法分为摩擦传动和啮合传动两大类。摩擦传动又分为摩擦轮传动和皮带传动两种。啮合传动又分为齿轮传动、螺旋传动和链传动3种。

3.1 带传动

3.1.1 概述

带传动（Belt Drive）主要由主动带轮1、从动带轮2和传动带3组成，如图3.1所示。工作时利用张紧在带轮上的传动带，借助带与带轮间的摩擦或者啮合来实现主动轮与从动轮之间的运动和动力的传递。



（a）摩擦式　　（b）啮合式

图3.1　带传动的组成

1. 带传动的主要类型

1）按传动原理分

（1）摩擦带传动：靠传动带与带轮之间的摩擦力实现传动，如V带传动、平带传

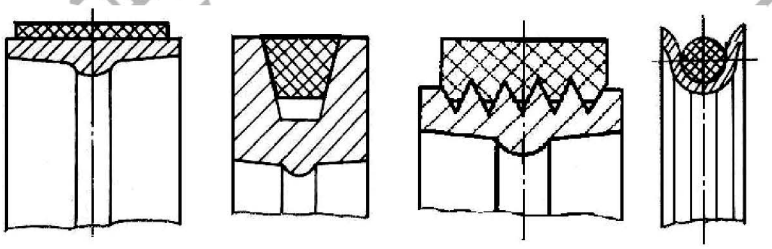
动等。

（2）啮合带传动：靠传动带内侧凸齿与带轮外缘上的齿槽相啮合实现传动，如同步带传动，如图 3.1（b）所示。同步带传动除保持了摩擦带传动的优点外，还具有传递功率大、传动比恒定、传动效率高和结构紧凑等优点。同步带传动主要应用于要求传动平稳、传动精度较高的场合，如数控机床、纺织机械等。

2）按传动带的截面形状分

（1）平带传动：其带的横剖面为矩形，内表面为工作面，如图 3.2（a）所示。平带传动结构简单，带轮也容易制造，多用于中心距较大的传动。常用的平带有橡胶布带、皮革带、棉织带等，其中以橡胶布带应用最广。

（2）V 带传动：其带的横剖面为梯形，两侧面为工作面，如图 3.2（b）所示。由于在张紧力和摩擦系数相同的条件下，V 带比平带传动能产生更大的摩擦力以及增加 V 带的根数可增加传递的功率，所以在机械传动中主要采用 V 带传动。



（a）平带　（b）V 带　（c）多楔带　（d）圆形带

图 3.2　传动带的截面形状

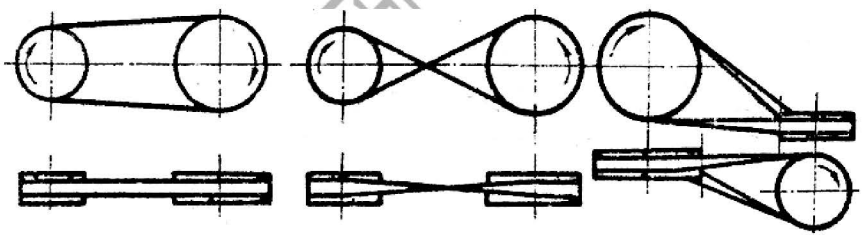
（3）多楔带传动：多楔带相当于平带与多根 V 带的组合，如图 3.2（c）所示。多楔带同时兼有平带与 V 带的优点，多用于结构要求紧凑的大功率传动中。

（4）圆形带传动：其带的横剖面为圆形，如图 3.2（d）所示。圆形带只用于功率很小的场合，如缝纫机上用的传动带。

2. 带传动的传动方式

常见的带传动的传动方式有三种：开口传动、交叉传动和半交叉传动，如图 3.3 所示。这三种传动方式在平带传动中都适用。对于 V 带和同步带，一般只适用于开口传动。

开口传动用于两轴平行、两轮向同一方向转动的场合，如图 3.3（a）所示。交叉传动用于两轴平行、两轮向相反方向转动的场合，如图 3.3（b）所示，这种传动，传动带的紧边和松边在交叉处有摩擦，故易磨损。半交叉传动常用于两轴在空间成 90°交叉的场合，如图 3.3（c）所示，这种传动方式只能单向传动，传动带除受拉力外，还受有附加的扭力。



（a）开口传动　　（b）交叉传动　　（c）半交叉传动

图 3.3　平带传动形式

3. 带传动的特点

带传动常用于中心距较大的动力传动。在这种情况下，与其他的机械传动相比，带传动主要具有以下特点：

（1）结构简单、制造和维护方便，成本低；

（2）带具有一定的弹性，可缓和冲击与吸收振动；

（3）当过载时，靠摩擦传动的带会在带轮上打滑，可防止损坏其他零件；

（4）传动结构的外廓尺寸较大；

（5）靠摩擦传动不能保证角速度比不变；

（6）轴及轴承上的受力较大。

带传动主要用于中、小功率（75 kW 以下），高速级传动，传动比不要求准确的机械中。传动带的工作速度一般为 5~30 m/s，高速带可达 60 m/s。平带传动的传动比通常为 3 左右，最大可达 6，有张紧轮可达到 10；V 带传动的传动比一般不超过 7，最大达到 10。V 带传动多采用多根 V 带同时进行连接传动。例如，R22 型直升机上莱康明 O-360 型四缸活塞式发动机就采用两根双 V 带，将发动机转轴的动力传至主齿轮箱和尾桨传动轴。

3.1.2　带传动的工作特性

1. 带传动的受力分析

如图 3.4 所示，静止时，传动带是以一定的初拉力 F_0 紧套在两个带轮上的，故传动带与带轮的接触面上便产生了正压力 N，从而也就产生了摩擦力 F_f。

$$F_f = f \cdot N$$

式中，f 为摩擦系数，对于 V 带传动，用当量摩擦系数 f_v 来代替 f，$f_v = f/\sin(\varphi/2)$（φ 为带轮槽角）。

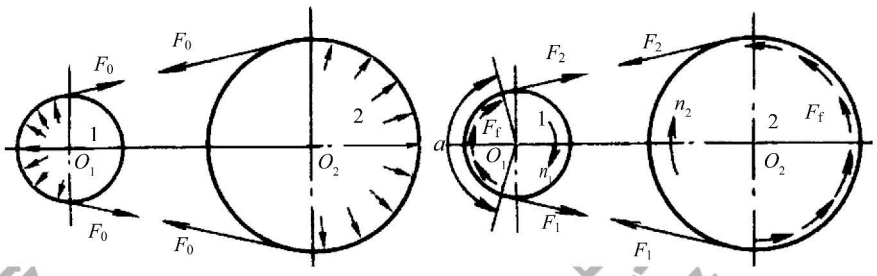


图 3.4　带传动的受力分析

传动带不工作时，传动带两边的拉力相等，即都等于 F_0，如图 3.4（a）所示。

传动带工作时，两边的拉力相应发生变化。传动带进入主动轮的一边被拉紧，称为紧边。紧边拉力由 F_0 增加到 F_1。传动带进入从动轮的一边被放松，称为松边。松边拉力由 F_0 减少到 F_2，如图 3.4（b）所示。带两边的拉力差，即：

$$F = F_1 - F_2 \tag{3-1}$$

式中，F 称为带传动的有效拉力，即带所能传递的有效圆周力，它也等于传动带与带轮接触区域之间摩擦力的总和 ΣF_f。所以式（3-1）又可写成：

$$F = F_1 - F_2 = \Sigma F_f \tag{3-2}$$

由于这个摩擦力 ΣF_f 是由初拉力 F_0 的存在而产生的，故它不仅产生在主动轮与传动带的接触面上，也产生在从动轮与传动带的接触面上。输入主动轮的转矩是通过摩擦力传给传动带，再由传动带通过摩擦力传给从动轮的，故这个关系式对两边带轮都适用。

传动带在静止和传动两种状态下的总长度，可以认为近似相等，则带的紧边拉力的增加量应等于松边拉力的减少量，即：

$$F_1 - F_0 = F_0 - F_2$$

移项得：

$$F_1 + F_2 = 2F_0$$

设主动轮的传递功率为 P（kW）、带速为 V（m/s），则带传递的有效拉力 F（N）也可表示为：

$$F = \frac{1000P}{V} \tag{3-3}$$

当传递功率 P 一定时，有效拉力 F 与带速 V 成反比，所以一般把带传动放在机械传动的高速级，以减小其有效拉力 F。

2. 传动带的弹性滑动和打滑

传动带是弹性体，当传动带受拉时将产生弹性伸长。拉力越大，伸长量就越大。如图3.5所示，传动带在 a_1 点绕上主动轮1时，带速与带轮1的圆周速度 v_1 相当。当传动带随着轮1由点 a_1 转至点 b_1 的过程中，带所受拉力由 F_1 逐渐降至 F_2，它的弹性伸长量亦将逐渐减少，即带要逐渐回缩，带沿带轮1的表面产生向后爬行现象，这种现象称为传动带的弹性滑动。由于弹性滑动，带在 b_1 点处的速度已降为 v_2。同理，带绕过从动轮2的过程中，带的拉力将由 F_2 逐渐增大至 F_1，带在从动轮的表面将产生向前爬行的弹性滑动，带速则由 a_2 点的 v_2 增至 b_2 点的 v_1，从动轮的圆周速度等于带在 a_2 点绕上从动轮时带速 v_2。

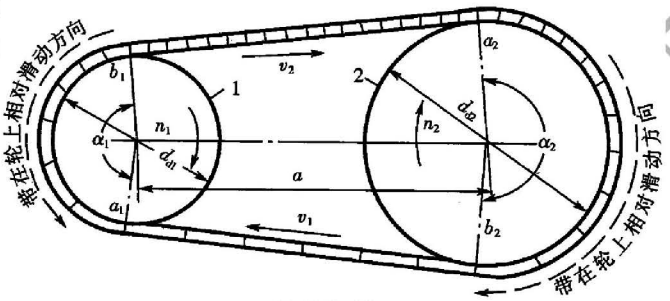


图3.5　带的弹性滑动

弹性滑动是带传动中无法避免的一种正常物理现象。弹性滑动导致从动轮的圆周速度低于主动轮的圆周速度，产生了速度损失。有效拉力愈大，速度损失就愈严重。

由于带传动所产生的摩擦力有一定限度，当工作载荷增大到使带所传递的有效拉力 F 超过极限摩擦力 $\sum F_{fmax}$ 时，带将在带轮上发生全面的相对滑动，这种现象称为打滑。带传动一旦出现打滑，即失去传动能力，从动轮转速急剧下降，带严重磨损。因此，应防止带传动出现打滑现象。

带传动的最大有效拉力 F_{max} 与初拉力 F_0、包角 α（带与带轮接触弧所对应的中心角）和摩擦系数 f 等有关。F_0、f 和 α 愈大，F_{max} 也愈大。但 F_0 过大，易使带发热磨损、带轮轴承的受力增加；若 F_0 过小，则带传动的工作能力得不到充分发挥，且易打滑，所以初拉力 F_0 大小应适当。由于大带轮上的包角 α_2 总是大于小带轮上的包角 α_1，所以，带传动的最大有效拉力 F_{max} 与 α_1 有关，通常 $\alpha_1 \geqslant 120°$。

因此，在带传动中，应确定适当的初拉力 F_0 和包角 α_1，以增大摩擦力 $\sum F_f$，避免打滑从而传递较大的有效拉力 F。

3. 传动比的计算

带传动时，由于弹性滑动，引起从动轮的转速降低，其降低的程度可用滑动系数 ε 来表示，即：

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$$

$$\because \quad V_1 = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \times 1000}(\mathrm{m/s}) \qquad V_2 = \frac{\pi d_2 n_2}{60 \times 1000}(\mathrm{m/s})$$

$$\therefore \quad \varepsilon = \frac{\pi d_1 n_1 - \pi d_2 n_2}{\pi d_1 n_1} = 1 - \frac{d_2 n_2}{d_1 n_1}$$

式中，d_1、d_2——主、从动轮的直径，mm；

n_1、n_2——主、从动轮的转速，r/min。

当考虑弹性滑动时，主、从动轮转速之间的关系为：

$$n_2 = \frac{(1-\varepsilon) d_1 n_1}{d_2}(\mathrm{r/min})$$

其传动比：

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1(1-\varepsilon)} \tag{3-4}$$

通常，由于滑动系数 ε 不大，对于V带传动，一般 $\varepsilon \leqslant 0.02$，可以不必考虑，则其传动比仍为：

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \tag{3-5}$$

即带传动的传动比与主、从动带轮的直径成反比。

4. 传动带的疲劳损坏

传动带在工作过程中，除了受张紧拉应力（σ）和因绕经带轮时产生的离心拉应力（σ_c）作用外，且每经过一个带轮，产生一次弯曲应力（σ_b）。因此，传动带工作时受到交变的应力作用。带在任一剖面上的应力变化规律如图3.6所示。由图3.6可知，带上最大应力发生在紧边刚进入小轮处。当这种变应力过大和重复一定次数后，传动带便产生疲劳损坏而失效。

理论和实践都证明，在上述应力中，弯曲应力对带的寿命影响最大。带轮直径越小，带越厚，带的弯曲应力就越大；单位时间内绕转的次数越多，应力变化频率就越高。所以，带传动中，应控制带轮的最小直径和带速。

传动带的疲劳损坏是带传动的另一种主要失效形式。在带传动设计中，除了保证传动带不打滑外，还必须保证传动带在较长时间内都能正常工作，因此必须考虑带的疲劳问题。

中国民航出版社有限公司版权所有

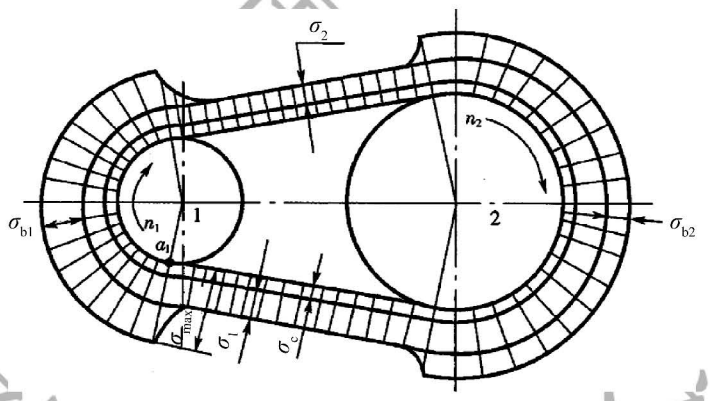


图 3.6　带传动的应力分析

3.1.3　V 带和带轮的结构

1. 普通 V 带的结构和尺寸标准

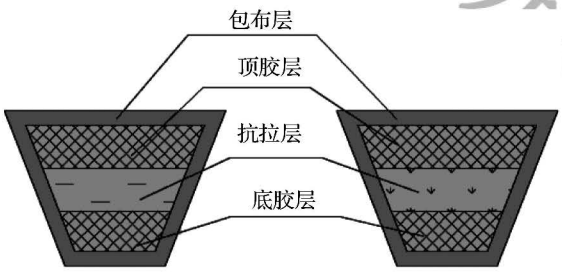
普通 V 带的截面呈等腰梯形，V 带的横剖面结构如图 3.7 所示，其中，图 3.7（a）是帘布结构，图 3.7（b）是线绳结构，它们均由下面几部分组成：

包布层——由胶帆布制成，起保护作用；

顶胶层——由橡胶制成，当带弯曲时承受拉伸；

抗拉层——由几层挂胶的帘布或浸胶的棉线（或尼龙线）绳构成，承受基本拉伸载荷；

底胶层——由橡胶制成，当带弯曲时承受压缩。



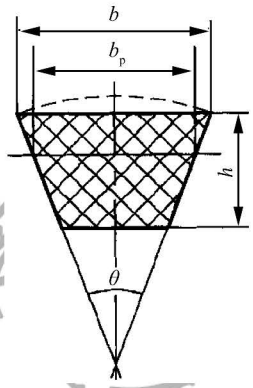
（a）帘布芯结构　　（b）线绳芯结构

图 3.7　V 带结构

V 带已经标准化，按其截面大小分为 7 种型号，其截面尺寸如表 3-1 所示。

中国民航出版社有限公司版权所有

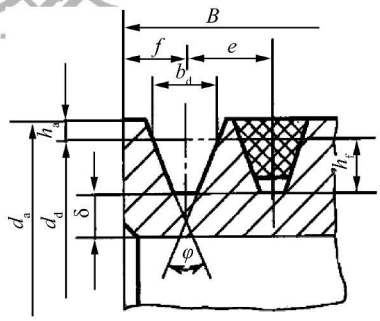
表 3-1　普通 V 带截面尺寸（GB/T 11544—2012）　　（单位：mm）



型号	顶宽 b	节宽 b_p	高度 h	楔角 θ
Y	6.0	5.3	4.0	40°
Z	10.0	8.5	6.0	
A	13.0	11	8.0	
B	17.0	14	11.0	
C	22.0	19	14.0	
D	32.0	27	19.0	
E	38.0	32	23.0	

当带在纵向弯曲时，在带中保持原长度不变的任意一条周线称为节线，由全部节线构成的面称为节面，带的节面宽度称为节宽（b_p），当带受纵向弯曲时，该宽度保持不变。在 V 带轮上，与所配用的节宽 b_p 相对应的带轮直径称为节径 d_p，通常它又是基准直径 d_d。普通 V 带轮轮缘的截面图及轮槽尺寸如表 3-2 所示。普通 V 带两侧面的夹角均为 40°，V 带绕在带轮上弯曲时，其截面变形使两侧面的夹角减小，为使 V 带能紧贴轮槽两侧，轮槽的楔角规定为 32°、34°、36°和 38°。

表 3-2　V 带轮的轮槽尺寸（GB/T 13575.1—2008）　　（单位：mm）



型号	Y	Z	A	B	C
b_d	5.3	8.5	11	14	19
h_{amin}	1.6	2.0	2.75	3.5	4.8
h_{fmin}	4.7	7.0	8.7	10.8	14.3
e	8±0.3	12±0.3	15±0.3	19±0.3	25.5±0.3
f_{min}	6	7	9	11.5	16
δ_{min}	5	5.5	6	7.5	10
d_a	$d_a = d_d + 2h_a$				
B	$B = (z-1)e + 2f$（z 为轮槽数）				

续表

φ	32°	d_d	≤60				
	34°			≤80	≤118	≤190	≤315
	36°		>60				
	38°			>80	>118	>190	>315

2. 普通 V 带轮结构

V 带轮是普通 V 带传动的重要零件，它必须具有足够的强度，但又要重量轻，质量分布均匀；轮槽的工作面对带必须有足够的摩擦，又要减少对带的磨损。

V 带轮常用材料为灰铸铁 HT150（$v \leqslant 30$ m/s）或 HT200（$v > 30$ m/s）。转速较高时可用铸钢或钢板冲压焊接结构；小功率时可用铸铝或塑料。

V 带轮轮槽的尺寸如表 3-2 所示。表 3-2 中 b_d 为轮槽的基准宽度。通常，V 带节面宽度与轮槽基准宽度重合，即 $b_p = b_d$。轮槽基准宽度所在圆称为基准圆，其直径 d_d 称为带轮的基准直径。

为了防止 V 带绕过带轮时弯曲过大而影响 V 带的强度，应限制小带轮的最小直径，可根据 V 带型号选择小带轮直径 $d_1 \geqslant d_{min}$，大带轮的直径应按传动比计算获得，但应圆整为 V 带轮直径标准系列值，V 带轮（小）最小基准直径与标准系列直径见表 3-3。

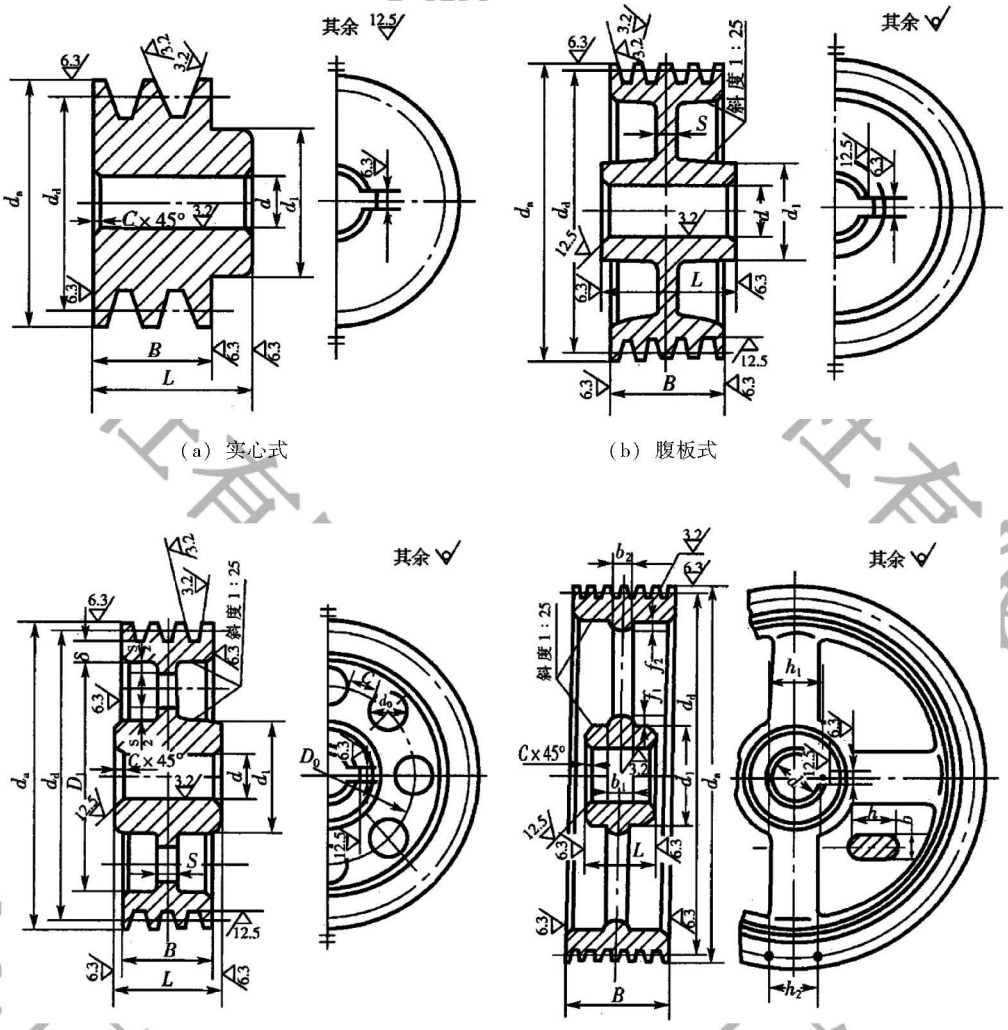
表 3-3　V 带轮（小）最小基准直径与标准系列直径（GB/T 13575.1—2008）

（单位：mm）

V 带型号	Y	Z	A	B	C	D	E
最小基准直径 d_{min}	20	50	75	125	200	355	500
标准系列直径	50，56，63，71，80，85，90，95，100，106，112，118，125，132，140，150，60，170，180，200，212，224，236，250，265，280，315，355，375，400，425，450，475，500，630，710，800，900，1000，1120，1250，1600，2000，2500						

铸造 V 带轮的结构如图 3.8 所示。带轮基准直径 $d_d < (2.5 \sim 3)d$（d 为带轮轴的直径）时，可采用实心式；当 $d_d < 3000$ mm 时，可采用腹板式；且当 $d_d - d_1 > 100$ 时，可采用孔板式；当 $d_d > 3000$ mm 时，可采用轮辐式。V 带轮的结构形式及腹板（轮辐）厚度的确定可参阅有关设计手册。

中国民航出版社有限公司版权所有



（a）实心式　　（b）腹板式

（c）孔板式　　（d）轮辐式

图 3.8　V 带轮结构

3.1.4　带传动的使用和维护

1. 带传动的使用和维护

为确保带传动正常运转，延长带的使用寿命，必须重视其使用和维护。

（1）安装时，两带轮轴线必须平行，轮槽应对正，其允差不得超过 20′，如图 3.9 所示。否则，将会加剧带的磨损，甚至使带脱落。

（2）在水平或近似水平的传动中，一般应使带的紧边在下面，松边在上面，以便借

带的自重加大带轮包角 α。

（3）多根 V 带传动，应采用配组带。更换 V 带时，通常是同一带轮的配组带必须同时全部更换，以免新旧带长短不一、受载不匀而加速新带损坏。此外，安装 V 带时，松紧要适中。在中等中心距时，根据经验，通常大拇指能按下 10～15 mm 左右即可，如图 3.10 所示。

（4）在使用中应保持橡胶带的清洁，防止油类、酸碱等对橡胶有腐蚀的物质接触，并尽量避免日光暴晒。此外，还必须应用防护罩。

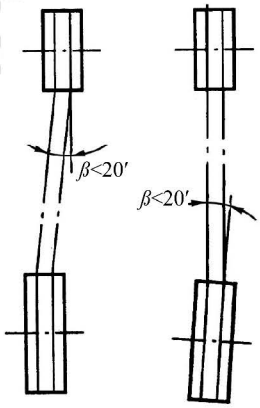


图 3.9　带轮的安装位置

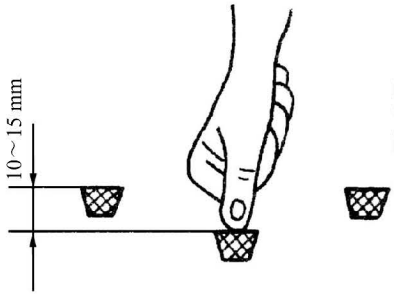


图 3.10　V 带的张紧程度

2. 带传动的张紧

实际的传动带并不是完全的弹性体，工作一段时间后，就会由于塑性变形使传动带伸长而松弛，导致初拉力减小，传动能力下降甚至出现打滑。为保证带传动的正常工作，应定期检查初拉力，当发现初拉力小于允许范围时，须重新张紧。

带传动中，常见的张紧装置有以下三类。

1）定期张紧装置

常见的有滑道式和摆架式两种，均靠调节螺钉（杆）来调节带的张紧程度。图 3.11（a）所示的这种定期张紧装置适用于水平或接近水平的带传动中，它是将装有带轮的电动机安装在滑轨上，调整螺钉可将它推到一个新的位置后再固定；图 3.11（b）所示的装置则适用于垂直或接近垂直的带传动中，它是将装有带轮的电动机安装在可绕着摆动支点摆动的摆架上，调整螺母使摆架摆动即可使带张紧。图 3.11（a）、（b）为定期调整中心距的张紧装置。

2）张紧轮张紧装置

它适用于中心距不能调整的场合。对于 V 带传动，张紧轮一般放在松边内侧，使 V 带只受单方向的弯曲，并尽可能靠近大带轮，以免小带轮的包角减小太多。如图 3.11（c）所示。

3）自动张紧装置

图 3.11（d）所示为一种自动张紧装置，它利用电动机和摆动架的重量，使摆动架绕固定支点摆动，使带随时处于张紧状态。

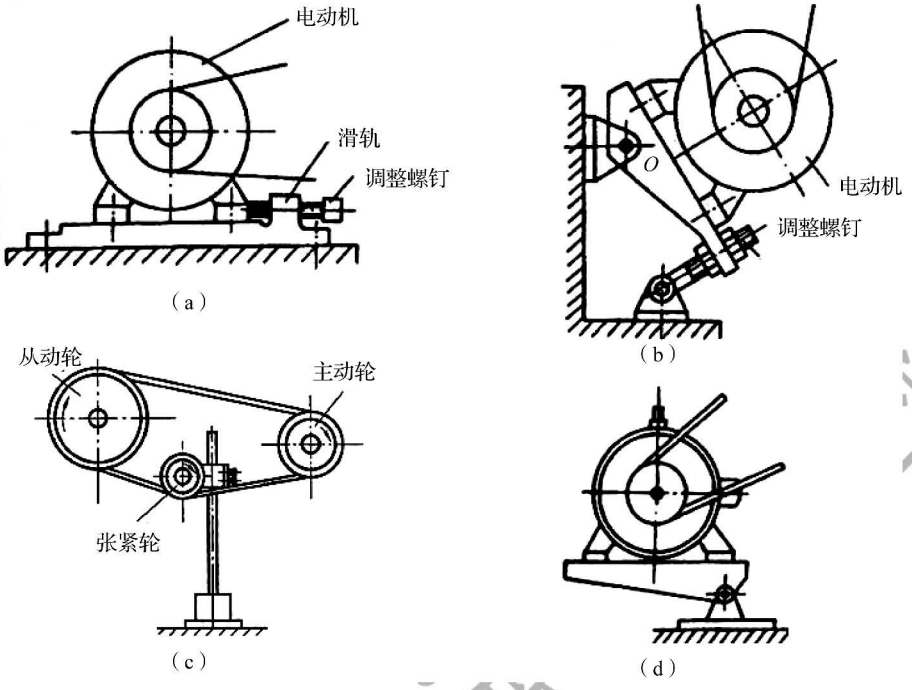


图 3.11　带传动张紧装置

3.1.5　带传动的航空应用案例

R44 直升机上发动机通过输出轴将动力传给下带轮，下带轮通过 4 根 V 带传给上带轮，上带轮分别将动力传输给主旋翼输入轴和尾桨输入轴，如图 3.12 所示。

在 R44 直升机维护手册和定期工卡中，明确带传动的检查应注意以下方面：

（1）检查上皮带轮槽，槽内应无腐蚀、凹痕、金属表面剥落或阳极镀层被磨透变粗糙或锐突等情况，若有应予以更换。

（2）检查下皮带轮结合面上有无锈蚀或阳极化涂层脱落，皮带槽有无磨损、粗糙或锐凸现象，若有应更换。

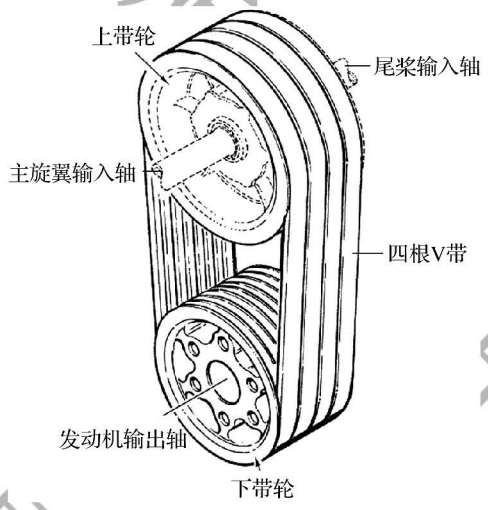
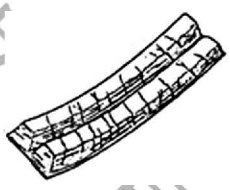
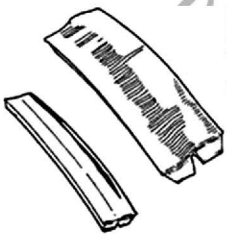
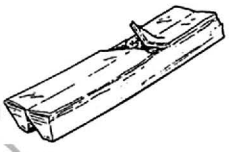
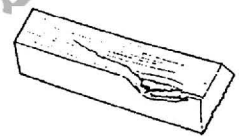


图 3.12　R44 直升机带传动图

（3）检查三角皮带有无磨损、开裂、脱层、刮伤、擦伤，皮带上有无滑油、润滑脂或外来物。

（4）对于皮带的检查，如果出现表 3-4 中任何一种情况，根据维修手册中相关章节要求，按照匹配套装更换皮带。

表 3-4　R44 直升机带传动故障现象—原因—处理措施对应表

序号	现象	原因	处理措施
1	皮带底开裂 	皮带打滑导致皮带过热，使下部胶变硬	制动器返厂修理
2	皮带上部磨损或损坏 	周围结构影响了皮带工作或外来物碰到了皮带	清除外来物； 设置好皮带轮与周围设备的距离
3	皮带上部起泡或洞穿 	皮带中间有外来物	检查并除去外来物
4	皮带底部割破 	安装时没有留出适当的松度，皮带碾过或滑出皮带轮，被皮带轮边缘划伤； 外来物落在皮带与带轮之间，划伤皮带	检查并调整合适张力； 检查并除去外来物
5	皮带滑出皮带轮 	皮带张力不正确，皮带变松； 外来物撞击	按手册上的皮带轮对准程序和张力检查程序进行检查、调整

知识总结	随堂练习

3.2　链传动

3.2.1　链传动的类型、特点和应用

1. 链传动的类型

链传动（Chain Drive）是由主动链轮 1、从动链轮 1 以及绕在两个链轮上的链条 3 组成的，如图 3.13 所示。这种传动是以链条作为中间挠性件，靠链节与链轮齿不断啮合来传递运动和动力的。因此，链传动是一种啮合传动。

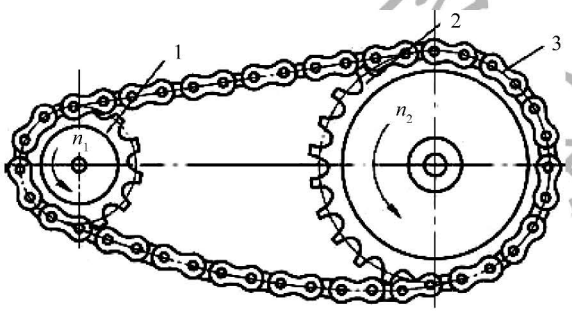


图 3.13　链传动

按照用途的不同，链可分为起重链、牵引链和传动链三类。起重链主要用于起重机械中提升重物，其工作速度 $v \leqslant 0.25$ m/s；牵引链主要用于链式输送机中移动重物，其工作速度 $v \leqslant 4$ m/s；传动链用于一般机械中传递运动和动力，通常其工作速度 $v \leqslant 15$ m/s。

按照链条的结构不同，传递动力用的链条主要有滚子链（见图 3.14）和齿形链两种（见图 3.15）。齿形链传动平稳、噪声小，承受冲击性能好，工作可靠性高，但结构复杂，

中国民航出版社有限公司版权所有

重量较大，价格较高。齿形链多用于高速或运动精度要求较高的传动，其应用不如滚子链广泛。本节主要介绍滚子链的传动（简称链传动）。

图 3.14　滚子链

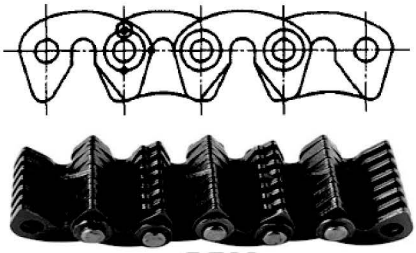


图 3.15　齿形链

2. 链传动的特点

链传动与带传动比较，有下列特点：

（1）链传动没有弹性滑动和打滑，能保证准确的平均传动比；

（2）传递的功率较大，一般传递的功率小于 100 kW；

（3）传动效率较高，一般可达 0.96；

（4）链条的张紧力小，作用于轴上的力较小；

（5）能在温度和湿度变化很大或多尘的恶劣条件下工作；

（6）结构较紧凑，装拆较方便；

（7）传动平稳性较差，有冲击和噪声，不宜在载荷变化很大和急速反向的传动中使用；

（8）无过载保护作用；

（9）瞬时传动比不恒定。

3. 链传动的应用

链传动常用于两轴平行、中心距较大，要求平均传动比准确和环境恶劣的开式传动中。它广泛用于运输机械、矿山机械、农业机械及建筑工程机械等各种机械中。此外，链传动在飞机飞行操纵系统中也得到广泛应用。早期的飞机也有应用链传动的，例如，莱特兄弟的飞机把发动机装在机翼上，发动机通过链条驱动螺旋桨。

目前，链传动的应用范围为：传递功率 $P<110$ kW；传动比 $i<8$；中心距 $a<8$ m；链速 $v\leqslant 15$ m/s。在专用的传动装置中，链速可达 35 m/s，功率可达几千千瓦。

3.2.2　滚子链简介

1. 滚子链的组成

滚子链由内链板、外链板、销轴、套筒和滚子所组成，如图 3.16 所示。

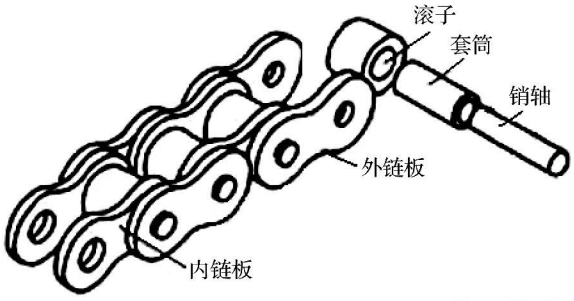


图 3.16　套筒滚子链

内链板和套筒、外链板和销轴分别采用过盈配合固定，构成内链节和外链节。链条就是由若干内、外链节依次铰接而成的。销轴与套筒为间隙配合，当链节屈伸时，套筒可在销轴上自由转动，当链条和轮齿啮合时，轮齿工作表面与滚子之间主要为滚动摩擦，可以减少轮齿和链条的磨损。为了减轻链条的重量，链板常制成睡“8”字形。

2. 滚子链的参数

1）节距与排数

链条上相邻两销轴中心的距离称为节距，用 P 表示，它是链条最主要的参数。节距大，承载能力也大，但链条各部分的尺寸和重量也大。当链轮齿数 z 一定时，节距大则链轮的直径 d 也增大，以致传动装置的尺寸也增大。因此，在设计链传动时在保证承载能力的条件下，尽量采用较小的节距。当传递的载荷较大时，可采用较小节距的双排链，如图 3.17 所示，或采用多排链。但排数不宜过多，以免各排链受载不均匀，一般不超过 4 排。

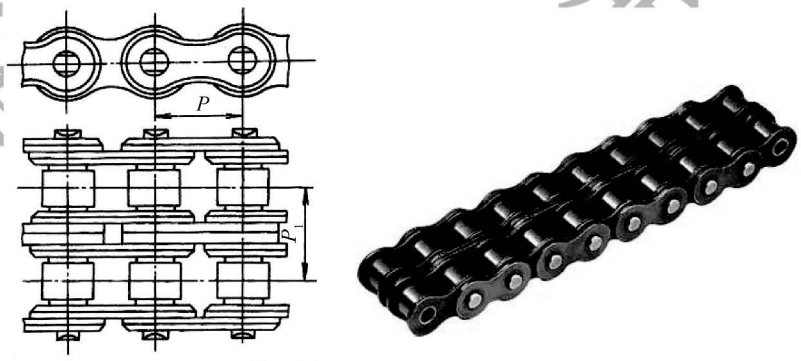
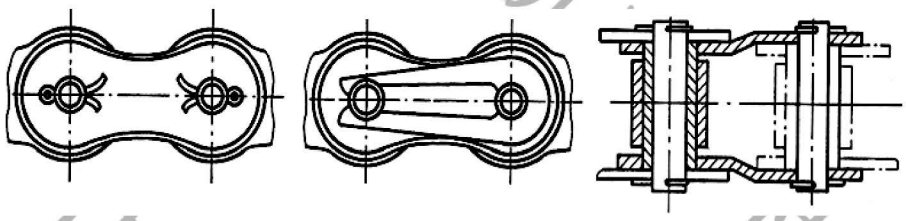


图 3.17　双排滚子链

2）长度

链条的长度用链节数来表示。链节数最好选用偶数，因为这样才可使链条两端均为内

链板，便于用可以拆卸的外链板连接。对链节数为偶数的链条，大节距时，其接头用开口销连接［见图 3.18（a）］；小节距时，用弹簧卡片连接［见图 3.18（b）］。采用弹簧卡片连接时，应使其开口端的方向与链条运动方向相反，以免工作时受到碰撞而脱落。若链节数为奇数，则必须用过渡链节［见图 3.18（c）］，但这种链节的链板会产生附加弯曲应力，故应避免采用奇数链节。



（a）　　（b）　　（c）

图 3.18　连接链节

3. 滚子链的标准

套筒滚子链是标准件，已有国家标准（GB/T 1243—2006），其主要尺寸和破坏载荷见表 3-5。国家标准规定套筒滚子链的制造精度分为 A、B 两个系列。A 系列链的制造精度和破坏载荷比 B 系列的高，用于高速、重载和重要的传动。B 系列链多用于一般传动。

表 3-5　滚子链基本参数（摘自 GB/T 1243—2006）

链号	节距 P（mm）	排距 P_1（mm）	极限拉伸载荷 Q（N）	单排每米重量 q（kg/m）
05B	8.00	5.64	4510	0.184
06B	9.525	10.24	8920	0.408
08A	12.70	14.38	13800	0.612
08B	12.70	13.92	17800	0.714
10A	15.875	18.11	21800	1.02
12A	19.05	22.78	31200	1.53
16A	25.40	29.29	55000	2.06
20A	31.75	35.76	86700	3.83
24A	38.10	45.44	124500	5.71
28A	44.45	48.87	169000	7.65
32A	50.80	58.55	222300	10.2
40A	63.50	71.55	346700	16.30
48A	76.20	87.83	500100	23.10

由表 3-5 可知，链号数乘以 25.4/16 mm 即为节距值。滚子链的标记规定如下：

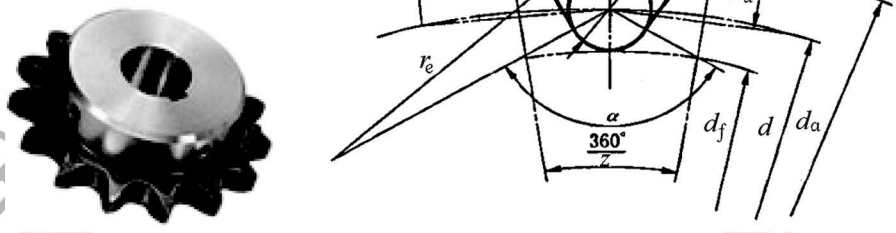
链号 — 排数 — 链节数 — 标准编号

例如：按 GB/T 1243—2006 标准制造的 A 系列，节距 12.7 mm，单排，86 节的滚子链，标记为：08A—1—86 GB/T 1243—2006。

3.2.3　链轮

链传动链轮与齿轮类似，但齿廓曲线不同，宽度通常也比齿轮小，如图 3.19（a）所示。国家标准 GB/T 1243—2006 规定了链轮端面齿形的齿槽形状。其常用齿廓为三圆弧一直线，如图 3.19（b）所示。实际齿槽形状应在规定的最大齿槽形状和最小齿槽形状的范围内。

链轮齿数对链传动的平稳性和使用寿命影响很大。齿数过少时，传动的不均匀性和动载荷增加，链节间的相对转角增大，使功率损耗增加，铰链承压面上压强增加，加速铰链磨损。但链轮齿数太多，不但使传动尺寸和重量增大，还易因链节磨损，实际节距增长而发生跳齿或脱链现象，缩短链的使用寿命。所以，小链轮齿数不宜过少，大链轮齿数亦不宜过多。



（a）链轮　　（b）链轮的断面齿形

图 3.19　链轮的结构

滚子链的小链轮齿数一般按下列推荐值选取：

低速时（$v < 0.6$ m/s）　　$z_1 \geqslant 13 \sim 15$

中速时（$v = 0.6 \sim 8$ m/s）　　$z_1 \geqslant 17 \sim 19$

高速时（$v > 8$ m/s）　　$z_1 \geqslant 19 \sim 23$

超高速（$v > 25$ m/s）　　$z_1 \geqslant 35$

滚子链的大链轮齿数 $z_2 = iz_1$，在这里可以看出，链轮的齿数可为奇数也可为偶数。链轮最多齿数限制为：$z_{max} = 120$。

链轮结构主要有整体式、腹板式和齿圈式三种，如图 3.20 所示。一般小直径的链轮做成整体式［见图 3.20（a）］；中等直径的链轮多做成腹板式［见图 3.20（b）］；直径大于 200 mm 的链轮可做成齿圈结构，齿圈与轮毂可用焊接方法连接［见图 3.20（c）］；也可用螺栓连接［见图 3.20（d）］。当轮齿磨损后，只需更换齿圈即可。

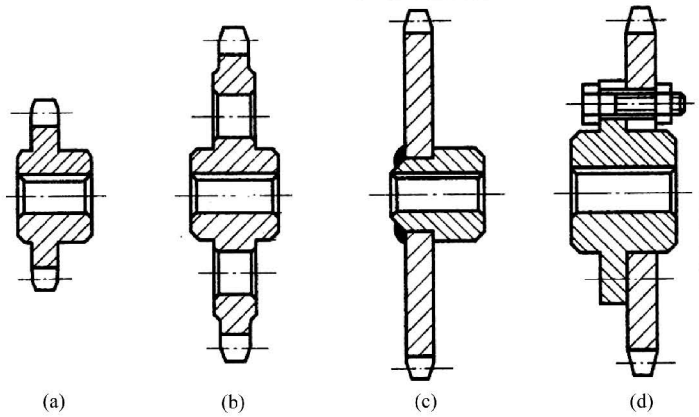


图 3.20　链轮结构形式

3.2.4　链传动的运动特性

1. 链传动的传动比

当链与链轮啮合时，链是按折线绕在链轮上的。链传动的运动情况与绕在多边形轮子上的带传动很相似。因此，链轮回转一周，链就移动一多边形周长 zp 的距离，所以，链的速度 v 为：

$$v=\frac{n_1z_1p}{60\times1000}=\frac{n_2z_2p}{60\times1000}(\mathrm{m/s}) \tag{3-6}$$

式中，p —— 链的节距（mm）；

z_1、z_2 —— 分别为主动轮和从动轮的齿数；

n_1、n_2 —— 分别为主动轮和从动轮的转速（r/min）。

由上式得链传动的传动比：

$$i=\frac{n_1}{n_2}=\frac{z_2}{z_1} \tag{3-7}$$

2. 链传动的不等速性

按式（3-6）和（3-7）求得的速度和传动比都是平均值，实际上由于链是按折线绕

在链轮上，其瞬时速度和瞬时传动比都是呈周期性变化的。

为便于说明，设链的主动边处于水平位置，主动轮以角速度 ω_1 转动，其节圆圆周的速度 $v_1 = d_1\omega_1/2$，如图 3.21 所示。

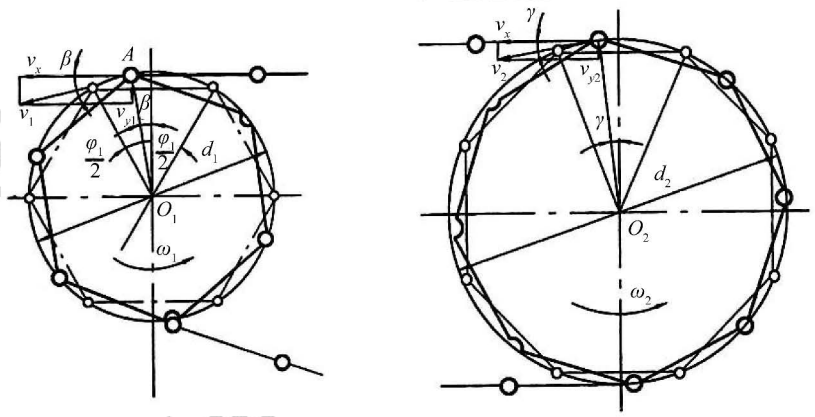


图 3.21　链传动的运动分析

由图 3.21 知，啮合点 A 转过 β 角（链条销轴 A 点圆周速度与水平线的夹角），设链水平运动时的速度为 v_x，它等于啮合点 A 的圆周速度（即链轮节圆圆周速度 v_1）的水平分量：

$$v_x = v_1\cos\beta = \frac{d_1}{2}\omega_1\cos\beta$$

设 φ_1 为主动轮上一个节距所对的中心角，则 $\varphi_1 = 360°/z_1$。在每一链节进入啮合至脱离啮合时，β 角在 $\pm\varphi_1/2$ 范围内周期性变化。当 $\beta = 0$ 时，$v_{max} = \omega_1 d_1/2$；当 $\beta = \pm\varphi_1/2$ 时，$v_{min} = \frac{d_1}{2}\omega_1\cos\frac{\varphi_1}{2}$。由此可知，即使 ω_1 为常数，链条前进的瞬时速度却是作周期性的变化。每转过一个链节，链速的变化就重复一次。链轮的齿数愈少，β 角的变化范围愈大，则链速的变化就愈大。

设从动轮的角速度为 ω_2，节圆圆周速度为 v_2，同理由图 3.21 知：

$$v_2 = \frac{v}{\cos\gamma} = \frac{v_1\cos\beta}{\cos\gamma} = \frac{d_1\omega_1\cos\beta}{2\cos\gamma} = \frac{d_2\omega_2}{2}$$

所以，从动轮的角速度：

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 d_1\cos\beta}{d_2\cos\gamma} \tag{3-8}$$

链传动的瞬时传动比：

$$i=\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{d_2\cos\gamma}{d_1\cos\beta} \tag{3-9}$$

由以上两式知道，因β和γ都是变化的，所以，从动轮的角速度ω_2和瞬时传动比i也是随时间变化的。

由于链传动在工作过程中，链条和从动轮均作变速运动，当链轮的转速愈高，节距愈大；齿数愈少，链速变化也愈大，即链条运动的不均匀性愈剧烈。

由于链速和从动轮的角速度是变化的，从而产生了相应的加速度和角加速度，且因链条、从动轮以及与从动链轮相连的系统均具有一定的质量，所以必然引起附加动载荷。加速度和角加速度愈大，附加动载荷就愈大，冲击和噪声也愈大。过大的冲击会加速链和链轮的磨损。为了减小链和从动轮作周期性变速运动所带来的上述不利影响，应限制链轮的转速，适当增加链轮的齿数，采用较小的链节距和自动张紧装置。所以，在机械传动中，通常是将链传动放在低速级。

3.2.5 链传动的失效形式和使用维护

1. 链传动的主要失效形式

链传动的失效通常是由于链条的失效而引起的，其失效形式主要有以下几种。

1）链板的疲劳破坏

链传动在工作时，主动边比从动边受的拉力大，所以链板承受的是变应力。当应力超过疲劳强度极限并经过一定的应力循环次数后，链板将因疲劳而断裂。

2）滚子和套筒的疲劳点蚀

在链条与链轮啮合时，链节是绕销轴以一定的角速度转向轮齿的，链节在与轮齿接触时产生冲击，速度愈高，冲击力就愈大。当应力超过疲劳强度极限并经过一定的应力循环次数后，滚子或套筒的表面产生细微的疲劳裂纹，裂纹逐渐发展，使表面金属微粒脱落，这种现象称为疲劳点蚀。滚子或套筒的表面发生点蚀后，工作面积减少，应力增大，加速点蚀的发展，终至报废。这种失效形式发生在润滑良好的场合。

3）销轴和套筒胶合

链条中的销轴和套筒起着铰链的作用，链速过高时，销轴和套筒的工作表面相互粘结，并在相对转动中将较软的金属撕下，这种现象称为胶合。

4）链条磨损伸长

链条的销轴和套筒间有相对转动，将产生磨损，磨损后链条的节距增大。当节距增大过多时链条就容易从链轮上脱落下来，发生脱链现象。

5）链条过载拉断

在低速重载时或突然过载时，链条传递的圆周力超过了静强度，链条将被拉断。

6）链轮齿面磨损

链传动长期运转，链轮齿廓会过度磨损变尖，严重降低传动质量，致使链轮报废。一般链轮的寿命为链条寿命的两倍以上。

2. 链传动的使用和维护

链传动的两轴应平行，两链轮应位于同一平面内。一般宜采用水平或接近水平的布置。为便于链条进入和脱离链轮，使链条的紧边在上方，如图 3.22（a）所示。两链轮的中心线与水平面的夹角 φ 最好不超过 45°，如图 3.22（b）所示。链条安装时不需要初拉力，为了让松边保持适当的下垂度，最好能与带传动一样，具有调整中心距的装置，以避免链节磨损后下垂度太大。如果中心距太大或两轮中心线接近垂直而中心距又不能调整时，可在松边加一个张紧轮，如图 3.22（c）、（d）所示。张紧轮可用链轮或无齿的滚轮，其直径略小于小链轮的直径。

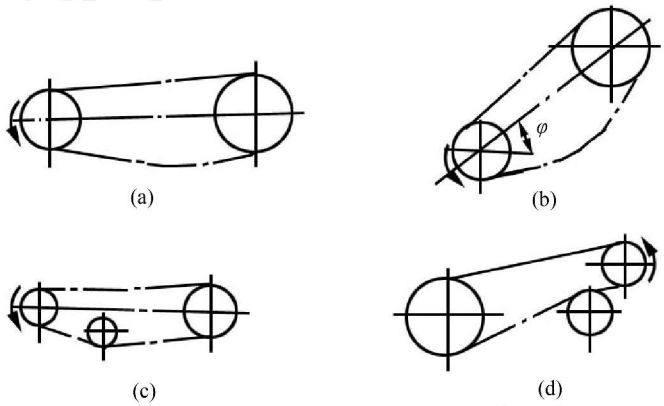


图 3.22　链传动布置

链传动润滑的好坏是影响其工作能力和使用时间的重要因素。良好的润滑可以减轻磨损，缓和冲击和振动。

常见的润滑方式有：人工定期润滑、滴油润滑、油浴润滑、飞溅润滑和压力润滑五种。通常根据链速和链节距来选用润滑方式，如图 3.23 所示。常用的润滑油为 L-AN32、L-AN46、L-AN68 等型号的全损耗系统用油。周围环境温度低时采用前者，周围环境温度高时采用后者。对开式链传动及重载低速链传动可在油中加入 MoS_2 等添加剂；对于低速又无法供油处可用润滑脂润滑。

应定期用煤油清洗滚子链，以清除齿间的污垢和杂质的堆积。及时剔除已损坏的链节，更换新链节。如换修次数较多，则应更换整根链条。

为了安全、防尘以及减小噪声，链传动应用防护罩封闭起来。操作工应戴好安全帽，在链条传动附近工作时，注意防止衣服、头发绞进链条中而造成人身事故。

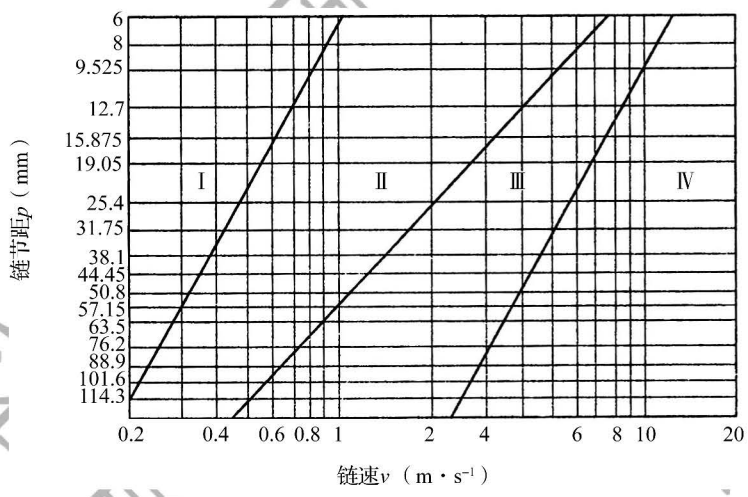


图 3.23　链传动润滑方式的选用

Ⅰ. 用油壶、油刷定期人工润滑；Ⅱ. 滴油润滑；Ⅲ. 油池润滑或油盘飞溅润滑；Ⅳ. 油泵压力喷油润滑

3.2.6　链传动航空应用案例

图 3.24 所示为波音 737NG 飞机的水平安定面配平操纵系统中的前操纵机构。当驾驶员转动配平手轮，带动链轮和链并驱动前钢索鼓轮，这带动到后钢索鼓轮的钢索，后钢索鼓轮转动并驱动齿轮箱和丝杠及安定面。

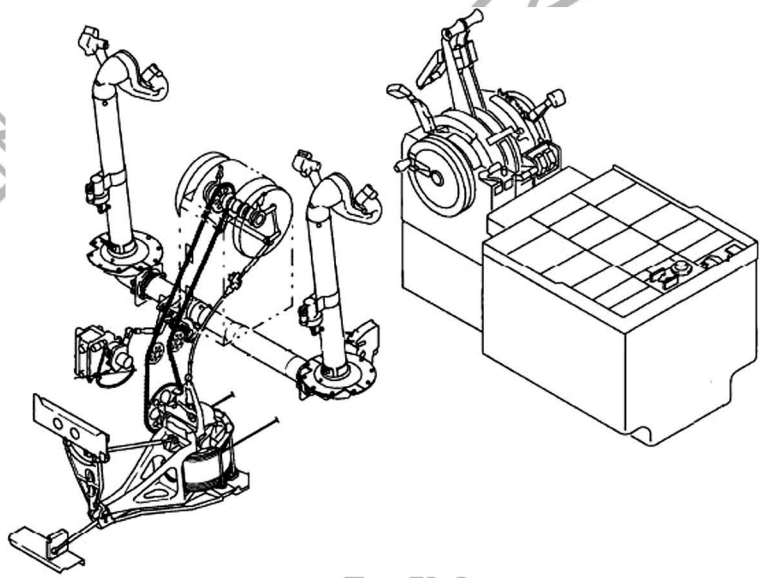


图 3.24　波音 737NG 飞机的操纵机构示意图

该装置利用链轮分度性好，张紧力小，中心距大，能够实现挠性传递等优点将配平手轮的运动传递到钢索鼓轮。

知识总结	随堂练习

3.3　齿轮传动

齿轮传动（Gear Drive）是靠一对齿轮的轮齿依次相互啮合来传递运动和动力的。齿轮传动是现代机械中应用最广的一种传动形式，它广泛应用于金属切削机床、汽车、拖拉机和飞机等各种机器中。

齿轮传动主要有以下特点：

（1）能保证恒定的传动比，传递运动准确、可靠；

（2）适用范围广，传递功率可从1瓦到十几万千瓦，圆周速度可达300 m/s；

（3）结构紧凑，使用寿命长；

（4）机械传动效率高，一般可达0.95~0.99；

（5）制造和安装精度要求高，成本较高；

（6）不宜用于两轴间距离较大的传动。

3.3.1　齿轮传动的分类

1. 按齿轮传动时两轮的相对运动情况分

按照一对齿轮传动时两轮的相对运动情况，齿轮传动可分为平面齿轮传动和空间齿轮传动两大类。

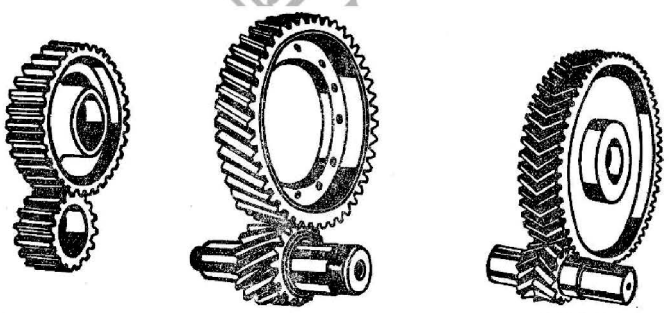
1）平面齿轮传动

平面齿轮传动时两轮的相对运动为平面运动，它们的轴线是互相平行的并且采用圆柱齿轮。

（1）按轮齿方向，圆柱齿轮可分为直齿圆柱齿轮传动［见图3.25（a）］、斜齿圆柱

中国民航出版社有限公司版权所有

齿轮传动［见图 3.25（b）］和人字齿圆柱齿轮传动［见图 3.25（c）］三种。



（a）直齿　　（b）斜齿　　（c）人字齿

图 3.25　圆柱齿轮传动

（2）按啮合情况可分为外啮合齿轮传动（见图 3.25）、内啮合齿轮传动（见图 3.26）以及齿轮与齿条啮合传动（见图 3.27）。一对外啮合齿轮传动中，主、从动齿轮的转向相反；一对内啮合齿轮传动中，主、从动轮的转向相同。齿轮与齿条传动中，齿条可视为直径无限大的圆柱齿轮。

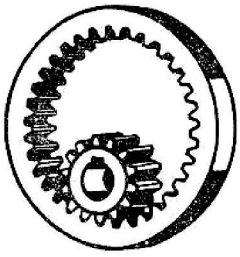


图 3.26　内啮合齿轮传动

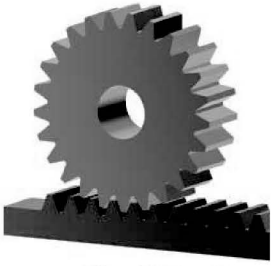


图 3.27　齿轮齿条传动

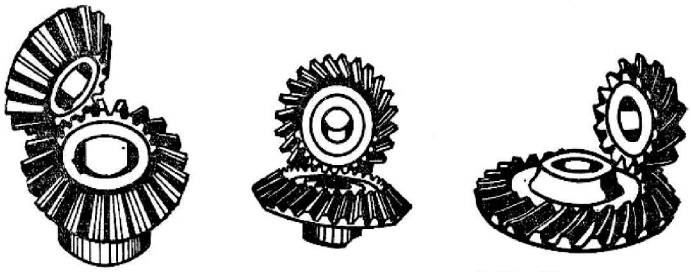
2）空间齿轮传动

空间齿轮传动时，两轮的相对运动为空间运动，它们的轴线不平行。

（1）两相交轴间的传动用圆锥齿轮。圆锥齿轮传动按轮齿形式可分为直齿圆锥齿轮传动［见图 3.28（a）］、斜齿圆锥齿轮传动［见图 3.28（b）］和螺旋齿圆锥齿轮传动［见图 3.28（c）］。

（2）两相错轴间的传动用螺旋齿轮。两个相应的螺旋齿轮（见图 3.29）可以组成轴间夹角为任意值（0°~90°）的螺旋齿轮传动。蜗杆蜗轮传动是轴间夹角为 90°的螺旋齿轮传动的特例，如图 3.30 所示。

中国民航出版社有限公司 版权所有



（a）直齿　　（b）斜齿　　（c）曲齿

图 3.28　圆锥齿轮传动

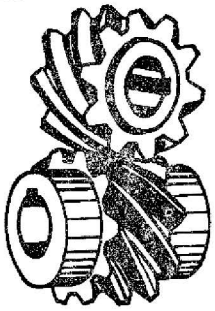


图 3.29　螺旋齿轮传动

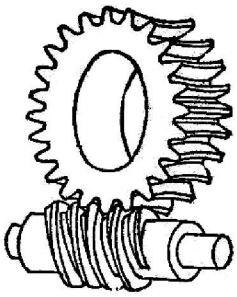


图 3.30　蜗杆蜗轮传动

2. 按工作条件分

按工作条件来分，齿轮传动可分为开式、半开式和闭式齿轮传动。

（1）开式齿轮传动——齿轮完全暴露在外面，没有防尘罩或机壳，容易落入灰砂和杂质，不能保证良好的润滑，齿轮易磨损，多用于低速和不重要的场合。

（2）半开式齿轮传动——有简单的防护罩，有时还把大齿轮部分浸入油池中，它的工作条件虽有改善，但仍不能做到严密防止外界杂物侵入，润滑条件也不算最好，多用于农业机械和建筑机械。

（3）闭式齿轮传动——齿轮和轴承都密封在箱体内，能保证良好的润滑和啮合精度，多用于汽车、机床、航空发动机等的齿轮传动中。

3. 齿轮传动特点

齿轮传动在机械中应用最为广泛，其具有如下特点：

（1）传动精度高。现代常用的渐开线齿轮的传动比是准确、恒定不变的。这不但对精密机械与仪器是关键要求，也是高速重载下减轻动载荷、实现平稳传动的重要条件。

（2）适用范围宽。齿轮传动传递的功率范围极宽，可以从 0.001 W 到 60000 kW；圆周速度可以很低，也可高达 150 m/s，带传动、链传动均难以比拟。

（3）可以实现平行轴、相交轴、交错轴等空间任意两轴间的传动，这也是带传动、链传动做不到的。

（4）结构紧凑，工作可靠，使用寿命长。

（5）机械传动效率高，一般可达 0.95～0.99。

（6）制造和安装精度要求高，对环境条件要求较严，除少数低速、低精度的情况以外，一般需要安置在箱罩中防尘防垢，还需要重视润滑，成本较高。

（7）宜用于两轴间距离较大的传动。

（8）减震性和抗冲击性不如带传动等柔性传动好。

3.3.2 齿廓啮合基本定律

前面我们说过齿轮传动能保证恒定的传动比，也就是说两齿轮的每一对轮齿在其整个啮合过程的任一瞬间的传动比都必须保持不变。

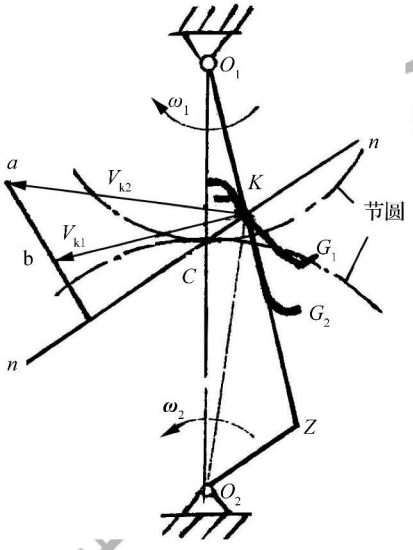


图 3.31　齿廓形状与传动比的关系

我们知道一对齿轮的传动是靠主动轮轮齿的齿廓推动从动轮轮齿的齿廓来实现的。为此，齿轮的齿廓必须具有一定的形状，以满足保持瞬时传动比不变。齿廓啮合基本定律就是研究当齿廓形状符合什么条件时，才能保证瞬时传动比不变。

图 3.31 所示为两啮合齿轮的齿廓 G_1 和 G_2 在任意点 K 接触。设主动轮以角速度 ω_1 顺时针转动，推动从动轮以角速度 ω_2 逆时针转动。两齿廓上 K 点的速度分别为 $V_{k1}=\omega_1\cdot\overline{O_1K}$ 和 $V_{k2}=\omega_2\cdot\overline{O_2K}$。

过 K 点作两齿廓的公法线 nn 与连心线 O_1O_2 交于 C 点，速度 V_{k1} 和 V_{k2} 在公法线 nn 上的分速度应相等，否则就会发生两齿廓分离或相互压入的现象，故 $ab\perp nn$。

过 O_2 作 $O_2Z\parallel nn$，与 O_1K 的延长线交于 Z 点，因 $\triangle Kab$ 与 $\triangle KO_2Z$ 的对应边成比例，即：

$$\frac{\overline{KZ}}{\overline{O_2K}}=\frac{\overline{Kb}}{\overline{Ka}}=\frac{V_{k1}}{V_{k2}}=\frac{\omega_1\,\overline{O_1K}}{\omega_2\,\overline{O_2K}}$$

或

$$\frac{\overline{KZ}}{\overline{O_1K}}=\frac{\omega_1}{\omega_2}$$

又因为 $\triangle O_1O_2Z\backsim\triangle O_1CK$，故：

$$\frac{\overline{KZ}}{\overline{O_1K}}=\frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_1C}}$$

由此得：

$$i_{12}=\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_1C}} \tag{3-10}$$

上式表明，要使两齿轮的传动比恒定不变，应使比值 $\overline{O_2C}/\overline{O_1C}$ 为常数。因两齿轮中心 O_1 和 O_2 为定点，中心距 O_1O_2 为定值。所以，要满足 $\overline{O_2C}/\overline{O_1C}$ 为常数的要求，就必须使 C 点为连心线上的一个固定点。由此得出结论，要使传动比不变，齿廓形状必须符合的条件是：不论两齿廓在任何位置接触，过接触点所作齿廓的公法线都必须与连心线交于一定点 C。这就是齿廓啮合基本定律。

上述定点 C 称为节点，以 O_1 和 O_2 为圆心，过节点 C 所作的两个相切圆称为节圆。由式（3-10）知，$V_C=\omega_1\cdot\overline{O_1C}=\omega_2\cdot\overline{O_2C}$，即两个节圆的圆周速度相等，因此在齿轮传动中，两个节圆作纯滚动。一对齿轮啮合时才有节点和节圆，单个齿轮不存在节点和节圆。

凡能满足齿廓啮合基本定律的一对齿廓称为共轭齿廓。一般来说，任意给定一条齿廓曲线，就可以根据齿廓啮合基本定律画出与其共轭的另一条齿廓曲线。符合齿廓啮合基本定律的曲线有无穷多对，考虑到设计、制造、安装等因素，目前多数齿轮采用渐开线作为齿廓曲线。

3.3.3　渐开线及其性质

1. 渐开线的形成

如图 3.32 所示，将直线 AB 沿着半径为 r_b 的圆作纯滚动，直线上任意一点 K 的轨迹 DKE 称为该圆的渐开线。该圆称为基圆，r_b 称为基圆半径，直线 AB 称为发生线。

以同一基圆上产生的两条相反的渐开线为齿廓的齿轮（见图 3.33），即为渐开线齿轮。

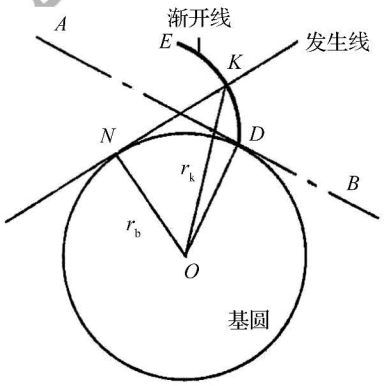


图 3.32　渐开线的形成

图 3.33　渐开线齿廓

2. 渐开线的性质

根据图 3.32 所示的渐开线形成过程可知，渐开线具有下列一些性质：

（1）发生线沿基圆滚过的线段长度等于基圆上被滚过的弧长，即 $\overline{NK}=\overset{\frown}{ND}$。

（2）渐开线上任一点的法线必与基圆相切。因在渐开线形成过程中的每一瞬时，发生线都绕它与基圆的切点 N 转动，线段 NK 为渐开线上 K 点的曲率半径，N 点为其曲率中心。所以，渐开线上 K 点的速度方向与 NK 垂直，即 NK 为渐开线上 K 点的法线。

（3）渐开线离基圆愈远的部分，其曲率半径愈大，渐开线愈平直；反之，渐开线离基圆愈近的部分，其曲率半径愈小，渐开线弯曲愈厉害。

（4）渐开线的形状与基圆的大小有关（见图 3.34），同一基圆上的渐开线形状完全相同；基圆半径愈小，渐开线愈弯曲；基圆半径愈大，渐开线愈平直；基圆半径趋于无穷大时，渐开线就成为一条直线。

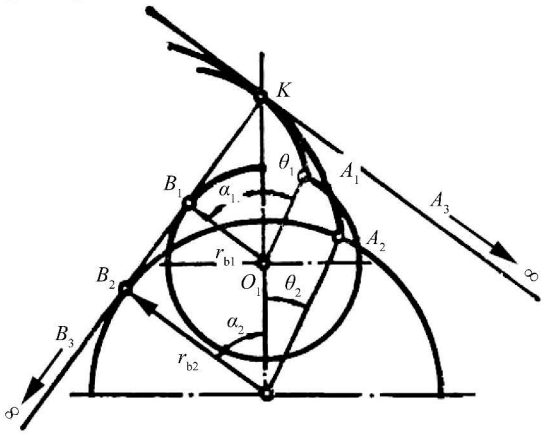


图 3.34　不同基圆上的渐开线

（5）在渐开线不同的点上，压力角 α_k 的大小也不同，离中心 O 愈远（即 r_k 愈大），压力角就愈大；在基圆上的压力角为零。

（6）基圆内无渐开线。

3.3.4　渐开线齿轮各部分的名称及标准直齿圆柱齿轮的尺寸计算

1. 齿轮各部分的名称及符号

图 3.35 所示为直齿圆柱齿轮的一部分。连接各轮齿齿顶的圆称为齿顶圆，其直径用 d_a 表示。相邻两齿之间的空间称为齿槽。齿槽底部连成的圆称为齿根圆，其直径用 d_f 表示。

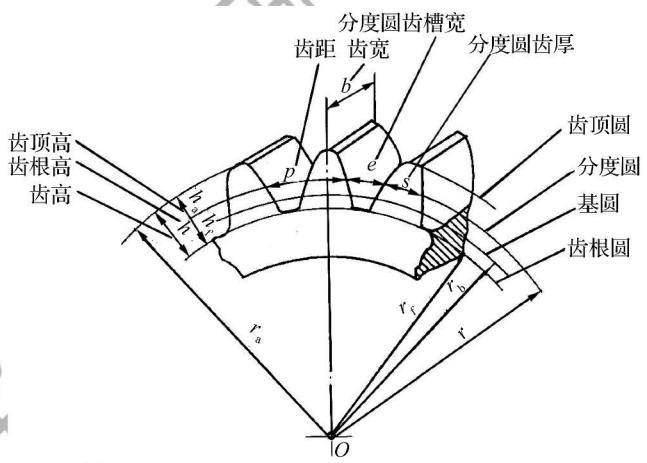


图 3.35　齿轮各部分的名称

以齿轮中心为圆心，其任意直径 d_k 的圆周上，轮齿两侧齿廓之间的弧长称为该圆上的齿厚，用 s_k 表示，从齿根到齿顶齿厚逐渐减小；齿槽两侧齿廓之间的弧长称为该圆上的齿槽宽，用 e_k 表示，从齿根到齿顶齿槽宽逐渐减小；相邻两齿同侧齿廓之间的弧长称为该圆上的齿距，用 p_k 表示，从齿根到齿顶齿距逐渐增大。根据渐开线性质可知，从齿根到齿顶压力角 α_k 逐渐增大。

设 z 为齿数，则根据齿距的定义可得：

$$\pi d_k = p_k z \qquad 或 \qquad d_k = \frac{p_k}{\pi} \cdot z \tag{3-11}$$

由上式可见，在不同直径的圆周上，比值 p_k/π 是不同的，其中还包含无理数“π”。此外，在不同直径的圆周上，齿廓各点的压力角也是不等的。为了便于设计、制造、测量及互换使用，将齿轮某一圆周上的比值 p_k/π 规定为标准值（整数或较完整的有理数），并使该圆上的齿廓压力角也为标准值，这个圆称为分度圆，其直径用 d 表示。为了简便，分度圆上各参数的符号都不带角标。分度圆上的压力角简称为压力角，用 α 表示。我国规定的标准压力角为 20°。分度圆上的齿距以 p 表示，比值 p/π 称为模数，用 m 表示，即：

$$m = p/\pi \tag{3-12}$$

模数是齿轮的一个重要参数，它是齿轮所有几何尺寸计算的基础，单位为毫米（mm）。显然，m 愈大，则 p 也愈大，轮齿也愈大，齿轮承受载荷的能力也就愈大。

为了方便齿轮的设计和制造，国家标准 GB 1357—2008 规定了渐开线齿轮的模数系列，表 3-6 列出了其中一部分。

表 3-6　标准模数系列（摘自 GB 1357—2008）　（单位：mm）

第一系列	1	1.25	1.5	2	2.5	3
	4	5	6	8	10	12
第二系列	1.75	2.25	2.75	(3.25)	3.5	3.75
	4.5	5.5	(6.5)	7	9	(11)

分度圆上的 m、p、s 及 e 的关系为：

$$p = s + e = \pi m \tag{3-13}$$

分度圆直径为：

$$d = mz \tag{3-14}$$

在齿轮的轮齿上，介于齿顶圆和分度圆之间的部分称为齿顶，其径向距离称为齿顶高，用 h_a 表示。介于齿根圆和分度圆之间的部分称为齿根，其径向距离称为齿根高，用 h_f 表示。齿顶圆与齿根圆之间的径向距离称为全齿高，用 h 表示。

齿轮的齿顶高和齿根高都可用模数乘上一个系数来表示，对标准齿轮取：

$$h_a = h_a^* m \tag{3-15}$$

$$h_f = (h_a^* + c^*) m \tag{3-16}$$

$$h = h_a + h_f = (2h_a^* + c^*) m \tag{3-17}$$

式中，h_a^* ——齿顶高系数，我国标准规定，正常齿 $h_a^* = 1$，短齿 $h_a^* = 0.8$；

c^* ——齿顶隙系数，我国标准规定，正常齿 $c^* = 0.25$，短齿 $c^* = 0.3$。

在一对齿轮相啮合时，为了避免一个齿轮的齿顶圆与另一个齿轮的齿槽底部相抵触，同时还能贮存润滑油，所以在齿顶圆与齿槽底部之间制备有顶隙，用 c 表示。

2. 标准直齿圆柱齿轮的主要尺寸计算

为了便于计算和设计，将渐开线标准直齿圆柱外齿轮的几何尺寸计算公式列于表 3-7 中，供选用。

表 3-7　渐开线标准直齿圆柱齿轮主要参数和尺寸计算公式

名称	符号	公式
齿数	z	选定
模数	m	根据强度或结构确定，选用标准值

续表

名称	符号	公式
压力角	α	选用标准值
分度圆直径	d	$d = mz$
齿顶高	h_a	$h_a = h_a^* m$
齿根高	h_f	$h_f = (h_a^* + c^*)m$
齿全高	h	$h = h_a + h_f$
齿顶圆直径	d_a	$d_a = (z + 2h_a^*)m$
齿根圆直径	d_f	$d_f = (z - 2h_a^* - 2c^*)m$
基圆直径	d_b	$d_b = d\cos\alpha$
周节	p	$p = \pi m$
齿厚	s	$s = \dfrac{\pi m}{2}$
齿槽宽	e	$e = \dfrac{\pi m}{2}$
中心距离	a	$a = \dfrac{1}{2}(d_1 + d_2) = \dfrac{1}{2}(z_1 + z_2)m$
顶隙	c	$c = c^* m$
固定弦齿厚	$\bar{s}_c$	$\bar{s}_c = \dfrac{\pi m}{2}\cos^2\alpha$（$\alpha = 20°$时，$\bar{s}_c = 1.387m$）
固定弦齿高	$\bar{h}_c$	$\bar{h}_c = m(h_a^* - \dfrac{\pi}{8}\sin 2\alpha)$（$\alpha = 20°$时，$h_a^* = 0.746m$）
公法线长度	W	$W = m\cos\alpha[(k - 0.5)\pi + z\,\mathrm{inv}\,\alpha]$ {$\alpha = 20°$时，$w = m[2.9521(k - 0.5) + 0.0145]$}

3. 径节制齿轮

径节制齿轮是一种英制齿轮。我国民航进口美国、英国等国家的客机及地面机械设备中的齿轮多数是以英制作为单位的，它们不用模数而用径节作为计算齿轮几何尺寸的基本参数，单位是英寸（in）。齿数与分度圆直径之比称为径节，用 DP 表示。

$$\mathrm{DP} = \frac{z}{d} \tag{3-18}$$

径节与模数一样也有规定的标准值，例如：1、$1\frac{1}{4}$、$1\frac{1}{2}$、$1\frac{3}{4}$、2、$2\frac{1}{4}$、$2\frac{1}{2}$、$2\frac{3}{4}$、3、$3\frac{1}{2}$、4、5、6、7、8、9、10、12、14、16、18、20。

中国民航出版社有限公司版权所有

径节与模数的换算关系为：

$$m = \frac{25.4}{\mathrm{DP}}(\mathrm{mm}) \tag{3-19}$$

径节制齿轮的压力角标准值有：$14\frac{1}{2}°$、20°和$22\frac{1}{2}°$三种。径节制齿轮各部分尺寸的相互关系见表3-8。

表3-8　径节齿轮各部分尺寸的相互关系

序号	名称	代号	相互关系	序号	名称	代号	相互关系
1	径节	DP	$\mathrm{DP} = \frac{\pi}{t} = \frac{z}{D_f} = \frac{z+2}{D_a}$	8	基节	t_f	$t_f = t\cos\alpha$
2	压力角	α	$14\frac{1}{2}°$	9	齿顶高	h'	$h' = \frac{1}{\mathrm{DP}}$
3	分度圆直径	D_f	$D_f = z/\mathrm{DP}$	10	齿根高	h''	$h'' = \frac{1.157}{\mathrm{DP}}$
4	基圆直径	D_b	$D_b = D_f\cos\alpha$	11	全齿高	h	$h = h' + h''$
5	齿顶圆直径	D_a	$D_a = D_f + \frac{2}{\mathrm{DP}}$	12	齿厚	s	$s = \frac{t}{2}$
6	齿根圆直径	D_i	$D_i = D_f - 2\times\frac{1.157}{\mathrm{DP}}$	13	齿间	w	$w = s$
7	周节	t	$t = \frac{\pi}{\mathrm{DP}}$	14	径向间隙	c	$c = \frac{1.157}{\mathrm{DP}}$

3.3.5　一对渐开线齿轮的啮合

1. 渐开线齿廓满足齿廓啮合基本定律

图3.36所示的一对渐开线齿廓G_1和G_2在任一点K接触，过K点作两齿廓的公法线nn与两轮连心线O_1O_2交于C点，根据渐开线的性质可知，线nn必同时与两基圆相切，设切点分别为N_1和N_2。因两基圆为定圆，它们在同一方向的内公切线均通过连心线上同一点。所以无论两齿廓在何处接触（如K_2点），过接触点所作齿廓公法线均通过连心线上同一点C，这就证明了渐开线齿廓满足齿廓啮合基本定律。

2. 渐开线齿轮中心距的可分离性

由于制造和安装的误差，一对渐开线齿轮的实际中心距离与理论计算出来的中心距离不可能完全一致。当中心距有误差时，齿轮的瞬时传动比会不会变化呢？由图3.36可知，因$\triangle O_1N_1C \backsim \triangle O_2N_2C$，故两轮的传动比为：

$$i=\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_1C}}=\frac{r'_2}{r'_1}=\frac{r_{b2}}{r_{b1}} \tag{3-20}$$

上式表明，一对渐开线齿轮的瞬时传动比与两轮的基圆半径有关。当一对齿轮制成后，其基圆半径是固定的，因此中心距有误差时，瞬时传动比仍然为常数。这种特性称为渐开线齿轮中心距的可分离性，它是渐开线齿轮的另一个重要优点。

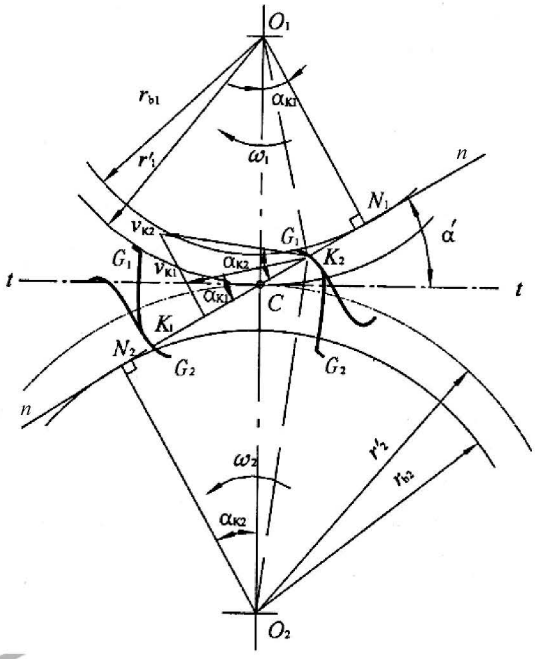


图 3.36　一对渐开线齿轮的啮合

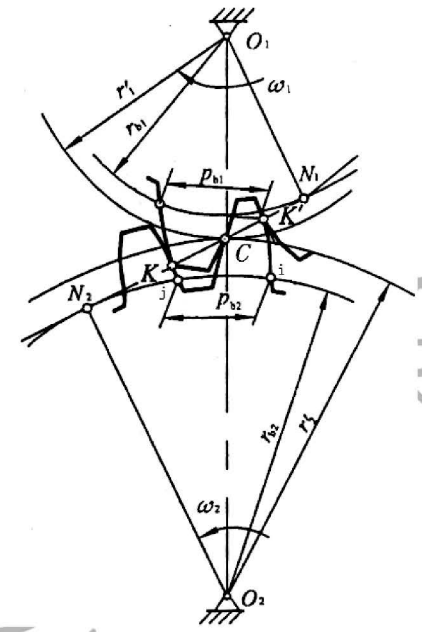


图 3.37　一对渐开线齿轮正确啮合的条件

3. 渐开线齿轮正确啮合条件

由前面我们已经得知，一对渐开线齿廓是满足啮合基本定律并能保证恒定传动比的。但这并不是说任意两个渐开线齿轮都能搭配起来并能正确地传动。如图 3.37 所示的一对渐开线齿轮传动中，设 m_1、m_2、α_1、α_2、p_{b1}、p_{b2} 分别为两轮的模数、压力角和基节。当前一对齿在啮合线 $\overline{N_1N_2}$ 上 K 点接触时，其后一对齿应在啮合线 $\overline{N_1N_2}$ 上另一点 K' 接触。这样前一对齿分离时，才能同时在啮合线上接触，轮 1 相邻两齿同侧齿廓沿法线的距离 $\overline{K_1K'_1}$ 应与轮 2 相邻两齿同侧齿廓沿法线的距离 $\overline{K_2K'_2}$ 相等，即：

$$\overline{K_1K'_1}=\overline{K_2K'_2} \tag{3-21}$$

根据渐开线的性质，两轮基节也应相等，即 $p_{b1}=p_{b2}$。由轮 2 可得：

$$\overline{K_2K'_2} = \overline{N_2K'_2} - \overline{N_2K_2} = \overset{\frown}{N_2i} - \overset{\frown}{N_2j} = \overset{\frown}{ji} = p_{b2}$$

$$= \frac{\pi d_{b2}}{z_2} = \frac{\pi d_2 \cos\alpha_2}{z_2} = p_2 \cos\alpha_2 = \pi m_2 \cos\alpha_2$$

同理，由轮 1 可得：

$$\overline{K_1K'_1} = p_1 \cos\alpha_1 = \pi m_1 \cos\alpha_1$$

代入式（3-21）得：

$$m_1 \cos\alpha_1 = m_2 \cos\alpha_2$$

因为模数和压力角都已标准化了，要满足上式必须使：

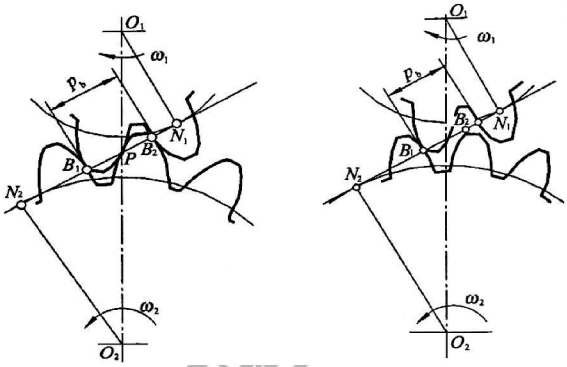
$$m_1 = m_2 = m$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

上式表明，一对渐开线齿轮的正确啮合条件是：两齿轮的模数和压力角必须分别相等。

4. 渐开线齿轮连续传动的条件

图 3.38（a）所示为一对渐开线齿轮啮合的情况，其中齿轮 1 为主动轮，齿轮 2 为从动轮。要使齿轮连续传动，则必须保证在前一对轮齿未脱离啮合时，后一对轮齿已经进入啮合。从一对轮齿的啮合过程来看，啮合点实际所走过的轨迹只是啮合线 N_1N_2 上的一段 $\overline{B_1B_2}$，B_2 点是轮齿进入啮合的起始点，B_1 点是齿轮齿廓接触的终止点。$\overline{B_1B_2}$ 称为实际啮合线段。从图 3.38（a）看出，如果 $\overline{B_1B_2} = p_b$，那么当前一对轮齿即将脱离啮合时，后一对轮齿正好进入啮合，表明传动恰好连续，但在传动过程中始终只有一对轮齿啮合。如果 $\overline{B_1B_2} < p_b$，则当前一对轮齿在 B_1 点脱离啮合时，后一对轮齿尚未进入啮合，结果将使传动中断，如图 3.38（b）所示。如果 $\overline{B_1B_2} > p_b$，则表明在传动过程中，有时一对轮齿啮合，有时多于一对轮齿啮合，传动连续。



（a）　　（b）

图 3.38　渐开线齿轮传动的条件

根据以上分析，可以得出，齿轮连续传动的条件是：两轮的实际啮合线 $\overline{B_1B_2}$ 应大于或至少等于齿轮的基节。通常用实际啮合长度 $\overline{B_1B_2}$ 与基节 p_b 的比值 ε_a 来表示齿轮连续传动条件。ε_a 称为端面重叠系数。所以，齿轮连续传动的条件为：

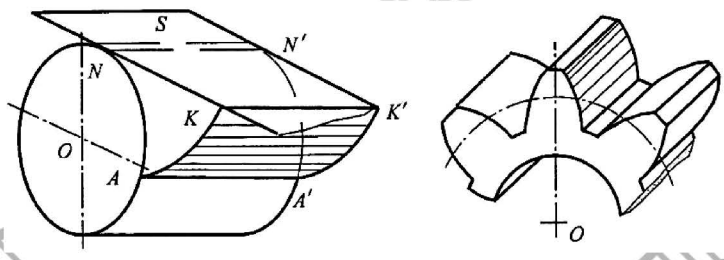
$$\varepsilon_a = \frac{\overline{B_1B_2}}{p_b} \geqslant 1$$

重叠系数 ε_a 的理论值应大于或等于 1，但考虑到制造和安装的误差，实际上应使 ε_a 大于 1。一般机械制造中 $\varepsilon_a = 1.1 \sim 1.4$。重叠系数的大小表明同时啮合齿数的多少，其值愈大则传动愈平稳，每个轮齿受力也愈小。重叠系数的大小与模数无关而随齿数的增多而加大。但是重叠系数是有限制的，对于标准直齿圆柱齿轮，重叠系数最大为 1.981。

3.3.6　标准斜齿圆柱齿轮传动

1. 斜齿圆柱齿轮齿廓的形成及传动特点

前面讨论直齿圆柱齿轮的齿廓形成时，是在垂直于齿轮轴线的端面上进行的。实际上齿轮有一定的宽度，所以齿廓的形成如图 3.39（a）所示，与基圆柱相切的平面 S 称为发生面。当发生面 S 在基圆柱上作纯滚动时，其上任一平行于切线 NN' 的直线 KK' 的轨迹，即为渐开线曲面。渐开线曲面与轮轴垂直面的交线为渐开线。



（a）　　（b）

图 3.39　直齿圆柱齿轮齿廓形成及齿面接触线

由渐开线曲面的形成可知，直齿圆柱齿轮在啮合时，齿面上的接触线都是平行于轴线的直线，如图 3.39（b）所示。当齿轮传递载荷时，由于沿全齿宽是同时进入啮合，又同时退出啮合，所以受力也是突然加载又突然卸载的。因此传动平稳性较差，冲击和噪声也较大。

斜齿圆柱齿轮齿廓的形成原理如图 3.40（a）所示。当发生面沿基圆柱作纯滚动时，其上与切线 NN' 成一倾斜角度的直线 KK' 的轨迹为一渐开线的螺旋面，即为斜齿圆柱齿轮的齿廓曲面，直线 KK' 与切线 NN' 间的夹角 β_b，称为基圆柱上的螺旋角。

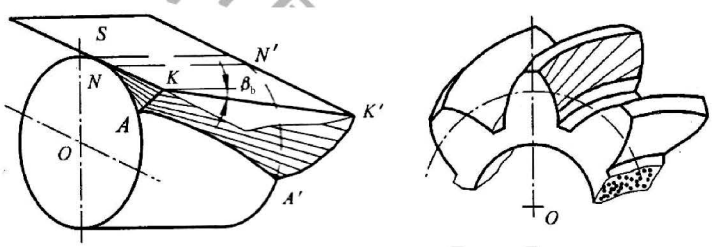


图 3.40　斜齿圆柱齿轮齿廓形成及齿面接触线

从斜齿圆柱齿轮的形成过程可知，斜齿圆柱齿轮的齿廓在任何啮合位置时，其接触线都是与齿轮轴线不平行的斜线，如图 3.40（b）所示。一对齿从开始啮合起，齿面上的接触线由零逐渐增大，以后又逐渐缩短直到脱离啮合。所以一对齿的啮合不是突然开始，也不是突然离开。另外，由于轮齿是倾斜的，所以同时啮合的齿数较多。因此，斜齿圆柱齿轮传动有以下特点：

（1）齿廓误差对传动的影响较小，冲击和噪声较小，适用于高速场合；

（2）传动能力较大，适用于重载；

（3）在传动时会产生轴向分力，对轴承与轴的结构提出较高的要求，并需采用推力轴承，在大功率的传动中，可以采用人字齿圆柱齿轮使轴向力互相抵消。

2. 斜齿圆柱齿轮的主要参数和几何尺寸

由于斜齿轮的轮齿是倾斜的，所以它有端平面（垂直于齿轮轴线的平面）几何参数和法平面（垂直于轮齿的平面）几何参数。由于用铣刀或滚刀加工斜齿轮时，刀具的进刀方向垂直于轮齿的法平面，所以轮齿的法向模数和压力角分别与刀具的模数和压力角相等。因此规定斜齿圆柱齿轮的法向模数和压力角为标准值。但斜齿轮的分度圆直径仍按端面模数计算。图 3.41 为斜齿轮分度圆柱面的展开图。设 p_t、m_t、α_t 分别为端面周节、端面模数和端面压力角；p_n、m_n、α_n 分别为法面周节、法面模数和法面压力角；β 为分度圆柱上的螺旋角，β 一般为 7°~20°，它的旋向有左旋和右旋两种，其旋向识别与螺纹旋向识别一样。

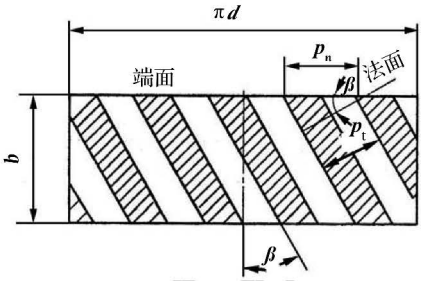


图 3.41　斜齿轮分度圆柱的展开形状

斜齿圆柱齿轮的端面参数与法面参数的关系如下：

$$p_n = p_t \cos\beta$$

$$m_n = m_t \cos\beta$$

斜齿圆柱齿轮主要尺寸的计算公式如表 3-9 所示。

表 3-9　标准斜齿圆柱齿轮主要尺寸计算公式

名称	符号	公式	名称	符号	公式
分度圆直径	d	$d = m_t z = mz/\cos\beta$	齿根圆直径	d_f	$d_f = d - 2h_f = d - 2.5m_n$
齿顶高	h_a	$h_a = m_n$	法向齿距	p_n	$p_n = \pi m_n$
齿根高	h_f	$h_f = 1.25m_n$	端面齿距	p_t	$p_t = \pi m_t = p_n/\cos\beta$
全齿高	h	$h = h_a + h_f = 2.25m_n$	中心距	a	$a = \frac{1}{2}(d_1 + d_2)$
齿顶圆直径	d_a	$d_a = d + 2h_a = d + 2m_n$			

3. 斜齿圆柱齿轮传动的正确啮合条件

一对外啮合斜齿圆柱齿轮啮合时，两轮的模数和压力角必须相等，两轮分度圆上的螺旋角也必须大小相等且方向相反，即：

$$m_{n1} = m_{n2};\quad \alpha_{n1} = \alpha_{n2};\quad \beta_1 = -\beta_2$$

3.3.7　直齿圆锥齿轮传动

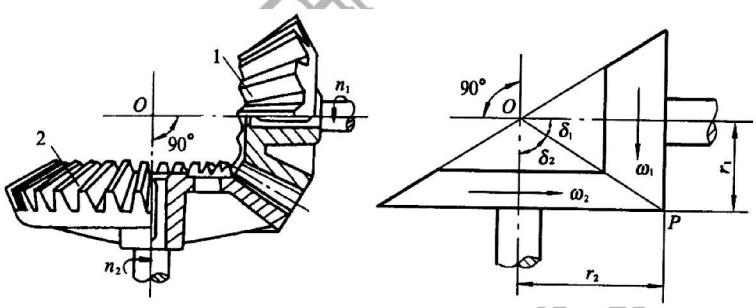
1. 圆锥齿轮传动的特点和传动比

圆锥齿轮用于两相交轴之间的传动。在一般机械中，多采用两轴线交角 $\Sigma = 90°$ 的直齿圆锥齿轮传动。圆锥齿轮传动常应用在速度较低（通常 $v < 5$ m/s）和轻载的场合。在飞机飞行操纵系统附件齿轮箱中，圆锥齿轮得到广泛的应用。

一对圆锥齿轮传动相当于一对节圆锥纯滚动，如图 3.42 所示。对于正确安装的标准直齿圆锥齿轮，节圆锥与分度圆锥相重合，其传动比可以用相当于一对共顶的分度圆锥形的摩擦轮作无滑动的传动来求得。图中，δ_1、δ_2 分别为两锥齿轮的轴线与分度圆锥母线之间的夹角，称为分度圆锥角，正确安装时与节圆相等；r_1、r_2 分别为分度圆半径；该两轴线交角 $\Sigma = \delta_1 + \delta_2 = 90°$，则传动比为：

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{r_2}{r_1} = \tan\delta_2 = \cot\delta_1 \qquad (3-22)$$

中国民航出版社有限公司版权所有



（a）　　（b）

图 3.42　圆锥齿轮传动

2. 直齿圆锥齿轮的几何尺寸

因为圆锥齿轮的大端尺寸大，计算和测量比较方便，所以圆锥齿轮的几何尺寸以大端为准，即以大端模数 m 作为标准模数；大端压力角 α 为标准压力角，$\alpha = 20°$。其几何尺寸计算公式见表 3-10。

表 3-10　直齿圆锥齿轮主要尺寸计算公式

名称	符号	公式
小轮的分度圆锥角	δ_1	$\tan\delta_1 = z_1/z_2$
大轮的分度圆锥角	δ_2	$\tan\delta_2 = z_2/z_1$
齿顶高	h_a	$h_a = m$
齿根高	h_f	$h_f = 1.2m$
全齿高	h	$h = h_a + h_f = 2.2m$
分度圆直径	d	$d_1 = mz_1$；$d_2 = mz_2$
齿顶圆直径	d_a	$d_{a1} = d_1 + 2h_a\cos\delta_1$；$d_{a2} = d_2 + 2h_a\cos\delta_2$
齿根圆直径	d_f	$d_{f1} = d_1 - 2h_f\cos\delta_1$；$d_{f2} = d_2 - 2h_f\cos\delta_2$
齿顶角	θ_a	$\tan\theta_a = h_a/R$
齿根角	θ_f	$\tan\theta_f = h_f/R$
锥距	R	$R = \sqrt{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_2}{2}\right)^2} = \frac{m}{2}\sqrt{z_1^2 + z_2^2}$

一对圆锥齿轮的正确啮合条件和圆柱直齿轮一样，两轮大端的模数和压力角应分别相等且为标准值。

中国民航出版社有限公司版权所有

3.3.8　齿轮齿条传动

齿轮齿条传动可以将旋转运动变成直线运动，也可以将直线运动变成旋转运动。

齿条是齿轮的一种特殊形式，它可以看成是半径无限大的齿轮，如图 3.43 所示。分度圆半径无限大时它的圆弧变成直线，称为分度线。齿顶圆、齿根圆也相应变成齿顶线、齿根线，齿廓变成斜线。标准齿条的齿廓线夹角 $2\alpha = 40°$。相邻两齿在分度线对应点距离为周节 $p = \pi m$。

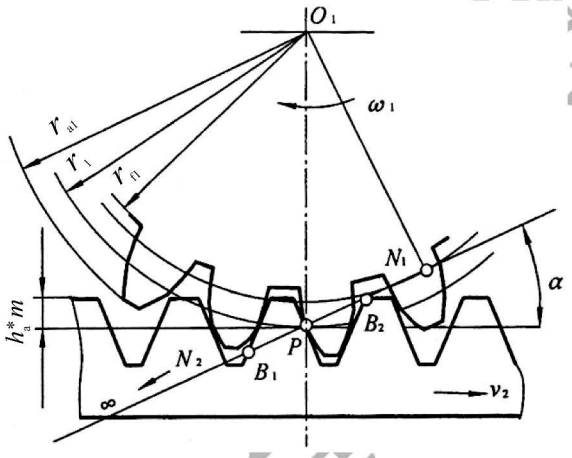


图 3.43　齿轮齿条传动

当齿轮与齿条啮合，齿轮转 n 转时，齿条移动的距离为：

$$S = nzp = nz\pi m \tag{3-23}$$

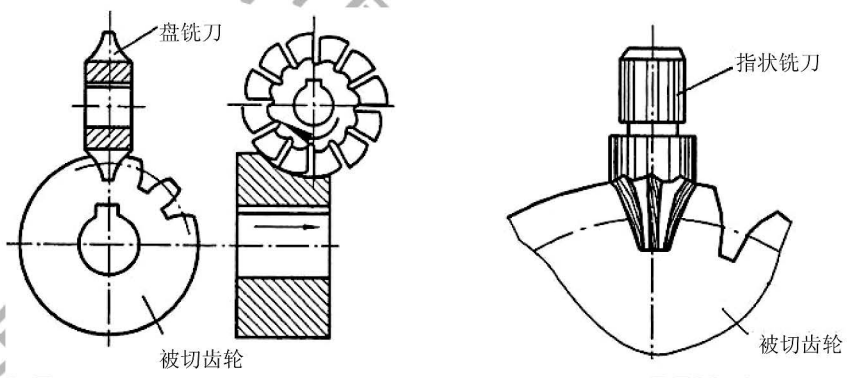
齿轮齿条传动在飞机或发动机上也有应用，如用于伊尔-14 飞机前设备舱门的开闭和用于斯贝发动机的高压燃油停车开关，控制燃油路的通断。

3.3.9　齿轮加工与根切现象

1. 齿轮加工方法

齿轮制造的方法有铸造法、热轧法、冲压法和切削法等，其中最常用的是切削法。切削加工法又分为仿形法和范成法两种。

仿形法是最简单的切齿方法，轮齿是用与齿廓曲线相耦合的成形铣刀在铣床上铣削而成，如图 3.44 所示。由于齿廓曲线不但与模数、压力角有关，还与齿数有关，而齿轮的齿数变化范围很大，同一模数的铣刀只能备有几把到十几把，所以用仿形法加工出的齿廓只是近似的渐开线，精度等级低。这种方法多用于修配或小批生产。



（a）盘状齿轮铣刀切齿　　（b）指状铣刀切齿

图 3.44　仿形法加工齿轮

范成法又称展成法或包络法，它是利用一对齿轮啮合时，其共轭齿廓互为包络的原理来切齿的。范成法常用的有插齿（见图 3.45）、刨齿（见图 3.46）和滚齿（见图 3.47）三种切齿方法。

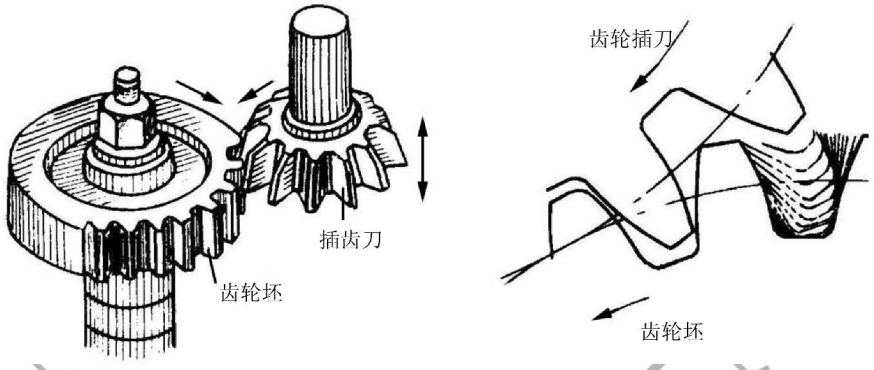


图 3.45　插齿法加工齿轮

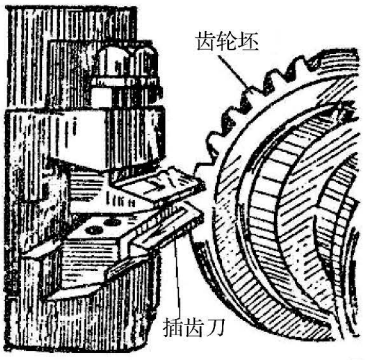


图 3.46　刨齿法加工齿轮

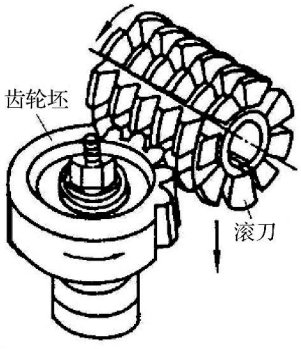


图 3.47　滚齿法加工齿轮

2. 渐开线齿廓的根切现象

当用范成法加工齿轮时，如果齿轮的齿数太少，则刀具的齿顶会将轮坯的轮齿根部渐开线齿廓切去一部分，如图 3.48 所示，这种现象称为根切。

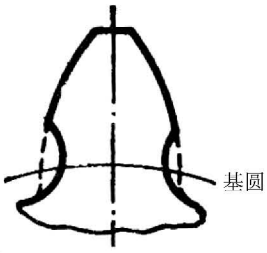


图 3.48　齿轮根切现象

轮齿发生根切后，齿根的强度被削弱；由于齿根部的渐开线被切去，传动的平稳性较差，所以应力求避免这种现象。

加工圆柱标准直齿轮不产生根切的最少齿数为：

当 $\alpha=20°$，$h_a^*=1$ 时，$z_{min}=17$；

当 $\alpha=20°$，$h_a^*=0.8$ 时，$z_{min}=14$。

3.3.10　变位齿轮简介

标准齿轮设计计算比较简单，因而得到了广泛的应用。但随着生产的发展，标准齿轮已不能完全满足某些特殊的要求，其主要的缺点有：

（1）用范成法加工标准齿轮时，齿轮的齿数不能少于最少齿数，否则将产生根切。

（2）一对互相啮合的标准齿轮，其分度圆上的齿厚相等。与大齿轮相比较，小齿轮轮廓渐开线曲率半径较小，齿根厚度小，啮合次数又多，当其他条件相同时，小齿轮的强度和寿命都低。采用标准齿轮难于解决这一矛盾。

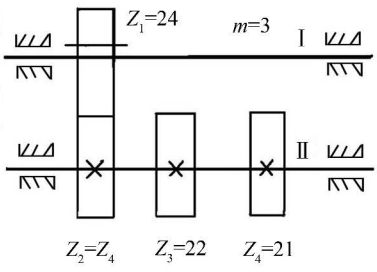


图 3.49　变位齿轮用于配凑中心距

（3）当需要配凑中心距时，采用标准齿轮往往不能实现正确啮合传动。如图 3.49 所示的变速箱中，要求轴Ⅰ上的滑移齿轮 Z_1 能与轴Ⅱ上的固定齿轮 Z_2、Z_3、Z_4 依次啮合，因上述各对齿轮的标准中心距不同，因而，在轴Ⅰ、Ⅱ间不可能都实现标准齿轮传动。

为了改善标准齿轮上述不足之处，以便设计出承载能力大、体积小、重量轻的齿轮传动，因而需要对标准齿轮进行变位修正，作变位修正的齿轮称为变位齿轮。

变位齿轮是一种非标准齿轮，它的加工原理与标准齿轮相同。当用齿条插刀或齿轮滚刀加工标准齿轮时［见图 3.50（a）］，刀具分度线（中线）应与轮坯分度圆相切，这样加工出来的齿轮为标准齿轮。如果将刀具分度线向离开轮坯中心方向移动一段距离 xm［见图 3.50（b）］，这时刀具分度线不再同被切齿轮的分度圆相切，而是另一根与刀具分度线相平行的直线同分度圆相切，被切出齿轮的模数、压力角分别与标准齿轮的模数、压力角相等。但是齿根圆和分度圆上的齿厚增大，齿顶高变高，齿根高变小，且分度圆的齿厚大于齿槽宽。这种改变刀具与轮坯相对位置加工出的齿轮就是变位齿轮。刀具分度线

与轮坯分度圆离开的距离 xm 称为变位量，x 称为变位系数。规定刀具离开轮坯中心的变位称为正变位，变位量为正值，即 $xm>0$ 或 $x>0$；刀具靠近轮坯中心的变位［见图 3.50（c）］称为负变位，变位量为负值，即 $xm<0$ 或 $x<0$。

综上所述，变位齿轮的主要参数，如 m、α、和 z 不变，与标准齿轮相同，加工变位齿轮的刀具和方法也与加工标准齿轮的相同。但是齿形和某些几何尺寸发生了变化，如图 3.50（d）所示。变位齿轮能克服上述标准齿轮的三条主要缺点，又不给齿轮加工带来新的困难，所以应用十分广泛。

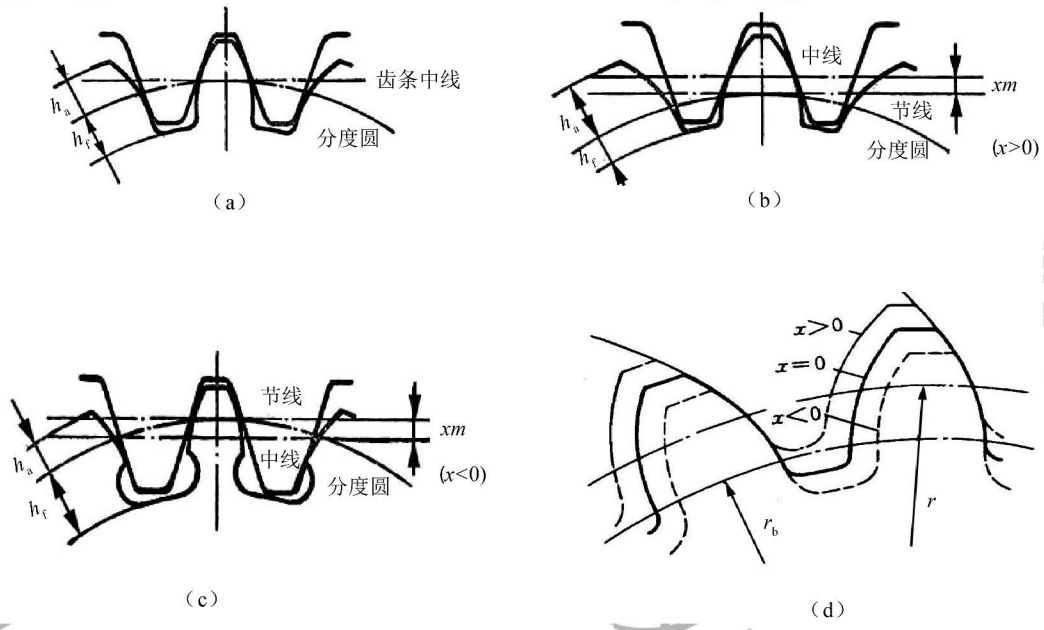


图 3.50　变位齿轮的加工

3.3.11　齿轮的失效形式与材料选择

1. 齿轮的失效形式

齿轮失效是指齿轮在使用过程中，由于发生诸如轮齿折断、齿面损坏等现象，而使齿轮过早地失去正常工作能力的情况。齿轮失效的主要现象是轮齿折断以及齿面磨损、点蚀、胶合及塑性变形等。

1）轮齿折断

齿轮传动时，在齿轮根部产生最大的弯曲应力；齿轮脱离啮合时，齿根弯曲应力为零，所以齿轮承受变化的弯曲应力。在载荷多次重复作用下，弯曲应力超过疲劳极限时，首先在有应力集中的齿根部产生疲劳裂纹，裂纹逐渐扩展，引起轮齿折断，如图 3.51（a）所示。齿轮材料较脆，受到严重过载或冲击时，也易折断；齿轮、轴或机体发生变

形以及制造、安装的偏差，使载荷集中于轮齿的一部分，也容易发生局部折断，如图3.51（b）所示。避免轮齿折断的根本办法是通过计算，保证轮齿具有足够的弯曲强度。此外，适当增大齿根的圆角半径，提高零件的刚度，保证芯部的韧性和正确安装等都可以减少轮齿折断的发生。

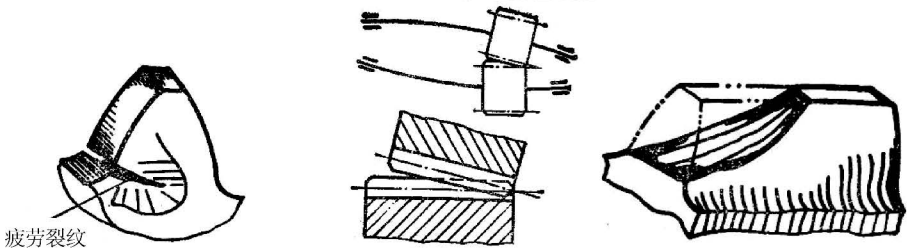


图3.51　轮齿折断

2）齿面磨损

齿面磨损有两种情况：一种是因齿面互相摩擦产生的跑合磨损，能起抛光作用；另一种是由于灰砂、硬屑粒等进入齿面间而引起的磨粒性磨损。齿面磨损后，齿廓失去准确渐开线齿形，齿厚变薄，齿侧隙增大使传动不平稳，甚至引起轮齿折断。齿面磨损常发生在开式齿轮传动中。在闭式传动中，如果润滑油不干净也会发生磨粒磨损。

3）齿面点蚀

齿轮在啮合过程中传递载荷时，齿面产生接触应力。当轮齿脱离啮合时，齿面接触应力为零，所以齿面产生的是变化的接触应力。当接触应力超过材料的疲劳极限时，在载荷的多次重复作用下，齿面表层就会产生细微的裂纹，裂纹的蔓延扩展使金属微粒脱落，这种现象称为点蚀。实践证明，点蚀首先出现在齿面的节线附近（见图3.52）。齿面发生点蚀后，工作面积减少，接触应力增大，加速点蚀的发展，使轮齿啮合情况恶化而至报废。

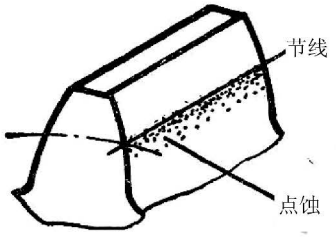


图3.52　齿面点蚀图

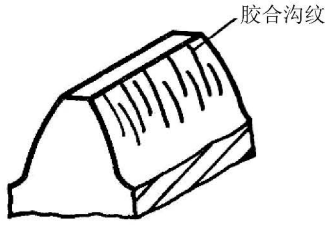


图3.53　齿面胶合

齿面抗点蚀的能力主要与齿面硬度有关，齿面愈硬，则抗点蚀的能力愈强。齿面硬度HB≤350的闭式齿轮传动常因点蚀而失效。在开式传动中，由于齿面磨损的速度较快，点蚀还来不及出现或扩展就被磨掉，所以通常见不到点蚀现象。

4）齿面胶合

在高速重载传动中，因齿面压力较大，润滑或散热不良时，互相接触的齿面因摩擦温度剧增而熔结在一起，齿轮继续运转时，较软的齿面沿滑动方向被撕下小块金属形成沟纹，这种现象称为胶合（见图3.53）。齿面发生胶合后，工作表面被破坏，从而造成齿轮失效。为防止胶合，通常选用黏度较大或抗胶合性能较好的润滑油、提高齿面硬度和齿面光洁度等方法来提高齿面抗胶合的能力。

5）齿面塑性变形

在重载荷作用下，齿面未经硬化处理，齿面上可能产生局部的塑性变形，使齿面失去正确齿形。这种失效常发生在低速和过载、启动频繁的传动中。

综上所述，轮齿的失效形式与齿轮传动的工作情况、齿轮材料的性质、轮齿表面的硬度和表面粗糙度等密切相关。

2. 齿轮材料选择

齿轮材料选择一般有四条原则：

（1）开式传动中不重要的低速齿轮可采用铸铁；一般齿轮多采用锻钢；尺寸大、结构复杂的齿轮可采用铸钢或球墨铸铁；

（2）配对齿轮中，小齿轮受力及磨损较大，所以对其硬度要求应高于大齿轮20~50HBS；

（3）一般中、低速齿轮可采用45号钢45Mn、40Cr等材料经调质处理，齿面硬度为≤350HBS；

（4）一般中高速、重载齿轮可采用中碳钢、中碳合金钢等材料经调质或表面淬火，齿面硬度>350HBS，也可采用低碳合金钢经渗碳淬火热处理，使齿面硬度>350HBS。

齿轮工作齿面硬度及其组合的应用举例于表3-11中，可供设计时参考。

表3-11　齿轮工作齿面硬度及其组合的应用举例

齿面类型	齿轮种类	热处理		工作齿面硬度举例		应用举例
		小齿轮	大齿轮	小齿轮	大齿轮	
软齿面（1HBS≤350）	直齿	调质	调质	240~270HBS 260~290HBS	200~230HBS 220~250HBS	中低速重载固定式传动装置
	斜齿和人字齿	调质	正火调质	240~270HBS 270~300HBS	160~190HBS 200~230HBS	

续表

齿面类型	齿轮种类	热处理		工作齿面硬度举例		应用举例
		小齿轮	大齿轮	小齿轮	大齿轮	
软硬齿面组合（$HBS_1>350$，$HBS_2<350$）	斜齿和人字齿	表面淬火	调质	45～50HRC	200～230HBS	过载和冲击都不大的中低速重载固定式传动装置
		渗碳	调质	56～62HRC	270～300HBS	
硬齿面（HBS>350）	直齿、斜齿和人字齿	表面淬火	表面淬火	45～50HRC		传动尺寸受到限制和运输机械的传动装置
		渗碳	渗碳	56～62HRC		

注：1. 对于用滚刀和插齿刀切削的齿轮，齿面硬度一般不应超过HB300。

2. 重要齿轮的表面淬火，应采用高频感应淬火，并沿齿沟进行。

3. 通常渗碳后的齿轮要进行磨齿。

4. 为了提高抗胶合性能，建议大、小齿轮的材料采用不同牌号的钢。

5. 本表仅为举例，并未包括所有可能的最优组合。

常用的齿轮材料、热处理后的硬度和应用举例列于表3-12。

表3-12　常用的齿轮材料、轮齿硬度和应用举例

材料	牌号	热处理方法	硬度		应用举例
			齿芯HB	齿面HRC	
优质碳素钢	45	正火	162～217		低速轻载的齿轮
优质碳素钢	45	调质	217～255		中、低速中载的齿轮。如通用减速器和机床中一般传动的齿轮
合金钢	35SiMn		217～269		
	38SiMnMo		217～269		
	40Cr		241～236		
优质碳素钢	45	表面淬火	217～235	40～50	高速中载、无剧烈冲击的齿轮。如机床变速箱中的齿轮
合金钢	40Cr		241～236	48～55	
	20Cr	渗碳、淬火、回火		56～62	高速中载、承受冲击载荷的齿轮。如汽车、拖拉机中的重要齿轮
	20CrMnMo		HRC23～33	56～62	
	20CrMnTi			56～62	
	38CrMoAlA	氮化		>65（HV>850）	载荷平稳、润滑良好的齿轮，内齿轮

中国民航出版社有限公司版权所有

续表

材料	牌号	热处理方法	硬度		应用举例
			齿芯 HB	齿面 HRC	
铸钢	ZG45	正火	163～197		重型机械中的低速齿轮
	ZG55		179～207		
	ZG35SiMn		163～217		
	ZG35SiMn	调质	197～248		标准系列减速器的大齿轮
球墨铸铁	QT50-5		147～241		可用来代替铸钢
	QT60-2		229～302		
灰铸铁	HT25-47		170～241		低速中载、不受冲击的齿轮。如机床操纵机构的齿轮
	HT30-54		187～255		
织物层压塑料			25～35		高速轻载齿轮

注：HV 表示维氏硬度。

3.3.12 齿轮传动的安装与维护

1. 齿轮安装的注意事项

（1）齿轮装配前应保证齿形和齿轮各部尺寸符合要求。

（2）齿轮安装在轴上，应避免安装歪斜，要求较高的应检查径向和端面的跳动量，高速轴还应进行动平衡检测。

（3）安装时应保证互相啮合的齿轮轴中心距准确，并且轴线平行，齿侧间隙合适，运转自如。

（4）圆锥齿轮安装对轴向位移和夹角都有严格要求。安装时对齿轮箱轴承孔的垂直度要仔细检查，小齿轮轴的轴向位置应首先保证，并保证两齿轮锥顶重合，如图 3.54 所示。

（5）齿轮安装好之后要进行涂色检验，检查两齿轮啮合接触位置和接触面积。接触位置应在两齿轮的节圆附近及齿长的中部。接触面积以接触斑点来计算，高度方向接触斑点不少于 30%～50%，宽度方向不少于 40%～70%，如图 3.55 所示。图 3.55（a）为正确啮合；图 3.55（b）为中心距太大；图 3.55（c）为中心距太小；图 3.55（d）为齿轮轴线偏斜。

中国民航出版社有限公司版权所有

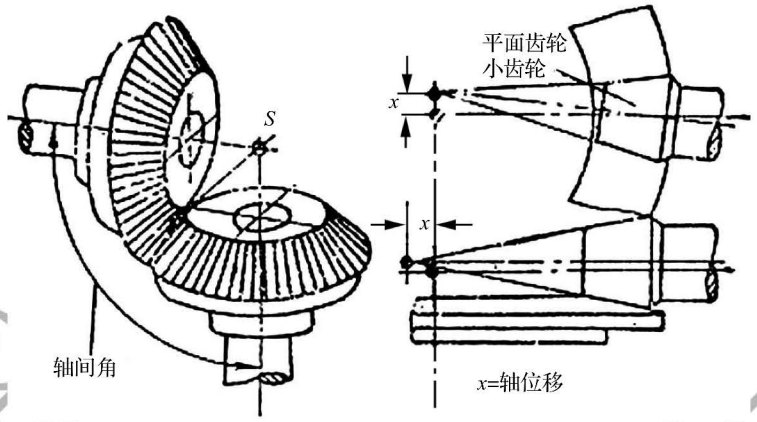


图 3.54　圆锥齿轮的安装位置

图 3.55　圆柱齿轮的接触斑点

2. 齿轮传动的维护

（1）经常检查润滑系统的状况，如润滑油的容量和质量、润滑油路是否畅通等。润滑油面应保持正常，过高则增加搅油使功率损失，过低会造成润滑不良；对压力润滑和喷油润滑系统还应检查油压，油压过高可能使润滑油路不畅，油压过低会导致供油不足，应进行必要的调整。

（2）按照使用规则定期补充或更换规定牌号的润滑油。

（3）注意观察监测齿轮传动的工作状况，如有无齿轮异响或齿轮箱过热等。齿轮异响主要由于齿面失效、齿体或齿轮轴变形、齿轮精度低、齿轮箱轴孔形位公差过大等原因引起。齿轮箱过热的原因，可能是由于齿侧隙过小、油质不好引起摩擦损失过大、润滑油不足、散热不良等。出现这方面的问题应及时检查，排除故障。

（4）按照使用要求定期检查齿轮的完好状况。对有齿面缺陷的齿轮进行更换。要注意，圆锥齿轮应成对更换。

3.3.13　齿轮精度检测

齿轮精度一般可通过测量公法线长度和固定弦齿厚两种方法来检测。

1. 测量公法线长度

测量公法线长度是一种简便可靠的测量齿厚方法，多用于检测直齿和斜齿圆柱齿轮。公法线长度就是在齿轮上用卡尺跨过 k 个齿量得的齿廓间的法线距离。如图 3.56 所示，卡尺的卡脚与齿数为 z 的齿轮齿廓相切于 A 、B 两点，设跨齿数为 k ，卡脚与齿廓切点 A、B 间的距离 AB 即为所测得的公法线长度，用 W 表示。

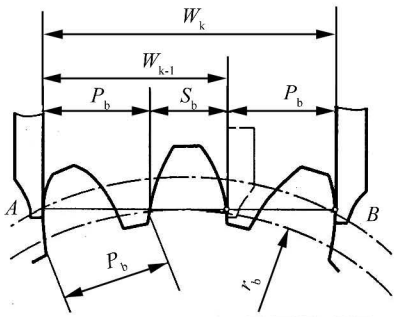


图 3.56　齿轮公法线长度的测量

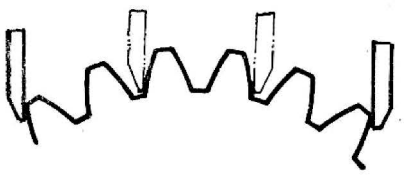


图 3.57　跨越齿数的影响

由图 3.56 可知：

$$W = (k - 1)p_b + s_b$$

式中，p_b ——齿轮基圆齿距（mm）；$p_b = p\cos\alpha = \pi m\cos\alpha$ ；

s_b ——齿轮基圆上的齿厚（mm）；$s_b = s\cos\alpha + mz\cos(\text{inv}\,\alpha) = m\cos\alpha(\pi/2 + z\,\text{inv}\,\alpha)$ 。

将 p_b 和 s_b 的关系式代入公法线长度 W 的计算公式中得：

$$W = m\cos\alpha[(k - 0.5)\pi + z\,\text{inv}\,\alpha] \tag{3-24}$$

对于标准齿轮，当 $\alpha = 20°$，$\text{inv}\,\alpha = 0.0149044$，公法线长度的计算公式为：

$$W = m[2.9521(k - 0.5)\pi + 0.014z] \tag{3-25}$$

在计算和测量公法线长度时，必须先确定跨齿数 k。如果卡尺的卡脚跨越的齿数太多，则卡脚的平面可能与齿顶尖角接触而不是与齿廓相切（见图 3.57）；如果跨齿数太少，则卡脚的尖端可能与齿廓根部接触；在这两种情况下测得的公法线长度都不准确。因此，要选择适当的跨齿数，使卡脚平面恰好切于分度圆附近。设卡尺的卡脚与齿廓的切点 A、B 在分度圆上（见图 3.56），公法线长度 W 所对应的圆心角 $\angle AOB = 2\alpha$，则弧 $\overset{\frown}{AB} = r2\alpha = (k - 0.5)p$ 。以 $r = mz/2$ 和 $p = \pi m$ ，得：

$$k = \frac{\alpha}{\pi}z + 0.5 \tag{3-26}$$

对于标准齿轮，$\alpha = 20°$，则上式可简化为

$$k = \frac{z}{9} + 0.5 = 0.111z + 0.5 \tag{3-27}$$

由上式计算得到的 k 值多为小数，应把它按四舍五入法取整数，然后再代入式(3-27)计算公法线长度 W。

为了减少计算，工程上已将模数 $m = 1$ mm、压力角 $\alpha = 20°$的标准直齿圆柱齿轮的公法线长度 W' 和跨齿数 k 列于表 3-13。使用该表时，如果模数不等于 1 mm 就先从表中查出 $m = 1$ mm 时的公法线长度 W′值，再乘上实际齿轮的模数值，就可以得到所求的公法线长度，即 $W = W'm$。

表 3-13　标准直齿圆柱齿轮的跨齿数 k 及公法线长度 W'（$m=1$ mm，$\alpha=20°$）

齿数	跨齿数	$m=1$ 的公法线长	齿数	跨齿数	$m=1$ 的公法线长	齿数	跨齿数	$m=1$ 的公法线长	齿数	跨齿数	$m=1$ 的公法线长
16	2	4.6523	36	5	13.7888	56	7	19.9732	76	9	26.1575
17	2	4.6663	37	5	13.8028	57	7	19.9872	77	9	26.1715
18	3	7.6324	38	5	13.8168	58	7	20.0012	78	9	26.1855
19	3	7.6464	39	5	13.8308	59	7	20.0152	79	9	26.1996
20	3	7.6604	40	5	13.8448	60	7	20.0292	80	9	26.2136
21	3	7.6744	41	5	13.8588	61	7	20.0432	81	10	29.1797
22	3	7.6885	42	5	13.8728	62	7	20.0572	82	10	29.1937
23	3	7.7025	43	5	13.8868	63	8	23.0233	83	10	29.2077
24	3	7.7165	44	5	13.9008	64	8	23.0373	84	10	29.2217
25	3	7.7305	45	6	16.8670	65	8	23.0513	85	10	29.2357
26	3	7.7445	46	6	16.8810	66	8	23.0654	86	10	29.2497
27	4	10.7106	47	6	16.8950	67	8	23.0794	87	10	29.2637
28	4	10.7246	48	6	16.9090	68	8	23.0934	88	10	29.2777
29	4	10.7386	49	6	16.9230	69	8	23.1074	89	10	29.2917
30	4	10.7526	50	6	16.9370	70	8	23.1214	90	11	32.2579
31	4	10.7666	51	6	16.9510	71	8	23.1354.	91	11	32.2719
32	4	10.7806	52	6	16.9650	72	9	26.1015	92	11	32.2859
33	4	10.7946	53	6	16.9790	73	9	26.1155	93	11	32.2999
34	4	10.8086	54	7	19.9452	74	9	26.1295	94	11	32.3139
35	4	10.8227	55	7	19.9592	75	9	26.1435	95	11	32.3279

2. 测量固定弦齿厚

测量固定弦齿厚，多用于检测圆锥齿轮和斜齿圆柱齿轮。固定弦齿厚是指标准齿条的齿廓与齿轮齿廓对称相切时，两切点之间的距离，即图 3.58 中的 $\overline{AB}$ 线段长度，以 $\overline{S}_c$ 表示。

根据渐开线原理推导得：

$$\bar{S}_c = \frac{\pi m}{2}\cos^2\alpha$$

$$\bar{h}_c = m\left(1 - \frac{\pi}{8}\sin 2\alpha\right)$$

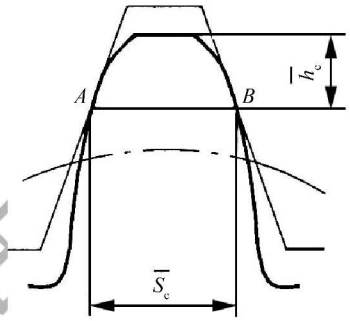


图 3.58　固定弦齿厚

式中，$\bar{h}_c$ 称为固定弦齿高，它是指固定弦 AB 至齿顶圆的垂直距离。

当 $\alpha = 20°$，$h_a^* = 1$ 时：

$$\bar{S}_c = 1.387m$$

$$\bar{h}_c = 0.7476m$$

$\bar{S}_c$ 和 $\bar{h}_c$ 也可查表 3-14 获得。

表 3-14　渐开线标准齿轮的固定弦齿厚 $\bar{S}_c$ 和固定弦齿高 $\bar{h}_c$（$h_a^* = 1$，$\alpha = 20°$）

m	$\bar{S}_c$	$\bar{h}_c$	m	$\bar{S}_c$	$\bar{h}_c$	m	$\bar{S}_c$	$\bar{h}_c$
1	1.3871	0.7476	2.5	3.4677	1.8689	5.5	7.6288	4.1117
1.25	1.7338	0.9344	3	4.1612	2.2427	6	8.3223	4.4854
1.5	2.0806	1.1214	3.5	4.8547	2.6165	7	9.7093	5.2330
1.75	2.4273	1.3982	4	5.5482	2.9903	8	11.0964	5.3806
2	2.7741	1.4951	4.5	6.2417	3.3641	9	12.4834	6.7284
2.25	3.1209	1.6820	5	6.9353	3.7379	10	13.8705	7.4757

注：1. 对于标准斜齿轮，表中的模数 m 指的是法面模数 m_n；

2. 对于直齿圆锥齿轮，模数 m 指的是大端模数，但圆锥齿轮多用分度圆弦齿厚和弦齿高表示。

3.3.14　齿轮传动航空应用案例

图 3.59 所示为西科斯基 S76 直升机的传动系统示意图，该系统包括主减速器、中间减速器和尾减速器。主减速器由直齿齿轮、斜齿齿轮和圆锥齿轮组成，中间减速器和尾减速器各由一对圆锥齿轮组成，减速器用来减速和改变动力传输方向。

在西科斯基 S76 直升机维护手册和定期工卡中，明确齿轮传动的检查应注意以下方面：

（1）航前和航后通过滑油观察窗来检查滑油的量。如果滑油量低于要求量，应该：

①确认是否存在滑油泄漏的问题，如果存在该问题要先找到泄漏原因，处理泄漏问题，然后加注规定型号的滑油到需要的量。

②如果不存在滑油泄漏的问题，加注规定型号的滑油到需要的量，登记加注滑油的量和加注日期，对比上次加注滑油日期以判断滑油消耗是否正常，如果滑油消耗过快，可能

存在齿轮磨损加剧的情况。

（2）根据手册要求，在一定的飞行时间后，将滑油放到规定容器中，然后清洗齿轮，加注规定型号的滑油到需要的量。将放出的滑油进行成分分析，确定金属屑含量是否超标，以判断齿轮是否磨损异常。

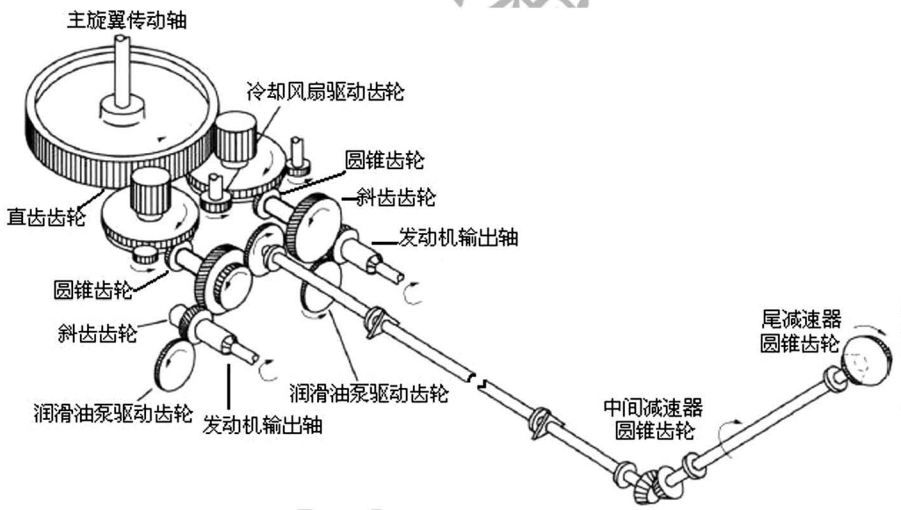


图 3.59　S76 直升机的传动系统示意图

（3）齿轮箱底部装有磁性堵头用来吸附滑油中的金属屑，如果齿轮磨损加剧，滑油中金属屑含量超标，磁性堵头中的电路接通，飞行员在飞行结束后会通知机务人员进行检查确认。正常情况下，要定期对磁性堵头进行清洁，以保证其能准确反映一定飞行时间内齿轮磨损情况。

（4）飞机齿轮箱上还安装有温度传感器或温度指示带。当齿轮磨损异常，滑油温度升高，温度传感器会报警，驾驶员会有记录并反馈给机务人员，温度指示带会在不同区域变速以提示滑油温度。机务人员需要每次航后检查温度指示带的颜色变化情况。

知识总结	随堂练习

3.4 蜗杆传动

蜗杆传动（Worm Drive）主要由蜗杆和蜗轮组成，如前面图 3.30 所示。它用于传递空间两垂直交错轴之间的运动和动力。一般蜗杆为主动件。利用蜗杆传动的传动比大、平稳和能自锁的特点，蜗杆传动常用在传动系统的低速级，或者改变传动方向和分度性要求比较高的地方。蜗杆传动在飞机飞行操纵系统附件中得到广泛的应用，如在襟翼和缝翼的操纵器、同步传感器中等。

3.4.1 蜗杆传动的类型和特点

1. 蜗杆传动的类型

根据蜗杆的形状，蜗杆传动可分为圆柱蜗杆传动［如图 3.60（a）所示］，圆弧面蜗杆传动［如图 3.60（b）所示］和锥面蜗杆传动［如图 3.60（c）所示］。

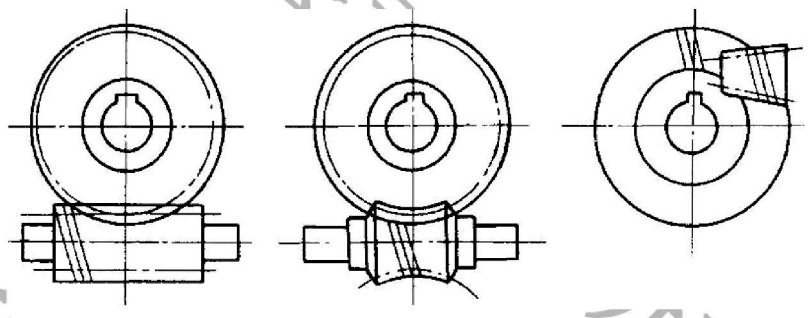


图 3.60 蜗杆传动的类型

1）圆柱蜗杆传动

圆柱蜗杆传动可分为普通圆柱蜗杆传动和圆弧齿圆柱蜗杆传动两大类。普通圆柱蜗杆传动又按其齿廓曲线形状的不同，可分为阿基米德蜗杆（ZA 型）、渐开线蜗杆（ZI 型）和法面直廓蜗杆（ZN 型）三种。由于阿基米德蜗杆加工方便，所以它应用最为广泛。

（1）阿基米德蜗杆传动。

阿基米德蜗杆在垂直于其轴线的剖面内，蜗杆齿形为阿基米德螺旋线；在通过其轴线的剖面内，蜗杆齿形为直线；在其法向剖面内，齿形为凸廓曲线，如图 3.61 所示。

中国民航出版社有限公司 版权所有

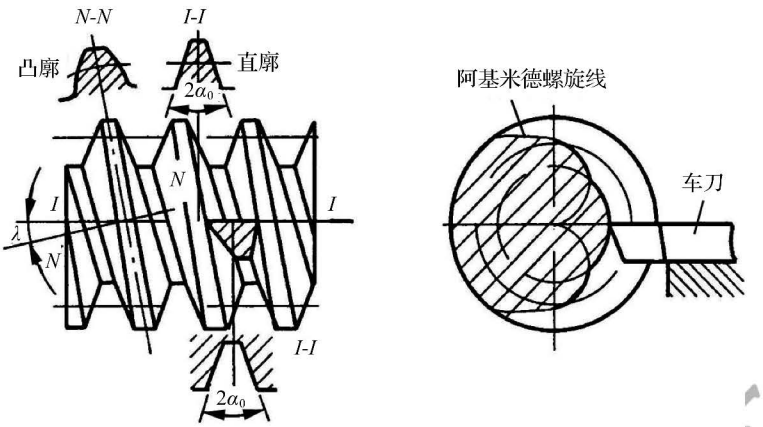


图 3.61　阿基米德蜗杆

（2）圆弧齿圆柱蜗杆传动。

如图 3.62 所示，通过蜗杆轴线并垂直于蜗轮轴线的平面称为主平面，主平面又称为中间平面。在主平面内蜗杆为凹圆弧齿形，蜗轮为凸圆弧齿形。由于是圆弧接触，齿面接触应力较小，同时齿面间容易形成油膜，所以与同尺寸的阿基米德蜗杆传动相比，其承载能力约为阿基米德蜗杆传动的 1.5~2.5 倍，传动效率提高 10%~15%，在相同条件下使用寿命可增加 1~2 倍，适宜高速、重载传动，应用较广。但圆弧齿蜗杆的制造工艺较复杂。

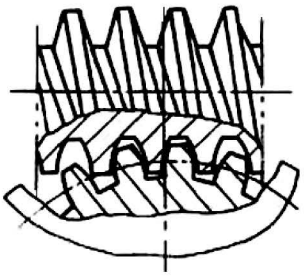


图 3.62　圆弧齿蜗杆传动

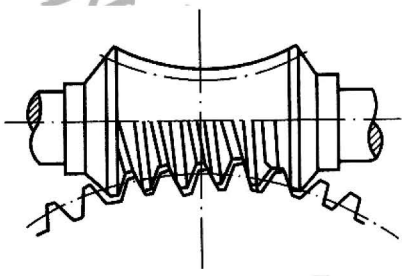


图 3.63　圆弧面蜗杆传动

2）圆弧面蜗杆传动

图 3.63 所示为圆弧面蜗杆传动，蜗杆的螺旋在圆弧回转体上，在主平面内，蜗杆和蜗轮的轮齿都为直线齿廓。这类传动由于同时相啮合的齿数增多，而且啮合情况好，所以承载能力高，但制造复杂。

以上介绍了几种蜗杆传动，总的来说，由于阿基米德蜗杆加工方便，实际应用中还是阿基米德蜗杆应用最广泛。以下以阿基米德蜗杆传动为例，介绍其特点、主要参数等。

2. 蜗杆传动的特点

蜗杆传动与齿轮传动相比有以下特点：

（1）传动比大，在一般传动中，$i=8\sim80$，在分度机构中，传动比可达 $i=600\sim1000$；

（2）传动平稳，由于蜗杆的齿是连续的螺旋形齿，所以传动平稳，噪声也小；

（3）具有自锁性，即只能蜗杆带动蜗轮，不能蜗轮带动蜗杆，但要注意，当蜗杆螺旋升角大时其自锁性不好；

（4）传动效率低，蜗杆传动中，蜗轮齿沿蜗杆齿的螺旋线方向滑动速度大，摩擦剧烈，效率低，通常 $\eta=0.7\sim0.9$ 之间，在具有自锁性能的蜗杆传动中，$\eta<0.5$，所以不宜传递较大功率，一般在 300 kW 以下；

（5）成本较高，为减少蜗杆传动时的摩擦，蜗轮常用较贵的青铜制造，有时还须采用散热措施，故成本较高。

3.4.2 蜗杆传动的主要参数和几何尺寸计算

在蜗杆传动的设计计算中都是以主平面的参数和几何关系为基准的。各参数如图 3.64 所示。

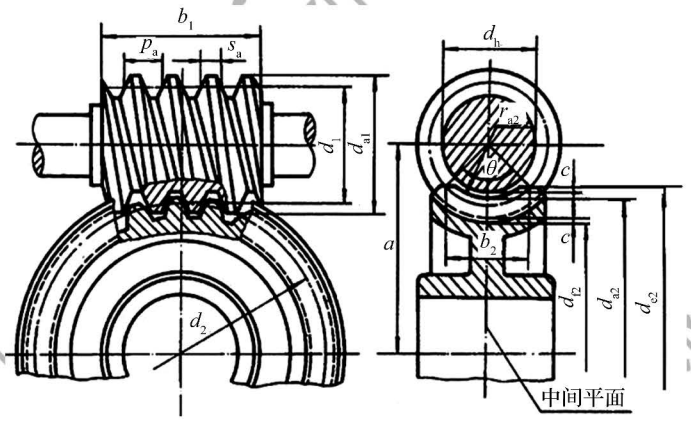


图 3.64　蜗杆传动在主平面内的啮合及几何尺寸

1. 模数和压力角

如图 3.64 所示，蜗杆和蜗轮的啮合情况，如同齿条和渐开线齿轮的啮合情况一样。蜗杆与蜗轮啮合时，蜗杆的轴向齿距 p_a 应与蜗轮分度圆齿距 p_t 相等，因而，蜗杆的轴向模数 m_a 应与蜗轮的端面模数 m_t 相等，即：$m_a=m_t$。蜗杆模数 m 就是指蜗杆的轴向模数，即：$m=p_a/\pi$。蜗杆模数 m 已标准化，可查 GB 10088—1988 获得。

蜗杆的轴向压力角 α 等于蜗轮的端面压力角 α_t，均为标准压力角，即：$\alpha=\alpha_t=20°$。

2. 蜗杆头数和蜗轮齿数

根据传动比的大小，由表 3-15 选取蜗杆头数 z_1，再由 $z_2 = iz_1$ 求得蜗轮齿数 z_2。为了避免蜗轮齿发生根切，z_2 不应小于 26~28，但也不宜大于 60~80，否则结构尺寸会过大。

表 3-15　根据传动比推荐采用的蜗杆头数 z_1

传动比 i 的范围	7~8	9~13	14~27	28~40	40 以上
蜗杆头数 z_1	4	3~4	2~3	1~2	1

3. 蜗杆特性系数和螺旋升角

蜗杆分度圆直径 d_1 与模数 m 之比，称为蜗杆特性系数 q，即：

$$q = d_1/m \tag{3-28}$$

上式可改写为 $d_1 = qm$，即当模数一定时，蜗杆的分度圆直径将随 q 值变化。因蜗轮的轮齿通常是用滚刀切制的，滚刀的尺寸必须与蜗杆的尺寸基本相同（为保持蜗杆传动的径向间隙，滚刀外径稍大于蜗杆的顶圆直径）。为了减少滚刀的数目，对每一标准模数都规定了几个 q 值，见表 3-16。即对每个标准模数规定了几个蜗杆直径和相应的滚刀。这样，既能满足生产上的需要，又符合经济原则。

表 3-16　m 与 q 的搭配及相应的 $m\sqrt[3]{q}$ 值

m（mm）	1.5		1.75	2		[2.25]		2.5		2.75		3		3.5
q	14	16	14	12	16	12	14	10	12	10	12	10	12	10
$m\sqrt[3]{q}$（mm）	3.62	3.79	4.23	4.58	5.04	5.15	5.45	5.34	5.73	5.95	6.3	6.46	6.87	7.56
m（mm）	3.5		4		[4.5]	5			[5.5]			6		7
q	12	9	10	12	10	9	10	12	9	10	9	10	12	9
$m\sqrt[3]{q}$（mm）	8.03	8.35	8.62	9.15	9.72	10.4	10.8	11.5	11.5	11.9	12.5	12.9	13.8	14.5
m（mm）	7		8			[9]			10					[11]
q	10	12	8	9	10	12	8	10	12	8	9	10	12	8
$m\sqrt[3]{q}$（mm）	15.1	16.1	16	16.6	17.2	18.4	18	19.5	20.6	20	20.8	21.5	22.9	22
m（mm）	[11]	12				14			16		18	20	22	25
q	10	8	9	10	12	8	9	10	8	9	8	8	8	8
$m\sqrt[3]{q}$（mm）	23.8	24	25	25.9	27.4	28	29.2	30.2	32	33.4	36	40	44	50

注：1. “［］”中的 m 值是第二系列，其余是第一系列。

2. 当用非标准滚刀或飞刀加工蜗轮时，q 值不受表中数值的限制。

中国民航出版社有限公司版权所有

设 λ 为蜗杆分度圆上的螺旋升角，P_{a1} 为轴向齿距，由图 3.65 可得：

$$\tan\lambda = \frac{z_1 P_{a1}}{\pi d_1} = \frac{z_1 m}{d_1} = \frac{z_1}{q} \tag{3-29}$$

当 z_1 和 q 值确定之后，λ 值即可由式（3-29）求得，或由表 3-17 查得。

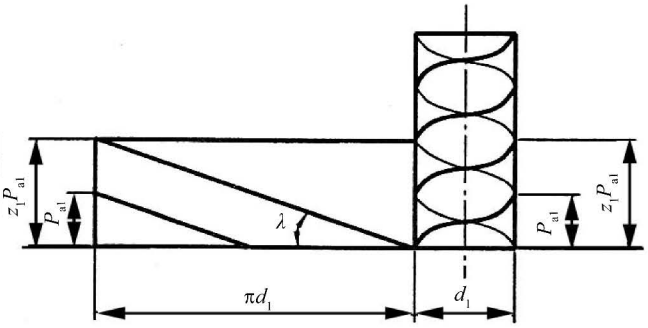


图 3.65　蜗杆分度圆柱展开

表 3-17　蜗杆分度圆上的螺旋升角 λ

z_1	q					
	16	14	12	10	9	8
1	3°34′35″	4°05′08″	4°45′49″	5°42′38″	0°20′25″	7°07′30″
2	7°07′30″	8°07′48″	9°27′44″	11°18′36″	12°31′44″	14°02′10″
3	10°27′15″	12°05′40″	14°02′10″	16°41′56″	18°26′06″	20°33′22″
4	14°02′10″	15°55′43″	18°26′06″	21°48′05″	23°57′45″	26°33′54″

4. 蜗杆传动的几何计算

标准阿基米德蜗杆传动几何尺寸的计算公式列于表 3-18（参见图 3.64）。

表 3-18　标准阿基米德蜗杆传动几何尺寸计算公式

名称	符号	计算公式	
		蜗杆	蜗轮
齿顶高	h_a	$h_{a1} = h_{a2} = m$	
齿根高	h_f	$h_{f1} = h_{f2} = 1.2m$	

续表

名称	符号	计算公式	
		蜗杆	蜗轮
全齿高	h	$h_1 = h_2 = 2.2m$	
分度圆直径	d	$d_1 = mq$	$d_2 = mz_2$
齿顶圆直径	d_a	$d_{a1} = d_a + 2h_{a1} = m(q+2)$	$d_{a2} = d_2 + 2h_{a2} = m(z_2+2)$
齿根圆直径	d_f	$d_{f1} = d_1 - 2h_{f1} = m(q-2.4)$	$d_{f2} = d_2 - 2h_{f2} = m(z_2-2.4)$
中心距	a	$a = \frac{1}{2}m(q+z_2)$	
蜗杆升角	λ	$\lambda = \tan^{-1}\frac{z_1}{q}$	
蜗杆蜗旋长度	L	$L = (12+0.1z_2)m \quad (z_1 = 1 \sim 2)$ $L = (13+0.1z_2)m \quad (z_1 = 3 \sim 4)$	
蜗轮宽度	b		$z_1 = 1 \sim 3,\ b = 0.75d_{a1}$ $z_1 = 4,\ b = 0.67d_{a1}$
蜗轮外圆直径	d_{w2}		$z_1 = 1,\ d_{w2} \leqslant d_{a2} + 2m$ $z_1 = 2 \sim 3,\ d_{w2} \leqslant d_{a2} + 1.5m$ $z_2 = 4,\ d_{w2} \leqslant d_{a2} + m$
蜗轮包角	2γ		一般　$2\gamma = 70° \sim 90°$

注：2γ 是指蜗杆与蜗轮啮合时，蜗杆分度圆的接触弧所对中心角。

5. 蜗杆传动的传动比

蜗杆与普通螺纹一样，有单头和多头之分。单头蜗杆每转一圈，蜗轮转过一个齿；双头或三头蜗杆转一圈时，蜗轮分别转过两个或三个齿。设蜗杆头数为 z_1，蜗轮齿数为 z_2，当蜗杆转动一圈时，蜗轮转过 z_1/z_2 圈。当蜗杆转速为 n_1 时，蜗轮的转速应为 $n_2 = n_1 z_1/z_2$。所以蜗杆的传动比为：

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \tag{3-30}$$

通常取 $z_1 = 1 \sim 4$。z_1 取得愈小，可以得到很大的传动比，而且结构紧凑；但 z_1 愈小，蜗杆的螺旋升角也小，蜗杆传动的效率就愈低，所以要根据具体条件适当选择蜗杆头数 z_1。

中国民航出版社有限公司版权所有

3.4.3 蜗杆传动的正确啮合条件和旋向判定

1. 蜗杆传动的正确啮合条件

阿基米德蜗杆与蜗轮在主平面内的啮合如同齿条与齿轮的啮合，为了保证轮齿的正确啮合，蜗杆的轴向模数 m_{a1} 和轴向压力角 α_{a1}，应分别等于蜗轮的端面模数 m_{t2} 和端面压力角 α_{t2}。同时蜗杆分度圆上的螺旋升角 λ 应等于蜗轮分度圆上的螺旋角 β，即：

$$m_{a1} = m_{t2} = m$$

$$\alpha_{a1} = \alpha_{t2} = \alpha$$

$$\lambda = \beta$$

2. 蜗杆传动的旋向判定

蜗杆和蜗轮的转动方向，可根据蜗杆传动具有螺旋传动的特点来判定，如图 3.66 所示。

首先，从简图上判断轮齿螺旋线的旋向。从蜗杆或蜗轮的轴向看去，若螺旋线是从左下斜向右上方，则为右旋［见图 3.66（a）］；反之，则为左旋［见图 3.66（b）］。然后，再根据蜗杆的 n_1 转向来确定蜗轮 n_2 的转向。螺旋线为右旋时，用右手定则来判定：右手四指指向 n_1 的转向，则与拇指所指的相反方向为蜗轮的转向，如图 3.66（a）中的 n_2 所示。螺旋线为左旋时，则用左手按同样的方法判定蜗杆的转向，如图 3.66（b）中的 n_2 所示。

另外，蜗轮的转向也和蜗杆与蜗轮的相对安装位置有关。比较图 3.66（b）和图 3.66（c）可以看出，它们同为左旋蜗杆传动，n_1 也相同，但两者的 n_2 却相反。

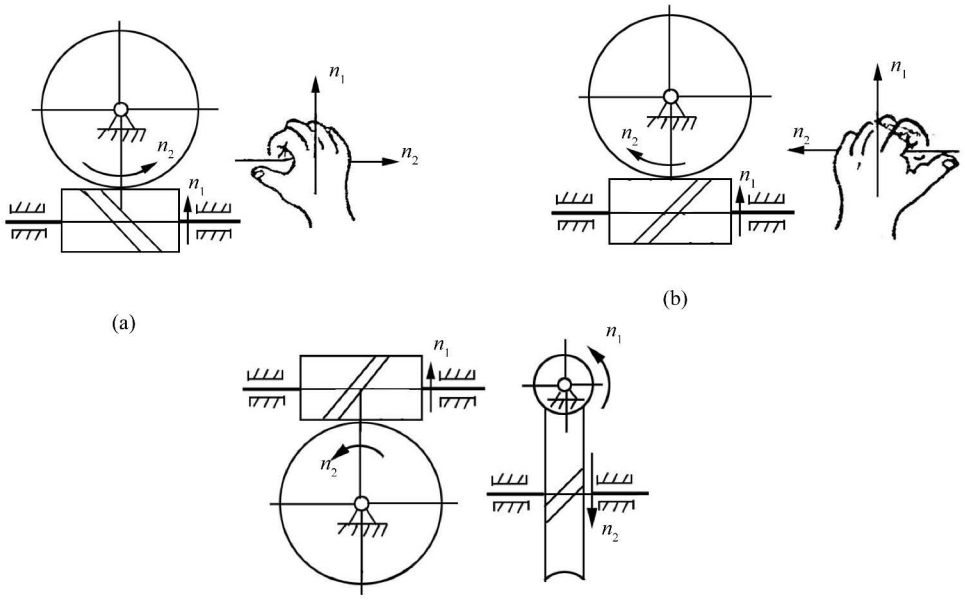


图 3.66　确定蜗杆传动的转向

3.4.4　蜗杆传动的失效形式及维护

1. 失效形式

蜗杆传动轮齿的失效形式和齿轮传动类似，有轮齿折断、疲劳点蚀、胶合和磨损等。但由于蜗杆传动在齿面间有较大的相对滑动速度，因而摩擦与发热远比齿轮传动严重，更易发生齿面磨损和胶合。通常蜗轮轮齿的材料较软，强度较弱，损坏多出现在蜗轮上。实践证明，在闭式传动中，蜗轮的失效形式主要是齿面点蚀和胶合；在开式传动中，其失效形式主要是磨损。只有当过载时，才发生轮齿折断的现象。

2. 蜗杆传动的维护

蜗杆传动的维护与齿轮传动的维护相同，但由于蜗杆传动本身的特点以及常用作自锁，所以还应注意以下两点：

（1）对于单向工作的蜗杆传动，蜗轮齿面上的接触斑点应位于其中部，且稍偏蜗杆旋出的方向，以确保旋入处有一定的间隙，同时轮齿接触斑点应具有一定的高度和宽度。若达不到要求，则可通过适当移动蜗轮轴向位置来改善。

（2）蜗杆传动在使用过程中，由于蜗轮与蜗杆齿的磨损而使齿侧间隙过大，将导致蜗杆传动不准确甚至不能自锁，这时应认真检查修理。如果蜗轮圈轮齿的厚度磨损超过允许范围，应更换蜗轮圈。

知识总结	随堂练习

3.5　轮系

3.5.1　轮系的功用和分类

前面已经讨论了一对齿轮组成的齿轮机构，它是齿轮传动中最简单的形式。但是在实

中国民航出版社有限公司版权所有

际应用中，由于主动轴与从动轴的距离较远，或要求有较大的传动比，或要求实现变速和变向等原因，用一对齿轮传动已不能满足需要，常采用一系列互相啮合的齿轮来进行传动。这种齿轮传动系统就称为轮系（Gear Trains）。

1. 轮系的功用

在各种机械设备中和飞机上，轮系的应用是十分广泛的，其主要功用如下。

1）增大传动比

一般一对齿轮的传动比只能达到2~6，传动比超过6以后，小齿轮磨损太快且大齿轮要做得较大，故不宜采用。应用轮系传动就可以达到很大的传动比；尤其利用行星轮系可以由很少几个齿轮获得很大的传动比，而且结构紧凑。

2）作较远距离传动

当主动轴和从动轴之间的距离较远；而又必须采用齿轮传动时，如果仅用一对齿轮来传动，如图3.67中所示轮1和轮2，齿轮的尺寸做得很大，既增大机器结构尺寸，又费材料，而且制造、安装都不方便。若改用齿轮3、4、5、6组成的轮系来传动，则能避免上述缺点，做到结构较紧凑、合理。

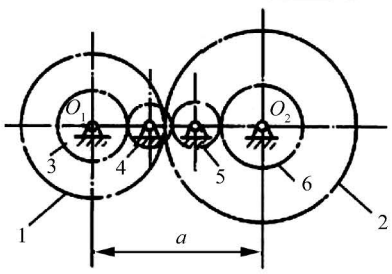


图3.67　传递相距较远两轴之间的运动

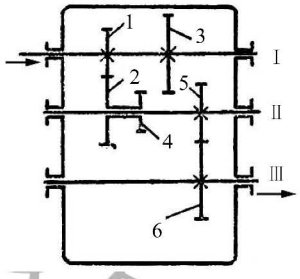


图3.68　汽车变速箱传动简图

3）实现变速传动

当主动轴的转速不变时，利用轮系可使从动轴获得多种转速。汽车、机床和起重设备等需要这种变速传动。图3.68为汽车变速箱的传动系统图，运动从轴Ⅰ传入，从轴Ⅱ传出，齿轮2与4为滑动双联齿轮，可在轴Ⅱ上滑动，并且可分别与齿轮1与齿轮3啮合，从而使轴Ⅲ得到两种不同的转速。

4）实现分路传动

应用轮系可以使一根主动轴通过齿轮带动若干根从动轴同时转动。图3.69为某飞机发动机附件传动示意图。图中，动力由发动机压气机轴经径向传动轴传来，再通过轮系分多路传出，带动飞机发电机、滑油泵、高压燃油泵、低压燃油泵和液压泵等工作。

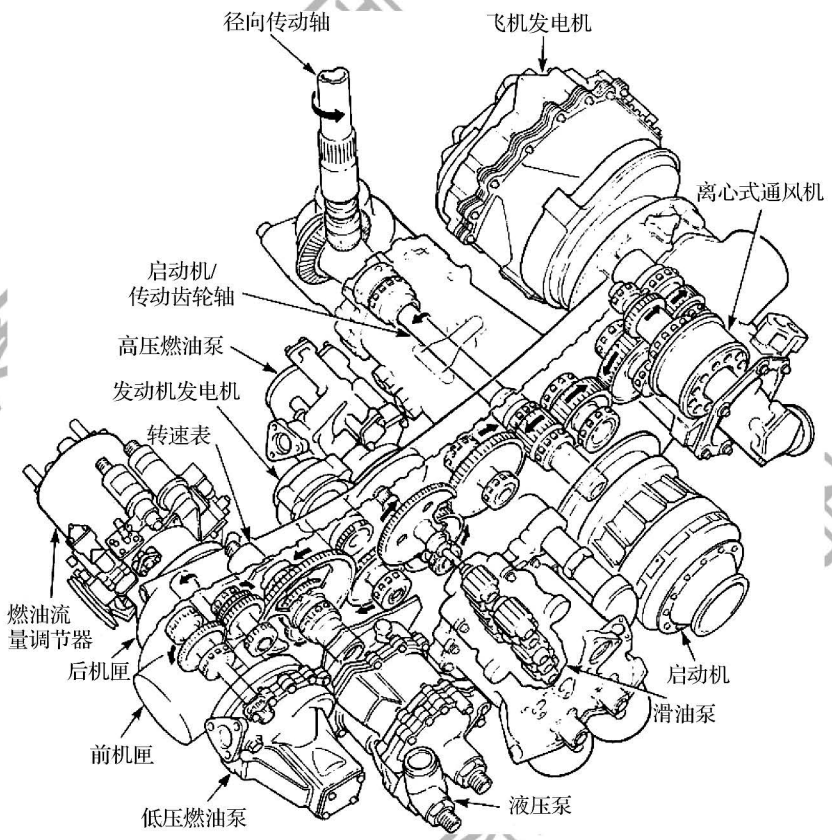


图 3.69　飞机发动机附件传动

5）合成或分解运动

采用周转轮系可以将两个独立运动合成一个运动，或将一个运动分解为两个独立运动。例如，汽车后桥上的差速器，它将汽车传动轴的输入转速分解为两个后车轮的转速，以适应汽车转弯的需要。

2. 轮系的分类

根据轮系在传动中轴线位置是否在空间固定，将其分为定轴轮系和周转轮系两大类。

1）定轴轮系（Ordinary Gear Trains）

在传动时，所有齿轮的回转轴线都具有固定位置的轮系，称为定轴轮系，如图 3.70 所示。

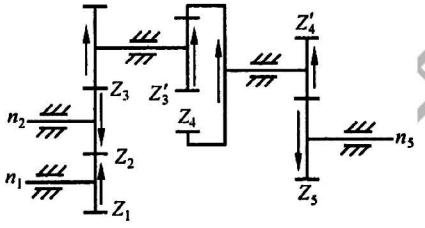
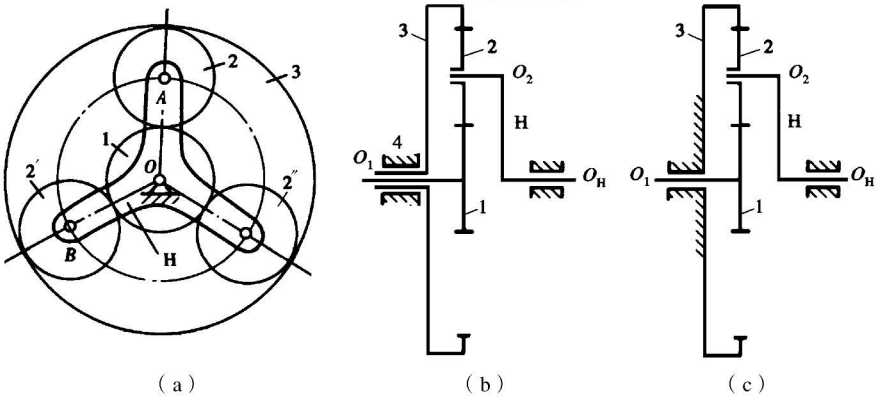


图 3.70　定轴轮系

2）周转轮系（Epicyclic Gear Trains）

在传动时至少有一个齿轮的轴线是绕另一齿轮的固定轴线作周转的轮系，称为周转轮系，如图 3.71 所示。在该图中，齿轮 2 空套在构件 H 的端

部，传动时，它除绕自身几何轴线 O_2 转动（自转）外，同时随轴线 O_2 绕固定轴线 O_1 转动（公转）。这种具有自转和公转的齿轮，其运动与太阳系中的行星绕太阳作自转和公转一样，故称其为行星轮。与行星轮啮合且几何轴线固定的齿轮称为中心轮（图 3.71 中的齿轮 1 和 3）。带动行星轮作公转的构件 H 称为转臂或系杆。



（a）　　（b）　　（c）

图 3.71　周转轮系的组成及类型

在周转轮系中，行星轮、中心轮和转臂是基本构件。每一个单一的周转轮系具有一个转臂，中心轮不超过两个，行星轮至少有一个。为了平衡行星轮产生的离心惯性力和减少齿轮的作用力，通常采用多个对称分布的行星轮，如图 3.71（a）所示。因为这种行星轮的个数对分析周转轮系的运动没有任何影响，所以在机构运动简图中可以只画出一个。

根据机构的自由度，周转轮系可分为差动轮系和行星轮系两种类型。

图 3.71（b）所示的周转轮系，两个中心轮都能转动。该轮系自由度为：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 4 - 2 = 2$$

这种具有两个自由度的周转轮系称为差动轮系。

图 3.71（c）所示的周转轮系，只有一个中心轮能转动。该轮系自由度为：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 2 = 1$$

这种具有一个自由度的周转轮系称为行星轮系。

3）混合轮系（Combined Gear Trains）

在一个轮系中，既有定轴轮系又有周转轮系的轮系，或者两个以上的周转轮系组成的轮系都称之为混合轮系，如图 3.72 所示，齿轮 1—2—2′—3 组成定轴轮系，3′—4—H—5 组成周转轮系，所有齿轮合在一起就组成了混合轮系。如图 3.73 所示，则是由两个周转轮系组成的混合轮系。

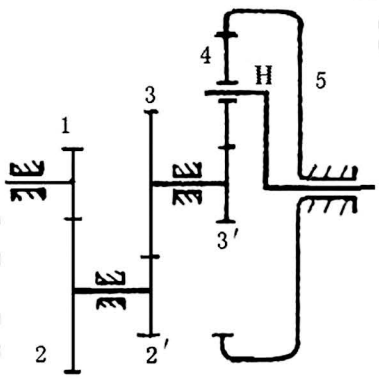


图 3.72　混合轮系 1

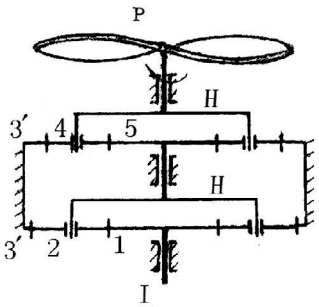


图 3.73　混合轮系 2

3.5.2　轮系传动比的计算

1. 定轴轮系传动比的计算

轮系中首末两轮角速度或转速之比称为该轮系的传动比。传动比用 i 表示。一对圆柱齿轮啮合传动时，其传动比为：

$$i_{12}=\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{n_1}{n_2}=\pm\frac{z_2}{z_1} \tag{3-31}$$

式中，i_{12} 表示轮 1 为主动轮、轮 2 为从动轮时的传动比。齿数比前的“+”号用于内啮合，表示两轮转向相同；“-”号用于外啮合，表示两轮转向相反。

下面讨论定轴轮系的传动比。图 3.70 所示的定轴轮系中，齿轮 1 为首轮，齿轮 5 为末轮。设各轮的齿数分别为 z_1、z_2、z_3、z'_3、z_4、z'_4 和 z_5，各轮的转速分别为 n_1、n_2、n_3、n'_3($n'_3=n_3$)、n_4 和 n_5。根据公式（3-31）可以求得轮系中各对啮合齿轮的传动比：

$$i_{12}=\frac{n_1}{n_2}=-\frac{z_2}{z_1}$$

$$i_{23}=\frac{n_2}{n_3}=-\frac{z_3}{z_2}$$

$$i_{3'4}=\frac{n'_3}{n_4}=\frac{n_3}{n_4}=\frac{z_4}{z'_3}$$

$$i_{45}=\frac{n_4}{n_5}=-\frac{z_5}{z_4}$$

将以上四式连乘得：

$$i_{12}\cdot i_{23}\cdot i_{3'4}\cdot i_{45}=\frac{n_1}{n_2}\cdot\frac{n_2}{n_3}\cdot\frac{n_3}{n_4}\cdot\frac{n_4}{n_5}=\left(-\frac{z_2}{z_1}\right)\cdot\left(-\frac{z_3}{z_2}\right)\cdot\left(\frac{z_4}{z'_3}\right)\cdot\left(-\frac{z_5}{z'_4}\right)$$

于是有：

$$i_{15}=\frac{n_1}{n_5}=i_{12}\cdot i_{23}\cdot i_{3'4}\cdot i_{45}=(-1)^3\frac{z_3z_4z_5}{z_1z'_3z'_4}$$

上式表明，定轴轮系的传动比等于轮系中各对啮合齿轮传动比的连乘积，其值等于所有从动轮齿数连乘积与所有主动轮齿数连乘积之比，其正负号取决于外啮合齿轮的对数，奇数对外啮合取负号，偶数对外啮合取正号。

以上分析可推广到一般情形。设定轴轮系首轮转速为 n_1，末轮转速为 n_k，则轮系的传动比可由下式表示：

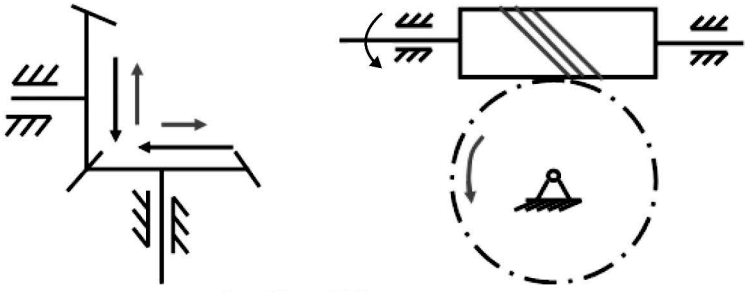
$$i_{1k}=\frac{n_1}{n_k}=(-1)^m\frac{\text{所有从动轮齿数乘积}}{\text{所有主动轮齿数乘积}}\qquad(3-32)$$

式中，m 为轮系中外啮合齿轮对数。

轮系传动比的正负号，也可用画箭头法确定，如图 3.70 所示。图中轮 5 与轮 1 箭头方向相反，应取负号，这与计算结果一致。

在分析图 3.70 所示轮系的传动比时，齿轮 2 在前一对啮合齿轮中是从动轮，在后一对啮合齿轮中是主动轮，故其齿数在公式的分子和分母中同时出现而互相消去。在轮系中，这种不影响传动比大小，仅起传递运动和改变转向作用的齿轮称为惰轮。

在图 3.74 所示的有空间齿轮的定轴轮系中，不但包括了圆柱齿轮传动，而且包含圆锥齿轮传动和蜗杆传动。这种轮系的传动比的大小仍可用公式（3-32）来计算，但不能用 $(-1)^m$ 的规律确定转向，而只能用画箭头法来确定转向，如图 3.74 所示。



（a）圆锥齿轮传动　　（b）蜗杆蜗轮传动

图 3.74　有空间齿轮的定轴轮系

另外，在机床传动系统和发动机附件传动系统的传动计算中，为了便于计算轮系末轮的转速，常定义传动比为：

$$i_{k1}=\frac{\omega_k}{\omega_1}=\frac{n_k}{n_1}=(-1)^m\frac{z_1z_3\cdots z_{k-1}}{z_2z_4\cdots z_k} \tag{3-33}$$

于是当首轮转速 n_1 已知时，容易求得末轮转速：

$$n_k=n_1i_{k1}$$

显然 $i_{k1}=1/i_{1k}$，即 i_{k1} 与 i_{1k} 互为倒数。

在定轴轮系中，通常先判断各部分的转动方向，然后算传动比。

例 3.1　图 3.75 所示为三叉戟飞机斯贝 512-5W 型发动机附件传动系统一支路，运动由发动机高压轴上齿轮 1 传入，由齿轮 9 输出带动滑油泵。各齿轮齿数 $z_1=44$，$z_2=31$，$z_3=19$，$z_4=53$，$z_5=47$，$z_6=33$，$z_7=61$，$z_8=32$，$z_9=62$，试计算：

（1）轮系的传动比 i_{91} 为多少？

（2）当高压轴达到最高转速 12800 r/min 时，滑油泵的转速为多少？

解：由图 3.71 可以看出，该轮系为定轴轮系。但轮系中有圆锥齿轮传动，所以只能用式（3-33）计算传动比的大小，圆锥齿轮转向须用画箭头的方法确定。

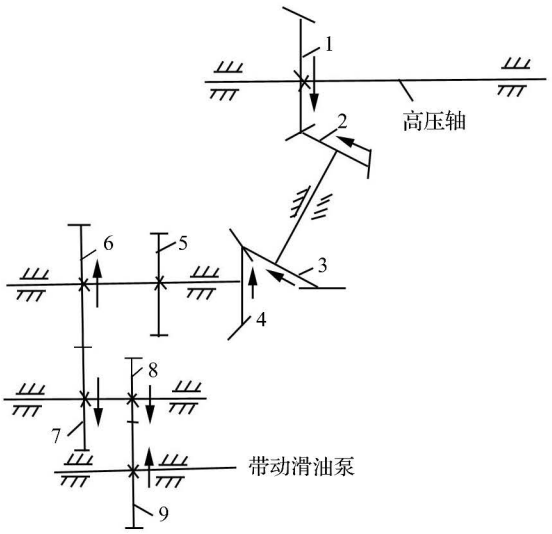


图 3.75　三叉戟飞机发动机附件传动系统一支路

（1）传动比：

$$i_{19}=\frac{z_2z_4z_7z_9}{z_1z_3z_6z_8}=\frac{31\times53\times61\times62}{44\times19\times33\times32}\approx7.039$$

$$i_{91}=1/i_{19}=1/7.039\approx0.142$$

（2）滑油泵的转速即为齿轮 9 的转速 $n_9 = n_1 i_{91}$，代入给定数据求得齿轮 9 的转速为：

$$n_9 = n_1 i_{91} = 12800 \times 0.142 = 1818 \text{ r/min}$$

各齿轮的转向如图 3.75 中箭头所示。

2. 周转轮系传动比的计算

周转轮系和定轴轮系的根本区别在于周转轮系中有转臂，它使行星轮既有自转又有公转。因此计算周转轮系的传动比就不能直接应用定轴轮系的计算公式。

根据相对运动原理，当给图 3.71 所示的周转轮系加上一个与转臂 H 的转速 n_H 大小相等、方向相反的公共转速（$-n_H$）后，各构件的相对运动并不改变。

然而这时转臂不动了，行星轮不再公转而变为定轴转动。因为中心轮与转臂同轴线，故各中心轮仍作定轴转动。于是周转轮系就转化为定轴轮系了，如图 3.76 所示。这种经过转化的假想的定轴轮系称为原周转轮系的转化轮系。

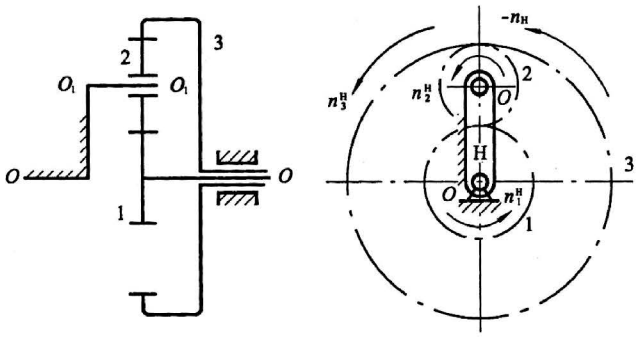


图 3.76　转化轮系

转化轮系中各构件的转速 n_1^H、n_2^H、n_3^H 及 n_H^H 的右上方都带角标 H，表示这些转速是各构件对转臂 H 的相对转速。现将各构件转化前后的转速列于表 3-19。

表 3-19　各构件转化前后的转速

构件	原来的转速	转化轮系中的转速
1	n_1	$n_1^H = n_1 - n_H$
2	n_2	$n_2^H = n_2 - n_H$
3	n_3	$n_3^H = n_3 - n_H$
H	n_H	$n_H^H = n_H - n_H = 0$

既然周转轮系的转化轮系是定轴轮系，就可应用求解定轴轮系传动比的方法计算其中任意两个齿轮的传动比。例如，在转化轮系中齿轮 1 对齿轮 3 的传动比 i_{13}^{H} 为：

$$i_{13}^{H}=\frac{n_1^{H}}{n_3^{H}}=\frac{n_1-n_H}{n_3-n_H}=-\frac{z_3}{z'_1}$$

现将以上分析推广到一般情形。设 n_G 和 n_K 为周转轮系中任意两个齿轮 G 和 K 的转速，它们与转臂 H 的转速 n_H 间的关系应为

$$\frac{n_G-n_H}{n_K-n_H}=\pm\frac{\text{从 G 至 K 所有从动轮齿数乘积}}{\text{从 G 至 K 所有主动轮齿数乘积}} \tag{3-34}$$

在转化轮系中，齿轮 G 和 K 转向相同时，公式右边取正值；转向相反时取负值。

应用式（3-34）时必须注意以下几点：

（1）公式中设 G 为主动轮，K 为从动轮，因此中间各轮的主从地位应从齿轮 G 起按顺序判定；

（2）公式是在假设所有构件转向相同的情况下导出的，因此在求解未知转速时，必须先假定某一转向的转速为正，相反方向的转速以负值代入公式；

（3）推导公式时对各构件所加的公共转速（$-n_H$）与各构件原来的转速是代数相加，所以公式只适用于齿轮 G、K 和转臂 H 的轴线互相平行的场合。

例 3.2　在图 3.71 所示的周转轮系中，已知 $z_1=17$，$z_3=85$，$n_1=300$ r/min，顺时针转动。请分别求出当 $n_3=0$ 和 $n_3=120$ r/min（逆时针转动）时的 n_H。

解：由公式（3-34）得转化轮系传动比为：

$$\frac{n_1-n_H}{n_3-n_H}=-\frac{z_3}{z_1}$$

当 $n_3=0$ 时：

$$\frac{300-n_H}{0-n_H}=-\frac{85}{17}=-5$$

解得：

$$n_H=50\ \text{r/min}$$

n_H 为正值，表示转臂顺时针转动。

当 $n_3=-120$ r/min（逆时针转动代入负值）时：

$$\frac{300-n_H}{-120-n_H}=-\frac{85}{17}=-5$$

解得：

$$n_H=-50\ \text{r/min}$$

n_H 为负值，表示转臂逆时针转动。

中国民航出版社有限公司版权所有

例 3.3　某发动机减速器采用的双行星轮系（具有双排行星轮）如图 3.73 所示。已知：$z_1 = 21$，$z_2 = 31$，$z_2' = 25$，$z_3 = 72$，输出轴转速 $n_H = 2830$ r/min，求 n_1。

解：这一轮系传动比的计算与单行星轮系相同。

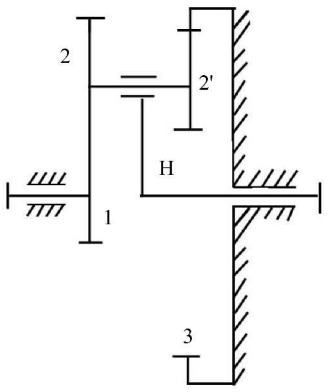


图 3.77　双行星轮系

$$i_{13}^{H} = \frac{n_1^{H}}{n_3^{H}} = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = -\frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_3}{z'_2}$$

$$i_{1H} = \frac{n_1}{n_H} = 1 - i_{13}^{H} = 1 + \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_3}{z'_2}$$

代入齿数，上式得

$$i_{1H} = 1 + \frac{31 \times 72}{21 \times 25} = 5.251$$

$$n_1 = i_{1H} \times n_H = 5.251 \times 2830 = 14860 \text{ r/min}$$

n_1 的转向与 n_H 相同。

例 3.4　图 3.78 所示为圆锥齿轮差动轮系。已知：$z_1 = z_3$，$n_H = 50$ r/min（逆时针转动）。求当 $n_1 = 0$ 和 $n_1 = 200$ r/min（逆时针转动）时的 n_3。

解：由式（3-34）得转化轮系传动比为：

$$\frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = -\frac{z_3}{z_1} = -1$$

$$n_1 - n_H = -n_3 + n_H$$

$$\therefore n_1 + n_3 = 2n_H = 2 \times 50 = 100 \text{ r/min}$$

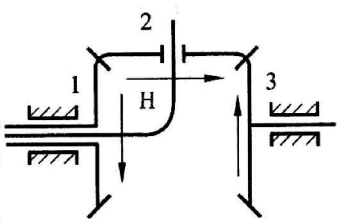


图 3.78　圆锥齿轮差动轮系

当 $n_1 = 0$ 时，

$n_3 = 2n_H - n_1 = 100$ r/min（逆时针转动）；

当 $n_1 = 200$ r/min 时，

$n_3 = 2n_H - n_1 = -100$ r/min（n_3 为负值，表示 n_3 为顺时针转动）。

3. 混合轮系传动比的计算

计算混合轮系传动比时，必须首先分清该轮系包括几个基本轮系以及这些基本轮系各由哪些构件组成，然后分别列出各基本轮系传动比的计算公式，再找出两个轮系的关联部位、两个轮系转速相同的构件，最后根据基本轮系间的组合方程联立解出所求的传动比。

例 3.5　如图 3.79 所示的混合轮系中，各齿轮齿数分别为：如图 3.75 所示的混合轮系中，各齿轮齿数分别为：$z_1 = z_2' = z_3' = 20$，$z_2 = z_3 = 40$，$z_5 = 80$，求传动比 i_{1H}。

解：该轮系包括两个基本轮系：齿轮 1、2、2′和 3 组成定轴轮系；齿轮 3′、4、5 和转臂 H 组成周转轮系。

定轴轮系中：

$$\frac{n_1}{n_3} = (-1)^2 \frac{z_2 z_3}{z_1 z'_2} = \frac{40 \times 40}{20 \times 20} = 4$$

$$\therefore\ n_3 = n_1/4 = \frac{n_1}{4} \qquad \text{(a)}$$

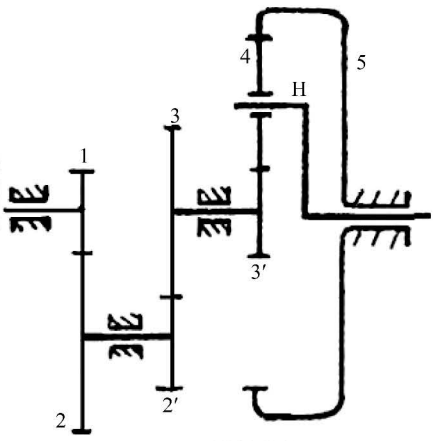


图 3.79　混合轮系

周转轮系中：

$$\frac{n'_3 - n_H}{n_5 - n_H} = -\frac{z_5}{z'_3}$$

$$\frac{n'_3 - n_H}{0 - n_H} = -\frac{80}{20} = -4$$

$$1 - \frac{n'_3}{n_H} = -4$$

$$n'_3 = 5n_H \qquad \text{(b)}$$

联立式（a）和式（b），因 $n_3 = n'_3$，所以得：

$$\frac{n_1}{4} = 5n_H$$

$$\therefore\ i_{1H} = \frac{n_1}{n_H} = 20$$

知识总结	随堂练习

3.6 螺旋传动

螺旋传动（Screw Drive）主要由螺杆和螺母组成。螺旋传动主要用来将主动件的旋转运动转换为从动件的直线移动，从而传递一定的动力和运动；也可用来调整并固定零件或部件之间的相对位置，应用十分广泛。

3.6.1 螺旋传动的类型及特点

1. 按作用分类

螺旋传动按其在精密机械中的作用，可分为调整螺旋、传力螺旋和传导螺旋。

1）调整螺旋

用以调整、固定零件的相对位置，如机床、仪器及测试装置中的微调机构的螺旋，如图 3.80 所示千分尺。调整螺旋不经常转动，一般在空载下调整。

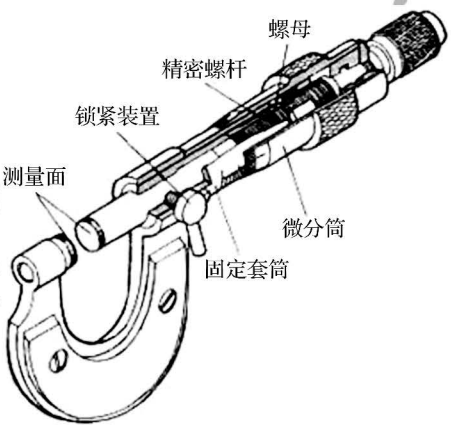


图 3.80 千分尺结构图

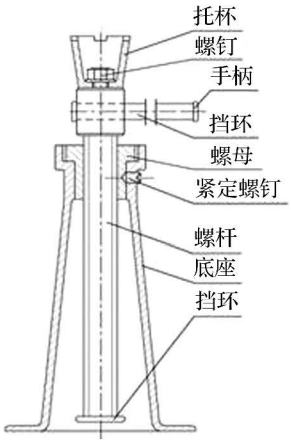


图 3.81 螺旋千斤顶结构图

2）传力螺旋

它以传递动力为主，要求以较小的转矩产生较大的轴向推力，用以克服工件阻力，如螺旋压力机、螺旋千斤顶等，如图 3.81 所示。这种传力螺旋主要是承受很大的轴向力，一般为间歇性工作，每次的工作时间较短，工作速度也不高，通常具有自锁能力。传力螺旋传动承受的载荷较大，因此要有足够的强度。

3）传导螺旋

它以传递运动为主，有时也承受较大的轴向载荷，如机床进给机构的螺旋等。传导螺旋常需在较长的时间内连续工作，工作速度较高，因此要求具有较高的传动精度。

2. 按摩擦性质分类

按照螺旋副的摩擦性质，螺旋传动可分为滑动螺旋和滚动螺旋。

1）滑动螺旋

滑动螺旋中的螺母与螺杆直接接触，运动时，螺母与螺杆之间的摩擦形式为滑动摩擦。

2）滚动螺旋

滚动螺旋中的螺母与螺杆之间存在滚动体，运动时，螺母与螺杆之间的摩擦形式为滚动摩擦。

本节课重点讲解滑动螺旋传动和滚动螺旋传动。

3.6.2　滑动螺旋传动

1. 滑动螺旋传动分类方法一

滑动螺旋传动根据螺杆和螺母是否运动以及运动方式可以分为以下几类。

1）螺母固定，螺杆转动并移动

如图3.82（a）所示，这种传动形式的螺母本身起着支承作用，螺杆不需另加轴承，从而简化了结构，消除了螺杆与轴承之间可能产生的轴向窜动，利于提高传动精度。

缺点是所占轴向尺寸较大（为螺杆行程的两倍加上螺母高度），刚性较差。因此仅适用于行程短（<25 mm）的情况。

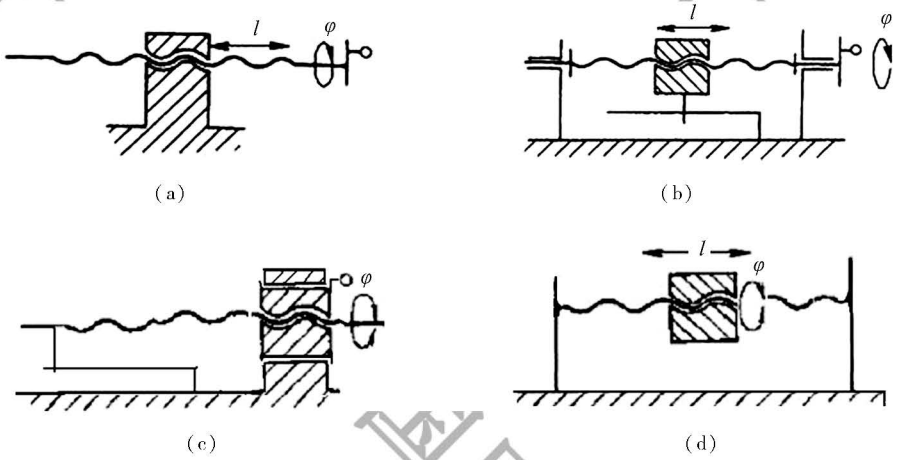


图3.82　螺旋传动的运动转变方式

2）螺杆转动，螺母移动

如图 3.82（b）所示，这种传动形式的特点是结构紧凑（所占轴向尺寸取决于螺母高度及行程大小），刚度较大。

与上种情况相比，当工作行程相同时，它的轴向尺寸几乎可缩为前者的一半，因此适用于工作行程较长的情况。但这种结构需要两个支承，同时要限制螺母转动，结构比较复杂，不利于提高传动精度。

3）螺母转动，螺杆移动

如图 3.82（c）所示，这种传动形式需要限制螺杆转动和螺母移动，结构比较复杂，所占空间又较大，应用较少。

4）螺杆固定，螺母转动并移动

如图 3.82（d）所示，这种传动形式结构复杂、紧凑，但在多数场合下使用不方便，应用较少。

2. 滑动螺旋传动分类方法二

滑动螺旋传动又可分为普通螺旋传动、差动位移螺旋传动和相对位移螺旋传动三种。

1）普通螺旋传动

这是一种最常用的滑动螺旋传动，例如，在螺旋千斤顶、台虎钳、机床传动机构和飞机飞行操纵系统等中得到广泛应用。

2）差动位移螺旋传动

这是利用一个螺杆上制有两段螺距不同的螺纹，实现螺杆转动较大角度，而螺母只作微量移动的传动方式，如图 3.83 所示。差动位移螺旋传动中，螺杆有 A 、B 两段螺距大小不等的螺纹，在 A 段与机架的螺孔啮合，其导程为 S_A；B 段与活动螺母啮合，其导程为 S_B，两段螺纹的旋向相同，活动螺母只能作相对于机架的轴向移动，不能转动。这样当螺杆旋转一周时，活动螺母移动的距离 L 就等于两导程之差，即：

$$L = S_A - S_B \tag{3-35}$$

假设 S_A 与 S_B 很接近，则其差值 L 很小，从而实现了微调目的。

如果螺杆 1 转动 φ 角时，螺母 2 相对于座架 3 的位移 L 为：

$$L = (S_A - S_B)\frac{\varphi}{2\pi} \tag{3-36}$$

差动螺旋传动的优点是能产生很小的位移，同时其螺旋导程并不太小，所以它常用于测微器、分度机构及许多精密机床、仪器和工具中。

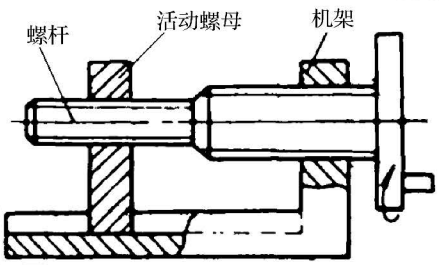


图 3.83　差动位移螺旋传动

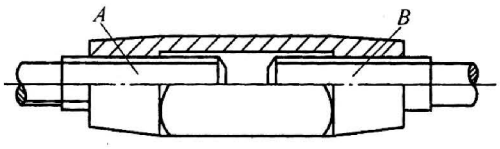


图 3.84　相对位移螺旋传动

3）相对位移螺旋传动

在上述差动位移螺旋传动中，若两螺旋副 A 和 B 的螺纹旋向相反，则螺母 2 的移动距离为：

$$L = S_A + S_B \tag{3-37}$$

如果螺杆 1 转动 φ 角时，螺母 2 相对于座架 3 的位移 L 为：

$$L = (S_A + S_B)\frac{\varphi}{2\pi} \tag{3-38}$$

这种机构可用于要求快速移动的场合，例如用于自动定心夹具和飞机操纵系统中钢索的拉紧装置松紧螺套，如图 3.84 所示。

3.6.3　滚动螺旋传动

1. 滚动螺旋传动的组成与结构

滚动螺旋传动是在螺杆和螺母间放入适量的滚珠，使滑动摩擦变为滚动摩擦的螺旋传动。滚动螺旋传动由螺杆、螺母、滚珠和滚珠循环返回装置四部分组成，如图 3.85 所示。

当螺杆转动时，滚珠沿螺旋滚道滚动。为了防止滚珠沿滚道面掉出来，螺母上设有滚珠循环返回装置，构成了一个滚珠循环通道，滚珠从滚道的一端滚出后，沿着循环通道返回另一端，重新进入滚道，从而构成一闭合回路。

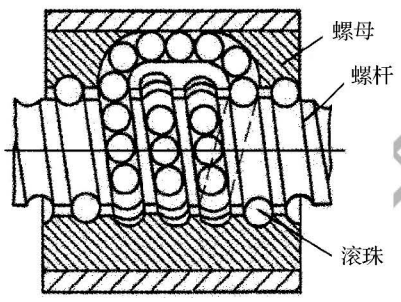


图 3.85　滚动螺旋传动

2. 滚动螺旋传动的特点及应用

滚动螺旋传动的特点主要有：

（1）摩擦阻力小，传动效率高，一般可达 90%

以上，约为滑动螺旋传动效率的三倍；

（2）运动平稳，动作灵敏，传动精度高；

（3）具有传动的可逆性，但不能自锁，用于垂直升降传动时，需附加制动装置；

（4）制造工艺复杂，成本较高，但使用寿命长，维护简单。

由于它的优点突出，因而在飞机襟翼收放机构、缝翼收放机构（见图 3.86、图 3.87）、飞机机载登机梯的收放机构、汽车的转向机构中得到较多的应用。

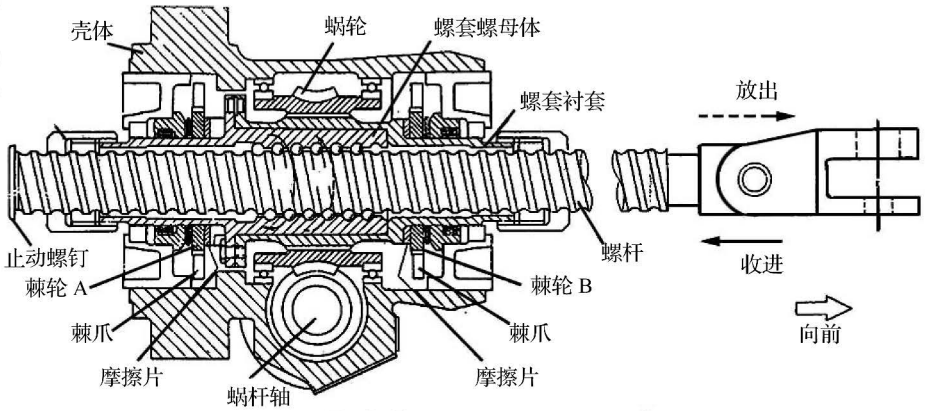


图 3.86　飞机缝翼滚动螺旋螺杆

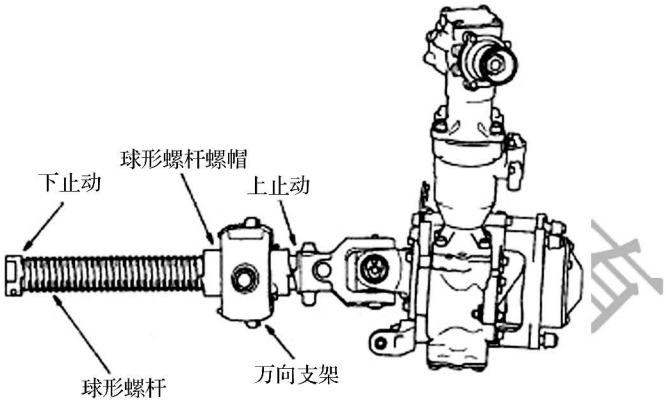


图 3.87　后缘襟翼系统——球形螺杆

3.6.4　螺旋传动的失效形式与维护

螺旋传动的主要失效形式有：

（1）螺纹牙间的磨损。螺纹牙间的磨损使螺牙变薄，间隙增大，精度下降，以至螺旋传动失效。

（2）螺杆的变形。

（3）螺杆或螺纹牙的断裂。

螺旋传动的维护主要注意事项：

（1）保持螺旋副接触面清洁；

（2）保证螺旋副接触面有良好的润滑。

3.6.5　螺旋传动航空案例

1. 襟翼操纵系统的螺旋传动

每个襟翼舵面有两套传动装置：球形螺杆（滚动螺旋传动）和万向支架。它们将来自扭力管的动力传给襟翼舵面，使其移动，如图 3.88 所示。

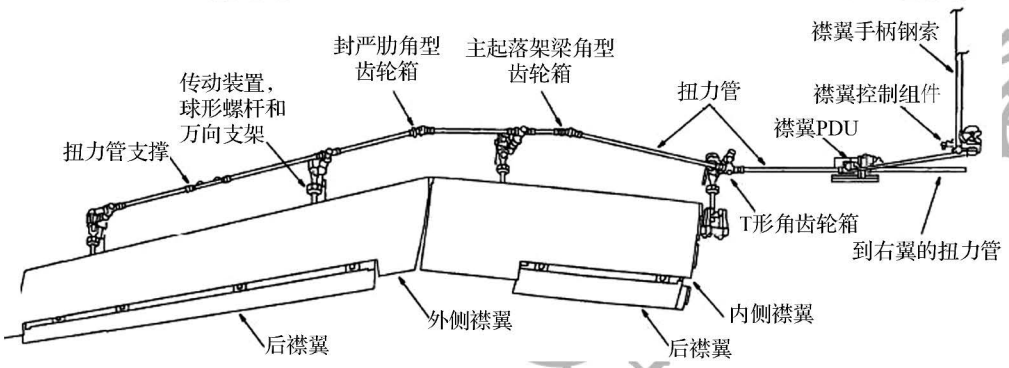


图 3.88　波音 737NG 一侧襟翼系统简图

每个后缘襟翼传动机构将来自扭力管的动力传给万向节和球形螺杆（滚动螺旋传动）。传动装置通过万向节转动球形螺杆，该螺杆用螺帽连接在万向支架上（两端各有一个）。当球形螺杆转动时，螺帽带动另一端的万向支架。在球形螺杆两端有止动，在后缘襟翼的正常使用期间，螺帽不会碰到止动，螺帽要用油脂进行润滑。

2. 水平安定面操纵系统的螺旋传动

安定面配平电门的输入操纵安定面配平作动筒，配平作动筒的输入带动齿轮箱和丝杠。当丝杠转动时，安定面前缘移动。齿轮箱也回传后钢索鼓轮。在丝杠的带动下，安定面前缘向上最大移动 4.2°，向下最大移动 12.9°，如图 3.89 所示。

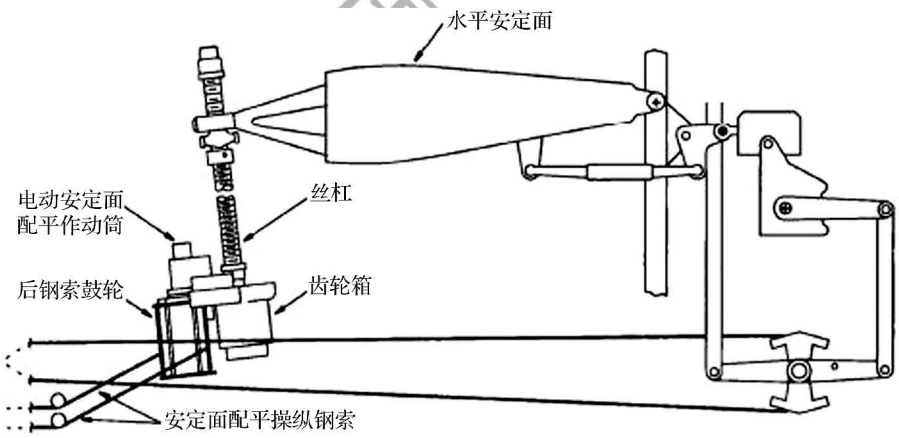


图 3.89　水平安定面配平操纵系统

知识总结	随堂练习

3.7　钢索传动和传动杆传动

钢索传动（Cable Drive）、传动杆传动（Transmission Rod Drive）以及它们的混合传动是用来传递操纵力和操纵运动的，它们广泛用于飞机、船舶及其他机械的操纵系统。

3.7.1　钢索传动

钢索传动又称为软式传动，它主要由钢索、滑轮、松紧螺套和钢索张力补偿器等组成，如图 3.90 所示。在钢索传动机构中，操纵力只能依靠钢索的张力传递。因此，必须有两根钢索构成回路，轮流起作用，即一根传动，另一根被动，以保证传递正反两个方向的力。

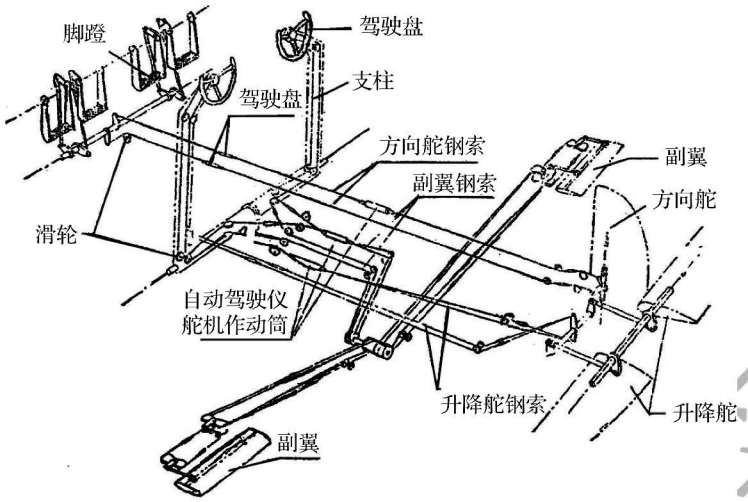


图 3.90　软式及混合式传动机构

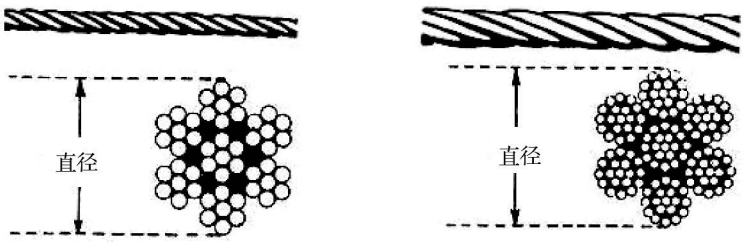
钢索传动的优点是构造简单、尺寸较小、重量较轻，可以曲折迂回长距离传动。其缺点是钢索的刚度较小，受力后容易被拉长，使操纵灵敏度变差；钢索在转弯处绕过滑轮，产生较大的摩擦力使钢索容易磨损。

1. 钢索的构造及型号、规格和等级

钢索由若干根钢丝组成一束，再按螺旋形或锥盘形，扭织成股，然后以一股为中心，其余数股汇合，编织而成，如图 3.91 所示。钢丝有碳钢丝和不锈钢丝两种。

钢索的型号是按其所具有的钢丝股数和每股钢丝根数来划分的。应用最广泛的航空钢索有 7×7 和 7×19 两种。7×7 钢索具有 7 股，每股由 7 根钢丝所制成［见图 3.91（a）］；7×19 钢索具有 7 股，每股由 19 根钢丝所制成［见图 3.91（b）］。

钢索的规格以其直径的大小来区分，其计量单位是英寸，航空钢索的直径一般为 1/16 in到 3/8 in。钢索直径的正确测量见图 3.91。



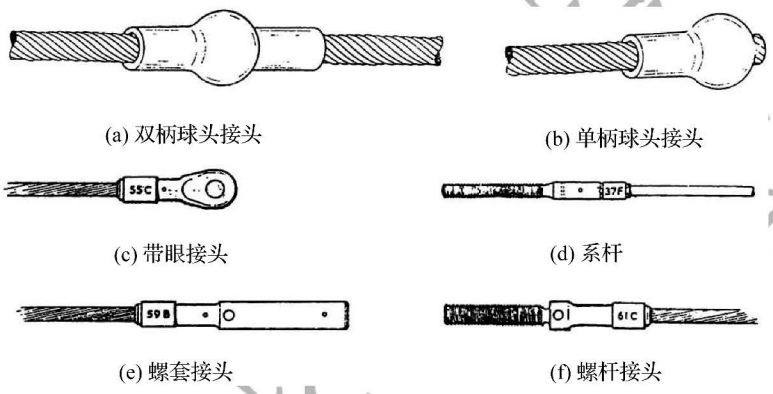
（a）7 股，每股 7 根钢丝　　（b）7 股，每股 19 根钢丝

图 3.91　钢索

飞机操纵系统所用的钢索，根据它们所能承受的载荷大小，共分五个等级，即 5 英担（CWT）、10 英担、15 英担、25 英担和 35 英担。英国 1 英担 = 112 磅；美国 1 英担 = 100 磅。

2. 钢索接头

钢索的终端可以采用不同的接头形式，常用的有钢索球头、带眼接头、螺套接头和螺杆接头四种，它们都是被挤压在钢索的端头上的，如图 3.92 所示。



(a) 双柄球头接头　(b) 单柄球头接头

(c) 带眼接头　(d) 系杆

(e) 螺套接头　(f) 螺杆接头

图 3.92　钢索接头

在钢索与操纵扇形块（轮）或钢索轮相连接的地方采用钢索球头。带眼接头一般与摇臂或叉形接头连接。螺套接头和螺杆接头是用在钢索与钢索相连接的地方，它们分别通过松紧螺杆和松紧螺套来连接的。

3. 松紧螺套

松紧螺套由两个带螺纹头的钢索接头和一个两端带内螺纹的螺套组成，如图 3.93 所示。松紧螺套的作用是少量地调节钢索长度和调整钢索的张力。松紧螺套一端为右旋螺纹，另一端为左旋螺纹，与螺套两端相配装的钢索接头也分别为右旋和左旋螺纹。为便于区别，螺套内为左旋螺纹一端的外圆上刻有一道槽或者滚花。

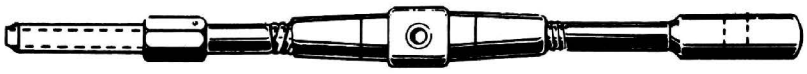


图 3.93　松紧螺套装置（典型）

在装连操纵系统中的松紧螺套时，必须将螺套与两端的接头同时拧上螺纹，从而保证在装配调整后，两端啮合的螺纹长度相同。除此之外，还要检查每个接头螺纹是否具有足够的拧入深度，要求露在螺套之外的螺纹不得超过三牙。对于有检查小孔的螺套，在调松

钢索时，螺杆末端不应超过该检查小孔的位置。这是防止螺纹旋合牙数过少，受到大力时容易拉脱，造成传动失效。

调整工作完成后，要对松紧螺套打保险。常用的保险方式有两种：卡簧固定式保险法和保险丝缠绕法。

卡簧式保险法如图 3.94 所示。这种保险方法可靠且方便快捷，目前在新型飞机上大都采用该法，例如波音 737、757 飞机上均采用此法。

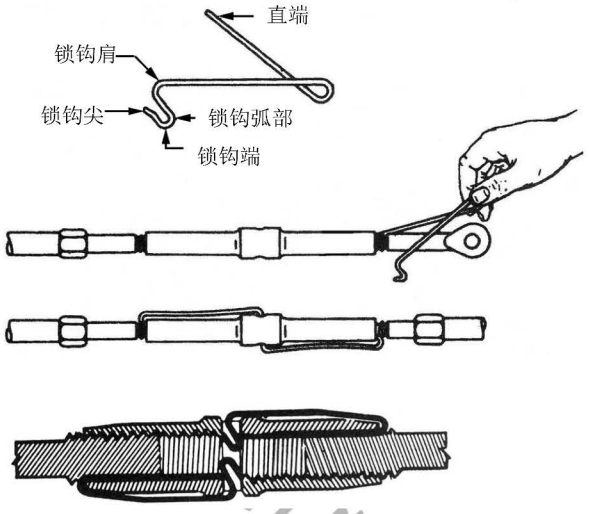


图 3.94　卡簧式保险法

保险丝缠绕法又有两种方式：双重扎绕保险法和单线扎绕保险法。对比之下双重扎绕保险法较单线扎绕保险法好些，所以在此只介绍双重扎绕保险法，如图 3.95 所示。

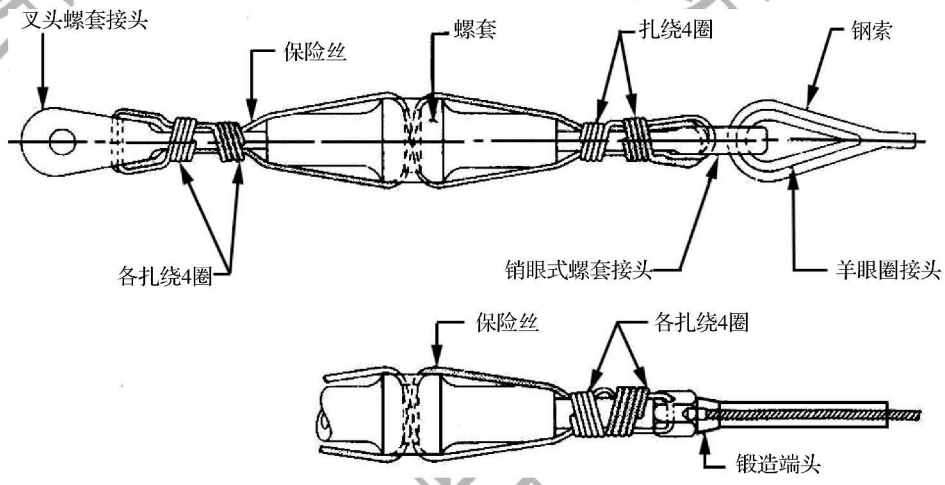


图 3.95　松紧螺套保险丝保险

在用保险丝缠绕法对松紧螺套打保险时，首先要按表 3-20 所列的尺寸规格，截出两根长度相同的保险丝，每根保险丝穿过螺套上的孔后，分别向前后弯曲（一根成 Z 形，另一根反向成 S 形），然后将每端的两根保险丝交叉穿过销眼式接头的销眼（或者是叉头式接头的叉根），拉紧后分别将保险丝紧扎绕在接头杆身上，每根不少于四圈，最后修剪平整。如果钢索接头为挤轧型的，可以将保险丝交叉穿过接头上的小孔，然后按上述方式扎绕保险。如果接头上的小孔径较小，不容双根保险丝通过，可只穿过单根，弯过来后与另一根打结，然后按上述方式同时扎绕。

表 3-20　松紧螺套的保险丝规格

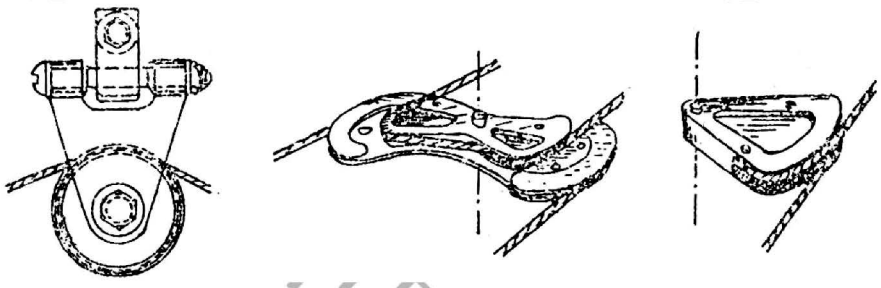
钢索尺寸（in）	扎绕保险方式	保险丝直径（in）	保险丝材料（退火状态）
1/16	单根	0.020	不锈钢
1/32	单根	0.040	铜、黄铜*
1/8	单根	0.040	不锈钢
1/8	双根	0.040	铜、黄铜*
1/8	单根	0.057（最低）	铜、黄铜*
5/32 及以上	双根	0.57	不锈钢

注：* 表示也可采用镀锌或镀锡的钢丝或软铁丝。

4. 滑轮和扇形轮

滑轮［见图 3.96（a）］是用来支持钢索和改变钢索的运动方向的，它通常用胶木或硬铝制成。为了减小摩擦力，在支点处装有滚珠轴承。

扇形轮又称扇形摇臂［见图 3.96（b）和（c）］，它除了具有滑轮的作用外，还可以改变力的大小。扇形轮多用硬铝制成，在支点处也装有滚珠轴承。



（a）　　（b）　　（c）

图 3.96　滑轮和扇形轮

软式传动机构中所用的摇臂和硬式传动机构中的摇臂是一样的，通常用硬铝制成，在支点处也装有滚珠轴承。但在软式传动机构中的摇臂大多是双摇臂，它具有扇形轮的功用。

由于滑轮、扇形轮和摇臂的功用相同，为了保证传动机构的正常工作，必须正确地选用和安装。为此要注意以下几点：

（1）在用双摇臂支持钢索的线路中，所有双摇臂都应与钢索的方向安装成直角［见图3.97（a）和（b）］，以避免钢索在传动过程中受到额外的拉伸作用。

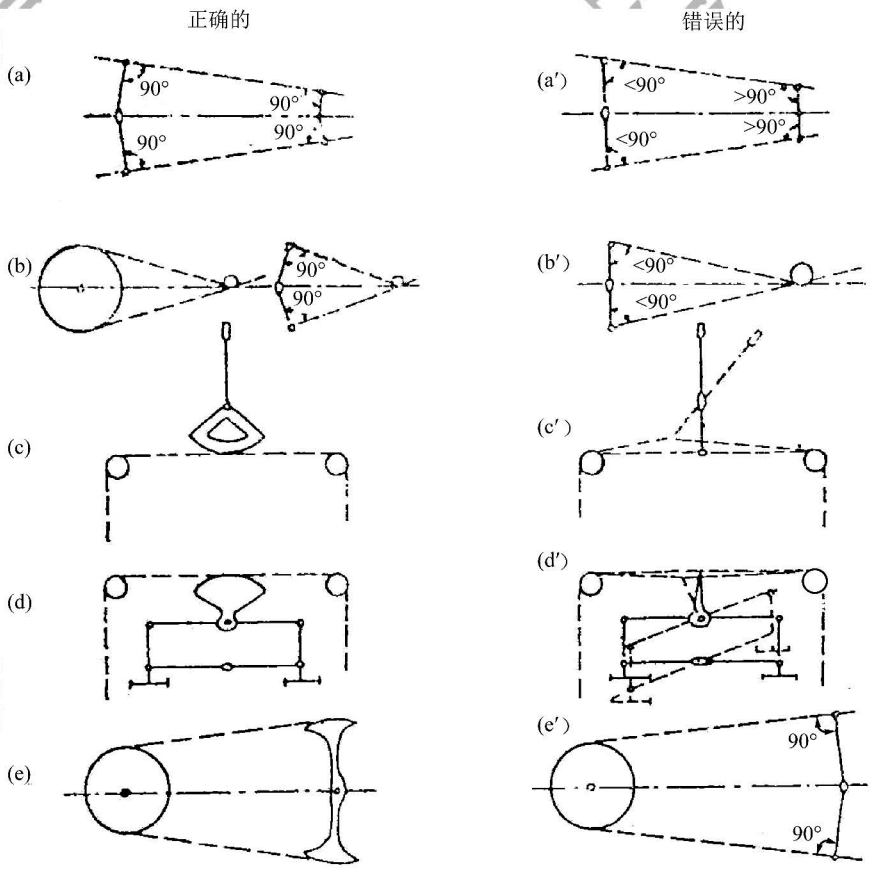


图3.97　滑轮、扇形轮和摇臂的选用与安装正误对比

（2）主动摇臂［见图3.97（c′）和（d′）］必须用扇形摇臂［见图3.97（c）和（d）］，因为当主动摇臂转动时，钢索即被挑起，如果滑轮以后的钢索总长不变，钢索也就受到额外的拉伸作用。

（3）扇形摇臂可以和滑轮同时采用［见图3.97（e）］，或者全用双摇臂［见图3.97（a）］；但是，同时采用摇臂和滑轮［见图3.97（e′）］是错误的。

5. 钢索张力补偿器

由于飞机机体上外载荷的变化和周围气温变化的影响，飞机机体结构和飞机操纵系统之间会产生不同的相对变形，因而钢索可能会变松或过紧。前者将发生弹性间隙，后者将产生附加摩擦。钢索张力补偿器的功用正是保持钢索的正确张力，而不受上述因素的影响。

图 3.98 所示为某型飞机上的钢索张力补偿器，它由安装底座、十字上盖、标尺、安装螺杆等构成。十字上盖受弹簧的作用可以保持钢索的正确张力。标尺上的刻度可指示出钢索的张力，而不需要张力器或其他仪器。

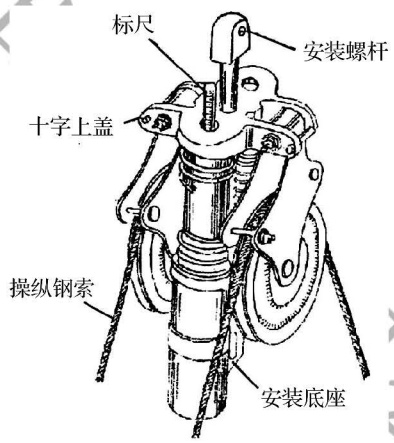


图 3.98　钢索张力补偿器

6. 钢索的编号和连接

对于多路钢索传动为了便于区别，每一路钢索都有各自的数字编号。对于同一路钢索可能只采用一根钢索，也有可能采用多根钢索首尾连接而成。对于由多根钢索连接而成的一路钢索传动，在其每根钢索的两个端头自前至后，分别依次标有 A、B、C、D 等字母代号，作为连接顺序。编号和字母都刻在钢索两端的接头上。例如，编号为 10 的一路操纵钢索，它的第一根钢索的前端为 10A，后端为 10B；第二根钢索的前、后端分别为 10B 和 10C，其余类推。连接钢索时，第一根的 10B 就与第二根的 10B 相接，第二根的 10C 与第三根的 10C 相接。钢索与扇形轮相连接时，扇形轮上也刻有同样的编号和字母，安装时，必须使它们相符合。

为了防止钢索之间发生错接现象，除了在钢索和扇形轮等的连接接头处刻有编号和字母外，所有钢索的连接点和调节点都是错开的，而且各个相邻的同等级的钢索或系杆接头上的螺纹的尺寸不同或螺纹的旋向不同。

7. 钢索张力的测量

在钢索传动中，当钢索受拉时，容易伸长（即产生弹性变形），这会使操纵灵敏性变差。为了减小这种不良现象，应用于操纵系统中的钢索在装配时都要预先拉紧。预先拉紧的力称为预加张力。钢索被预先拉紧后，就把各股钢丝绞紧，传动时就不容易被拉长，同时钢索张力增加也小。

钢索张力的大小可用钢索张力计来测量。图 3.99 是一种类型的张力计。它由表座、扳机、顶块和砧座等组成，其中顶块可替换，以便用来测量不同直径的

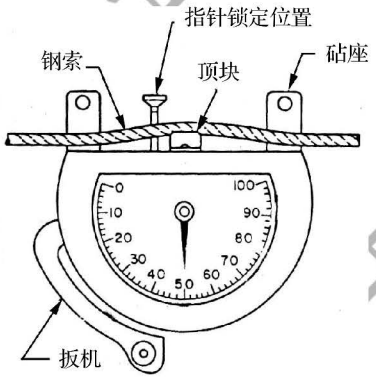


图 3.99　钢索张力计

钢索，第 1 号顶块是用于测量直径为 $\frac{1}{16}$ in、$\frac{3}{32}$ in 和 $\frac{1}{8}$ in 的钢索；第 2 号顶块是用于测量 $\frac{5}{32}$ in 和 $\frac{3}{16}$ in 直径的钢索。测量时，将扳机扳下，在两个砧座下面放进被测试的钢索，然后将扳机扳回去，此时可从张力计刻度盘上得到一个读数，然后在一张随该张力计附的校准表内把这个读数转换为钢索张力的磅数。例如，用第 2 号顶块测量直径为 $\frac{5}{32}$ in 的钢索的张力，得其读数为“30”，则钢索的实际张力是 70 lb，见表 3-21 张力对照表。

表 3-21　张力对照表

No. 1			顶块	No. 2	
1/16	3/32	1/8	张力（lb）	5/32	3/16
12	16	21	30	12	20
19	23	29	40	17	26
25	30	36	50	22	32
31	36	43	60	26	37
36	42	50	70	30	42
41	48	57	80	34	47
46	54	63	90	38	52
51	60	69	100	42	56
			110	46	60
			120	50	64

在取读数时，如果看刻度盘困难，可用张力计上的指针锁定装置，将指针锁住，然后从钢索上取下张力计，再读出其读数。

8. 钢索传动常见故障及维护

钢索传动系统的故障现象主要发生在钢索和滑轮上。

钢索作为软式传动机构的主要构件，主要用在副翼、方向舵、升降舵系统和直升机的尾桨等操纵系统中。若钢索发生较大故障，则会直接危及飞行安全。钢索常见的故障现象有断丝、磨损、锈蚀和松弛等情况。

1）断丝

断丝经常发生在滑轮和钢索头部这些容易反复受到弯曲、拉伸和交变应力的地方。严重的锈蚀也容易断丝。

中国民航出版社有限公司版权所有

检查钢索断丝最主要的方法是：用不起毛的洁净干软布沿着钢索长度方向擦拭并尽量擦拭干净，速度要慢，检查布被断丝勾住的地方。

彻底检查钢索时，必须将钢索在各个方向上进行全行程移动，使在滑轮、导向器和钢索轮等区域的钢索显露出来以进行观察。

注意：出现断丝的钢索必须进行更换！

2）磨损

磨损发生在钢索的表面，可以进行目视检查。发现钢索磨损时，对磨损部位各部件进行加固，防止磨损加剧，因磨损而出现断丝需要更换钢索。

3）锈蚀

锈蚀可以进行目视检查。如果发现钢索表面锈蚀，要卸除钢索的张力，然后将钢索反向扭转使之张开，目视检查内部的钢索股是否锈蚀。如果内部钢索股锈蚀，表明钢索已经损坏，需要更换钢索。如果内部没有锈蚀，就用编织粗糙的抹布或纤维刷子，清除外部锈蚀。切勿用金属刷或溶剂对钢索除锈。金属刷混有其他金属颗粒，能使钢索进一步锈蚀。溶剂会除去钢索内部的润滑剂，这也会使钢索进一步锈蚀。钢索彻底清洁之后，涂上防锈剂，这种防锈剂可以保护并润滑钢索。

4）钢索松弛

钢索承受拉力时，容易伸长；温度升高也容易伸长。没有安装钢索张力自动调节器的钢索操纵系统，钢索伸长造成操纵系统松弛，进而降低操纵的灵敏性。定期检查钢索张力，通过松紧螺套来调节钢索张力。

5）滑轮损坏

滑轮损坏常见的为滑轮槽、轮缘损坏和轴承转动不灵活等。当滑轮槽、轮缘磨损严重或已损坏，应更换滑轮。若仅滑轮轴承转动不灵活则应对轴承清洗并注入润滑脂，如能灵活地转动就可照常使用，否则应更换滑轮。

3.7.2 传动杆传动

传动杆传动又称为硬式传动，它主要由传动杆和摇臂等构件组成，如图 3.100 所示。在传动杆机构中，操纵力是由传动杆传递的。传动杆可以承受拉力或压力。

传动杆传动的主要优点是刚度较大，受力后不容易变形，因而操纵灵敏度较好；它的缺点是重量较大，不易绕过飞机内部的设备和装置；若用于飞机上，还须使传动杆避免与发动机的使用转速发生共振。

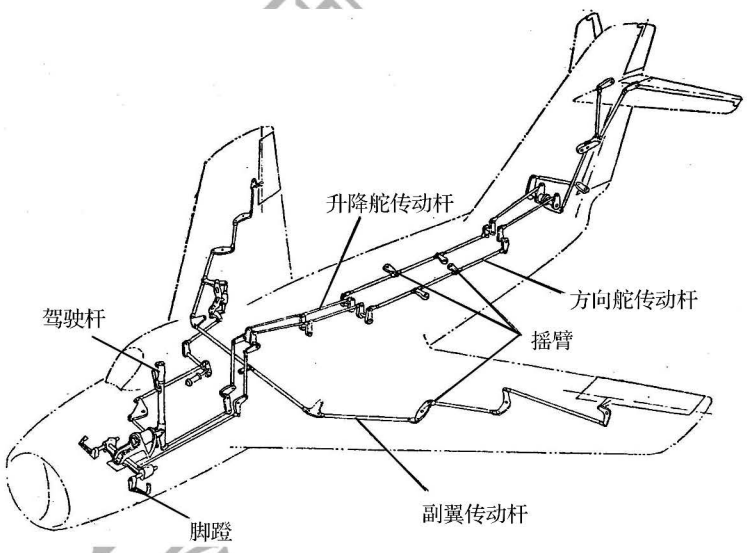


图 3.100　硬式传动机构

1. 传动杆

传动杆用铝合金或钢质管材制成，杆身两端装有接头，其中一端的接头通常是可调头，如图 3.101 所示。

为了使传动杆受压时不易失去稳定性，并避免产生共振，传动杆的长度一般不超过 2 m。在调整传动杆长度时，应注意不要使接头的调整螺杆退出过多。通常在传动杆的端部有检查小孔。调长传动杆时，调整螺杆的末端不应超过该小孔的位置，以确保有足够的啮合长度。

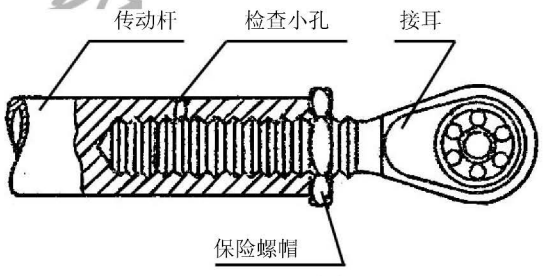


图 3.101　传动杆的可调接头

在传动过程中，传动杆不仅要作往复直线运动，而且还要相对于摇臂转动，为了减小摩擦，其接头内通常装有滚珠轴承。

2. 摇臂及其作用

摇臂通常由硬铝或钢制成。为了减小摩擦力，摇臂在与传动杆和支座的连接处都装有滚珠轴承。摇臂除去支持传动杆的功用外，还有以下的作用。

1）放大或缩小力的作用

如图 3.102 所示的摇臂，如果不考虑摩擦力和摇臂本身的重力，在受到力 F_1 和 F_2 的作用时，若摇臂处于受力平衡状态，则有：

$$F_1 \times r_1 = F_2 \times r_2$$

F_1 与 F_2 之比一般称为摇臂的力传动比，用 n_f 表示，即：

$$n_f = \frac{F_1}{F_2} = \frac{r_2}{r_1} \tag{3-39}$$

式中，r_1 ——输入臂（主动臂）的有效半径；

r_2 ——输出臂（从动臂）的有效半径；

F_1 ——输入力，是由传动杆 1 传来的力，作用在输入臂（主动臂）上；

F_2 ——输出力，是由输出臂（从动臂）传出的力，传给传动杆 2。

由此可见，力传动比实际上表示通过摇臂，输入力 F_1 与输出力 F_2 之间的关系。如果 $n_f < 1$，即表示通过摇臂，输出力大于输入力，摇臂起到了放大力的作用；如果 $n_f > 1$，则相反，摇臂起到了缩小力的作用。由式（3-39）可知，改变摇臂的两个半径的长短，就可以改变力传动比的大小。

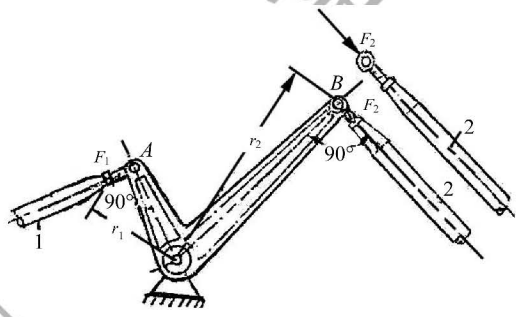


图 3.102　摇臂有放大或缩小力的作用

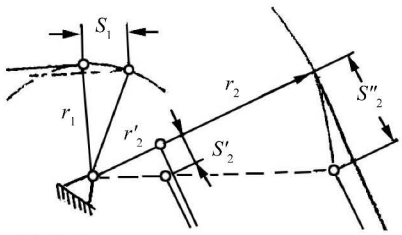


图 3.103　摇臂有放大或缩小位移的作用

2）放大或缩小位移的作用

由图 3.103 可以看到，如果输入臂的半径一定，在相同的输入臂端点位移 S_1 的条件下，输出臂半径越大，所得到的输出臂端点位移 S_2 也越大；反之，输出臂半径越小，则 S_2 也越小。

3）放大或缩小运动速度的作用

由图 3.104 可知，如输入杆（主动杆）1 以等速度 V_1 推动摇臂 AOB 以等角速度 ω 绕 O 点转动，此时可得以下的关系式，即

$$V_1 = r_1\omega$$

$$V_2 = r_2\omega$$

式中，V_1 ——输入杆（主动杆）的运动速度，即 A 点的切向速度；

V_2 ——转出杆（从动杆）的运动速度，即 B 点的切向速度。

根据上面两式，可得：

$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{r_2}{r_1}=n_f \tag{3-40}$$

由式（3-40）可知，输出速度 V_2 与输入速度 V_1 之比等于力传动比 n_f。

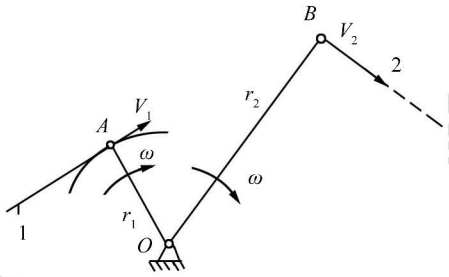


图 3.104　摇臂有放大或缩小运动速度的作用

4）改变传动杆的运动方向

如图 3.105 所示，当操纵手柄往右动作时，图（a）中传动杆 A 段向左运动，如把图（a）中的单摇臂 C 段换为双摇臂 D 段，其他不变，则传动杆 A 段向右运动［见图（b）］。

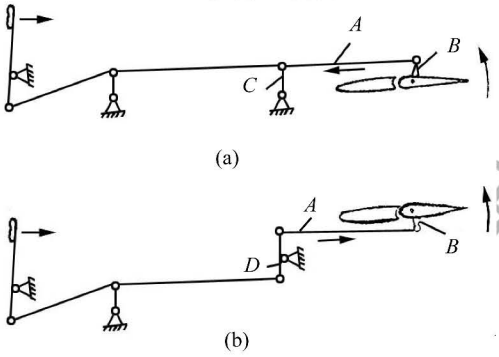


图 3.105　改变传动杆 A 的运动方向

5）可实现差动

这里所说的“差动”是指当操纵杆前后（或左右）偏转同一角度时，被操纵面向上和向下（或向左和向右）偏转的角度不同。能实现差动的摇臂称为差动摇臂，差动摇臂也是双摇臂。

它的工作原理如图 3.106 所示。它的一个臂 OA 经传动杆 AC 与驾驶操纵杆相连。当驾驶操纵杆在中立位置时，OA 臂与传动杆 AC 垂直；另一个臂 OB 经传动杆 BD 与舵面操纵摇臂相连。OB 臂与传动杆 BD 不成直角。当传动杆 AC 从中立位置向前或向后移动同样

的距离（$a_0 = b_0$）时，OA 臂前后移动的转角是相等的（$\alpha_1 = \alpha_2$），因而 OB 臂前后移动的转角也相等。但从图中可以看出，这时传动杆 BD 向后移动的距离却大于向前移动的距离（$b > a$）。因而，舵面向上的偏转角 δ_2 就大于向下偏转角 δ_1。

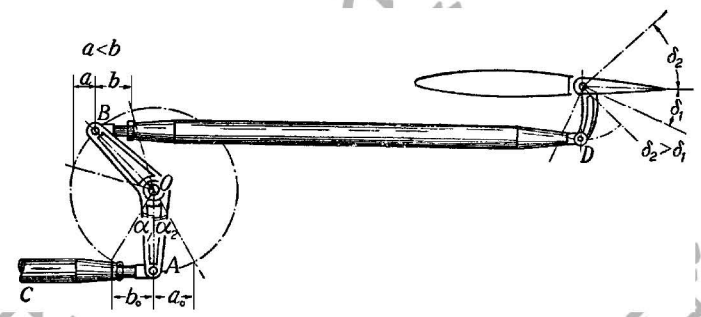
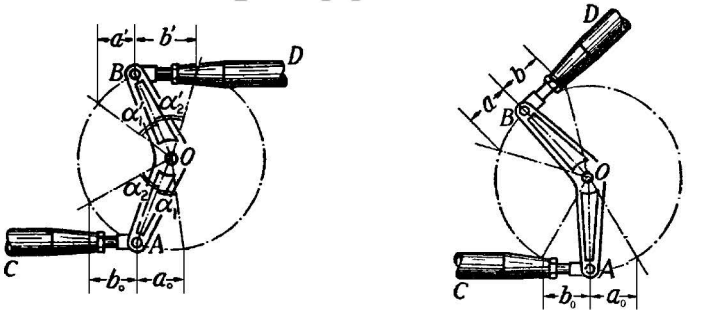


图 3.106　差动摇臂的差动原理

如果操纵杆在中立位置时，传动杆 AC 与 OA 臂也不成直角［见图 3.107（a）］。那么，当拉杆 AC 向前、向后移动的距离相等时（$a_0 = b_0$），OA 臂的转角 α_2 大于 α_1。结果 b 比 a 大得更多，差动作用就更大。



（a）差动摇臂　　（b）非差动摇臂

图 3.107　差动摇臂和非差动摇臂

如果操纵杆在中立位置，双摇臂的两个臂与各自的拉杆都是垂直的［见图 3.107（b）］，则当拉杆 AC 向前、向后移动的距离相等时，拉杆 BD 的移动距离也相等（$a = b$）。因此，这样连接的双摇臂就不起差动作用。可见，双摇臂之所以能起差动作用，是因为操纵杆在中立位置时，差动摇臂的两个臂至少有一个臂与其拉杆不成 90°直角。

3. 导向滑轮

导向滑轮由 3~4 个小滑轮及其支架组成，如图 3.108 所示，它的功用是：支持传动杆提高杆受压稳定性，使受压时不易弯曲；增大传动杆的固有频率，防止传动杆共振。传

动中传动杆要与导向滑轮摩擦，故维护中应注意：防止磨损传动杆、润滑良好、轴承无腐蚀。

4. 扭力管

扭力管输出角运动和扭转运动。

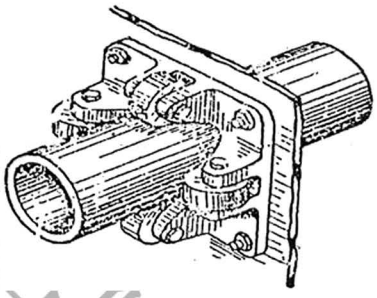


图 3.108　传动杆导向滑轮

3.7.3　混合传动

混合传动由钢索传动和传动杆传动混合组成，如图 3.100 中的升降舵传动机构所示。混合传动兼有软式和硬式传动的优点和缺点。

3.7.4　飞机操纵系统力传动比的计算

前面我们已介绍了单个摇臂的力传动比的计算。在飞机的俯仰、滚转和偏航三个操纵系统中，每一个系统都有若干个摇臂。各个操纵系统的传动比用 n 来表示，它等于全部摇臂传动比的乘积。现以飞机俯仰操纵系统为例，说明操纵系统力传动比的计算。图 3.109 为飞机俯仰操纵系统的传动图。根据该图，我们可计算出各个摇臂的传动比。

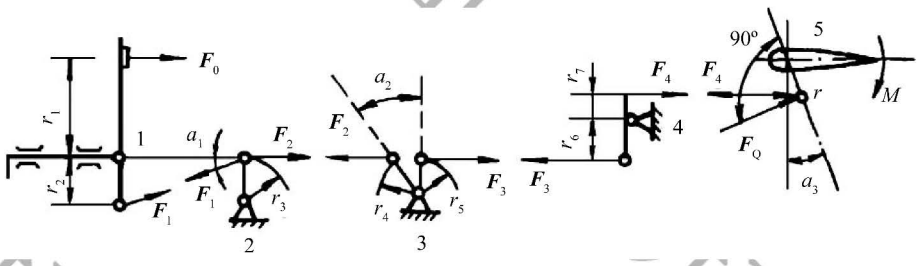


图 3.109　飞机俯仰操纵系统的传动图

第一个摇臂是驾驶杆，它的力传动比为：

$$n_1 = \frac{F_0}{F_1} = \frac{r_2 \cos \alpha_1}{r_1}$$

第二个摇臂的力传动比为：

$$n_2 = \frac{F_1}{F_2} = \frac{r_3}{r_3 \cos \alpha_1}$$

第三个摇臂的力传动比为：

$$n_3 = \frac{F_2}{F_3} = \frac{r_5}{r_4 \cos \alpha_2}$$

第四个摇臂的力传动比为：

$$n_4 = \frac{F_3}{F_4} = \frac{r_7}{r_6}$$

第五个摇臂是固定在舵面上的单摇臂，它的半径为 r，通常称为舵面操纵摇臂。它的力传动比为：

$$n_5 = \frac{F_4}{F_Q} = \frac{r}{r\cos\alpha_3} = \frac{1}{\cos\alpha_3}$$

式中，F_Q 是 F_4 的有效分力，它垂直于舵面操纵摇臂。

则该操纵系统的传动比为：

$$n = n_1 n_2 n_3 n_4 n_5$$

$$n = \frac{F_0}{F_1} \cdot \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{F_2}{F_3} \cdot \frac{F_3}{F_4} \cdot \frac{F_4}{F_Q} = \frac{F_0}{F_Q} \tag{3-41}$$

由式（3-41）可见，操纵系统的传动比 n 是杆力 F_0 与垂直于操纵摇臂上的力 F_Q 之比值。

或者：

$$n = \frac{r_2\cos\alpha_1}{r_1} \cdot \frac{r_3}{r_3\cos\alpha_1} \cdot \frac{r_5}{r_4\cos\alpha_2} \cdot \frac{r_7}{r_6} \cdot \frac{r}{r\cos\alpha_3} \tag{3-42}$$

即操纵系统的传动比 n 是各个摇臂从动臂的有效半径的连乘积与各个摇臂主动臂的有效半径的连乘积之比。

注意：

（1）其中 α_2 和 α_3 是为了得到升降舵偏转产生差动而选择的；

（2）上式为操纵系统在中立位置时的传动比，如果驾驶杆位移发生变化，各个摇臂的有效半径都会发生变化，因此，传动比 n 是个变量，是驾驶杆位移的函数。

知识总结	随堂练习

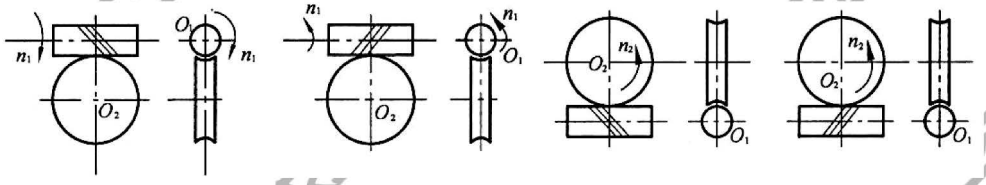
中国民航出版社有限公司版权所有

复习思考题

1. 带传动的主要特点是什么？
2. 常见带传动的基本类型有哪些？
3. 何谓带传动的失效？能否避免带传动失效？
4. 何谓带的弹性滑动？能否避免带的弹性滑动？
5. 安装带传动时，为什么要把带张紧？常用的张紧装置有哪几种？
6. 试述链传动的工作原理和特点。
7. 套筒滚子链由哪些部分组成？说明套筒滚子链的标记方法。
8. 链传动的不均匀性是怎样产生的？
9. 试述链传动失效的形式及原因。
10. 何谓齿廓啮合基本定律？
11. 渐开线具有哪些性质？
12. 何谓齿轮压力角？渐开线齿廓上各点的压力角是否相等？
13. 何谓齿轮的模数？
14. 何谓齿轮的分度圆？它与齿轮的节圆有何不同？在什么情况下两者可能重合？
15. 试证明渐开线齿廓符合齿廓啮合基本定律。
16. 何谓啮合线？何谓啮合角？一对外啮合齿轮按标准中心距安装时，啮合角和压力角有什么关系？
17. 何谓中心距可分性？
18. 何谓重叠系数？其意义是什么？
19. 直齿圆柱齿轮传动正确啮合的条件是什么？
20. 为什么齿轮齿条传动时，齿轮的分度圆就是传动时的节圆？啮合角等于分度圆压力角？
21. 与外啮合圆柱齿轮传动相比，齿轮齿条传动有什么特点？
22. 两个模数和齿数相同的齿轮，一个压力角为20°，另一个为25°，这两个齿轮在分度圆上的曲率半径哪一个大？
23. 什么是齿轮加工的仿型法和范成法？各有何特点？
24. 用范成法加工渐开线齿轮，为什么有时会发生根切？避免根切的条件是什么？
25. 什么是变位齿轮？它是如何加工出来的？
26. 什么是正变位齿轮？什么是负变位齿轮？它们与标准齿轮各有何异同？
27. 斜齿圆柱齿轮与直齿圆柱齿轮相比有何优缺点？
28. 为什么斜齿圆柱齿轮传动较直齿圆柱齿轮传动平稳且承载能力也大？
29. 斜齿圆柱齿轮传动的正确啮合条件是什么？
30. 直齿圆锥齿轮传动的正确啮合条件是什么？

中国民航出版社有限公司版权所有

31. 简述直齿圆锥齿轮的应用场合。
32. 直齿圆锥齿轮以哪一端的参数为标准值？
33. 什么是蜗杆传动？它的正确啮合条件是什么？
34. 什么是蜗杆特性系数？它有何用途？
35. 蜗杆蜗轮机构具有哪些特点？
36. 齿轮传动的失效形式有哪几种？
37. 蜗杆传动的失效形式有哪几种？如何防止和延缓失效？
38. 齿轮传动安装注意事项有哪些？
39. 简述齿轮传动的维护方法。
40. 已知蜗杆的旋向、转向如题 40 图所示，判断蜗轮的转向。

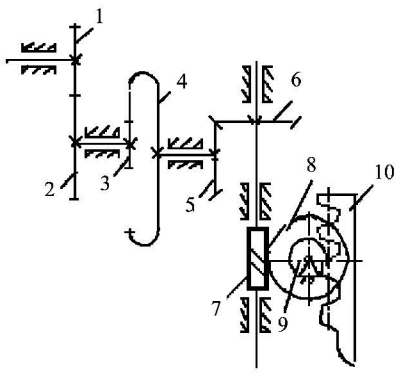


（a）　（b）　（c）　（d）

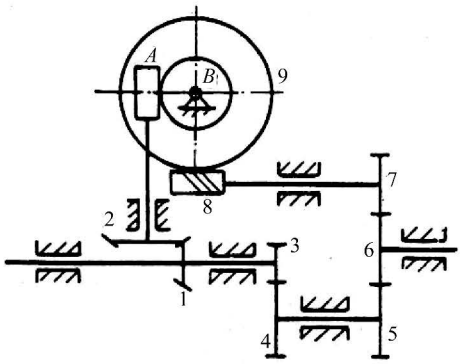
题 40 图

41. 什么是轮系？轮系有哪两种基本类型？它们各有什么特点？
42. 周转轮系由哪几个基本构件组成？它们各作何种运动？
43. 什么是周转轮系的转化轮系？为什么要进行这种转化？
44. 何谓混合轮系？其传动比如何计算？
45. 轮系有何功用？哪些功用是定轴轮系或行星轮系特有的？
46. 定轴轮系中哪种齿轮的齿数对轮系传动比的大小不起作用？它又有何用途？
47. 平面定轴轮系传动比的大小及其转向如何确定？
48. 空间轮系传动比的大小及其转向如何确定？
49. 在题 49 图所示的轮系中，设已知各齿轮齿数 $z_1=20$，$z_2=40$，$z_3=15$，$z_4=60$，$z_5=18$，$z_6=18$，$z_9=20$，齿轮 9 的模数 $m=3$ mm，蜗杆（左旋）头数 $z_7=1$，蜗轮齿数 $z_8=40$，齿轮 1 的转向如箭头所示，转速 $n_1=320$ r/min，试求齿条 10 的速度和移动方向。

50. 在题 50 图所示滚齿机工作台的传动系统中，设已知各齿轮齿数 $z_1=15$，$z_2=28$，$z_3=15$，$z_4=35$，被切削的齿轮齿数 $z_{10}=20$，分度蜗杆（右旋）8 的头数 $z_8=1$，分度蜗轮齿数 $z_9=40$，试求传动比 i_{75}。



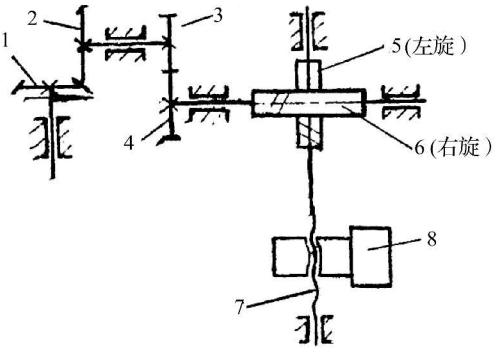
题 49 图



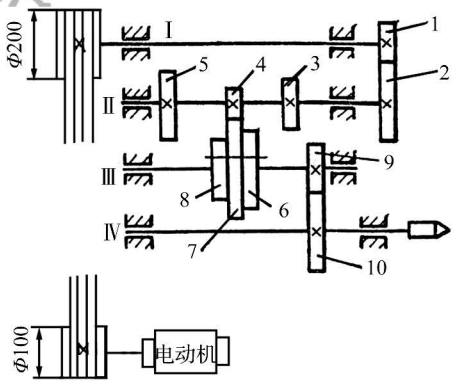
题 50 图

51. 在题 51 图所示的轮系中，设已知各齿轮齿数 $z_1=20$，$z_2=30$，$z_3=20$，$z_4=24$，$z_5=20$，$z_6=40$，丝杆（右旋）的螺距 $t=3$ mm，试求当齿轮 1 转一周时螺母 8 的移动距离和移动方向。

52. 在题 52 图所示传动系统中，设已知各齿轮齿数 $z_1=26$，$z_2=51$，$z_3=42$，$z_4=29$，$z_5=49$，$z_6=43$，$z_7=56$，$z_8=36$，$z_9=30$，$z_{10}=90$，电动机转速 $n=1450$ r/min，小皮带轮直径 $D_1=100$ mm，大皮带轮直径 $D_2=200$ mm，试求出轴Ⅲ上的三联齿轮分别与轴Ⅱ上的三个齿轮啮合时，轴Ⅳ的三种转速。

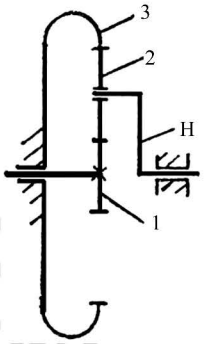


题 51 图

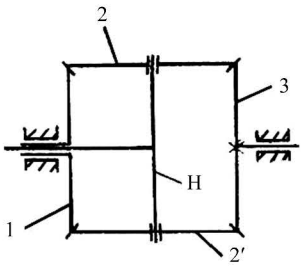


题 52 图

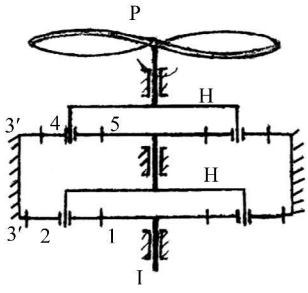
53. 在题 53 图所示行星减速器中，设已知各齿轮齿数 $z_1=105$，$z_2=130$，齿轮 1 转速 $n_1=1410$ r/min，试求转臂 H 的转速 n_H。



题 53 图



题 54 图



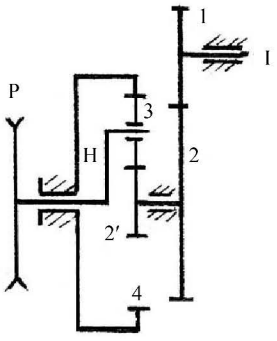
题 55 图

54. 在题 54 图所示轮系中，设已知各齿轮齿数 $z_1 = z_3$，$z_2 = z'_2$，$n_H = 50$ r/min（顺时针转动），试求：（1）$n_1 = 0$，n_3 为多少？（2）$n_1 = 200$ r/min（逆时针转动），n_3 为多少？

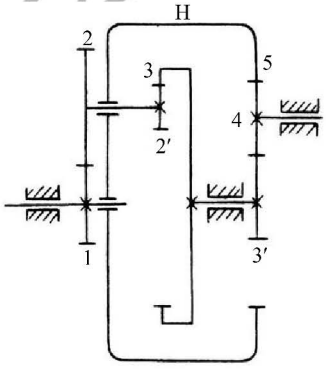
55. 如题 55 图所示为国产某直升机主减速器的行星轮系。发动机直接带动中心轮 1，由于功率大，采用六个行星轮 2，八个行星轮 4，已知 $z_1 = z_5 = 39$，$z_2 = 27$，$z_3 = 93$，$z'_3 = 81$，$z_4 = 21$，求输入轴 I 与螺旋桨 P 之间的传动比 i_{IP}。

56. 某行星转向机构如题 56 图所示，$z_1 = 21$，$z_2 = 35$，$z'_2 = 19$，$z_3 = 15$，$z_4 = 49$，I 轴为输入轴，系杆 H 和带动履带运动的驱动轮 P 相固联。求输入轴 I 与驱动轮 P 之间的传动比 i_{IP}。

57. 在题 57 图所示的轮系中，设已知 $n_1 = 1190$ r/min（顺时针转动），各齿轮齿数 $z_1 = 24$，$z_2 = 48$，$z'_2 = 30$，$z_3 = 90$，$z'_3 = 20$，$z_4 = 30$，$z_5 = 56$，试求转速 n_H。



题 56 图



题 57 图

58. 何谓螺旋传动？它有哪两种形式？

59. 螺旋传动的失效形式有哪些？维护要点是什么？

60. 钢索传动主要由哪几个零件组成？各有哪些功用？

61. 钢索传动的特点有哪些？飞机上常用的钢索是哪两种？

62. 松紧螺套的作用是什么？安装时应注意哪几点？
63. 飞机上每根钢索的两端接头处标有数字和字母，有何作用？
64. 如何测量钢索的张力？
65. 传动杆传动主要由哪几个零件组成？传动杆传动的特点是什么？
66. 硬式传动中摇臂有哪些作用？
67. 摇臂是如何实现差动的？
68. 如何计算飞机操纵系统力传动比？
69. 如何防止飞机的操纵钢索之间发生错接？

中国民航出版社有限公司版权所有

第 4 章　航空紧固件

学习要求：

- 了解螺纹的主要参数、类型及螺旋副的自锁及效率，熟悉螺纹连接的基本类型及美国航空螺纹系列与等级；
- 了解美国航空螺纹紧固件中航空螺栓、航空螺母、垫圈、螺钉的基本知识；
- 了解螺纹紧固件的安装和防松，掌握螺纹紧固件的失效形式和维护；
- 了解转角拧紧式紧固件的基本知识；
- 熟悉铆钉的基本类型及标号。

第 4 章　课程导学	

4.1　螺纹基础知识

4.1.1　螺纹的主要参数

如图 4.1 所示，螺纹的主要参数有：

大径 d ——螺纹的最大直径，也称外径。它是螺纹的公称直径。

小径 d_1——螺纹的最小直径，也称内径。它是外螺纹危险剖面的直径。

中径 d_2——轴向剖面内，牙厚等于牙间宽的圆柱直径。它是决定螺纹配合的主要参数。

螺距 P ——相邻两螺纹牙平行侧面间的轴向距离。

中国民航出版社有限公司 版权所有

螺纹线数 n ——螺纹螺旋线的数目。

导程 S ——同一螺纹上相邻两螺纹牙平行侧面间的轴向距离。对于单线螺纹，$S = P$；对于多线螺纹，$S = nP$。

螺旋升角 λ ——在中径 d_2 的圆柱面上，螺旋线的切线与垂直于螺纹轴线平面间的夹角，如图 4.2 所示，其计算式为 $\tan\lambda = \dfrac{S}{\pi d_2}$。

牙型角 α ——在轴向剖面内，螺纹牙形两侧边的夹角。

工作高度 h ——内外螺纹牙的径向接触高度。

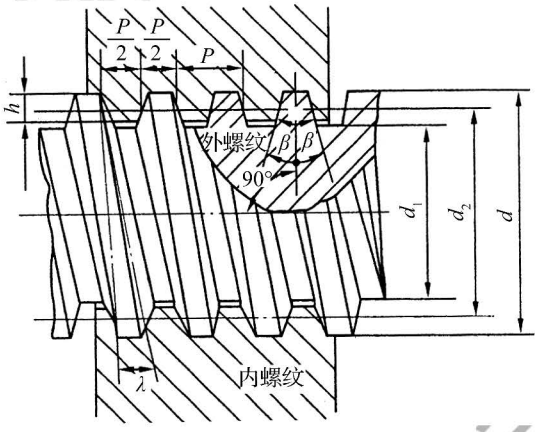


图 4.1　螺纹的主要参数

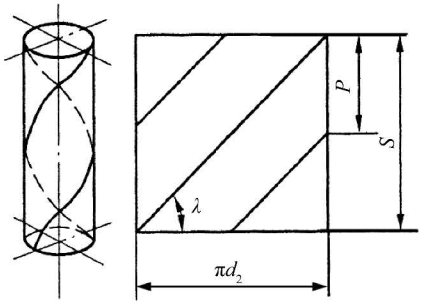
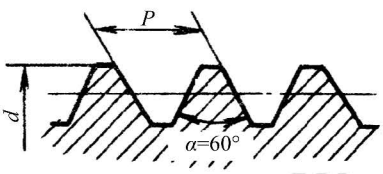


图 4.2　计算螺纹升角 λ

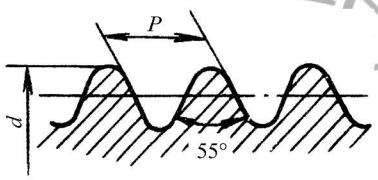
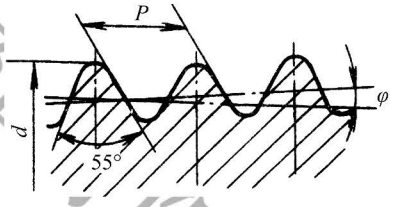
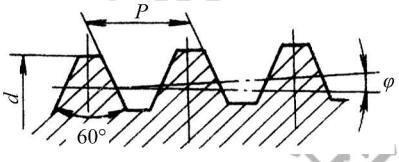
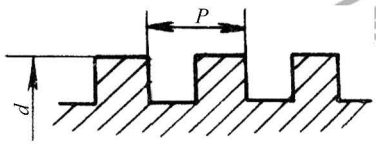
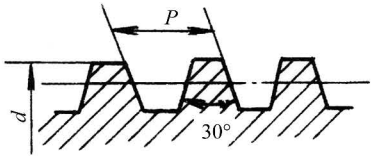
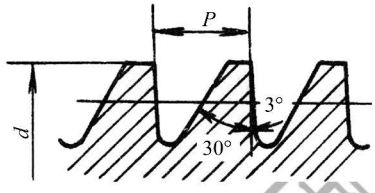
4.1.2　螺纹的类型

按螺纹的牙型不同，螺纹分为三角形螺纹、矩形螺纹、梯形螺纹和锯齿形螺纹，见表 4-1 中牙型图。

表 4-1　常用螺纹

类别	牙型图	特点和应用
普通螺纹		牙型角 60°，牙根较厚，牙根强度较高。当量摩擦系数较大。同一公称直径，按螺距 P 大小分粗牙和细牙。普通螺纹应用极广，主要用于连接。一般情况下用粗牙，细牙则用于薄壁零件或受动载荷的连接及液压系统内的一些连接以及微调机构的调整

续表

类别	牙型图	特点和应用
英寸制螺纹		牙型角 55°（英制），也有 60°（美制）的，尺寸单位是英寸。螺距以每英寸牙数反映。也有粗牙和细牙之分。多在修配美英等国家的零件时使用
圆柱管螺纹		牙型角 55°，牙顶呈圆弧。旋合螺纹间无径向间隙，紧密性好。公称直径近似为管子孔径，以英寸为单位。多用于压力在 1.57 MPa 以下的管子连接
圆锥管螺纹		与圆柱管螺纹相似，但螺纹分布在 1∶16 的圆锥表面上，紧密性更好。通常用于高温、高压条件下工作的管子连接。当与内圆柱管螺纹配用时，在 1 MPa 压力下已足够紧密
矩形螺纹		螺纹牙的剖面通常为正方形，牙厚为螺距的一半，尚未标准化。牙根强度较低，难于精确加工，磨损后松动，间隙难以补偿，对中精度低。但当量摩擦系数最小，效率较其他螺纹高，故用于传动
梯形螺纹		牙型角为 30°，其传动效率比矩形螺纹低，但可避免矩形螺纹的缺点。广泛用于传动
锯齿形螺纹		工作面的牙边倾斜角为 3°，非工作面的牙边倾斜角为 30°。综合了矩形螺纹效率高和梯形螺纹牙根强度高的特点。但只能用于单向受力的传动

按螺纹线的绕行方向，可分为右旋螺纹和左旋螺纹，一般多采用右旋螺纹。

按螺纹线的数目，可分为单线螺纹、双线螺纹和多线螺纹。单线螺纹主要用于连接，双线螺纹和多线螺纹多用于传动。

常用螺纹的类型、牙型、特点和应用已列于表 4-1 中，前四种螺纹主要用于连接，后三种螺纹主要用于传动。表中除了矩形螺纹外，其余螺纹都已标准化了，详见本书附表 2——公制螺纹直径与螺距标准组合系列、基本尺寸（GB/T 193—2003）。

4.1.3　螺旋副的受力分析、自锁和效率

两个分别具有内、外螺纹的构件旋合连接在一起就组成了螺旋副。值得注意的是，螺纹参数全部相同的内、外螺纹才能正确旋合连接。

1. 牙型角等于零的螺纹

图 4.3（a）所示为采用矩形螺纹的千斤顶。当转动手柄时，螺母绕螺杆旋转并上升或者下降，从而使重物 Q 被举起或放下。可将图（a）简化为图（b）所示的矩形螺纹螺旋副。

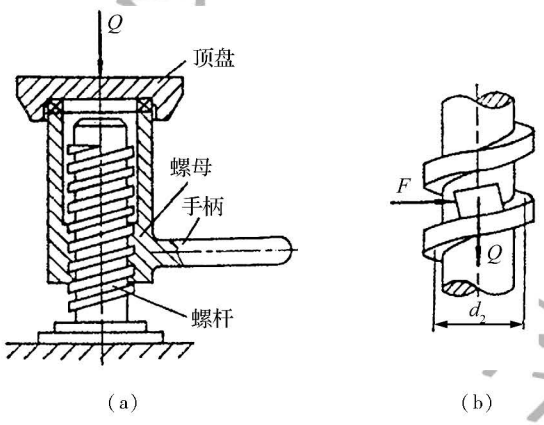
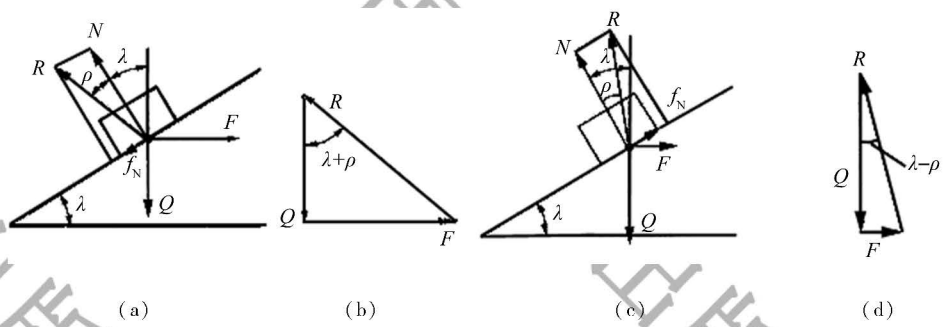


图 4.3　矩形螺纹受力分析

分析其受力，图中 Q 为作用在螺母上的轴向载荷，假定 Q 集中作用在螺纹中径 d_2 对应圆周上的一点。当对螺母作用转矩 T_2 使螺母等速旋转并沿载荷 Q 的反方向移动时，螺母相当于滑块在水平力 F 作用下沿斜面等速上升，如图 4.4（a）所示。图中 λ 为螺旋升角，ρ 为摩擦角，N 为法向反作用力，R 为摩擦力 f_N 与法向反作用力的合力。由于螺母作等速运动，所以作用于螺母上的三个力 Q、R 和 F 平衡，由力的封闭三角形［见图 4.4（b）］得：

$$F = Q\tan(\lambda + \rho) \tag{4-1}$$



(a)　(b)　(c)　(d)

图 4.4　矩形螺纹螺旋副受力分析图

旋转螺母克服螺纹中的阻力所需的转矩为：

$$T_1 = F \cdot \frac{d_2}{2} = \frac{Qd_2}{2}\tan(\lambda + \rho) \tag{4-2}$$

旋转螺母一周作功 $A_1 = 2\pi T_1$，其中有效功 $A_2 = QS$，S 为螺纹导程，故螺旋副的效率为：

$$\eta = \frac{A_2}{A_1} = \frac{QS}{2\pi T_1} = \frac{Q\pi d_2 \tan\lambda}{Q\pi d_2 \tan(\lambda + \rho)} = \frac{\tan\lambda}{\tan(\lambda + \rho)} \tag{4-3}$$

当螺母等速旋转并沿载荷 Q 的方向移动（即松退螺母）时，相当于滑块沿斜面等速下降，如图 4.4（c）所示，由力的封闭三角形［见图 4.4（d）］得：

$$F = Q\tan(\lambda - \rho) \tag{4-4}$$

由式（4-4）可知，若 $\lambda \leqslant \rho$，则 $F \leqslant 0$，这时必须加一反方向的作用力 F 才会使滑块下滑。若不加外力 F，则不论 Q 有多大，滑块也不会下滑。对螺纹来说，就是不论轴向载荷有多大，螺母不会自行松退，这种现象称为自锁。故矩形螺纹的自锁条件为：

$$\lambda \leqslant \rho \tag{4-5}$$

2. 牙型角不等于零的螺纹

三角螺纹、梯形螺纹等都是牙型角不等于零的螺纹。其受力关系可以用与矩形螺纹对比的方法求得。在轴向载荷作用下，螺纹与螺杆相对转动时，相当于一楔形重物 Q 沿槽形斜面移动，如图 4.5 所示。将矩形螺纹的受力分析所得各公式中的摩擦系数 f 和摩擦角

ρ 分别改为当量摩擦系数 $f'=\dfrac{f}{\cos\dfrac{\alpha}{2}}$ 和当量摩擦角 $\rho'=\arctan f'$，便得到牙型角不等于零的各种螺纹的相应公式：

$$\left.\begin{aligned} F &= Q\tan(\lambda+\rho') \\ T_1 &= \frac{Qd_2}{2}\tan(\lambda+\rho') \\ \eta &= \frac{\tan\lambda}{\tan(\lambda+\rho')} \\ F &= Q\tan(\lambda-\rho') \\ \lambda &\leqslant \rho' \end{aligned}\right\} \tag{4-6}$$

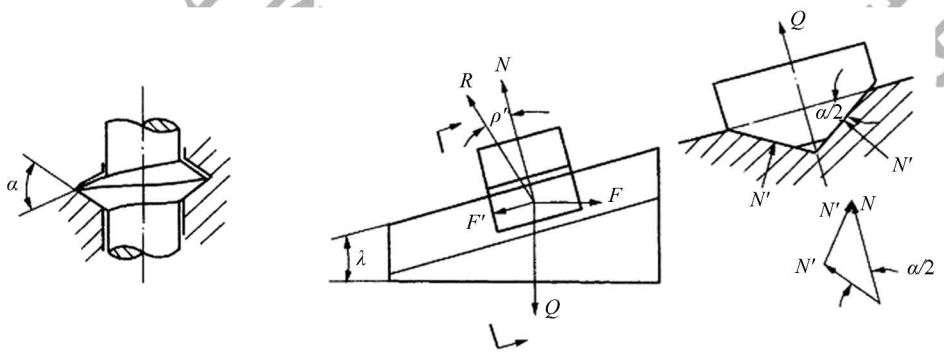


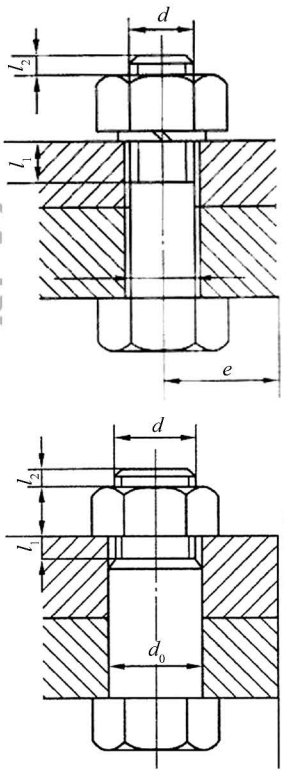
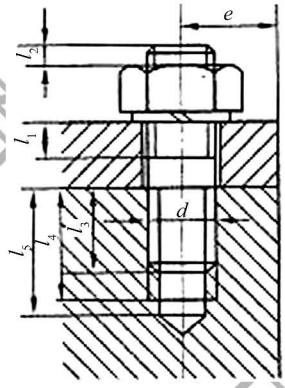
图 4.5　牙型角不等于零的螺纹受力分析图

由以上分析可知，螺旋升角 λ 越小或当量摩擦角 ρ' 越大，螺纹的自锁性能越好，效率越低。所以连接螺纹多采用单头三角形螺纹，传动螺纹则采用矩形、梯形螺纹。

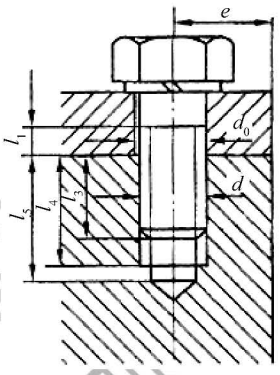
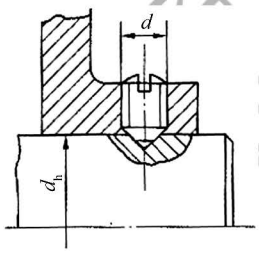
4.1.4　螺纹连接的基本类型及应用

螺纹连接有螺栓连接、双头螺柱连接、螺钉连接和紧定螺钉连接四种基本形式，它们的基本类型、特点和应用列于表 4-2 中。

表 4-2　螺纹连接的基本类型、特点和应用

类型	构造	主要尺寸关系	特点和应用
螺栓连接		螺纹余留长度 l_1 受拉螺栓连接： 静载荷 $l_1 \geqslant (0.3 \sim 0.5)d$ 变载荷 $l_1 \geqslant 0.75d$ 冲击、弯曲载荷 $l_1 \geqslant d$ 受剪螺栓连接 l_1 尽可能小，螺纹伸出长度 $l_2 \approx (0.2 \sim 0.3)d$，螺栓轴线到被连接件边缘的距离： $e = d + (3 \sim 6)$ mm	无需在被连接件上切制螺纹，构造简单，装拆方便，应用最广。用于通孔并能从连接两边进行装配的场合
双头螺柱连接		螺纹旋入深度 l_3，当螺纹孔零件为： 钢或青铜 $l_3 \approx d$ 铸铁 $l_3 \approx (1.25 \sim 1.5)d$ 铝合金 $l_3 \approx (1.25 \sim 2.5)d$ 螺纹孔深度 $l_4 \approx l_3 + (2 \sim 2.5)d$ 钻孔深度 $l_5 \approx l_4 + (2 \sim 2.5)d$ l_1、l_2、e 同上	一端旋入并紧定在较厚被连接件的螺纹孔中，另一端穿过较薄被连接件的通孔，与螺母组合使用。用于受结构限制而不能用螺栓或希望连接结构较紧凑且时常需装拆的场合

续表

类型	构造	主要尺寸关系	特点和应用
螺钉连接		l_1、l_3、l_4、l_5、e 同上	不用螺母，而且能有光整的外露表面，应用与双头螺柱连接相似，但不宜用于时常装拆的连接，以免损坏被连接件的螺纹孔
紧定螺钉连接		$d \approx (0.2 \sim 0.3)d_h$ 转矩大时取最大值	旋入被连接件之一的螺纹孔中，其末端顶住另一被连接件的表面或顶入相应的坑中，以固定两个零件的相互位置，并可传递不大的力或转矩

4.1.5　美国航空螺纹系列与等级

1. 螺纹系列

美国航空螺栓、螺钉和螺母的螺纹采用美国国家标准系列螺纹和美国统一标准系列螺纹。

1）美国国家标准系列螺纹（American National Standard Thread）

美国国家标准系列螺纹又分粗牙螺纹系列（NC）和细牙螺纹系列（NF）。这两种系列的螺纹尺寸详见本书附表 3——美制统一螺纹（UN）的标准系列（ASME B1.1—2003）。螺纹尺寸用两组数字来表示，两组数字之间有一短划。例如：螺纹 2-56。短划前面的数字表示螺纹直径的尺寸号数，每个尺寸号数有一个对应的螺纹公称直径；短划后面的数字表示该螺纹每英寸长度所具有的牙数，即相当于公制螺纹中的螺距。

对于小于 1/4 in 直径的螺纹，美国国家标准粗牙螺纹系列有 1、2、3、4、5、6、8、10 和 12 共 9 个尺寸号数的螺纹；美国国家标准细牙螺纹系列除了有上述 9 个尺寸号数的螺纹外，还有一个 0 号尺寸的螺纹，共有 10 个尺寸号数。例如，螺纹 2-56 表示每英寸长

中国民航出版社有限公司版权所有

度有 56 牙的 2 号粗牙螺纹，查表 1-1 可得到 2 号粗牙螺纹表示的螺纹公称直径为 0.086 in。

对于等于或大于 1/4 in 直径的螺纹，其尺寸号数就等于螺纹公称直径。例如，螺纹 3/4-10 表示每英寸长有 10 牙的 3/4 in 直径的粗牙螺纹。

同尺寸号数的粗牙螺纹系列与细牙螺纹系列的螺纹具有相同的螺纹公称直径，只是每英寸长度具有的牙数不同。例如，螺纹 3/8-16 和螺纹 3/8-24，前者每英寸长具有 16 牙的粗牙螺纹；后者每英寸长具有 24 牙的细牙螺纹，它们的公称直径都是 3/8 in。

2）美国统一标准系列螺纹（Unified Screw Thread）

该系列螺纹也分为粗牙螺纹系列（UNC）和细牙螺纹系列（UNF）。

美国统一标准系列螺纹是美国、英国和加拿大三国的标准化委员会一致商定的。它与美国国标系列螺纹比较只是在少数细节上有所不同，主要表现在公差的分布不同；还有对直径为 1 in 的螺纹规定不同。NF 规定为每英寸 14 牙，用 1-14NF 表示；UNF 规定每英寸 12 牙，用 1-12UNF 表示，其余则均相同，螺纹的牙型角均为 60°。除 1 in 直径的螺纹外，美国国家标准螺纹和美国统一标准螺纹是可互换的。

2. 螺纹等级

螺纹还有等级之分，螺纹的等级表示螺纹副具有的配合松紧程度，它设有四级：

1 级——松配合；2 级——自由配合；3 级——中度配合；4 级——紧配合。

等级数愈大，螺纹副配合的紧度愈紧。1 级配合只需用手指即可轻松拧转螺母。4 级配合则需要用扳手才能拧上螺母。航空螺栓绝大多数采用 3 级中度配合；航空螺钉则采用 2 级自由配合。

3. 标记

例：（1）美国统一标准粗牙螺纹系列，1/2 in 公称直径，每英寸 13 牙，2 级配合的外螺纹，标为 1/2-13UNC-2A。

（2）美国国家标准粗牙螺纹系列，1/2 in 直径，每英寸 13 牙，2 级配合的内螺纹，标为 1/2-13NC-2B。

对于左旋螺纹，在上面记号后面加上字母“LH”。

知识总结	随堂练习

4.2　美国航空螺纹紧固件

飞机上有许多零部件需在频繁的定期维护中拆卸分解或者更换。它们常采用螺栓、螺柱、螺钉、螺母和垫圈等螺纹紧固件来连接和紧固。这些螺纹紧固件常按下列三种规格标准制造：

（1）美国空军海军标准（AN）；

（2）美国国家航空标准（NAS）；

（3）美国军用标准（MS）。

4.2.1　航空螺栓（Aircraft Bolts）

1. 普通螺栓（General-purpose Bolts）

下面介绍几种常用的普通螺栓，如图 4.6 所示。

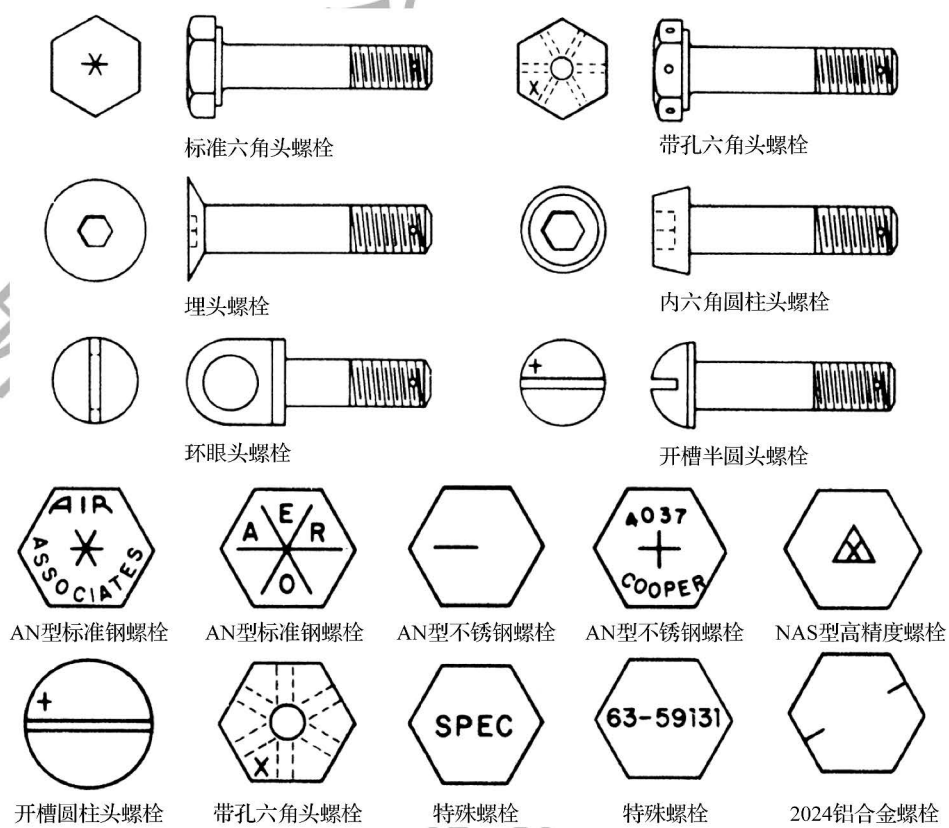


图 4.6　航空螺栓的识别标记

1）机体螺栓（Airframe Bolts）

机体螺栓是一种具有六方头的螺栓，它广泛用于飞机结构装配，能承受拉伸和剪切载荷。这种螺栓是按 AN 型号规格标准制造的，其规格 AN3～AN20，螺栓的螺纹为细牙螺纹（NF）。制造螺栓的材料有镍合金钢、不锈钢和 2024 铝合金等。通常可通过螺栓头上的标记（见图 4.6）来识别制造螺栓的材料及性能。

机体螺栓的直径为 3/16～5/4 in，它们分别用代号 AN3～AN20 表示。

2）发动机螺栓（Engine Bolts）

发动机螺栓的形状与机体螺栓一样，只是它的头部稍厚且有穿保险丝的通孔。发动机螺栓与机体螺栓具有相同的拉伸和剪切强度。它的规格为 AN73～AN81。

发动机螺栓的螺纹有细牙螺纹和粗牙螺纹两种。对于粗牙螺纹，在型号规格编码中表示螺纹直径的数字后面加上“A”字母，如是细牙螺纹则无“A”字母。

例：AN75-16 表示直径 5/16 in，长度为 $1\frac{3}{4}$ in，镍合金钢制的细牙螺纹螺栓。

AN75A16 表示直径 5/16 in，长度为 $1\frac{3}{4}$ in，镍合金钢制的粗牙螺纹螺栓。

3）高精度螺栓（Close-tolerance Bolts）

所谓高精度螺栓是指螺栓光杆段的直径制造精度比通用型的高，螺栓光杆段经研磨或磨削加工，它的直径误差在±0.0005 in（即±0.0127 mm）。高精度螺栓又称为紧公差螺栓，在高精度螺栓的头部有“△”标记，如图 4.7 所示。

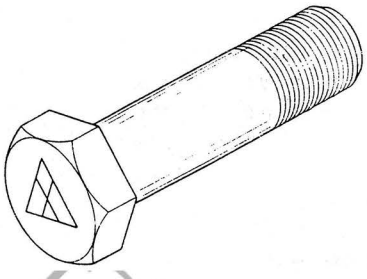


图 4.7　高精度螺栓

高精度螺栓与机体螺栓使用相同的直径和长度标准。它的头型有两种：六角头（AN173～AN186）和 100°埋头（NAS80～NAS86）。

高精度螺栓主要用于承受高冲击载荷或要求紧密配合的部位。

例：AN175-26A 表示直径为 5/16 in，杆长 $2\frac{3}{4}$ in，杆端无孔的高精度螺栓。

4）内六方螺栓（Internal Wrenching Bolts）

内六方螺栓的头部是圆柱形或圆锥台形的，在螺栓头上制有内六方。内六方螺栓是用高强度钢制造，它的强度比 AN 系列的六角头螺栓的强度高，因而它与 AN 系列的六角头螺栓不能互换使用。内六方螺栓主要用于承受拉伸和剪切复合应力的部位。它的头部与螺杆连接处有圆角。安装于钢件上时，安装孔口要划窝使圆角沉入孔内；安装于铝合金件上时，它的头下要安装 MS20002C 垫圈。

内六角螺栓的型号规格编码为 MS20004～MS20024，其末两位数字分别为 04、05、06、07、08、09、10、12、14、16、18、20、22 和 24，它们表示螺栓直径为 4/16～24/16 in，即 1/4～3/2 in。

航空螺栓的型号编码是按螺栓头型、紧固保险方式、制造材料和功能用途等方面来编类的。

螺栓的直径和长度在型号编码中以阿拉伯数字表示。螺栓的直径以 1/16 in 为计量单位；螺栓的长度一般以 1/8 in 为计量单位。

螺栓的制造材料是以英文字母或符号来表示的。“C”表示不锈钢；“DD”表示 2024 铝合金；“-”表示镍合金钢。

例：图 4.8 为螺栓型号编码示意图。

图 4.8　螺栓型号编码示意图

值得注意的是，螺栓型号编码中表明螺栓长度的数字，从 3 到 7 均以 1/8 in 为单位，如果螺栓杆长为 1 in，此时数字不是 8 而是 10，这意味着它的长度是 1 in 加上八分之零，即当表示 1 in 或 1 in 以上长的螺栓时，该数字由两位数字表示，第一位数字为英寸数，第二位数字以 1/8 in 为计量单位。

例：AN5C36 其中表示螺栓杆长的数字为“36”，它表示该螺栓杆长为 $3\frac{3}{4}$ in。

另外对于航空螺栓的直径，美国联邦航空局有规定，小于 3/16 in 直径的钢制螺栓或小于 1/4 in 直径的铝合金螺栓不能用于飞机结构上。

2. 专用螺栓（Special Bolts）

1）轴销螺栓（Clevis Bolts）

轴销螺栓的头部为圆头，圆头上有一字或十字槽，螺杆部分光杆与螺纹杆段之间一般都有一空刀槽。轴销螺栓的螺纹采用细牙螺纹（NF）。

轴销螺栓只能承受剪切载荷。常在转动部件中作为铰接点的轴销。

它的型号规格为 AN21~AN36。其中 AN21、AN22 和 AN23 中的第二位数字“1”“2”和“3”分别表示“6-40”“8-36”和“10-32”规格的螺纹。从 AN24 到 AN36 螺杆直径以 1/16 in 为单位。轴销螺栓的杆长也以 1/16 in 为单位。例如，AN24 轴销螺栓的螺杆直径为 4/16 in。

2）环眼螺栓（Eye Bolts）

环眼螺栓（Eye Bolts）专门用来承受拉伸载荷，常作为松紧螺套的叉形接头、轴销钢索套环等。

例：图 4.9 为螺栓型号编码示意图。

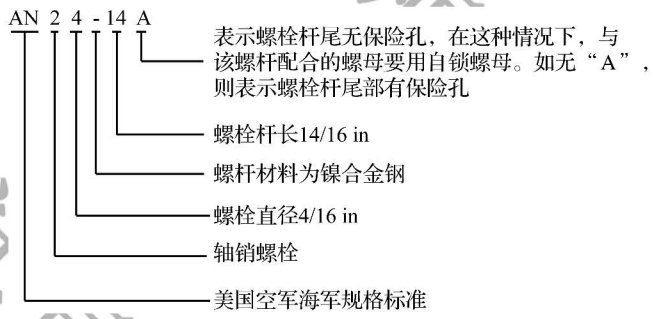


图 4.9　螺栓型号编码示意图

3）乔氏螺栓（Jo-bolt）

乔氏螺栓又称为玖氏螺栓或约氏螺栓。它是一种专用螺栓，由螺母、螺栓和衬套三个元件组成，并在出厂前装配成套，如图 4.10 所示。乔氏螺栓具有较高的剪切和拉伸强度，是一种高强度结构用紧固件。它用于飞机结构不允许使用 AN、MS 或 NAS 型紧固件且不经常拆卸的场合。

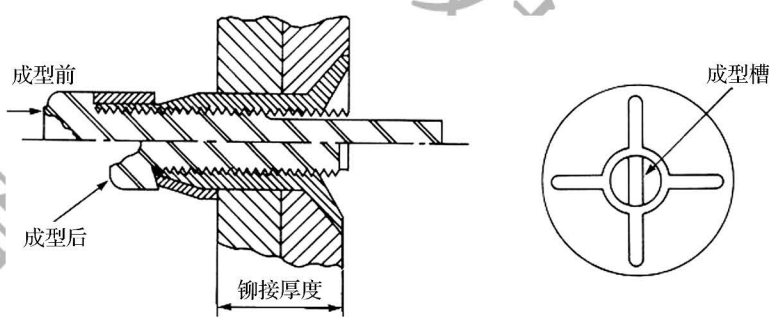


图 4.10　埋头乔式螺栓

乔氏螺栓还具有十分优异的抗震特性、重量轻和能单人快速作业等优点。但是，由于该螺栓为三个分离元件组成，它不能用于发动机进气道附近区域，以防万一螺栓松动而致其任一分离件被吸入发动机。

目前常用的乔氏螺栓有四种直径规格：200 系列，直径为 3/16 in；260 系列，直径为 1/4 in；312 系列，直径为 5/16 in；375 系列，直径为 3/8 in。乔氏螺栓有三种头型：埋头型（F）、埋头可铣切型（FA）和六角头型（P）。

安装时，固定乔氏螺栓的螺母并拧转螺栓，螺栓向外拉动将衬套挤压膨胀形成墩头使工件得以紧固。完工时，多余的螺杆段会断掉，形成与螺母平齐的断口。

4）锁扣螺栓（Lock Bolts）

锁扣螺栓又称拉螺栓。锁扣螺栓具有高强度螺栓和铆钉的作用，它与常规螺栓或铆钉相比较具有安装快捷、方便以及不需采用保险的优点。锁扣螺栓通常用于机翼型条接口、起落架关节、燃油箱安装接头、支撑杆柱、梁腹板、蒙皮托板和其他关键结构的接合部位。

按承受载荷的不同，螺杆制有两种形式：抗剪切载荷型［见图4.11（a）］和抗拉伸载荷型［见图4.11（b）］。抗剪切载荷型螺杆上的锁紧沟槽较抗拉伸载荷型螺杆上的锁紧沟槽少。与抗剪切载荷型螺杆相配合的锁箍的厚度也较薄。螺栓的头型有凸头和埋头两种。

常用的锁扣螺栓有拉固式、短桩式和盲固式三种型别，如图4.11所示。

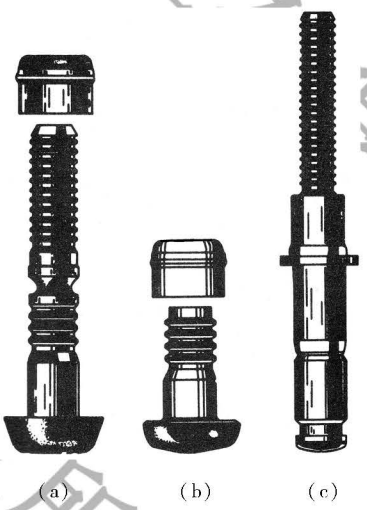


图4.11　锁扣螺栓

（1）拉固式锁扣螺栓（Pull-type Lock Bolts）。

拉固式锁扣螺栓由螺杆和锁箍组成［见图4.11（a）］。螺杆的制造材料有合金钢和铝合金两种；锁箍的材料有低碳钢和铝合金两种。拉固式锁扣螺栓的重量只有相同材质、尺寸的AN型螺栓与螺母的一半，而强度相同，因此，允许它们替代AN型螺栓。安装时需用专用的拉铆枪，无需顶铆，单人即可完成作业。

（2）短桩式锁扣螺栓（Stump-type Lock Bolts）。

短桩式锁扣螺栓与拉固式锁扣螺栓相似，也是由螺杆和锁箍组成［见图4.11（b）］，但它的螺杆较短。

它主要用于因安装间隔有限而不能采用拉固式锁扣螺栓的场合。安装时需用标准型气铆枪（带有能使锁箍紧固于螺杆环形锁槽之中的锤打装置）和一根顶冲棒，两人作业。

（3）盲固式锁扣螺栓（Blind-type Lock Bolts）。

盲固式锁扣螺栓是由螺杆、盲端胀套、衬套、锁箍和垫圈五个元件组装成一体结构形式的［见图4.11（c）］。它具有较高的强度和能将板材拉挤紧固的功能，通常用于只能从一面施工或者不便使用普通铆钉来铆接的部位。安装方法与拉固式相同，具体做法为：首先按通常要求钻孔，把螺栓的杆部放入孔中，专用的拉铆枪将螺杆向外拉出，使衬套进入盲端胀套内，同时专用的阴模向下压锁箍。衬套使盲端胀套膨胀的同时压紧下蒙皮而逐渐形成镦头。与此同时，阴模迫使锁箍嵌入螺杆的锁槽内。当拉力使锁箍充分地嵌入螺杆的槽内，镦头完全形成时，螺杆就会在特制的断槽处断掉。断口到锁箍顶之间的长度在0.032 in至0.079 in之间。

由于锁扣螺栓具有较高的强度，所以允许上述三种合金钢锁扣螺栓来代替高剪型铆钉、实心钢铆钉和同直径、头型与材质的AN型螺栓；也允许上述三种铝合金锁扣螺栓来

代替同直径、头型、材质的实心铆钉和 AN 型螺栓。

有关锁扣螺栓的型号规格，按下列方式予以编码。

拉固式锁扣螺栓编码示意图如图 4.12 所示。

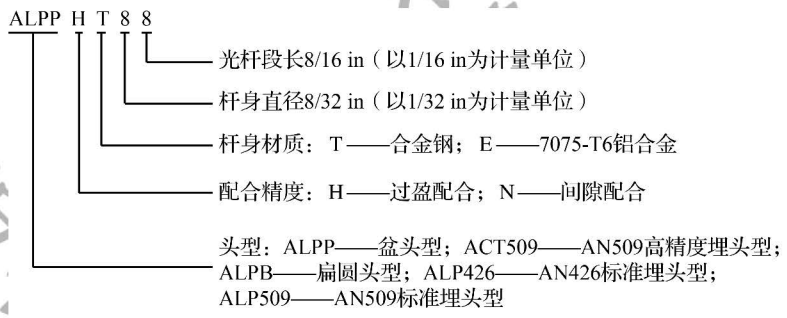


图 4.12　拉固式锁扣螺栓编码示意图

盲固式锁扣螺栓编码示意图如图 4.13 所示。

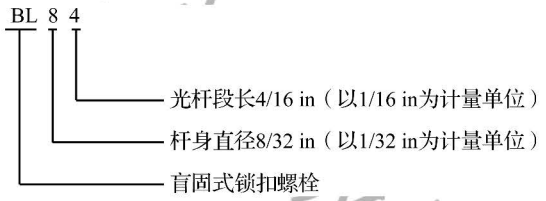


图 4.13　盲固式锁扣螺栓编码示意图

锁扣螺栓的锁箍编码示意图如图 4.14 所示。

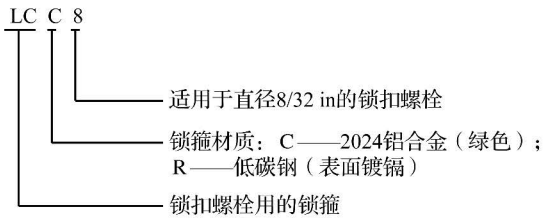


图 4.14　锁扣螺栓的锁箍编码示意图

短桩式锁扣螺栓的编码示意图如图 4.15 所示。

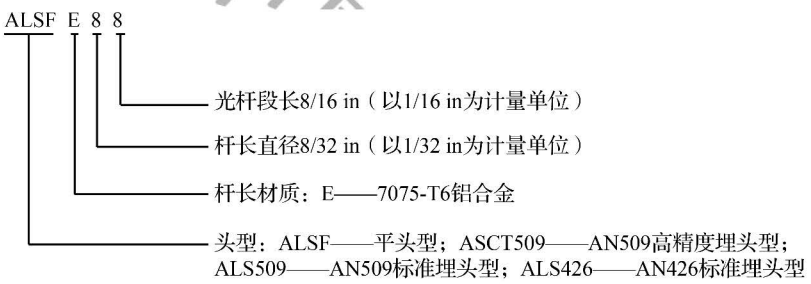


图 4.15　短桩式锁扣螺栓编码示意图

注：（1）61ST 铝合金材料制的锁箍只能与 7075 铝合金的锁扣螺栓配用；

（2）必须按待紧固工件的厚度来选择锁扣螺栓的光杆长度。

5）高锁螺栓（Hi-lock Fasteners）

高锁螺栓具有足够的强度能承受较大的剪切和挤压载荷。它能从单面紧固，一般用于普通螺栓难以安装的地方和要求紧固扭矩值严格并且很少拆卸的场合。

高锁螺栓的形状，见图 4.16。它的杆尾段制有外螺纹，杆尾端还制有内六方盲孔，该盲孔是供安装用的。高锁螺栓有扁平圆头和 100°埋头两种头型。高锁螺栓要与其专用的高锁螺母配合使用。高锁螺母（见图 4.16）分上、下两部分，上部为剪切六方头，下部为锁紧环。剪切六方头是供扳手扭转高锁螺母用的，当达到规定的扭矩值，剪切六方头就沿剪切槽处断掉与锁紧环分离，而锁紧环则紧固在螺杆上。锁紧环内制有内螺纹。制造时，当加工好锁紧环的内螺纹之后再在凸缘外圆表面局部挤压，使该段螺纹局部变形成为非圆螺纹，因而凸缘段的内螺纹具有防松作用且效果优良。锁紧环的下端制有一个扩孔，如果在该扩孔内镶嵌环形密封件可达到密封的目的。

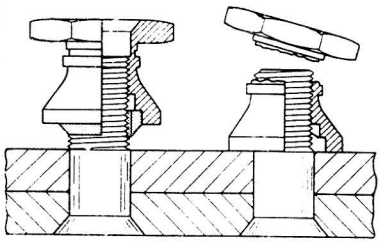


图 4.16　高锁螺栓与螺母

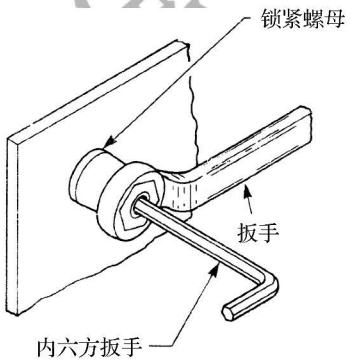


图 4.17　高锁螺栓的安装

高锁螺栓可用专用工具安装，也可用内六方扳手和梅花扳手安装。图 4.17 为用内六方扳手和梅花扳手组合安装高锁螺栓的情况。安装时，先将高锁螺栓放入被连接件的孔内，拧上螺母。然后用梅花扳手套入螺母的剪切六方头上，再将内六方扳手插入螺栓尾端

的六方孔内定位螺栓紧固时，转动梅花扳手使螺母相对螺栓转动，直至剪切六方头在剪切槽处剪断脱落。

波音飞机制造公司对高锁螺栓型号规格的标记示例如图 4.18 所示。

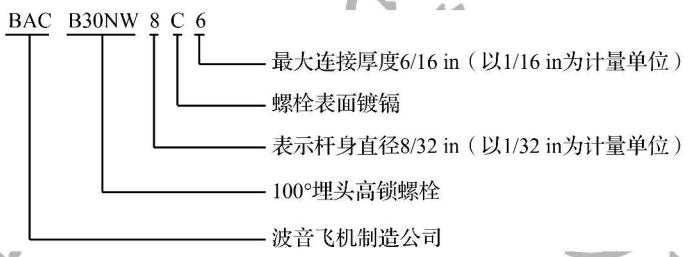


图 4.18　高锁螺栓型号规格的标记

4.2.2　航空螺母

航空螺母有很多不同的形状和尺寸规格，其制造材料有碳钢、镍合金钢、不锈钢和铝合金等。

航空螺母按能否自锁分非自锁型螺母和自锁型螺母两大类。非自锁型螺母在紧固后必须用开口销、保险丝、防松螺母或弹性垫圈等外部保险方式来保证螺母的紧固性。自锁型螺母本身具有保险性能，它能保证螺母的紧固性。

1. 非自锁型螺母（Non-self-locking Nuts）

飞机上常用的非自锁型螺母有六角槽形螺母、普通六角螺母、普通防松螺母和蝶形螺母等，如图 4.19 所示。

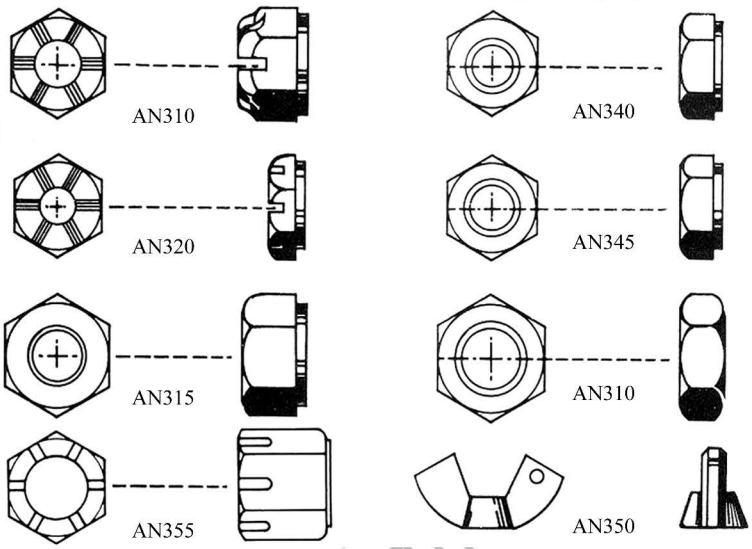


图 4.19　非自锁型螺母

1）飞机用六角槽形螺母（Castle Nuts）

这种类型的螺母又称为堞型螺母，其型号为 AN310。它是与 AN3～AN20 机体螺栓配合使用的，螺纹为 NF（细牙螺纹）。其制造材料有镍合金钢、不锈钢和 2024 铝合金三种。这三种材料在螺母的型号规格标记中分别用代号“-”“C”和“D”来表示。例：标记 AN310C6 表示为不锈钢制与 AN6 螺栓配合使用的堞形螺母；标记 AN310D5R 表示为 2024 铝合金制与 AN5 螺栓配合使用的右旋螺纹，R 表示右旋螺纹。这种形式的螺母十分结实，能够承受很大的拉力。帽顶的槽是装开口销或穿保险丝用的。安装时，该槽须与螺栓杆上的保险孔对正。

2）飞机用抗剪六角槽形扁螺母（Aircraft Shear Castle Nuts）

这种螺母型号为 AN320，它适用于仅有剪切应力的部位。它与 AN21～AN36 轴销螺栓配合使用。它的构造、制造材料与 AN310 螺母的相同，只是螺母的厚度稍薄一些。例：标记 AN320D6 表示为 2024 铝合金制与 AN26 轴销螺栓配合使用的抗剪型六角槽形扁螺母。

3）飞机用普通螺母（Aircraft Plain Nuts）

这是一种普通六角螺母，其型号为 AN315，通常用于受大拉力的部位。它的缺点是必须再用一个防松螺母或一个弹性垫圈来保证其紧固性。这种螺母的制造材料与 AN310 螺母的相同。另外，它有右旋螺纹和左旋螺纹两种。例：标记 AN315-7R 表示为镍合金钢制、与 AN7 螺栓配用的右旋螺纹螺母。标记 AN315C4L 表示不锈钢制、螺纹直径为 1/4 in 的左旋螺纹螺母。标记 AN315D6R 表示为 2024 铝合金制、螺纹直径为 3/8 in 的右旋螺纹螺母。

4）防松螺母（Check Nuts）

这是一种用于双螺母防松措施中的六角防松螺母，其型号为 AN316。它用于 AN315 普通螺母之上，防止普通螺母松脱。但由于比其他类型的防松措施增加的重量大，所以目前在飞机上很少应用。

5）六角螺母（Light Hex Nuts）

这种螺母有 AN340 和 AN345 两种型号，它们与安装螺钉配合使用，因此，其螺纹规格是按安装螺钉的规格制造的。AN340 为粗牙螺纹螺母；AN345 为细牙螺纹螺母。制造材料有碳合金钢（-）、不锈钢（C）、黄铜（B）和 2024 铝合金（DD）。例：标记 AN340B6 表示为由黄铜制造、与 6-32 安装螺钉配合使用的粗牙螺纹螺母。

6）发动机用六角槽形螺母（Slotted Engine Nuts）

这是一种用于发动机的六角槽形螺母，其型号为 AN355，规格从 AN355-3（3/16 in）到 AN355-12（3/4 in），制造材料为镍合金钢，螺母的螺纹为细牙螺纹。

7）蝶形螺母（Wing Nuts）

蝶形螺母又称为翼形螺母，其型号为 AN350。它专门用于拆装频繁，而且只需用手指拧紧即可的装配件上。它的制造材料为合金钢或黄铜。这种螺母可与安装螺钉或螺栓配合使用。配合安装螺钉的螺母由螺钉的号数给出。例：标记 AN350-6 表示与 6-40 安装螺钉

配合使用的螺母。而配合螺栓使用的螺母则以 1/16 in 制螺栓规格给出，同时加数字 16。例：标识 AN350-616 表示为与 3/8 in 直径螺栓配合使用的螺母。

2. 自锁型螺母（Self-locking Nuts）

自锁型螺母是利用增加螺旋副之间的摩擦力矩的方法来防松的。它能在强烈振动状况下保持不松动。

1）“靴”式自锁螺母（Boots Self-locking Nuts）

该型螺母的螺纹分为两段，底段为承载螺纹，顶段为锁紧螺纹。两段之间用弹性环体连接过渡，如图 4.20（a）所示。弹性环体的作用是保持顶段与底段螺纹有一定的间隔并恰好使这两段螺纹略有错位。当转动螺母使螺栓拧过底段螺纹后而欲进入顶段螺纹时，必须克服弹性环的阻力，才能使螺栓的螺纹与螺母顶段螺纹协调啮合。在螺栓全部拧紧后，弹性环段就迫使顶段螺纹紧紧咬住螺栓螺纹从而达到防松目的。

“靴”式自锁螺母可以多次重复使用。

2）开缝径向收口螺母和椭圆形收口螺母

开缝径向收口螺母［见图 4.20（b）］和椭圆形收口螺母［见图 4.20（c）］，这两种自锁螺母都是在拧紧后收口胀开，靠弹性锁紧。它们可以多次重复使用，由于其制造工艺较“靴”式自锁螺母的简单，所以这两种自锁螺母在飞机上的应用日益广泛。

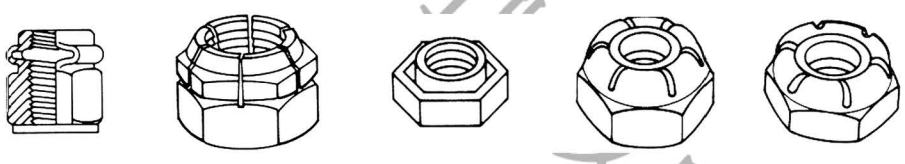


图 4.20　自锁螺母

上述三种自锁螺母为高温自锁螺母。图 4.20（d）、（e）为低温自锁螺母。

3）弹性防松螺母（Elastic Stop Nuts）

该型螺母在其顶段镶嵌有纤维或塑料锁圈，所以又俗称为橡皮头螺母，如图 4.21 所示。锁圈的孔径比与之配合螺栓的外径小一些且无螺纹。当弹性防松螺母刚拧进螺栓时，如同一般螺母，滞力不大；而当螺栓进入螺母的纤维锁圈部位时，由于螺栓挤压锁圈变形而产生一个很大的向下压力，这个弹性压力迫使螺母螺纹的承载面与螺栓螺纹紧密贴合。在螺栓拧紧后，纤维锁圈所产生的向下压力

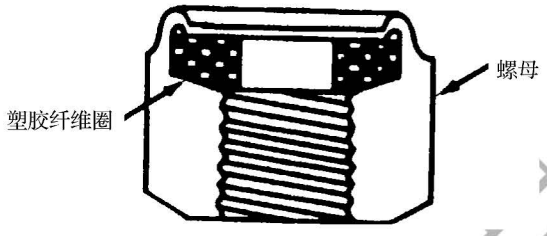


图 4.21　弹性防松螺母

仍保持不变，从而确保紧固和锁牢，即使受到严重振动也不会松动。

弹性防松螺母可多次重复使用。但是在使用时必须注意以下三点：

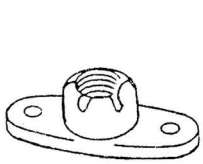
（1）在每次使用前，一定要检查螺母的纤维锁圈是否完好，如果用手指就可以把螺母拧到螺栓露头，则应予以报废；

（2）螺母拧紧后，至少保证螺栓杆端的倒角凸出螺母顶端；

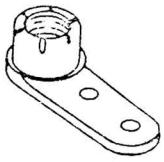
（3）不能用于温度高于250℉的部位。

4）托板螺母（Anchor Nuts）

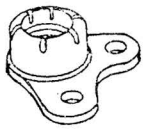
在飞机制造中，为了容易安装带有许多螺钉的检查板和检查门需使用托板螺母。有各种式样的托板螺母，如图4.22所示。其中浮动式的托板螺母松配合于托板上，然后铆接到蒙皮上。浮动式托板螺母的位置可作少量移动以便与安装螺钉协调配合。



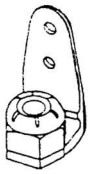
（a）双耳托板螺母



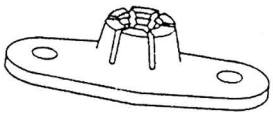
（b）单耳托板螺母



（c）NAS1027直角形托板螺母

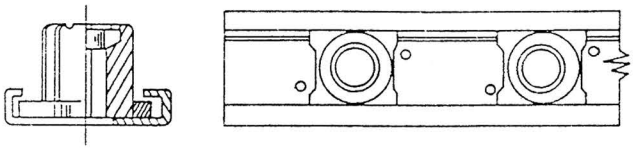


（d）NA256F直角形托板螺母



（e）AN362F高温双耳托板螺母

（f）浮动式双耳托板螺母



（g）成组式托板螺母

图4.22　托板螺母

4.2.3　垫圈（Washers）

在被紧固件的表面与螺母之间必须装有垫圈。垫圈为螺母提供承载区域，保护被连接件的表面以及调整零件或螺母的轴向位置。弹性垫圈和止动垫圈还有防松的作用。飞机上常用的垫圈有普通垫圈、弹性垫圈、止动垫圈和专用垫圈等，如图4.23所示。

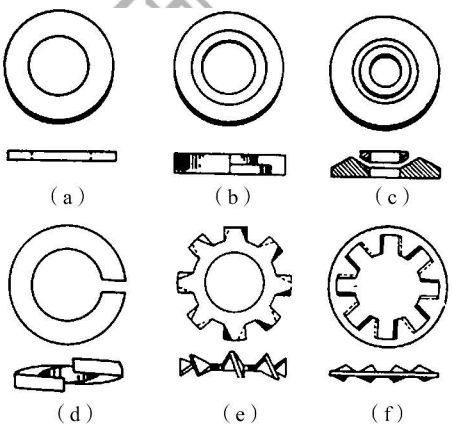


图 4.23　垫圈

1. 普通垫圈（Plain Washers）

AN960 为最常用的普通垫圈［见图 4.23（a）］，它广泛用于六角螺母之下，制造材料有碳、钢、黄铜、不锈钢和铝合金。它的规格有从与 1 号安装螺钉配合使用的规格到与 1 in 螺栓配合使用的规格。

2. 专用垫圈（Special Washers）

（1）AN975 锥形垫圈［见图 4.23（b）］，专门用于 MS 标准的内六方螺栓头的下侧。当 MS 标准的内六方螺栓用于铝合金结构件上时须采用该型垫圈。该型垫圈的制作材料是合金钢。垫圈表面经镀镉处理以防不同金属接触产生电化学腐蚀。

（2）组合垫圈，该型垫圈由球面垫圈和锥面垫圈组成［见图 4.23（c）］。当在有不超过 8°的斜表面上安装紧固件时，可通过加放该型组合垫圈来安装螺栓紧固件。

3. 弹性垫圈

在有些情况下不便于使用自锁螺母或不便于安装开口销，此时如果螺纹连接又为非关键部位，那么可使用弹性垫圈来防松。当上紧螺母时，垫圈的弹性使螺栓与螺母螺纹之间产生很大的摩擦力从而起到防松作用。

弹性垫圈有 AN935 开口式弹性垫圈［见图 4.23（d）］、AN936B 型外齿型弹性垫圈（Star Nock Washers）［见图 4.23（e）］和 AN936A 型内齿型弹性垫圈［见图 4.23（f）］。AN936 内、外齿型弹性垫圈，弹力均匀，防松效果较好。外齿型应用较多。

使用弹性垫圈必须用普通型平垫圈垫底，以免结合表面受到损伤。

4.2.4　螺钉（Screws）

在飞机上，航空螺钉也是一种极为广泛采用的螺纹紧固元件。它的结构与螺栓的类

似，螺钉杆身一般为全螺纹杆身，螺纹按2级自由配合精度制造，钉尾有平头和尖头的两种。安装时，螺钉一般都是拧装于构件上的螺孔内，通常拧转螺钉来达到紧固目的。常用的螺钉按用途分为结构螺钉、安装螺钉和自攻螺钉三种。

1. 结构螺钉（Structural Screws）

结构螺钉由合金钢制成，其拉伸和剪切强度与同尺寸、材质的AN型螺栓相同。该型螺钉具有与同尺寸螺栓完全相同的长度，钉杆身有光杆（无螺纹）段，如图4.24所示。结构螺钉的螺纹为细牙（NF）。螺杆的配合精度也与AN型六角头螺栓同级，因此可作为结构螺栓来使用。螺钉的头型有圆头、扁圆头、100°埋头等型。螺钉头的螺刀槽口有十字式、尖十字式和一字式槽口。

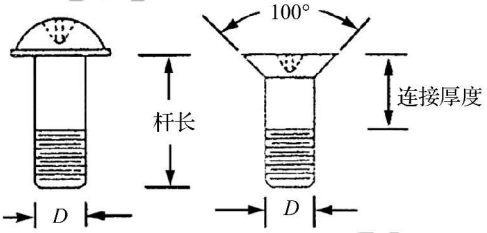


图4.24　结构螺钉

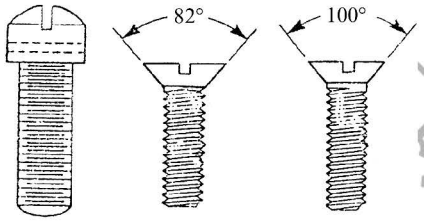


图4.25　安装螺钉

常见结构螺钉的型号有：

（1）AN509，它为100°埋头螺钉；

（2）AN525，它为垫圈头螺钉，这种螺钉有一个类似垫圈的大头，承载面积较大；

（3）AN502和AN503圆头螺钉，其中AN502为细牙圆头螺钉，AN503为粗牙圆头螺钉，这两种螺钉的圆头钉头上有一字槽并有一个穿保险丝的小孔。

2. 安装螺钉（Machine Screws）

安装螺钉常用于轻小型机件以及齿轮箱盖板等铸铝件的装配。螺钉的头型、螺刀槽与结构螺钉的相同。螺钉杆身为全螺纹杆段，如图4.25所示。安装螺钉的螺纹有粗牙和细牙两种。安装螺钉的制作材料有低碳钢、不锈钢、黄铜和铝合金等。

常见型号有：

（1）AN500和AN501圆头螺钉，AN500为粗牙圆头螺钉，AN501为细牙圆头螺钉，这两种的结构与AN502和AN503的相同，钉头有一字螺刀槽且有一小孔。例如，标记AN501B-416-7表示为4/16 in直径、7/16 in长、黄铜制AN标准细牙圆头螺钉。如果在该标记中表示材料的字母B换为C，则表示材料为不锈钢制，若换为D则表示材料为2017铝合金。

（2）AN505和AN510 82°埋头螺钉，AN505为粗牙82°埋头螺钉，AN510为细牙82°埋头螺钉。

（3）AN515 和 AN520 扁圆头螺钉，AN515 为粗牙半圆头螺钉，AN520 为细牙扁圆头螺钉。

3. 自攻螺钉（Self-tapping Screws）

自攻螺钉常用于薄金属板、塑料板等的紧固。自攻螺钉是靠自身在装配孔里攻丝而紧固的。自攻螺钉的头型有扁圆头、100°埋头、大扁圆头等，钉尾有尖头（A 型）和钝头（B 型）两种类型，如图 4.26 所示。

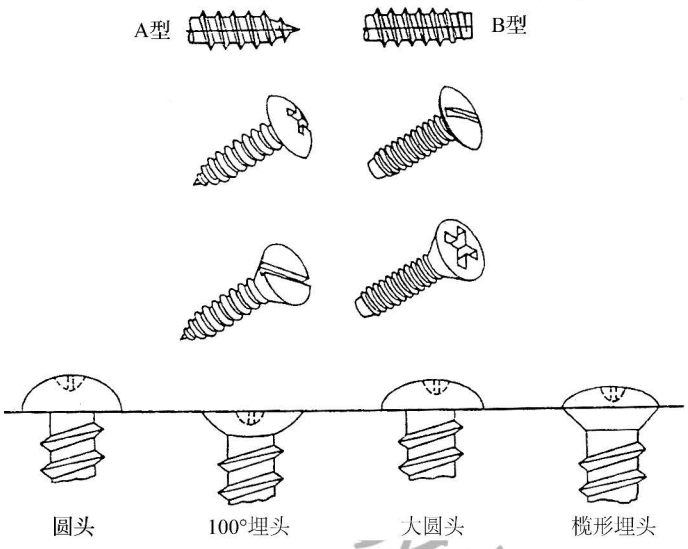


图 4.26　自攻螺钉

常见型号有：

（1）AN504 和 AN506，它们常用来安装诸如标牌之类的可拆卸件；

（2）AN530 和 AN531，它们是用于金属板料的自攻螺钉，AN530 为扁圆头，AN531 为埋头自攻螺钉，它们的钉尾是钝头（B 型）。

知识总结	随堂练习

4.3　螺纹紧固件的安装和防松

4.3.1　螺纹紧固件的安装与拆卸

在飞机维修过程中，螺纹紧固件的安装与拆卸占有很重要的地位。在安装与拆卸螺纹紧固件时必须注意下列几点：

（1）首先应检查螺栓、螺母或螺钉是否清洁、完好。如是新更换件则应注意其型号、规格是否符合要求，螺栓的光杆段长度应等于或者略大于螺栓所穿过材料的厚度。

（2）除非有专门的规定以外，在螺母之下必须装有垫圈。

（3）只要情况许可，螺栓安装方向都应螺栓头在上方。这样万一螺母松脱，螺栓可仍在其位而不致掉出。

（4）要恰当地拧紧螺纹紧固件，要根据使用要求和螺栓直径，正确选用扳手。对于要求严格控制预紧力的螺纹连接，一定要用控制力矩的扳手，即测力矩扳手或定力矩扳手；对于不严格控制预紧力的螺纹连接，应采用梅花扳手、呆扳手等相应的固定扳手，尽量不用活扳手。拧紧时，用力应均匀适度，不能用冲击力。通常对于小直径螺纹仅用腕力或臂力。对于大直径螺纹用全身力或配以专用扳手，并根据要求拧紧。

（5）对于采用保险丝或开口销进行防松保险的螺栓和螺母，要注意穿保险丝或开口销孔的对位，保证既符合规定的扭矩值又使孔对位。若达不到要求，可用改变垫圈厚度的方法来达到。禁止用超扭矩或者松退螺母的办法来谋求对正保险孔。

（6）当被连接件上的螺栓或螺钉数目较多时，为使载荷分布均匀，应按顺序依次拧紧，如图 4.27 中的箭头方向和数字顺序所示。对有密封或紧固要求部件上的螺栓组，通常应逐步拧紧，先把所有螺母旋至被连接零件上，然后按顺序号加 1/3 左右的预紧力，拧一遍后，再依次加 1/3 左右的预紧力，如此反复拧 3~5 遍，直至达到所规定的要求为止。螺母拧紧后，螺栓杆端应露出螺母 3 牙螺纹左右。

（7）双头螺柱的装拆，手工装拆方法如图 4.28 所示，其中图（a）是用双螺母方法装拆，装拆前用两个扳手使双螺母相互顶紧，旋入时用扳手拧上面的螺母，旋出时拧下面的螺母；图（b）是把高六角螺母 2 旋在双头螺柱上，当拧紧止动螺钉 1 后，用扳手拧高六方螺母，即可将双头螺柱拧入和旋出。双头螺柱在装入前，应在紧固端的螺纹上涂润滑油，以防锈蚀，为将来拆卸打下基础。

（8）对于螺钉，要根据钉头螺刀槽口选择合适的螺丝刀。转动螺钉时要保持一定的压力以防止螺丝刀从槽中滑出而损伤周围的结构。

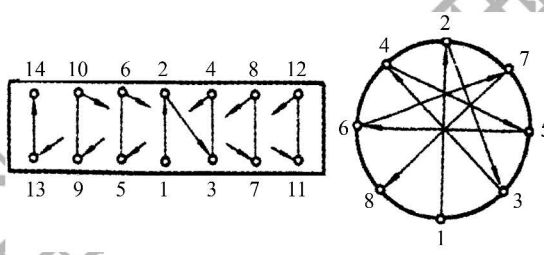


图 4.27　螺钉分布及拧紧次序

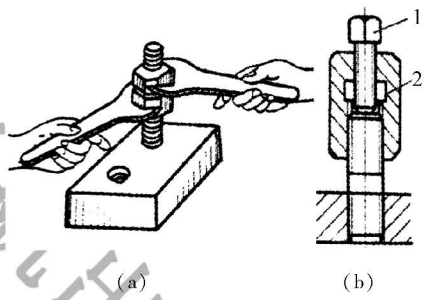


图 4.28　双头螺柱的装拆

4.3.2　螺纹紧固件的防松

螺纹连接一般采用单线普通螺纹，其升角 $\lambda = 1.5° \sim 3.5°$，而其当量摩擦角 $\rho' = 6° \sim 9°$，完全满足自锁条件，螺母不会松脱。但是，当连接受到冲击、振动和交变载荷作用时，预紧力可能瞬时消失，这种现象多次重复后，就会使螺母松脱。此外，在高温或温度变化较大时，由于温差变形等原因，也可能会发生松脱现象。飞机集上述两种情况于一身，因此飞机上的全部螺纹紧固件都必须进行防松保险。

对飞机上螺纹紧固件的防松保险方法很多，通常采用的有保险丝、开口销、弹性垫圈、弹簧卡圈和自锁螺母等。

1. 保险丝防松保险

保险丝防松保险是采用一根细金属丝将两个或两个以上的紧固件连接在一起。当某一元件有松动趋向时，它会受到保险丝的牵制而停止发展。制造保险丝的材料有低碳钢、不锈钢和黄铜等，一般常用的是低碳钢丝。用保险丝对螺纹紧固件打保险时，可选用单股或双股形式，一般以双股扭结成辫结形式应用最广泛，如图 4.29 所示。

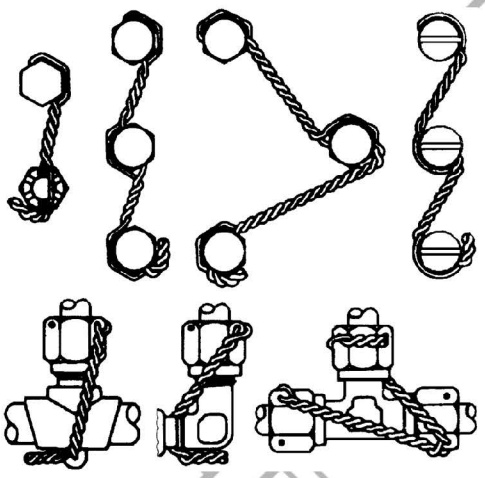


图 4.29　保险丝防松保险

单股保险丝一般常用于分布间隔很近的小螺钉群，如图 4.30 所示。

一般来说，如果螺纹紧固件群集在一起，采用相互串联保险的形式要比各自独立保险优越得多。至于一次串联保险的元件数量多少，应视具体场合而定。例如螺栓的分布间隔较远，用双股扭辫法来保险时，一次串联的螺栓数不应多于 3 个。如果螺栓为紧邻分布，则一次串联的螺栓数以保险丝长 24 in 为准。

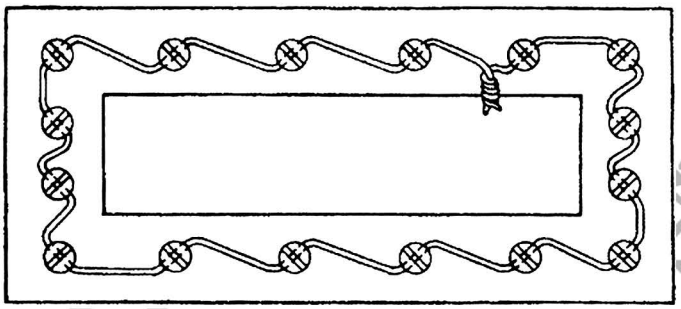


图 4.30　单股保险丝保险

采用保险丝作为防松保险手段时应遵守下列基本规则：

（1）每次打保险都必须用新的保险丝；

（2）打保险时，必须随时将保险丝拉紧，但是其张紧度不能过量，以防保险丝在受到振动时可能断裂；

（3）保险丝的绕向应该是将螺母朝拧紧方向拉紧；

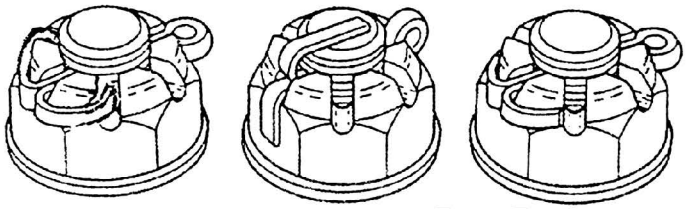
（4）保险丝的辫结应该紧凑匀称，在两螺母之间的保险段应适当张紧而无多余的辫结；

（5）对螺栓头保险时，一定要保持缠绕在螺栓头侧的辫结不向上松脱而造成保险松驰；

（6）打保险完工后的尾端应为 1/4～1/2 in 长的辫结（相当于 3～6 个辫弛），而且应将辫尾弯过来或压在下面，以防自行松散和刮手。

2. 开口销防松保险

杆身钻孔的螺栓杆与六角槽形螺母相配套的紧固件一般都采用开口销保险。制造开口销的材料有低碳钢和不锈钢等，一般常用低碳钢表面镀镉的开口销，不锈钢制的开口销专门用于不允许使用磁化材料或需要抗锈蚀的部位上。开口销装入销孔应松紧适当，只允许有微量的间隙。开口销的安装形式有常用形式、较佳形式和可选形式三种，如图 4.31 所示。



（a）常用形式　　（b）较佳形式　　（c）可选形式

图 4.31　开口销防松保险

采用开口销保险应注意下列基本规则：

（1）每次打保险都必须用新的开口销；

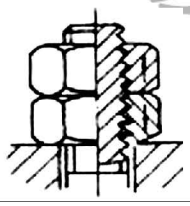
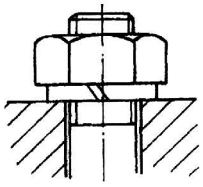
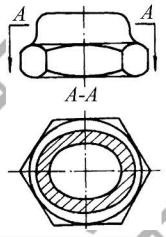
（2）如采用较佳形式安装开口销时，弯在螺栓顶上的开口销尾端不能超出螺栓直径，贴在螺母侧面的开口销尾端不能碰到垫圈表面，长出部分应剪去；

（3）如采用可选形式安装开口销时，应保持开口销的两尾端贴近在螺母侧面上；

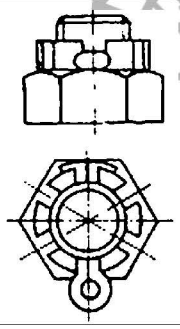
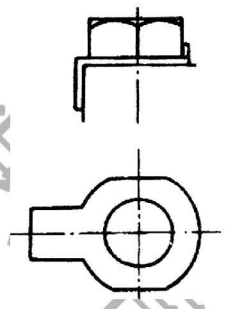
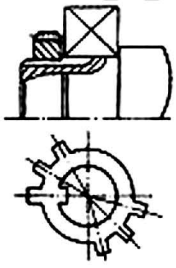
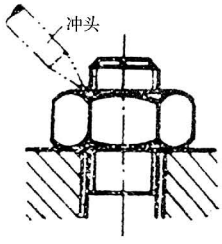
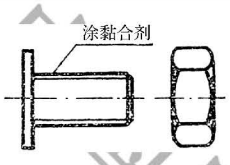
（4）开口销尾端弯折处应保持一定的弯曲弧度，陡折角会导致开口销杆断裂，用木榔头敲弯成形是最佳施工法。

其他常用的防松保险法见表 4-3。

表 4-3　螺纹连接的常用防松方法

防松方法		图例	特点和应用
摩擦力防松	双螺母		两螺母对顶拧紧后，使两螺母之间的螺栓杆受到拉伸而螺母受到压缩，构成螺纹副轴向压紧，从而防止连接松动。结构简单，适用于平稳、低速和重载的连接
	弹簧垫圈		螺母拧紧后，靠垫圈被压平而产生的弹性反力，使螺纹副轴向压紧，同时垫圈斜口的尖端抵住螺母与被连接件的支撑面也有防松作用，结构简单、防松方便，但由于垫圈的弹力不均，在冲击、振动的工作条件下，其防松效果较差。一般用于不很重要的连接
	非圆口自锁螺母		螺母一端制成非圆形收口。拧紧后，螺纹牙的厚度及螺纹直径发生变化，使螺纹副间压紧。结构简单、防松可靠，可多次装拆而不降低防松性能。用于重要的连接

续表

防松方法		图例	特点和应用
机械防松	槽形螺母与开口销		槽形螺母拧紧后，将开口销穿入螺栓尾部小孔和螺母的槽内，并将开口销尾部分开与螺母侧面贴紧，也可用普通螺母代替槽形螺母，但需拧紧螺母后，再配钻销孔。适用于有较大冲击、振动的高速机械中的连接
	单耳止动垫圈		螺母拧紧后，将单耳止动垫圈的一边弯贴在螺母的侧面上，另一边下弯贴紧在被连接件的侧面上，即可将螺母锁住。结构简单、使用方便、防松可靠
	圆螺母及止动垫圈		将止动垫圈的内舌插入轴槽，拧紧螺母后，将垫圈的外舌折入螺母的槽中，使螺母与轴不能相对转动。此法防松可靠，适用于轴上螺纹的防松
其他防松方法	冲点法		螺母拧紧后，利用冲头在螺栓尾与螺母旋合的末端打冲，$d>8$ mm 时冲 3 点，$d\leqslant 8$ mm 时冲 2 点。防松可靠，适用于不需拆卸的连接
	黏结法		用黏合剂涂于螺纹副间，拧紧螺母，待黏合剂自行固化后，即黏结成一体。如用厌氧胶作黏合剂，拆卸时可通过加热到 200℃，使黏合剂失效后方可拆卸。防松可靠，适用于有较大冲击、振动及重要连接中

中国民航出版社有限公司版权所有

4.3.3 螺纹紧固件的失效形式和维护

螺纹紧固件常见的失效形式有：螺母或螺钉松脱、螺杆拉断、螺纹滑牙、螺栓六方头或螺钉头槽拧坏、锈蚀等。

螺纹紧固件的失效有时会给飞机带来灾难性的后果，为此我们必须正确使用、安装和维护螺纹紧固件。在维护飞机时要仔细检查各部位螺纹紧固件的可靠性，特别要注意检查保险丝和开口销等的紧固情况，此外，还要注意保持螺纹紧固件的清洁，防止锈蚀。

对于螺栓、螺母或螺钉的螺纹如有滑牙、碰伤等损坏，一般更换零件即可。但对飞机结构或部件上的螺孔螺纹损坏，常采用嵌装钢丝螺套的方法来修复。钢丝螺套是一种螺纹标准件，由专门的生产厂家制造，常用的一种称为“黑乐靠”的钢丝螺套（Helicoil Inserts），它是用棱形截面的不锈钢丝按螺栓螺纹规格精确绕制而成，如图 4.32 所示。

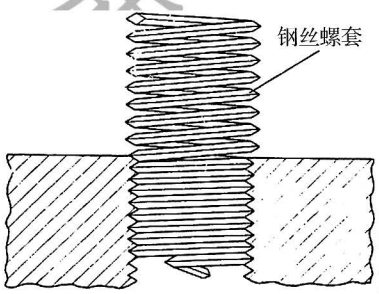


图 4.32 “黑乐靠”钢丝螺套

采用嵌装钢丝螺套修复螺孔，需在原螺孔的基础上扩孔、攻螺纹，对结构或部件的强度有一定的削弱，所以采用该法修理螺孔须经部件生产商或 FAA 批准，同时还必须严格遵循钢丝螺套生产厂家提供的施工方法。

“黑乐靠”钢丝螺套的安装步骤，如图 4.33 所示。

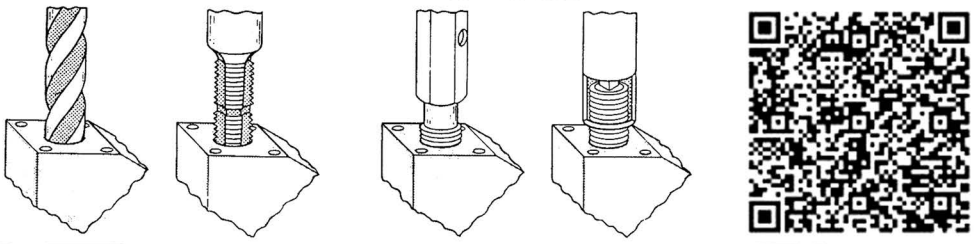


图 4.33 “黑乐靠”钢丝螺套安装步骤

（1）首先使用“黑乐靠”安装包提供的专用钻头钻掉滑牙的螺纹［见图 4.33（a）］；

（2）用专用丝锥攻出螺纹［见图 4.33（b）］；

（3）用专用螺纹量规检验螺孔［见图 4.33（c）］；

（4）把钢丝螺套装于专用安装工具上，旋入螺孔内［见图 4.33（d）］，当螺套达到安装要求时，拆下工具，剪除钢丝螺套尾端弯边。

图 4.33（e）的二维码为钢丝螺套修复螺纹动画。

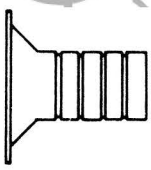
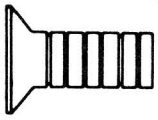
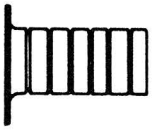
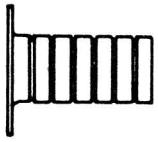
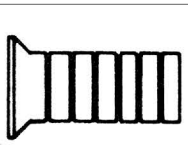
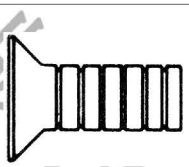
钢丝螺套除用来修复损坏的螺孔外，还常常作为螺纹衬套用于诸如铝合金、镁合金、

塑料和木材等低硬度材料制造的飞机构件上，以提高螺孔螺纹的强度和耐磨性。

另外，当飞机构件上穿螺栓的光孔由于磨损、腐蚀或其他原因而损坏时，常采用阿克勒斯衬套（Acres Sleeves）来修理。

阿克勒斯衬套是一种喇叭头、薄壁管型标准件。它由铝合金或不锈钢制成，它的型号和外形如表 4-4 所示。

表 4-4　阿克勒斯套管的型号与外形

图形	型号	基本件号	图形	型号	基本件号
	100°509	JK5510		100°标准	JK5516
	凸头 （剪切型）	JK5511		凸头	JK5517
	100°小凸头	JK5512		100° 大尺寸	JK5533

采用阿克勒斯衬套修理内孔，其优点是避免报废飞机构件，同时仍保持原孔径和继续使用原尺寸的螺栓。缺点是降低飞机构件的强度，因为嵌装阿克勒斯衬套必须将原构件上已损坏的孔扩钻大 1/64 in。

阿克勒斯衬套安装程序如下：

（1）将原孔扩钻 1/64 in，清除孔内壁上的锈蚀或其他损伤；

（2）选择合适的阿克勒斯衬套型号和长度；

（3）将阿克勒斯衬套黏固于已扩好的孔内，注意保持衬套与原内孔的同轴度。

阿克勒斯衬套的拆卸可用下面两种方法进行。一是用销冲将阿克勒斯衬套打出；二是用比原衬套管径小 0.004～0.008 in 的钻头将衬套钻掉。

知识总结	随堂练习

4.4 转角拧紧式紧固件

转角拧紧式紧固件又称为包皮紧固件，通常用于飞机检查窗板、舱盖口、包皮以及需经常拆卸的各种面板的紧固。转角拧紧式紧固件的最大特点是能迅速上紧或拆卸。它只需顺时针转动 1/4 圈即可上紧。当需卸开时，只需逆时针方向略为扭转即可松开。

常见的转角拧紧式紧固件有宙斯型紧固件、凸轮型紧固件、气塞型紧固件三种。

4.4.1 宙斯型紧固件

宙斯型紧固件（Dzus Fasteners）是最常用的包皮紧固件。它由螺桩、套圈和锁簧座组成，如图 4.34 所示。它的螺桩为表面镀镉的钢质件。螺桩的头型有扁圆头、平头和蝶形三种，分别用代号“A”“FA”和“AW”表示。螺桩的杆身直径尺寸以 1/16 in 为计量单位。杆长以 1/100 in 为计量单位。螺桩杆长是指螺桩头底面到杆身锁槽底端之间的距离。例如：A4-25，A 表示扁圆头螺桩，4 表示螺桩直径为 4/16 in，杆长为 25/100 in。孔圈由铝或钢表面镀镉制成，它的作用是保持螺桩的活动位置。锁簧为表面镀镉的钢质件，它的功能是锁定螺桩。宙斯型紧固件用来紧固包皮或面板的工作过程是这样的：当包皮或面板关合时，螺桩锁槽的前端卡住锁簧，当用螺丝刀转动螺桩 1/4 圈，锁簧被拉入螺桩锁槽的底部并能听到明显的响声，此时便将螺桩锁定从而包皮或面板被紧固。

中国民航出版社有限公司版权所有

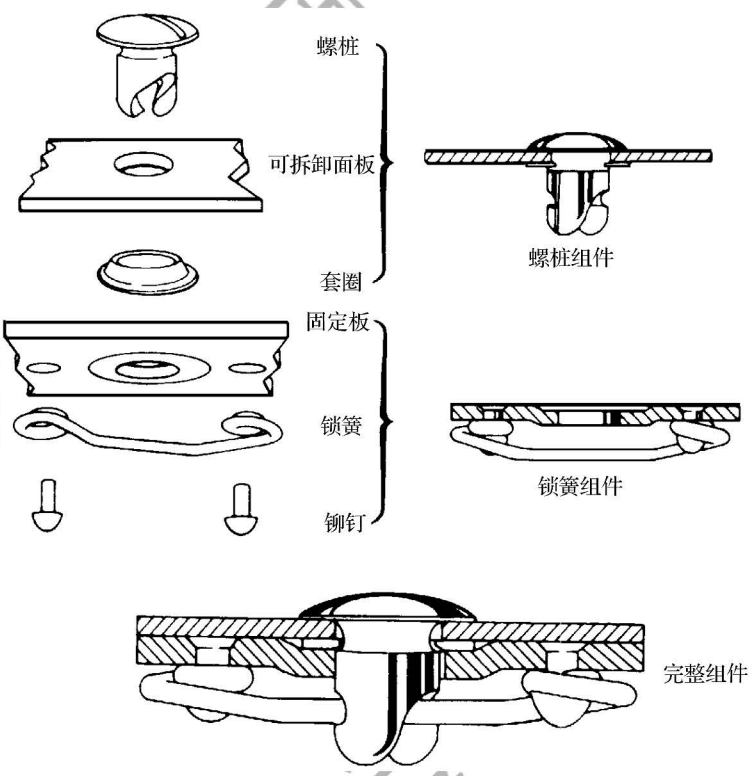


图 4.34　宙斯型紧固件

4.4.2　凸轮型紧固件

凸轮型紧固件（Cam-lock Fasteners）有很多不同的式样和构造，最常见的有 2600、2700 和 4002 系列三种。它们由螺桩组件、套圈和锁座三部分组成，如图 4.35 所示。2600 系列与 2700 系列的主要不同在于螺桩组件的螺钉头型不同，前者为标准圆柱头，后者为埋头。4002 系列则在抗拉强度、抗剪强度方面比前两系列高得多，约是前两者的三倍之多。

螺桩组件和套圈均安装于可拆卸的面板或包皮上。锁座铆接在飞机结构件上，锁座有固定式和浮动式两种。凸轮型紧固件工作时，只需用螺丝刀顶住螺钉往里推并顺时针方向拧转螺钉 1/4 圈，螺桩上的横销进入锁座底端凹槽即将螺桩锁定。拆卸时只需用螺丝刀顶住螺钉往里推并逆时针方向略为扭动即可松开。

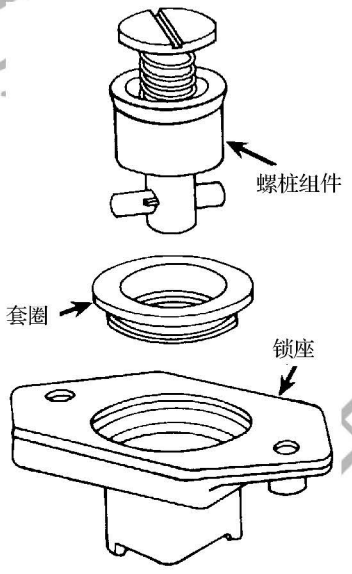


图 4.35　凸轮型紧固件

4.4.3 气塞型紧固件

气塞型紧固件（Air-lock Fasteners）由螺桩、横销和锁座三部分组成，如图 4.36（a）所示。图 4.36（b）为气塞型紧固件组合状态。

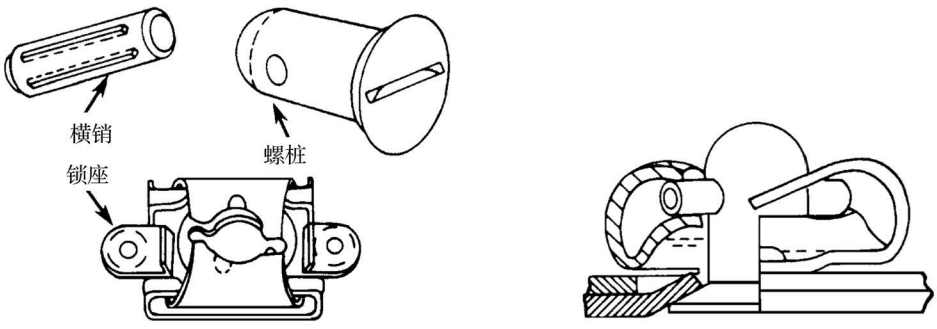


图 4.36 气塞型紧固件

螺桩为钢质件并经表面淬火处理。螺桩的长度须按待紧固板面的总厚度选定。通常在螺桩的头顶上刻有数字，表示能满足上述厚度要求的螺桩长度，数字以 1/100 in 为计量单位。横销用铬钒钢制造并经热处理。如果因某种原因将横销从螺桩上拆下，则必须更换新销，原来的横销禁止装回再次使用。螺桩和横销装在活动的包皮或门上。锁座有固定式和浮动式两种，它铆接在飞机结构上。锁座有三种尺寸规格：2 号、5 号和 7 号。锁座的尺寸规格表示锁座中心到铆钉孔中心的间距。例如，2 号为 3/4 in，5 号为 1 in，7 号为 11/8 in。锁座用高碳钢制成，锁座的上簧片可以在螺桩拧松后将螺桩推出，而当螺桩拧在紧固位置时，又能保证横销锁定在簧片上的凹槽里而不受锁座本身所承受的拉力大小的影响。气塞型紧固件的工作情况同前述两种转角拧紧式紧固件相同。气塞型紧固件相对前两种转角拧紧式紧固件应用得较少，只有某些包皮或检修门使用气塞型紧固件。

知识总结	随堂练习

4.5　铆钉

在飞机制造和修理工作中，铆钉被广泛用于铝合金件的连接和紧固。铆钉是以一个金属销钉的形式，将两块或多块板料或构件铆合在一起。应用在飞机上的铆钉可分为两大类：普通实心铆钉和专用铆钉。

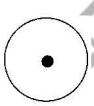
4.5.1　普通实心铆钉

普通实心铆钉（Solid Rivets）常简称为普通铆钉，它的一端为已制成型铆头，另一端为待成型铆头。铆接施工时需从一面用顶模顶住已成型铆头，再从另一面冲击敲打铆钉杆端头而形成铆钉镦头从而达到铆接目的。为了满足各种不同场合的需要，普通铆钉以各种金属材料制成各种不同的头型和尺寸规格。

1. 铆钉材料

飞机铆钉通常由铝合金、不锈钢和蒙乃尔合金等材料制成，其中用得最多的是铝合金。制造铆钉的材料在铆钉的型号规格标记中用一个或两个英文字母来表示。另外在铆钉头端面上制有凸点、凸划、凸十字、凸三角、凹槽或凹点等标志来表示铆钉的材料。常见铆钉材料、字母代号、铆钉头端标志以及特点和应用见表 4-5。

表 4-5　铆钉材料、代号、标记及特点

铆钉材料	代号	铆钉头端面标记	特点及应用
1100	A	无任何标记	1100 为含铝 99% 的纯铝，用其制造的铆钉硬度低、耐腐蚀，主要用于整流罩和客舱内设施的铆接
2117	AD	有一凹圆点	2117 是以铜为主要合金元素的铝合金，具有足够的强度，抗腐蚀性好，用之前不需进行任何处理，有“外场铆钉”之称。广泛用于飞机铝合金构件的铆接
2017	D	有一凸点 	2017 也是以铜为主要合金元素的铝合金，具有较高的强度。在铆接前必须进行热处理降低其硬度，并在一小时内铆接完毕，否则铆钉就会变得很硬无法铆接。通常将 2017 铆钉热处理后立即放入低于 0℃的冰箱内，在使用之前取出，故称之为“冰箱铆钉”。“冰箱铆钉”铆接后 1 小时左右只具有其额定强度的一半，约 4 天时间才能达到其额定强度。该类铆钉用于强度要求较高的飞机铝合金结构件

中国民航出版社有限公司版权所有

续表

铆钉材料	代号	铆钉头端面标记	特点及应用
2024	DD	有两凸横杠	2024 与 2017 基本相同，只是其强度比 2017 稍高些以及其硬化期更短，热处理后或从冰箱中取出后须 10 分钟内铆接完毕，否则铆钉变硬无法铆接。它用于强度要求最高的飞机铝合金结构件上
5056	B	有凸十字	5056 是以镁为主要合金元素的铝合金，约含镁 5% 左右。应用于飞机镁合金结构件上
7050	E	有凸圆环[1]	7050 是以锌为主要合金元素的铝合金，它的强度比 2024 更高一些，用 7050 制的铆钉主要用于高强度铝合金结构件上，在波音 767 飞机上它取代了 2024 材料制的铆钉
蒙乃尔	M	有两凹点	蒙乃尔（Monel）具有高强度和高抗蚀性。用于铆接飞机上合金钢构件，有时可替代不锈钢铆钉
不锈钢	F	有一凹槽[2]	不锈钢铆钉的抗腐蚀能力极强，应用于不锈钢材料或高温耐腐蚀的场合，如飞机防火墙等

注：1. 表示也有三条呈放射状的凸杠；

2. 表示也有无任何标记的。

2. 铆钉类型

普通铆钉的类型是按其头型来划分的，它有两大类：凸头铆钉（Protruding Head Rivets）和埋头铆钉（Counter-sunk Head Rivets）。凸头铆钉有圆头型、扁圆头型、平头型和通用头型等。埋头铆钉有 100°埋头、78°埋头和 120°埋头等。圆头型和平头型铆钉应用于飞机内部结构件的铆接；扁圆头型以及改进型扁圆头型铆钉一般用来铆接薄板。因为钉头较矮、气动阻力不大，也常用来铆接飞机外表蒙皮，尤其常用在机身后段和机尾部分。通用头型铆钉其实是圆头、平头和扁圆头铆钉的综合型，正因为如此，通用头型铆钉可替代其他各种凸头铆钉，广泛用于飞机内部和外表。埋头铆钉以 100°埋头铆钉应用最为广泛。埋头铆钉应用于要求表面平齐光滑部位，多用于飞机外表面。

中国民航出版社有限公司版权所有

3. 铆钉的型号规格标记

普通铆钉的型号规格标记由铆钉制造标准代号、头型代号、材料代号、铆钉杆直径和铆钉杆长五个部分组成。常见的铆钉制造标准代号有 AN、MS 和 NAS 三种。头型代号按各自的制造标准用三至五位数字表示。材料代号用英文字母表示，见表 4-5。铆钉杆直径用数字表示并以 1/32 in 为计量单位。铆钉杆长也用数字表示并以 1/16 in 为计量单位。要注意埋头铆钉的杆长与凸头铆头的杆长的区别，见图 4.37。

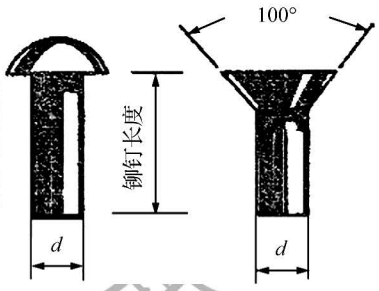
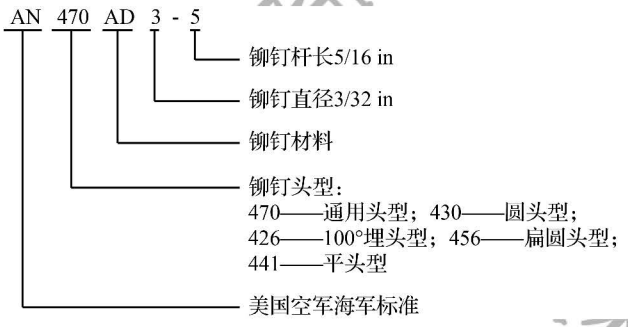


图 4.37　铆钉尺寸量度

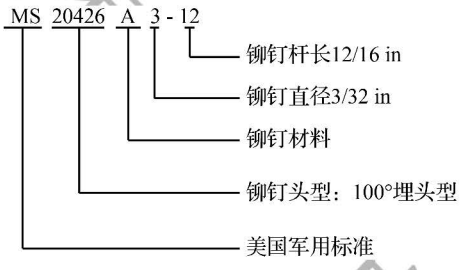
铆钉的型号规格标记，举例如下。

（1）示例 1：



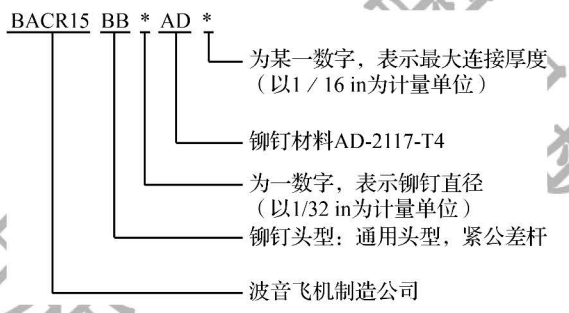
注：AN470AD3-5 与 MS20470AD3-5 以及 NAS1242AD3-5 等同。

（2）示例 2：

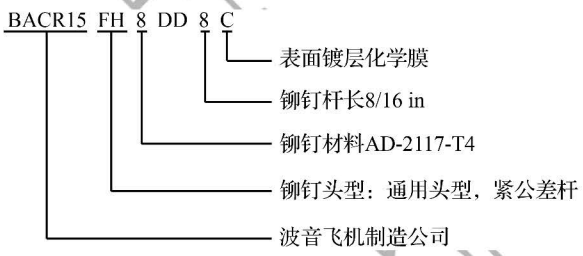


注：MS20426A3-12 与 AN426A3-12 等同。

（3）示例3：



（4）示例4：



波音飞机制造公司对铆钉的型号、规格也制定了编码标记。其中表示头型的标记如下：

ET-通用头型，紧公差杆并且杆径加大 1/32 in；FH-82°埋头型；AD-100°埋头型，杆径加大 1/32 in；BA-100°埋头型；FV-120°埋头型。

4. 普通铆钉尺寸规格的确定

1）铆钉直径 d

铆钉直径应至少等于被连接板中最厚板板厚的 3 倍。例如，要铆接两块厚为 0.040 in 的铝合金板件，则铆钉直径 $d = 0.040 \times 3 = 0.120$ in，查得最接近该值的标准铆钉直径为 1/8 in（0.125 in），为此可确定铆钉直径 $d = 1/8$ in。

2）铆钉杆长 l

铆钉杆长 l = 被连接件总厚度尺寸 + $1.5d$。例如，要铆接两块厚为 0.040 in 的铝合金板件，则铆钉杆长 $l = 0.040 \times 2 + 1.5 \times 1/8 = 0.2675$ in。查得最接近该值的标准铆钉长为 1/4 in（0.250 in），为此可确定铆钉长度 $l = 1/4$ in。

4.5.2 专用铆钉

飞机上的专用铆钉有拉铆钉、高强度铆钉和螺纹铆钉三大类。

1. 拉铆钉

拉铆钉是一种最常用的专用铆钉，它能从单方面铆接成型。由于这种形式的铆钉在铆接施工时看不到“加工铆头”的成型过程，故也称之为“盲铆钉”。又由于该型铆钉在铆接施工时是拉拔铆钉芯杆使盲端成型铆头的，所以又称之为“拉铆钉”。在飞机制造和维修中使用许多种拉铆钉，下面介绍常用的几种。

1）自塞摩擦锁紧式拉铆钉（Self-plugging Friction-Lock Rivets）

这是一种早期的拉铆钉，曾广泛用于飞机制造和维修，目前仍用于轻型飞机的修理。自塞摩擦锁紧式拉铆钉由带铆钉头的空心杆体和穿过杆体的芯杆两部分组成。

安装时芯杆下端锥体部分被拉挤入空心杆体，使杆体挤胀变粗。当芯杆锥体完全进入铆钉杆体形成盲端铆头时，拉杆将断掉，铆接工作完成。该型拉铆钉的断口不够光滑平整，需用修整剪修整断口使其与铆钉头平齐。该型铆钉有两种头型：通用头型和100°埋头，见图4.38。

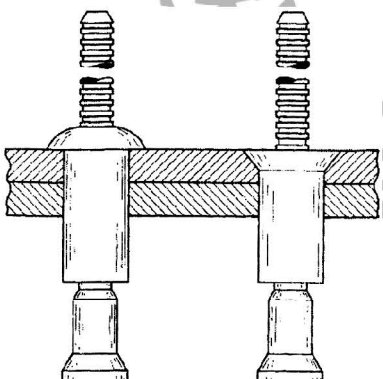
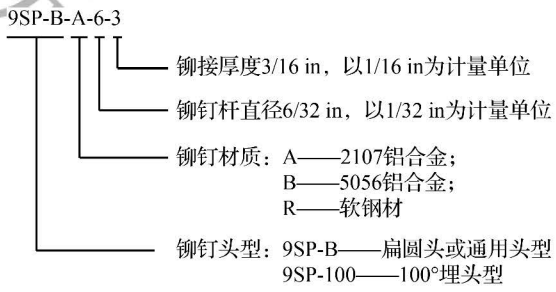


图4.38　自塞摩擦锁紧式拉铆钉

该型铆钉常以1/8 in、5/32 in和3/16 in三种标准直径供货。制造这种铆钉的材料有多种，常用的有2017铝合金芯杆和2117铝合金杆身以及2017铝合金芯杆和5056铝合金杆身两种。

常见自塞摩擦锁紧式拉铆钉的型号规格标记如下。

（1）HUCK制造公司：



（2）Townsed 公司 Cherry 铆钉分部：

CR 163-6-6

- 铆接厚度：芯杆为球端头者以1/32 in为计量单位；芯杆为锯齿形者以1/16 in为计量单位
- 铆钉杆直径6/32 in，以1/32 in为计量单位：4——1/8 in；6——3/16 in；5——5/32 in；8——1/4 in
- 铆钉材质、类型和头型的系列号：163——2117铝合金制品、自塞
- 摩擦锁紧式凸圆头型；Cherry牌号铆钉

（3）OLYMPIC 铆钉螺钉公司：

RV 2 0 0-4-2

- 铆接厚度1/18 in，以1/16 in为计量单位
- 铆钉杆直径4/32 in，以1/32 in为计量单位
- 铆钉头型：0 = 通用头型；1 = 100°埋头型
- 铆钉材质：0——2017铝合金；5——5056铝合金；7——软钢材
- 铆钉头型：2——摩擦锁铆式；5——空心拉堵铆钉
- 制造厂家：OLYMPIC铆钉螺钉公司

（4）美国军用标准：

MS 20600 B 4 K 2

- 铆接厚度1/18 in，以1/16 in为计量单位
- 铆钉芯杆：K——球头芯杆；W——锯齿形芯杆
- 铆钉杆身直径4/32 in，以1/32 in为计量单位
- 铆钉材质：B——50567铝合金；AD——2117铝合金
- 铆钉类型和头型：20600——摩擦锁铆式、凸圆头；20601——摩擦锁铆式、100° 埋头
- 美国军用标准

从上述几个例子可以看到，专用铆钉一般都是制造公司按自己定的编码规则来对专用铆钉编码的，并没有统一的规定。但是各公司对铆钉的铆接厚度都以 1/16 in 为计量单位，对铆钉杆身直径以 1/32 in 为计量单位。

2）自塞机械锁紧式拉铆钉（Self-plugging Mechanical Lock Rivets）

自塞机械锁紧式拉铆钉现广泛用于飞机制造和维修中。现以最常用的 Cherry Lock 拉铆钉为例，说明它的构造。它的构造如图 4.39 所示。由图 4.39 可见，它比自塞摩擦锁紧式拉铆钉多了一个锁紧环。当自塞机械锁紧式拉铆钉铆接完毕，锁紧环就紧紧卡入芯杆上的锁紧环槽内，使留在杆身内的芯杆不会因振动而松脱。

另外，这种铆钉铆接后芯杆断口正好与铆钉头平齐，故不需再进行平整断口的工作。

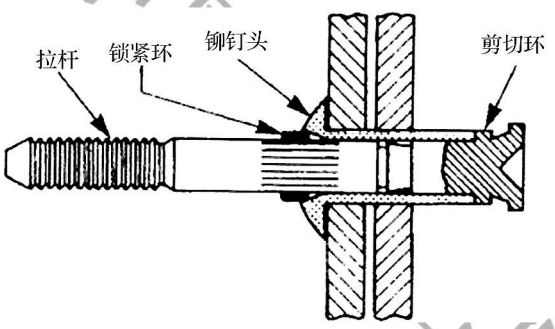


图 4.39　自塞机械锁紧式拉铆钉

自塞机械锁紧式拉铆钉有多种式样，除 Cherry Lock 拉铆钉外，常见的还有 Cherry Max 拉铆钉、Huck-Lock 拉铆钉、Olympic-Lock 拉铆钉，它们的构造大同小异。

自塞机械锁紧式拉铆钉的铆接过程也以 Cherry Lock 拉铆钉为例来说明，如图 4.40 所示。

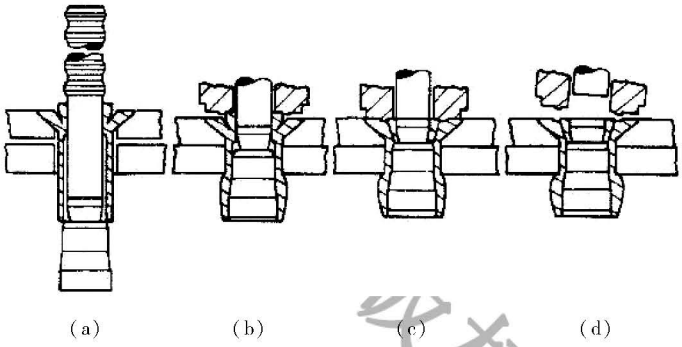


图 4.40　自塞机械锁紧式拉铆钉的拉铆过程

拉铆钉杆身的长度可用两种方法来确定：

(1) 采用铆接厚度量规确定杆身长度。铆接厚度量规又称为钩尺，见图 4.41 (a)。要确定铆钉杆身长度时，将钩尺伸到铆接件的铆钉孔内，使其钩住工件底面，然后读露出工件顶面的尺寸，取标准尺寸即为拉铆钉的杆长，如图 4.41 (b) 所示。

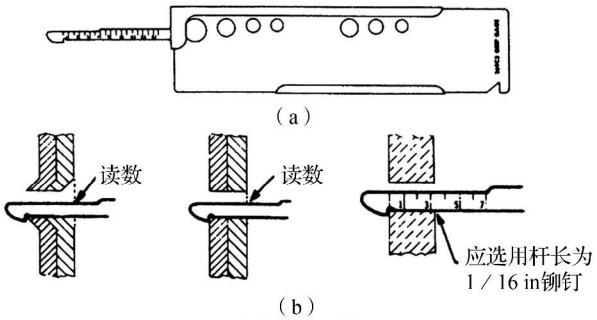


图 4.41　铆接厚度量规的使用方法

（2）将拉铆钉装入铆孔后，杆身露出的长度尺寸 B 取 3/64 in 到 1/8 in 之间（此时芯杆尚未受拉），见图 4.42。

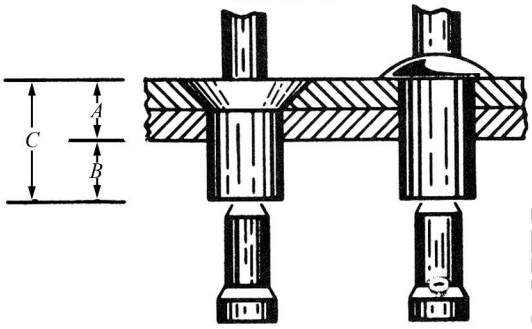


图 4.42　确定铆钉长度

常见自塞机械锁紧式拉铆钉的型号规格标记如下。

（1）示例 1：

CR 2263-5-4

- 最大铆接厚度4/16 in，以1/16 in为计量单位
- 铆钉杆径5/32 in，以1/32 in为计量单位
- 通用头型Cherry Lock铆钉，杆身材料5056铝合金，芯杆材料7075铝合金，锁紧环材料5056铝合金
- Cherry铆钉

（2）示例 2：

NAS 173 8 B 5-4

- 最大铆接厚度4/16 in，以1/16 in为计量单位
- 铆钉杆径：4——0.140 in；5——0.173 in；6——0.201 in
- 铆钉材料
- 铆钉头型：奇数——埋头；偶数——凸头
- 美国国家航空标准

（3）示例 3：

CR3 24-3-5-4

- 最大铆接厚度4/16 in，以1/16 in为计量单位
- 铆钉杆径5/32 in，以1/32 in为计量单位
- 铆钉头型：奇数——凸头；偶数——埋头
- 铆钉型号和材料：杆身材料5056铝合金；芯杆材料合金钢
- Cherry铆钉

2. 高剪切应力铆钉（Hi-shear Rivets）

高剪切应力铆钉是专门设计用于承受高剪切载荷而得其名的。高剪切应力铆钉简称高剪铆钉，又称销桩式铆钉。高剪铆钉由销桩和锁圈两部分组成，见图 4.43。这种铆钉具有同一直径 AN 螺栓相同的承剪强度，而其重量则只有螺栓的 40%。它广泛用于飞机高强度结构区域。

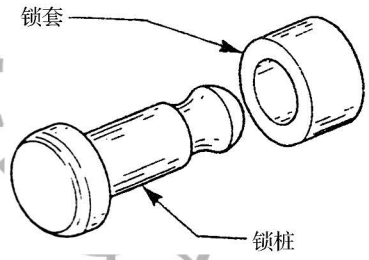
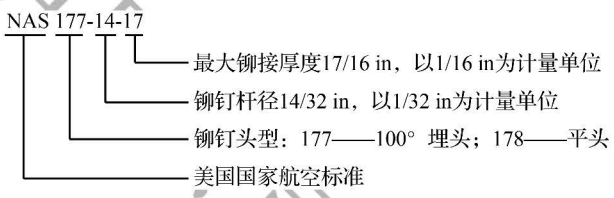


图 4.43　高剪切应力铆钉

高剪铆钉制有平头和埋头两种头型。高剪铆钉杆身与铆孔的配合为过盈配合。安装时，先将高剪铆钉用手锤敲入铆孔，待铆钉杆尾露出后套上锁圈，然后从一面顶住铆钉头，从另一面用铆枪将锁圈轧装于铆钉杆凹弧槽位置，紧固牢靠形成铆头。

高剪铆钉型号规格标记如下：



3. 螺纹铆钉（Threaded Rivets）

螺纹铆钉又称为铆钉螺母，是一种带有内螺纹的空心拉铆钉。螺纹铆钉最早设计是用来将橡胶防冰套安装到机翼或飞机尾部表面上的。现已推广用于飞机次要结构上，例如，安装仪表、托架和隔音材料等。

螺纹铆钉的头型通常有两种：平头和 100°埋头。100°埋头螺纹铆钉头高度有 0.048 in 和 0.063 in 两种。当在较薄材料的埋头窝上装该铆钉时，使用钉头高度较薄的一种。无论平头还是埋头螺纹铆钉，均具有凸齿和不带凸齿两种形式的铆钉头形式。使用钉头上具有单凸齿的螺纹铆钉，需用专用的凹槽剪在铆孔周边剪一小槽口以容纳钉头上的凸齿。当这种铆钉铆接好后可防止铆钉转动。这种铆钉尤其适合用作螺母集装板。不带凸齿的螺纹铆钉仅用在没有扭转负荷的部位。

螺纹铆钉的钉尾也有尾部通孔和盲孔两种形式。一般场合多用尾部通孔形式的螺纹铆钉。钉尾为盲孔形式的螺纹铆钉主要用于要求气密的场合，如气密舱。

螺纹铆钉杆的直径有三种：3/16 in、7/32 in 和 1/4 in，其内依次制有 6-32、8-32 和 10-32 的美国国家标准螺纹。

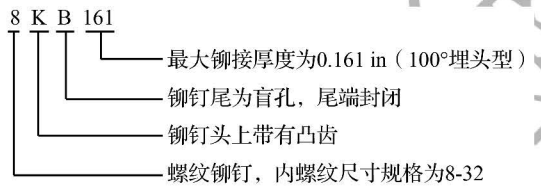
螺纹铆钉杆长有六种尺寸，每一种尺寸杆长的螺纹铆钉有其适合的铆接厚度范围。从铆钉头端面的径向短划标识可辨别其铆接厚度。铆接厚度最小的一种，钉头端面无任何标记。厚度增大一档，钉头端面上就有一道径向短划。厚度越大，径向短划根数越多。如果铆钉头端面上有五道径向短划，表明这是能铆接最大厚度的一种。钉头标记、杆号及铆接

厚度范围见表 4-6。

表 4-6　螺纹铆钉规格标记

螺纹铆钉类型		螺纹铆钉标记					
平头	杆号	45	75	100	120	140	160
	铆接厚度	0.010～0.045	0.046～0.075	0.076～0.100	0.101～0.120	0.121～0.140	0.141～0.160
100°埋头	杆号	91	121	146	166	186	206
	铆接厚度	0.048～0.091	0.092～0.121	0.122～0.146	0.147～0.166	0.167～0.186	0.187～0.206
100°埋头	杆号	106	136	161	181	201	221
	铆接厚度	0.063～0.106	0.107～0.136	0.137～0.161	0.162～0.181	0.182～0.201	0.202～0.221

螺纹铆钉的型号规格用数字和字母来标记。例：10KB106。该标记的左边一组数字由一位数或两位数组成，表示该铆钉的内螺纹尺寸号数；右边一组数字由两位或三位数字组成，表示该铆钉的最大铆接厚度，以 1/1000 in 为计量单位。若该数字为 5 的倍数，就表示铆钉为平头螺纹铆钉；若不是，则表示为埋头螺纹铆钉。两组数字的中间有英文字母或短划用来表示带不带凸齿和钉尾构造。若该处为一短划，表示该铆钉的钉尾为通孔、铆钉头上无凸齿；若该处为字母 K，则表示该铆钉头上有凸齿，顶尾为通孔形式；若该处为字母 KB，则表示该处铆钉头上有凸齿，钉尾为盲孔尾端封闭。螺纹铆钉型号规格标记如下：



知识总结	随堂练习

4.6　紧固件松动检查及修理

紧固件松动是飞机结构维修中常见的问题，以飞机蒙皮紧固件进行检查为例，本项目主要检查内容为紧固件是否发生松动，紧固件松动部位通常有特殊特征，可根据以下特征对飞机蒙皮进行检查。

4.6.1　紧固件头处漆层裂开

漆层沿紧固件头部周缘破裂主要有两方面原因：一方面，紧固件与孔壁存在较大间隙，紧固件受载后将出现较大相对位移，容易使机身蒙皮漆层沿紧固件头部周缘过载破裂；另一方面，由于紧固件与孔壁之间存在较大间隙，漆层将直接承受较大的增压载荷，使得漆层沿紧固件头部周缘过载破裂。

4.6.2　松动铆钉的“冒烟”

紧固件头部漆层破裂后，机身增压会导致紧固件头部周缘漏气，从而夹带、挤压出机身蒙皮内表面积聚的脏污并沿紧固件头部边缘向两边积聚（为明显的“外翻”状）。如果紧固件漏气严重，还将在紧固件头部后方形成黑色尾迹（俗称“黑尾巴”）。

4.6.3　紧固件及孔壁表面脏污

正常情况下，紧固件孔壁应洁净并呈金属光泽。漏气导致机身内部脏污被挤压到机身外部时，紧固件以及紧固件孔壁表面上将会黏附、积聚一些异物。

飞机机身蒙皮紧固件常见缺陷的典型特征见表4-7。

表4-7　紧固件常见缺陷特征

紧固件损伤类型	紧固件典型特征						
	漆层是否破裂	漆层是否脱落	是否有脏污积聚		是否与蒙皮平齐	是否有烧蚀点	孔壁是否脏污
			“外翻状”	“沉淀状”			
松动	是	否	是	否	是	否	是
雷击	否	否	否		是	是	是
埋头窝不合格	否	否	否	是	否	否	否
掉漆	是	是	否	是	是	否	否

中国民航出版社有限公司版权所有

检查完成，如有松动问题需要进行紧固件的松动修理。及时更换松动的紧固件，是避免紧固件松动扩散危及飞机持续适航性并降低维修成本的有效措施。由于松动后的紧固件孔已经出现塑性变形，必须对紧固件孔扩孔并安装加大级或者下一级紧固件。由于机身蒙皮紧固件一般为埋头紧固件，安装加大级或者下一级修理紧固件时必须满足以下要求：

（1）紧固件间距必须满足 $4D \sim 6D$（D 为紧固件孔名义直径）。

（2）重新划埋头窝后不能因为埋头窝过深导致紧固件孔出现“毛边”（Feather Edge），以免大幅度降低蒙皮疲劳寿命。如果重新划埋头窝后可能导致紧固件孔出现“毛边”，必须安装凸头紧固件。

知识总结	随堂练习

复习思考题

1. 螺纹的主要参数有哪些？螺距与导程有什么异同之处？
2. 内螺纹与外螺纹在什么条件下才能正确连接？
3. 什么是螺纹自锁现象？三角形螺纹的自锁条件是什么？
4. 螺纹连接有哪几种类型？它们各自有何特点？
5. 美国航空螺纹连接件采用哪两种系列的螺纹？其螺纹等级的含义是什么？
6. 美国航空螺栓型号编码中螺栓的直径和长度分别以多少英寸作为计量单位？其制造材料的代号有哪几个？各表示什么材料？
7. AN3～AN20 是什么螺栓？其螺纹是粗牙还是细牙螺纹？
8. AN73～AN81 是什么螺栓？它与 AN3～AN20 在结构上有什么区别？
9. 何为高精度螺栓？它用于什么场合？
10. 内六方螺栓用于铝合金件连接时应采取什么措施？
11. AN21～AN36 是什么螺栓？常用于什么场合？
12. Jo-bolt 螺栓由哪几个元件组成？有哪些优点？常用于什么场合？
13. 锁扣螺栓有哪些特点？常用于什么场合？
14. 高锁螺栓有哪些特点？常用于什么场合？
15. 试说明下列螺栓代号的意义：

中国民航出版社有限公司版权所有

AN20-10；AN75-5A；BACB30NW5C5；AN23-12；AN173-14；AN5C5

16. 飞机上的非自锁型螺母安装时必须采取什么措施？
17. 常用的非自锁型航空螺母有哪几种类型？各自的代号是什么？
18. 自锁型螺母为什么能够防松？
19. 常用的自锁型螺母有哪几种类型？各自的构造和特点是什么？
20. 试说明下列螺母代号的意义：

AN310C10；AN315D5R；AN340DD6；AN355-5

21. 垫圈的作用是什么？常用垫圈的类型及应用场合有哪些？
22. 飞机上常用的螺钉有哪几种？各自有哪些特点？
23. 螺纹紧固件安装应注意哪些事项？
24. 如何拆卸双头螺柱？
25. 飞机上的螺纹连接件的螺纹一般都满足自锁条件，为什么还要采取防松措施？
26. 飞机上螺纹连接件常用的防松措施有哪些？各自应用于什么场合？
27. 采用保险丝防松应遵守哪些基本规则？
28. 如何修复飞机结构上或部件上损坏的螺孔？
29. 如何修复飞机结构上或部件上损坏的螺栓孔？
30. 常用的转角拧紧式紧固件有哪几种？各自的构造和特点是什么？
31. 试述常用的铆钉材料、代号及标记。
32. 试说明下列普通铆钉代号的意义：

AN426AD3-5；AN470DD4-8；BACR15BA3AD5

33. 试述自塞摩擦锁紧式拉铆钉的构造及安装特点。
34. 试述自塞机械锁紧式拉铆钉的构造及安装特点。
35. 试述高剪铆钉的构造及安装特点。
36. 螺纹铆钉头端面的径向刻线的含义是什么？
37. 试说明下列专用铆钉的意义：

CR2249-5-4；NAS178-6-4；10K100

第 5 章　航空机械零件

学习要求：

- 熟悉弹簧基本功用、类型及特点、结构及参数和压缩特性；
- 熟悉键的分类及特点，掌握键的失效及处理方法；
- 熟悉联轴器的作用，掌握刚性联轴器和弹性联轴器的分类及特点；
- 熟悉离合器的类型及功用，掌握各类离合器的结构和特点；
- 了解轴的分类、作用及特点，熟悉轴的结构，掌握轴上零件的固定方法；
- 熟悉滑动轴承的结构与特点、工作原理，掌握滑动轴承的使用与维护方法；
- 熟悉滚动轴承的结构和类型，掌握滚动轴承的代号、固定与装配、失效与维护；
- 掌握管路的组成、分类和标记，掌握接头的分类及特点，了解飞机管路标准施工。

第 5 章　课程导学

5.1　弹簧

弹簧是机械中广泛应用的弹性零件。在外载荷的作用下，弹簧利用材料的弹性和结构特点能产生较大的弹性变形并吸收储存一定的能量。当外载荷卸除后，弹簧又能恢复原来的形状并释放出吸收储存的能量。

5.1.1　弹簧的功用

弹簧的主要功用有：

中国民航出版社有限公司 版权所有

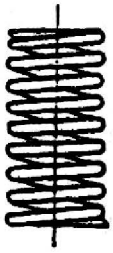
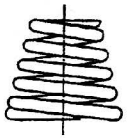
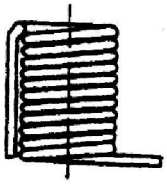
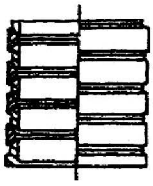
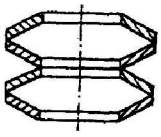
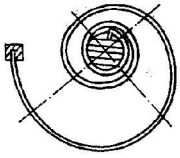
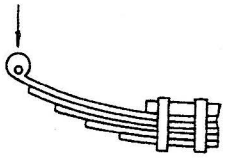
（1）控制运动，如内燃机的气门弹簧，液压阀门中的控制弹簧；
（2）缓冲和吸振，如车辆中的缓冲弹簧，联轴器中的吸振弹簧；
（3）储存能量，如钟表和仪表中的盘簧（发条）；
（4）测量力或力矩，如测力器、弹簧秤中的弹簧。

5.1.2　弹簧的基本类型和特点

按照受力的性质，弹簧分为拉伸弹簧、压缩弹簧、扭转弹簧三种。

按照形状，弹簧又可分为圆柱螺旋弹簧、圆锥螺旋弹簧、碟形弹簧、环形弹簧、板弹簧和盘簧。常用的弹簧类型见表 5-1。

表 5-1　弹簧的基本类型

按形状分 \ 按载荷分	拉伸	压缩	扭转	弯曲
螺旋形	圆柱形螺旋拉伸弹簧 	圆柱形螺旋压缩弹簧  锥形螺旋压缩弹簧 	圆柱形螺旋扭转弹簧 	
其他		环形弹簧  碟形弹簧 	盘形弹簧 	板弹簧 

各类弹簧中以圆柱螺旋弹簧应用得最广。螺旋弹簧是用弹簧钢丝卷绕制成的，其中圆柱螺旋弹簧规格已标准化了，有专门工厂生产。在飞机附件中，圆柱螺旋弹簧常作为控制弹簧使用。

碟形弹簧是用钢板冲压成的锥台形的弹簧。它是压缩弹簧，刚性很大，能承受很大的冲击载荷，并具有良好的吸振能力，所以常用作缓冲弹簧。在载荷相当大和弹簧轴向尺寸受限制的地方，可以采用碟形弹簧。例如，在三叉戟飞机起落架减震支柱上的弹簧筒内装有16片碟形弹簧。另外，在三叉戟飞机的刹车间隙自动调节器中也用到了碟形弹簧。

环形弹簧是分别由带有内、外锥形的钢制圆环交错叠合制成的。它是目前最强的压缩缓冲弹簧，在近代的重型列车、重型锻压设备和飞机着陆装置中广泛应用。

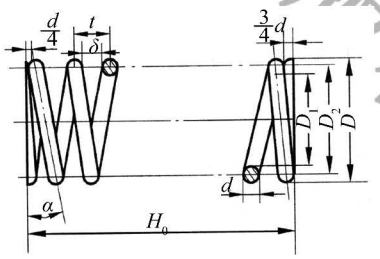
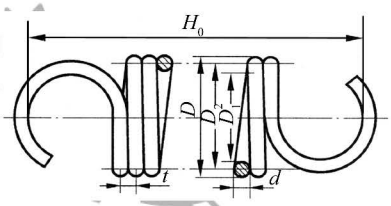
盘形弹簧主要用于钟表和仪表中，在某些型号的飞机机轮防滞装置中盘形弹簧也得到应用。

板弹簧通常是由若干长度不等的条形钢板叠合而成，并用簧夹夹紧。这种弹簧变形大，吸振能力很强，在工作中主要承受弯曲作用力，多用于各种车辆及重型锻压设备中。

5.1.3 圆柱螺旋压缩和拉伸弹簧的各部名称及几何尺寸

表5-2给出了圆柱螺旋压缩和拉伸弹簧的各部名称及几何尺寸计算公式。

表5-2 圆柱形螺旋压缩和拉伸弹簧的几何尺寸计算公式

计算项目	压缩弹簧	拉伸弹簧
		
弹簧丝直径 d	由强度计算确定	
弹簧中径 D_2	$D_2 = Cd = D - d$	
弹簧外径 D	$D = D_2 + d$	
弹簧内径 D_1	$D_1 = Cd = D_2 - d$	
弹簧支承圈数 n_2	端部并紧磨平：$n_2 = 1.5 \sim 2.5$ 端部并紧不磨平：$n_2 = 1.5 \sim 3.5$	$n_2 = 0$

续表

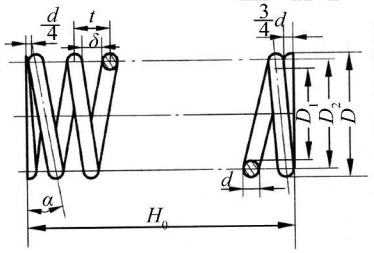
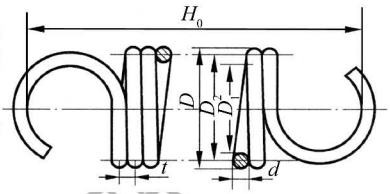
计算项目	压缩弹簧	拉伸弹簧
		
弹簧工作圈数 n	由刚度计算确定	
总圈数 n_1	$n_1 = n + n_2 = n + (1.5 \sim 3.5)$	$n_1 = n$
间距 δ	$\delta = \lambda_2' + \delta' \geqslant \dfrac{\lambda_2}{n} + 0.1d$	
节距 t	$t = d + \delta$	$t \approx d$
自由高度 H_0	端部并紧磨平：$H_0 = n\delta + (n_1 - 0.5)\,d$ 端部并紧不磨平：$H_0 = n\delta + (n_1 + 1)\,d$	$H_0 = nd$ + 钩环高度
螺旋角 α	$\alpha = \arctan\left(\dfrac{t}{\pi D^2}\right)$，一般 $\alpha = 5° \sim 9°$	
弹簧丝展开长度 L	$L = \dfrac{\pi D_2 n_1}{\cos\alpha} \approx \pi D_2 n_1$	$L = \pi D_2 n$ + 钩环展开长度

表 5-2 中的参数 C 称为弹簧指数，也称为旋绕比。当弹簧钢丝直径 d 一定时，C 值愈小，弹簧就愈硬，即刚度愈大，每单位相对变形量的弹力愈大，制作弹簧时簧丝卷绕也愈困难；反之，C 值愈大，则弹簧愈软，即刚度愈小，每单位变形量的弹力愈小。一般取 $4 \leqslant C \leqslant 14$。

另外，圆柱形螺旋压缩弹簧两端支承圈的端面应与弹簧的轴心线相垂直，以保证工作稳定。

5.1.4　圆柱螺旋压缩弹簧的特性

为了清晰地表明工作过程中弹簧的载荷与变形或高度之间的关系，通常给出载荷与变形的关系图，这个关系线图称为弹簧的特性线图。对于等节距的圆柱螺旋压缩弹簧，其载荷与变形成正比关系，其特性线图为一直线，如图 5.1 所示。这个关系对拉簧和扭簧都适用。

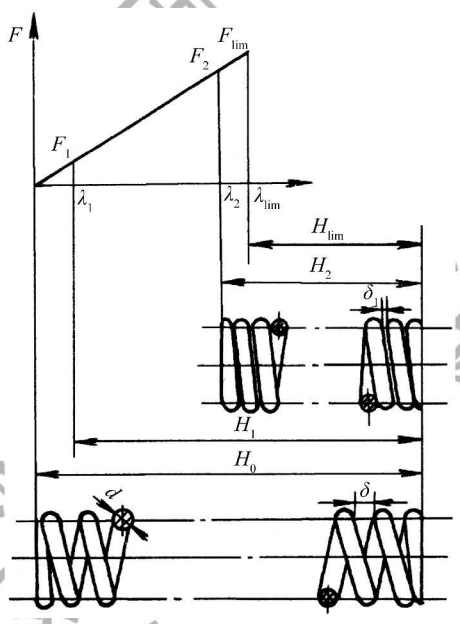


图 5.1　弹簧特性线图

图 5.1 中，H_0 为弹簧的自由高度，即弹簧未受载荷时的高度。安装弹簧时，通常使弹簧预先承受一定的载荷使其可靠地稳定在安装位置上，该载荷以 F_1 表示，F_1 称为弹簧的最小工作载荷。在 F_1 作用下，弹簧高度被压缩到 H_1，其压缩量为 λ_1。F_2 为弹簧工作时承受的最大工作载荷，在 F_2 作用下，弹簧高度被压缩到 H_2，其压缩量为 λ_2。压缩变形量增加了 $\lambda_2 - \lambda_1 = h$，即弹簧的工作行程。$F_{lim}$ 为弹簧的工作极限载荷。这时弹簧相应的压缩变形量为 λ_{lim}，弹簧高度为 H_{lim}。一般取 $F_1 = (0.1 \sim 0.5) F_2$，而最大工作载荷一般由机械工作要求确定。为了保证弹簧有稳定的弹性，所以通常取 $F_2 \leqslant 0.8F_{lim}$。

5.1.5　航空应用案例：张力弹簧在飞机前起落架收放机构中的应用

前起落架锁定机构利用一个过中心装置将前起落架锁定在放下或收上位置。两个张力弹簧将锁连杆保持在这些位置上。

1. 前起落架收上运动

在起落架收上之前，前起落架锁作动筒缩入。这时松开前起落架锁机构并使前起落架收上。当起落架向上移动过程中，液压压力保持在前起落架作动筒的收上端。前起落架锁作动筒在前起落架运动到收上位时，将前起落架锁机构推到锁定位置。张力弹簧将锁连杆保持在过中心锁定位置。这将前起落架保持在收上位置。如图 5.2 所示。

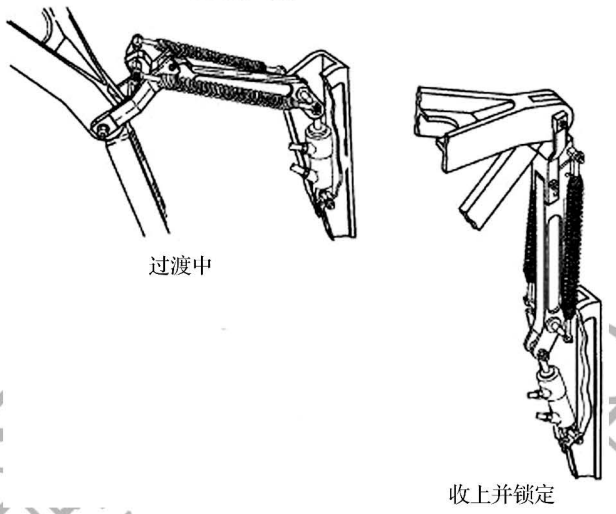


图 5.2　起落架收上示意图

2. 前起落架放下运动

在起落架放下之前，前起落架锁作动筒伸出。这时松开前起落架锁机构并使前起落架放下。当起落架向下移动过程中，液压压力保持在前起落架作动筒的伸出端。前起落架锁作动筒在前起落架移动到放下位时将前起落架锁机构推到锁定位置。张力弹簧将锁连杆保持在过中心锁定位置。这将前起落架保持在放下位置。如图 5.3 所示。

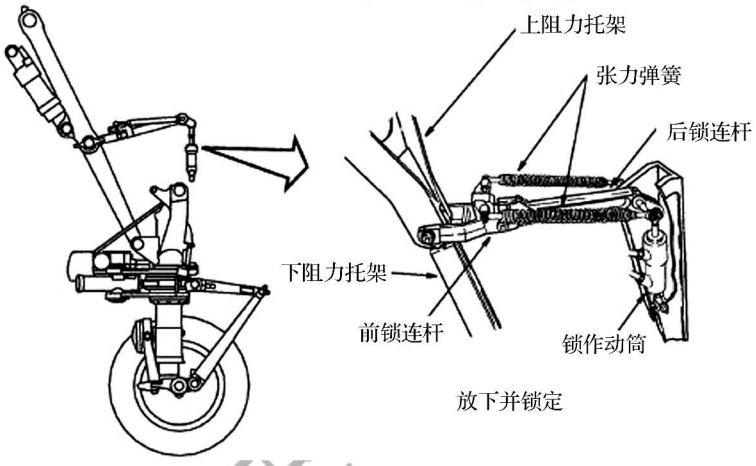


图 5.3　起落架放下示意图

知识总结	随堂练习

5.2 轴

5.2.1 轴的功用

轴是组成机械的重要零件之一。机械中凡作旋转运动的零件，如齿轮、带轮、滑轮、车轮和机轮等，都必须安装在轴上才能实现其旋转运动，由此可见轴是用来支承旋转零件的。它的功用主要有三个方面：

（1）支承旋转零件；

（2）传递转矩和传递运动；

（3）承受弯矩。

5.2.2 轴的分类

根据轴的受载情况，轴可分为三种。

1. 心轴

支承旋转零件，只承受弯矩而不承受转矩的轴，称为心轴。心轴又可分为不动心轴和转动心轴。不动心轴是不旋转的，它固定在机架上，如图 5.4（a）所示的自行车前轮轴。转动心轴则随旋转零件一起转动，如图 5.4（b）所示的铁路车辆轴。

2. 传动轴

工作时只起传递转矩，不承受或只承受很小弯矩的轴，称为传动轴。如图 5.4（c）中的直升机传动轴。

中国民航出版社有限公司版权所有

3. 转轴

既传递转矩又承受弯矩的轴称转轴。如图 5.4（d）所示减速器中的齿轮轴。

轴按其轴线形状不同又可分为直轴和曲轴两类，本课程只介绍直轴。直轴按其外形不同分为光轴和阶梯轴。此外，直轴还可以分为实心轴和空心轴，如燃气涡轮发动机的转子为空心轴。

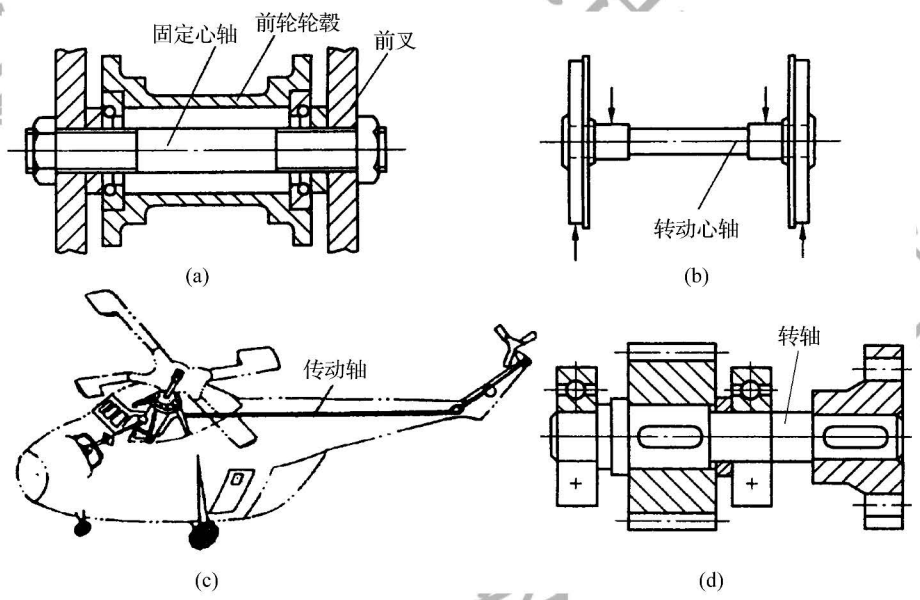


图 5.4　轴按承载情况分类

5.2.3　轴的各部分名称及其结构

现以图 5.5 为例说明轴的各部分名称及其结构。

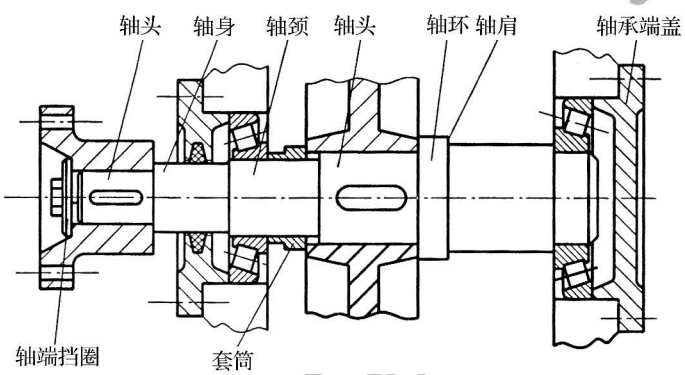


图 5.5　转轴结构

轴的各部分名称如下：

轴颈——与轴承配合的轴段或轴上被支承的部分，称为轴颈；

轴头——与零件轮毂配合的部分称为轴头；

轴肩——轴直径变化所形成的台阶称为轴肩，轴肩由定位面和过渡圆角组成；

轴环——两轴肩之间的轴向距离很小，且呈环状的轴段称为轴环；

轴身——连接轴头与轴颈的部分称为轴身。

轴的结构取决于轴上零件的布置和固定方式、轴承的类型和尺寸、制造和装配工艺、安装位置和要求、受力情况等条件。轴的结构由于受上述诸多因素影响，因而没有标准的形式。一般地说，轴的结构尺寸（直径、圆角半径、倒角、键槽、退刀槽、砂轮越程槽等）应符合标准或规定。同一轴上的各结构要素应尽量取同样尺寸。各键槽应布置在同一母线上；轴端、轴头、轴颈的端部应有倒角以便安装轴上零件。为了保证阶梯轴上的零件能顺利地装拆，轴的各段直径应从轴端起逐段加大。轴的台阶数要尽可能少，轴肩高度尽可能小。滚动轴承处的轴肩外径应小于轴承内圈的外径，以利拆卸。此外为了便于轴在加工过程中各工序的定位，轴的两端面上应作出中心孔。

总的来说，轴的结构应满足：

（1）轴和装在轴上的零件要有准确的工作位置；

（2）轴上的零件应便于装拆和调整；

（3）轴应具有良好的制造工艺性；

（4）轴的受力合理，有利于提高轴的强度和刚度。

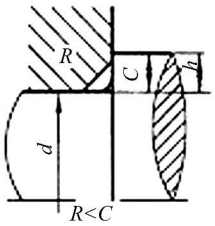
5.2.4 轴上零件的固定

为了保证轴上零件能正常工作，其轴向和周向都必须固定。

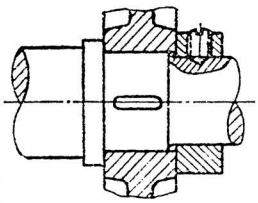
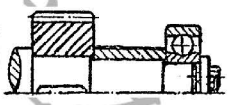
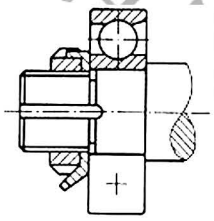
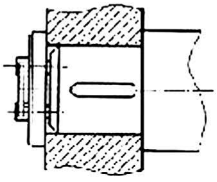
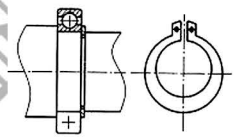
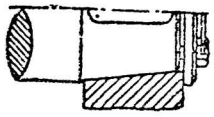
1. 轴上零件的轴向固定

轴上零件轴向固定是为了防止零件轴向移动和传递轴向力。常用固定方法见表5-3。

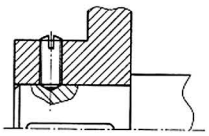
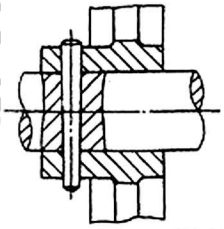
表5-3 轴上零件的轴向固定

固定件	简图	简要说明	特点和用途
轴肩		为了保证零件紧靠定位面，轴上圆角半径 r 应小于零件内孔倒角 C 或圆角半径 R	能承受较大的轴向力，定位简单可靠，但截面变化处有应力集中，轴肩过多会增大轴的直径，制造较复杂

续表

固定件	简图	简要说明	特点和用途
轴环 挡圈		轴肩高度：$h \approx (2\sim3)C$ 轴环宽度：$b \approx 1.4h$ 装滚动轴承的轴肩高度可查手册	常用于齿轮、轴承等的轴向固定。能承受的轴向力较小，常用于固定光轴上的零件，或用于固定轴向力较小的零件
套筒		依靠已固定零件来定位	能承受较大的轴向力，定位可靠，无应力集中，但重量有增加。一般用于零件间距较小处
圆螺母		一般用细牙螺纹，以减少对轴的削弱。常用双螺母或加用带翅垫圈来防止螺母松脱	能承受较大的轴向力，定位可靠。用于零件间距离较大，且轴上允许车螺纹处，更多用于固定轴端零件
压板		固定螺钉须加用防松装置	可承受振动与冲击，结构较笨重。用于固定轴端零件
弹簧卡圈			简便，但凹槽处有应力集中。用于轴向力很小或仅为了防止轴向移动处。常用于固定轴承
圆锥面			对中性好，能承受冲击，但加工较复杂，用于固定轴端零件

续表

固定件	简图	简要说明	特点和用途
紧定螺钉			可在双向作轴向固定并兼作周向固定。用于固定作用力小的零件
圆锥销			同上

2. 轴上零件的周向固定

轴上零件周向固定是为了使轴上零件和轴一起转动并传递转矩。常用的固定方法有以下几种：

（1）平键或花键；

（2）过盈配合；

（3）紧定螺钉；

（4）圆锥销。

后三种连接可同时兼作轴向固定。

知识总结	随堂练习

中国民航出版社有限公司版权所有

5.3　轴承

轴承是支撑轴的部件，它用以减少轴与支撑之间的摩擦和磨损，并保持轴的旋转精度。

根据轴承工作时的摩擦性质不同，可分为滑动轴承和滚动轴承两大类。

5.3.1　滑动轴承

根据轴承所受载荷的方向不同，可以将滑动轴承分为向心轴承［见图5.6（a）］、推力轴承［见图5.6（b）］和向心推力轴承［见图5.6（c）］。向心轴承承受径向载荷；推力轴承承受轴向载荷；向心推力轴承同时承受径向和轴向载荷。

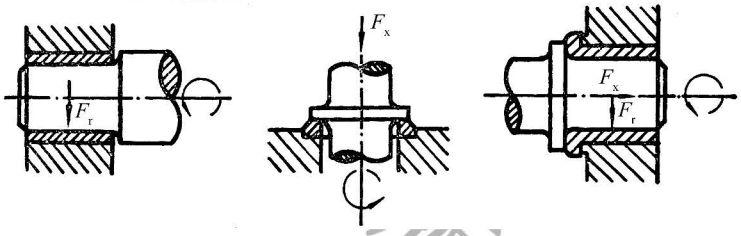


图5.6　滑动轴承的类型

滑动轴承在一般情况下摩擦损耗较大，使用维护也比较复杂，所以在很多场合常由滚动轴承所取代。但滑动轴承具有结构简单，工作平稳、可靠、无噪声等特点，若能保证液体摩擦润滑，可大大减小摩擦损失和表面磨损，提高承载能力和旋转精度以及具有一定的吸振能力。因此在某些场合还必须采用滑动轴承。

1. 滑动轴承的结构

滑动轴承一般是由轴瓦（或称轴套）与轴承座构成。根据结构不同，滑动轴承可分为整体式、剖分式和调心式三种。

1）整体式滑动轴承

这种轴承分有轴瓦和无轴瓦两种。无轴瓦整体式滑动轴承只用于对旋转精度无要求、轻载、低速的场合。典型的整体式滑动轴承由轴承座1和轴套2组成，如图5.7所示。轴承座顶部制有装油杯的螺纹孔。轴套也相应开油孔并在内表面开油槽。

整体式滑动轴承结构简单，成本低廉，但磨损而造成的间隙无法调整，只能沿轴向装

入或拆除，应用于低速、轻载或间歇性工作的机器中。

2）剖分式滑动轴承

剖分式滑动轴承由轴承座1、轴承盖2、上下轴瓦3与4、螺柱5和润滑装置等组成，如图5.8所示。这种轴承根据剖分位置分为剖分式正滑动轴承和斜滑动轴承两种。在剖分面处，制成凹凸状的配合表面，使之能上下对中和防止横向移动。通常在轴承盖与轴承座之间留有少量的间隙，当轴瓦稍有磨损时，可适当减少放置在轴瓦剖面上的垫片，并拧紧轴承盖上的螺柱以消除轴颈与轴瓦间的间隙，使磨损的轴瓦得到调整。选用剖分式正滑动轴承时，应保证径向载荷的作用线不超过中心线左右各35°，否则，就应采用剖分式斜滑动轴承。这类轴承也已标准化，可查阅相关手册获得。剖分式滑动轴承装拆方便、轴瓦与轴颈的间隙可以调整，故应用最广泛。

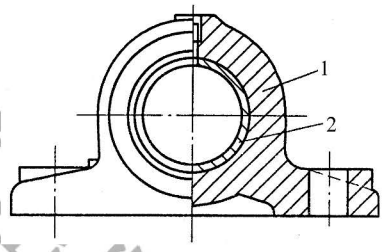
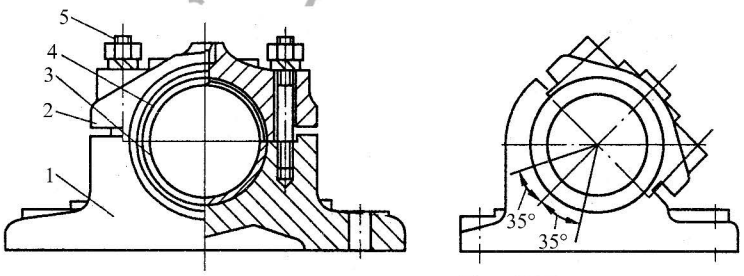


图5.7　整体式滑动轴承

剖分式滑动轴承结构复杂，可以调整因磨损而造成的间隙，安装方便。应用于低速、轻载或间歇性工作的机器中。



（a）水平式　　（b）斜置式

图5.8　剖分式滑动轴承

3）调心式滑动轴承

调心式滑动轴承由轴承座和轴瓦等组成，而且把轴瓦与轴承座相接触的表面做成球面形状，如图5.9所示。这种轴承可自动调整位置来适应轴的偏斜。常用在轴颈较长（宽径比 $B/d > 1.5$）或轴的刚性较小或两端轴承不易精确对中时的场合。

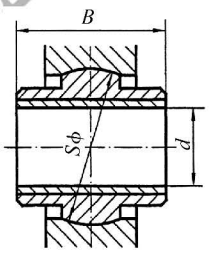


图5.9　调心式滑动轴承

2. 轴瓦的结构和材料

轴瓦是滑动轴承中的核心零件，其工作表面既是承载面又是摩擦面。滑动轴承的工作能力和使用寿命，主要取决于轴瓦的结构和材料选择的合理性。

1）轴瓦的结构

在整体式滑动轴承中，轴瓦为套筒形，故称其为轴套，其结构见图 5.10。

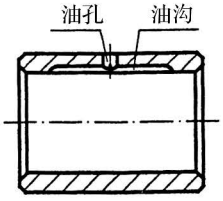


图 5.10　轴套

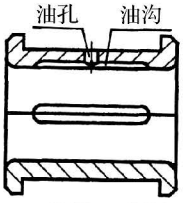


图 5.11　剖分式轴瓦

在剖分式滑动轴承中，轴瓦由两块组成，其结构见图 5.11。这种轴瓦两端的凸肩用以防止轴瓦的轴向窜动，并能承受一定的轴向力。为保证润滑油的引入和均匀分布，应在轴瓦的非承载部分开设油孔和油槽。注意：油槽不应开至端部，以防漏油，如图 5.12 所示。为了防止轴瓦随轴转动，可用定位销定位，如图 5.13 所示。

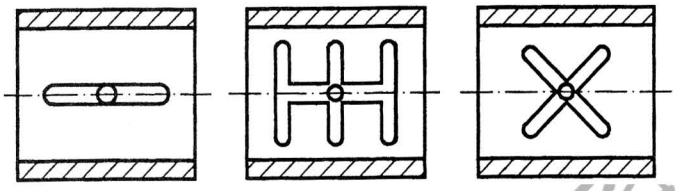


图 5.12　轴瓦上的油槽

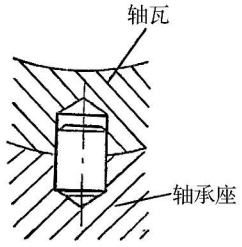


图 5.13　销钉定位

为了改善轴瓦表面的摩擦性质，常在轴瓦内表面上浇铸一层或两层减摩材料，称为轴承衬。为了使轴承衬与轴瓦贴附牢固，在轴瓦内表面做出燕尾形或螺纹形的榫槽，见图 5.14。

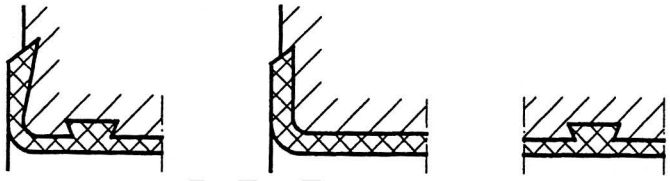


图 5.14　轴瓦的沟槽形状

2）轴瓦的材料

轴瓦材料性能的要求：

（1）减摩性——材料副具有较低的摩擦系数。

（2）耐磨性——材料的抗磨性能，通常以磨损率表示。

（3）抗胶合——材料的耐热性与抗黏附性。

（4）摩擦顺应性——材料通过表层弹塑性变形来补偿轴承滑动表面初始配合不良的能力。

（5）嵌入性——材料容纳硬质颗粒嵌入，从而减轻轴承滑动表面发生刮伤或磨粒磨损的性能。

（6）磨合性——轴瓦与轴颈表面经短期轻载运行后，形成相互吻合的表面形状和粗糙度的能力。

此外还应有足够的强度和抗腐蚀能力，良好的导热性、工艺性和经济性。工程上常用浇铸或压合的方法将两种不同的金属组合在一起，性能上取长补短。

常用轴瓦和轴承衬材料的性能及应用，见表 5-4。

表 5-4　常用轴瓦和轴承衬材料的性能及应用

材料	牌号	P（MPa）	v（m/s）	Pv（MPa · m/s）	HB		特性及用途举例
					金属模	砂模	
灰铸铁	HT15-33	4	0.5		163～241		用于不受冲击的轻负载荷轴承
	HT20-40	2	1				
	HT25-47	1	2				
耐磨铸铁	耐磨铸铁-1（HT）	0.05～9	2～0.2	0.1～1.8	180～229		铬镍合金灰口铁，用于与热处理（淬火或正火）轴相配合的轴承
	耐磨铸铁-3（HT）	0.1～6	3～0.75	0.3～4.5	160～190		钛铜合金灰口铁，用于与不淬火的轴相配合的轴承
	耐磨铸铁-1（QT）	0.5～12	5～1.0	2.5～12	210～260		球墨铸铁，用于与经热处理的轴相配合的轴承
	耐磨铸铁-2（QT）				167～197		球墨铸铁，用于与不经淬火的轴相配合的轴承

中国民航出版社有限公司版权所有

续表

材料	牌号	P（MPa）	v（m/s）	Pv（MPa·m/s）	HB		特性及用途举例
					金属模	砂模	
铸造青铜	ZQSn10-1	15	10	15（20）	90	80	铸锡青铜，用于重载、中速高温及冲击条件下工作的轴承
	ZQSn6-6-3	8	3	10（12）	65	60	铸锡锌铅青铜，用于中载、中速工作的轴承，如减速器、起重机、机床的一般主轴轴承
	ZQA19-4	30	8	12（60）	110	100	铸铝铁青铜，用于受冲击负荷处，轴承温度可至300℃，轴颈需淬火
	ZQPb30	25（平稳）	12	30（90）	25		铸铝铁青铜，用于受冲击负荷处，轴承温度可至300℃，轴颈需淬火铸铅青铜，浇在钢轴瓦上作轴承衬，可承受很大的冲击载荷，也可用于精密机床的主轴轴承，内燃机、空压机的轴承等
		15（冲击）	8	60			
轴承合金	ZChSnSb 11-6	25（平稳） 20（冲击）	80 60	20（100） 15（10）	27		铸锡基轴承合金，用于作轴承衬，用于重载、高速、温度低于110℃的重要轴承，如汽轮机、大于750 kW的电动机、内燃机、高转速的机床主轴轴承等
	ZChPbSb 16-16-2	15	12	10（50）	30		铸铅基轴承合金，用于不剧变的重载，高速的轴承如车床、发电机、压缩机、轧钢机等轴承，温度低于120℃
尼龙	尼龙6 尼龙1010		5	0.09（无润滑） 2.5（滴油间歇工作）			尼龙轴承自润性、耐腐蚀性、耐磨性、减震性能都较好，而导热性不好，线膨胀系数大，尺寸稳定性不好，适用于速度不高或散热条件好的地方

注：括号中的 Pv 值为完全液体摩擦时的许用值。

3. 液体润滑滑动轴承

在转速高、载荷大和对旋转精度要求高的情况下，一般采用液体润滑滑动轴承。例

中国民航出版社有限公司版权所有

如，航空活塞式发动机和柴油机中曲轴的轴承及连杆轴承均设计成液体润滑滑动轴承。根据轴颈与轴瓦间的油膜形成原理的不同，可把液体润滑滑动轴承分为液体动压滑动轴承和液体静压滑动轴承两种。

1）液体动压滑动轴承

液体动压滑动轴承是在完全液体动压润滑状态下工作的滑动轴承。它是利用轴径与轴承间的相对转动，将润滑油带入楔形间隙而形成动压油膜来把两摩擦表面分开的。如图5.15所示，在径向滑动轴承中，其轴颈与轴承孔间具有一定的间隙。静止时，轴在轴承孔的最下方，并与之直接接触，两表面间自然形成弯曲的楔形间隙［见图5.15（a）］。当轴颈开始按图示方向转动时，速度很低，轴颈与轴承孔两金属表面直接接触所产生的摩擦力（与轴颈转向相反），迫使轴颈向左滚动而产生偏移［见图5.15（b）］。此时，润滑油的黏度，使牢固黏附于轴颈上的油，在随轴转动的同时，被带进楔形间隙。显然，单位时间里带进的油多于带出的油。由于油的不可压缩性，楔形间隙内的油相互挤压而形成动压力。随着轴颈转速增大，带入楔形间隙的油量增多，逐渐形成压力油膜，并迫使轴颈和轴承分开，摩擦阻力随之减小，油压的水平分力使轴颈移向右上方［见图5.15（c）］。当转速达到一定值时，油膜承载力与外载荷平衡，轴颈处于偏右下方的位置，并进入稳态转速［见图5.15（d）］。这种润滑状态称为液体动压润滑。

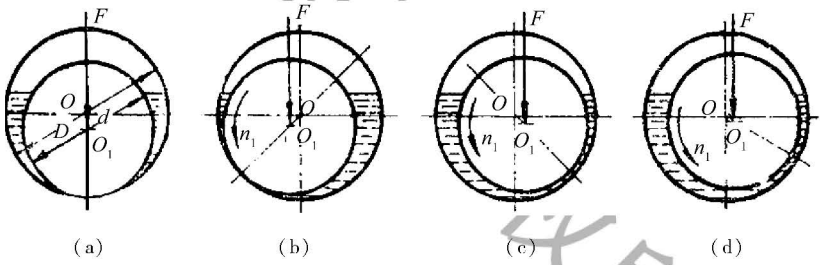


图5.15　液体动压润滑油膜的形成过程

可见，形成液体动压润滑的基本条件是：

（1）被润滑表面必须有收敛的楔形间隙，即进油口间隙大于出油口间隙；

（2）被润滑表面间必须有足够的相对滑动速度；

（3）润滑油供应充分，且具有一定的黏度。

为了获得较高的旋转精度和稳定性，液体动压滑动轴承常制成多油楔轴承。例如，图5.16所示为四油楔轴承；图5.17所示为单向摆动瓦三油楔轴承。

单向摆动瓦三油楔轴承的轴瓦由带球端的螺钉支撑着。单向运转时，支点不安置在正中而偏向一侧。随运转条件的改变，轴瓦能自行调节倾斜程度，以保证时时处于最佳工作状态下运转。摆动瓦具有比固定瓦更好的旋转精度、稳定性和抗震性，但制造、调整都较费事。

液体动压滑动轴承的承载能力与轴颈的转速有关，所以一般应用在高速场合。

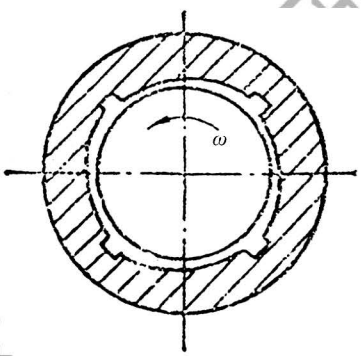


图 5.16　四油楔轴承图

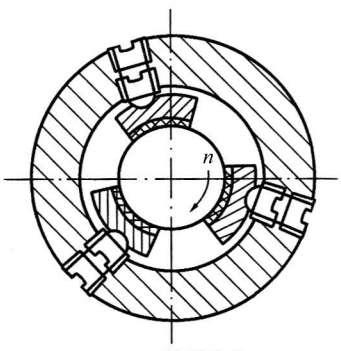


图 5.17　单向摆动瓦三油楔轴承

2）液体静压滑动轴承

液体静压滑动轴承是在液体静压润滑状态下工作的滑动轴承。它利用油泵把润滑油压入轴承间隙中，强制形成静压油膜并将两摩擦面分开，以保证轴承在液体摩擦状态下工作。图 5.18 为液体静压向心滑动轴承的工作原理图。因轴瓦内表面开有 4 个对称均布的油腔，油腔与油腔之间开有回油槽，回油槽在油腔之间有封油面。来自油泵的油压为 p_s 的润滑油经过 4 个节流器降压后，流入 4 个油腔，在油腔内形成静压，从而使轴颈和轴瓦表面被润滑油膜分开。然后，润滑油又经封油面上的间隙和回油槽流回油池。

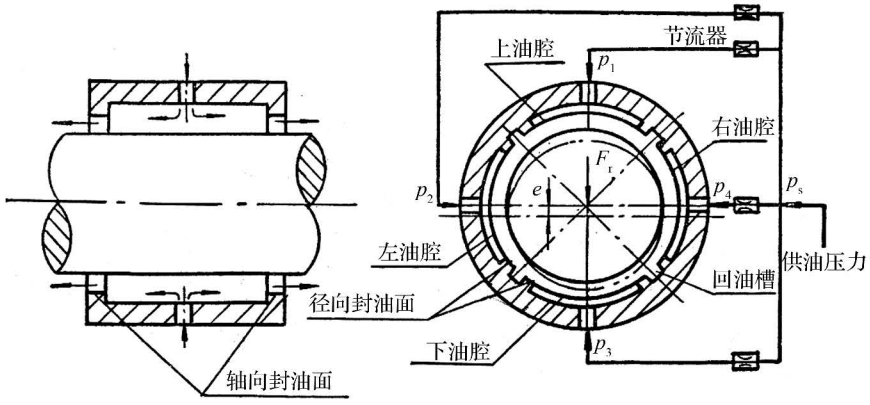


图 5.18　液体静压向心滑动轴承工作原理图

当轴承不受外载荷时，各油腔与轴颈间的间隙相同。由于润滑油经各节流器的压力降相同，四个油腔的油压均相等，即 $p_1 = p_2 = p_3 = p_4$，此时，轴颈与轴承同心。

当轴承受外载荷 F_r 时，轴颈沿载荷方向移动一距离，于是油腔 3 的间隙减小，又因有节流器的节流作用，油压增大，而油腔 1 的间隙增大，且因节流器的节流作用，油压降低。这样，在轴颈上下形成压力差 $p_3 - p_1$，此压力差作用在轴颈上，与外载荷 F_r 平衡，使轴颈轴线稳定在偏心 e 的位置。

液体静压滑动轴承的静压油膜是靠外部油压系统提供的压力而形成的，故油膜承载能力的大小与轴颈的转速无关，能保证轴承在启动、停车和低速等不同的工作状况下处于液体摩擦状态。液体静压滑动轴承的承载能力大，可达到较高的旋转精度，轴承寿命长，效率高。但它必须有一套压力供油系统，结构也比较复杂，所以不如液体动压滑动轴承应用广泛。目前，液体静压滑动轴承主要用于低速、重载和要求精密的机器中。

4. 滑动轴承的应用领域

（1）工作转速特高的轴承，如汽轮发电机；

（2）要求对轴的支承位置特别精确的轴承，如精密磨床；

（3）特重型的轴承，如水轮发电机；

（4）承受巨大冲击和振动载荷的轴承，如破碎机；

（5）根据装配要求必须做成剖分式的轴承，如曲轴轴承；

（6）在特殊条件下（如水中或腐蚀介质）工作的轴承，如舰艇螺旋桨推进器的轴承；

（7）轴承处径向尺寸受到限制时，可采用滑动轴承，如多辊轧钢机。

5. 滑动轴承的失效与维护

1）滑动轴承常见失效形式

（1）磨粒磨损——进入轴承间隙的硬颗粒有的随轴一起转动，对轴承表面起研磨作用。

（2）刮伤——进入轴承间隙的硬颗粒或轴径表面粗糙的微观轮廓尖峰，在轴承表面划出线状伤痕。

（3）胶合——当瞬时温升过高，载荷过大，油膜破裂时或供油不足时，轴承表面材料发生黏附和迁移，造成轴承损伤。

（4）疲劳剥落——在载荷的反复作用下，轴承表面出现与滑动方向垂直的疲劳裂纹，扩展后造成轴承材料剥落。

（5）腐蚀——润滑剂在使用中不断氧化，所生成的酸性物质对轴承材料有腐蚀，材料腐蚀易形成点状剥落。

2）滑动轴承的安装、维护要点

（1）滑动轴承安装要保证轴颈在轴承孔内转动灵活、准确、平稳。

（2）轴瓦与轴承座孔要修刮贴实，整体式轴瓦压入时要防止偏斜，并用紧定螺钉固定。

（3）定期添加或者更换规定牌号的润滑油，同时保证润滑油路畅通，油路与油槽接通，以确保摩擦面润滑良好。

（4）注意清洁，修刮调试过程中凡能出现油污的机件，修刮后都要清洗涂油。

（5）轴承使用过程中要经常检查润滑、发热、振动问题。遇有发热（一般在60℃以下为正常）、冒烟、卡死以及异常振动、声响等要及时检查、分析，采取措施。

5.3.2　滚动轴承

滚动轴承用滚动摩擦取代了滑动摩擦，具有摩擦阻力小，功率耗损少，启动容易，轴向尺寸小等优点。滚动轴承已标准化、系列化，实行专业化生产，选用和更换方便，价格便宜，所以广泛用于各类机器中。

1. 滚动轴承的构造

由于应用场合、受力大小及精度等要求不同，故滚动轴承的类型和结构形式也是多种多样的。

典型的滚动轴承是由外圈1、内圈2、滚动体3和保持架4四种零件组成，如图5.19所示。内圈和外圈统称套圈。内、外圈上常制有凹槽，有限制滚动体轴向移动和降低滚动体与套圈间接触应力的作用。保持架的作用是将滚动体均匀地分隔开，减少滚动体之间的摩擦和磨损。

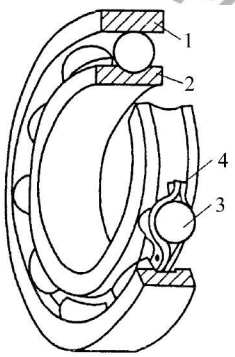


图5.19　滚动轴承的构造图

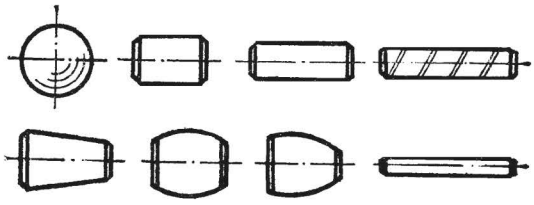


图5.20　滚动体的形状

滚动体是滚动轴承中的核心零件，它在套圈的滚道间滚动，在轴承中产生滚动摩擦。有些种类的滚动轴承，除必须有滚动体外，其他三种零件则视具体结构可有可无或者附加有某种用途的零件，如防尘盖和密封圈等。根据工作需要，滚动体可做成不同的形状，常见的滚动体形状如图5.20所示。

通常将内圈装在轴颈上与轴一起转动，外圈装在轴承座孔内固定不转动。但也有外圈转动、内圈不转动或两者都转动的情况。

2. 滚动轴承的类型及特性

滚动轴承的类型很多，分类的方法也很多。

按滚动轴承所能承受负荷的方向，可分为向心轴承和推力轴承两大类。向心轴承主要承受径向负荷；推力轴承主要承受轴向负荷。

按照轴承的公称接触角的大小，滚动轴承可分为：

向心轴承（$0°\leqslant\alpha\leqslant45°$）$\begin{cases}\text{径向接触轴承}(\alpha=0°)\\ \text{向心角接触轴承}(0°<\alpha\leqslant45°)\end{cases}$

推力轴承（$45°<\alpha\leqslant90°$）$\begin{cases}\text{轴向接触轴承}(\alpha=90°)\\ \text{推力角接触轴承}(45°<\alpha\leqslant90°)\end{cases}$

$0°<\alpha<90°$ 的轴承统称为角接触轴承。公称接触角 α 越大，轴承承受轴向载荷的能力就越大。滚动轴承受负荷时传给滚动体的合力作用线与径向平面之间的夹角称为公称接触角，如图 5.21 所示。

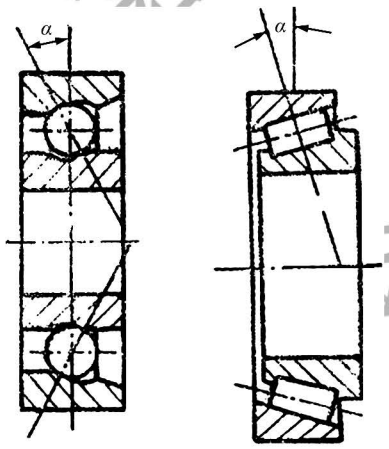


图 5.21　滚动轴承的公称接触角

按照滚动体的种类，滚动轴承可分为球轴承和滚子轴承两大类。

按轴承工作时能否调心，又可分为刚性轴承和调心轴承两大类。调心轴承的外圈内表面为球面，可适应机座轴承孔中心线与轴中心线不同心而产生的不大的偏斜。

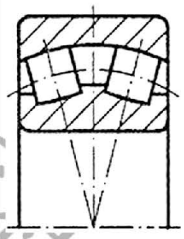
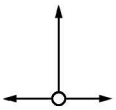
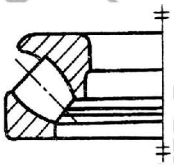
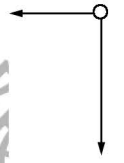
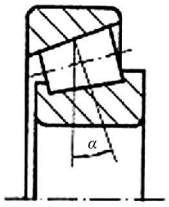
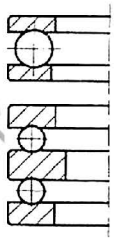
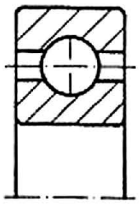
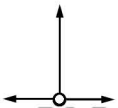
国家标准中，根据所能承受的负荷方向、公称接触角、滚动体的种类、能否调心，将滚动轴承综合分为深沟球轴承、调心球轴承、圆柱滚子轴承、调心滚子轴承、滚针轴承、螺旋滚子轴承、角接触球轴承、圆锥滚子轴承、推力角接触球轴承、推力球轴承、推力滚子轴承和推力调心滚子轴承等。

常用滚动轴承的类型、特性及应用见表 5-5。

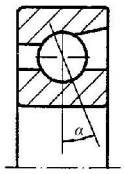
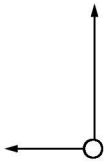
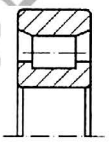
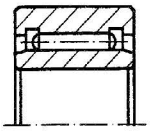
表 5-5　常用滚动轴承的类型、特性及应用

轴承类型及代号（GB/T 272—1993）	结构简图	轴承方向	基本额定动载荷比[1]	极限转速比[2]	允许角偏差	主要特性和应用
调心球轴承 1			0.6～0.9	中	2°～3°	主要承受径向载荷，同时也承受少量的轴向载荷。因为外圈滚道表面是以轴承中点为中心的球面，故能自动调心

续表

轴承类型及代号（GB/T 272—1993）	结构简图	轴承方向	基本额定动载荷比[1]	极限转速比[2]	允许角偏差	主要特性和应用
调心滚子轴承 2			1.8~4	中	1°~2.5°	能承受很大的径向载荷和少量的轴向载荷。承受能力大，具有自动调心性能
推力调心滚子轴承 3			1.7~2.2	低	允许 2°~3°	滚道是球面形的。能适应两滚道轴线间的角偏差及角运动。具有可分离部件，故该轴承为可分离型
圆锥滚子轴承 4			1.1~2.5	中	2′	能同时承受较大的径向、轴向联合载荷，因系线接触，承载能力大于“6”类轴承。内、外圈可分离，装拆方便，成对使用
推力球轴承 5			1	低	不允许	只能承受轴向载荷，而且载荷作用线必须与轴线相重合，不允许有角偏位。有两种类型：单列——承受单向推力；双列——承受双向推力。高速时，因滚动体离心力大，球与保持架摩擦发热严重，寿命较低，可用于轴向载荷大、转速不高之处
深沟球轴承 6			1	高	2′~10′	主要承受径向载荷，同时也可承受一定的轴向载荷。当转速很高而轴向载荷不太大时，可代替推力球轴承受纯轴向载荷

续表

轴承类型及代号（GB/T 272—1993）	结构简图	轴承方向	基本额定动载荷比[1]	极限转速比[2]	允许角偏差	主要特性和应用
角接触球轴承 7			1.0～1.4	高	2′～10′	能同时承受径向、轴向联合载荷，接触角越大，轴向承载力也越大。通常成对使用。可分装于两个支点或同装于一个支点上
圆柱滚子轴承 N			1.5～3	高	2′～4′	能承受较大的径向载荷，不能承受轴向载荷。因系线接触，内、外圈只允许有极小的相对偏转
滚针轴承 NA				低	不允许	只能承受径向载荷，承载能力大，径向尺寸小。一般无保持架，因而滚针间有摩擦，极限转速低。因系线接触，不允许有角偏位。可以不带内圈

注：1. 基本额定动载荷比：指同一尺寸系列各种类型和结构形式的轴承基本额定动载荷与深沟球轴承的基本额定动载荷之比。

2. 极限转速比：指同一尺寸系列 0 级各类轴承脂润滑时的极限转速与深沟球轴承脂润滑时极限转速之比。高——90%～100%；中——60%～90%；低——60%以下。

3. 滚动轴承的代号

为了表示滚动轴承的类型、系列、结构特点及尺寸等，国家标准（GB/T 272—1993）中规定了用拉丁字母和一组数字作为轴承代号。它由前置代号（前段）、基本代号（中段）和后置代号（后段）三部分组成，其排列方式如下：

前置代号　　基本代号　　后置代号

1）前置代号

前置代号在基本代号段的左侧用字母表示，它表示成套轴承的分部件。例如，L 表示可分离轴承的分离内圈或外圈，例：LN207，表示（0）2 尺寸系列的单列圆柱滚子轴承的可分离外圈。K 表示滚子和保持架组件，例：K81107，表示推力圆柱滚子轴承的滚子与保持架组件。

中国民航出版社有限公司版权所有

2）基本代号

基本代号表示轴承的基本类型、结构和尺寸。一般由 5 个数字或字母加 4 个数字表示。基本代号由轴承类型代号、尺寸系列代号和内径代号组成，其排列方式如下：

轴承类型代号　　尺寸系列代号　　内径代号

轴承类型代号用数字或字母来表示。表 5-5 中列出了九种基本类型的滚动轴承。

除了表 5-5 列出的九种类型的滚动轴承，还有推力圆柱滚子轴承，其代号为 8；外球面球轴承，其代号为 U；四点接触球轴承，其代号为 QJ。

尺寸系列代号由轴承的宽（高）度系列代号和直径系列代号组合而成，用两位阿拉伯数字来表示，见表 5-6。它的主要作用是区别内径相同而宽度和外径不同的轴承。

内径代号表示轴承的公称内径，一般用两位阿拉伯数字表示，对于轴承公称内径，大于 10 mm 而小于 500 mm 的轴承，其代号表示方法见表 5-7。

表 5-6　尺寸系列代号

			向心轴承								推力轴承			
			宽度系列								高度系列			
			宽度尺寸依次递增→								高度尺寸依次递增→			
			8	0	1	2	3	4	5	6	7	9	1	2
直径系列	外径尺寸依次递增↓	7			17		37							
		8	—	08	18	28	38	48	58	68	—	—	—	—
		9	—	09	19	29	39	49	59	69	—	—	—	—
		0		00	10	20	30	40	50	60	70	90	10	
		1	—	01	11	21	31	41	51	61	71	91	11	—
		2	82	02	12	22	32	42	52	62	72	92	12	22
		3	83	03	13	23	33				73	93	13	23
		4	—	04	—	24	—	—	—	—	74	94	14	24
		5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	95	—	—

注：表中“—”表示不存在此种组合。

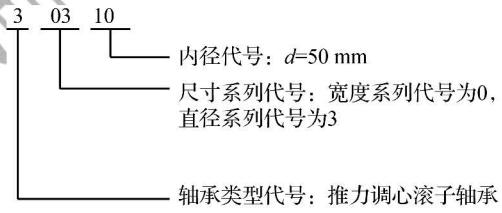
表 5-7　滚动轴承内径代号（摘自 GB/T 272—1993）

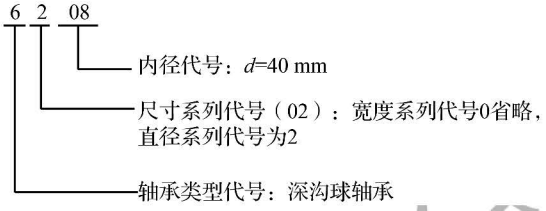
轴承公称内径（mm）	内径代号	示例
0.6~10（非整数）	用公称内径毫米数直接表示，在其与尺寸系列代号之间用“/”分开	深沟球轴承 618/2.5　　$d = 2$
1~9（整数）	用公称内径毫米数直接表示，对深沟及角接触轴承 7、8、9 直径系列，内径与尺寸系列代号之间用“/”分开	深沟球轴承 625　　$d = 5$； 深沟球轴承 618/5　　$d = 5$

续表

轴承公称内径（mm）		内径代号	示例	
10～17	10	00		
	12	01	深沟球轴承 6200	d = 10；
	15	02	深沟球轴承 6202	d = 15
	17	03		
20～480（22、28、32 除外）		公称内径除以 5 的商数，商数为个位数，需在商数左边加“0”，如 08	调心滚子轴承 23208 深沟球轴承 6215	d = 40； d = 75
500 以及 22、28、32		用公称内径毫米数直接表示，在其与尺寸系列代号之间用“/“分开	调心滚子轴承 230/500 深沟球轴承 62/22	d = 500； d = 22

轴承基本代号举例：





3）后置代号

后置代号为补充代号。轴承在结构形状、尺寸公差、技术要求等有改变时，才在基本代号右侧予以添加。后置代号一般用字母或字母加数字表示，并且与基本代号相距半个汉字距离（代号中有符号“-”“/”除外）。例：72211AC、6205-2Z/P6、22308/P63。后置代号共分 8 组，各组排列顺序及内容见表 5-8。

表 5-8　后置代号顺序及内容

后置代号顺序	1	2	3	4	5	6	7	8
内容	内部结构	密封与防尘、套圈变形	保持架及其材料	轴承材料	公差等级	游隙	配置	其他

第 1 组表示内部结构变化，以角接触球轴承的接触角变化为例，如公称接触角 α = 40°时，代号为 B；α = 25°时，代号为 AC；α = 15°时，代号为 C。

第 5 组为公差等级，按精度由低到高依次代号为/P0、/P6、/P6x、/P5、/P4、/P2。/P0 级为普通级，在代号标注中省略不注，如：6203 表示该轴承的公差等级为/P0级。

第 6 组为游隙，其代号为/C1、/C2、/C3、/C4、/C5，分别表示游隙 1、2、3、4、5 组，如 6210/C3。游隙 0 组为基本游隙，无代号，如 6210。

例：说明 62303、72211AC、LN308/P6x 及 59220 等代号的含义。

解：62303，6 类（深沟球）轴承，尺寸系列 23（宽度系列 2，直径系列 3），内径 17 mm，精度 P0 级。

72211AC，7 类（角接触球）轴承，尺寸系列 22（宽度系列 2，直径系列 2），内径 55 mm，接触角 $\alpha = 25°$，精度 P0 级。

LN308/P6x，N 类（单列圆柱滚子）轴承，L 表示可分离轴承的分离内圈或外圈，尺寸系列（0）3（宽度系列 0，直径系列 3），内径 40 mm，精度 P6x 级。

59220，5 类（推力球）轴承，尺寸系列 92，高度系列 9，直径系列 2，内径 100 mm，精度 P0 级。

4. 滚动轴承的轴向固定

滚动轴承的轴向固定都是通过轴承内、外圈分别与轴和座孔的轴向固定来实现的。

1）内圈与轴的固定

内圈在轴上的轴向固定方法，如图 5.22 所示。

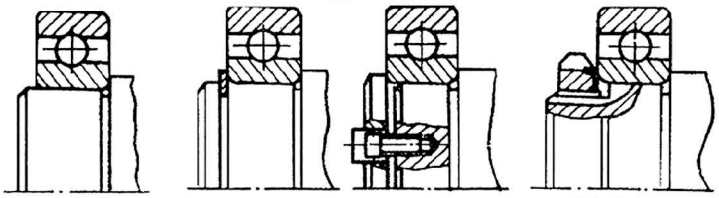


图 5.22　滚动轴承内圈与轴的固定

图 5.22（a）为内圈的一侧用轴肩固定，而另一侧不固定，用于承受单向轴向负荷的场合；图 5.22（b）为用弹性挡圈和轴肩双向固定，这种方法结构紧凑，装拆方便，适用于承受轴向力较小的场合；图 5.22（c）为用轴端挡圈和轴肩双向固定，适用于直径较大、轴向负荷较大的场合；图 5.22（d）为用锁紧螺母和轴肩双向固定，这种固定方法装拆方便，适用于轴向负荷大、转速高的场合。

2）外圈与座孔的固定

外圈在支座的轴承孔内的轴向固定方法，如图 5.23 所示。图 5.23（a）采用轴承端盖压紧轴承外圈，这是轴承外圈广泛采用的固定方法，适用于承受单向轴向负荷的场合；图 5.23（b）采用轴承端盖和轴承座孔的凸肩使轴承外圈双向固定，适用于高速并承受很大的轴向负荷的情况；图 5.23（c）采用弹性挡圈和轴承座孔的凸肩使轴承外圈双向固

中国民航出版社有限公司版权所有

定，适用于轴向负荷较小的场合。

选择轴承轴向固定的方法时，主要考虑轴向负荷的大小和方向（单向或双向）、转速的高低、轴承的类型以及支承的固定形式等。

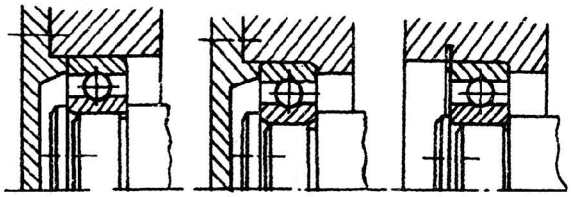


图 5.23　轴承外圈的轴向固定

5. 滚动轴承的预紧

轴承的预紧是指安装时在轴承中产生并保持一定的轴向力，以消除游隙并在滚动体和内外圈接触处产生预变形，这样就可以提高轴承的刚性和旋转精度，减小机器工作时轴的振动。

一般向心角接触轴承都是成对预紧的。常用的预紧方法如图 5.24 所示。图 5.24（a）采用螺纹和凸台夹紧一对圆锥滚子轴承的外圈预紧；图 5.24（b）采用弹簧预紧，这种方法可得到较稳定的预紧力；图 5.24（c）是在一对轴承中间装入长度不等的套筒预紧，其预紧力可由两套筒的长度差来控制；图 5.24（d）是夹紧一对磨窄了外圈的轴承预紧。

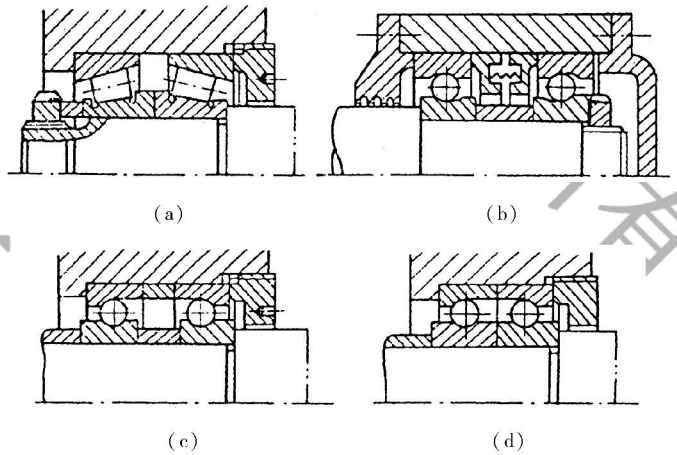


图 5.24　滚动轴承的预紧方法

6. 滚动轴承的配合与装拆

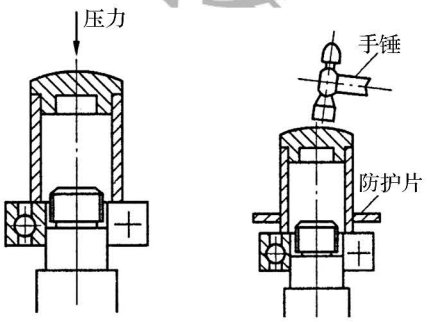
1）滚动轴承的配合

滚动轴承的配合是指内圈与轴颈、外圈与轴承座孔的配合。因为滚动轴承是标准件，

所以规定轴承内圈与轴颈的配合为基孔制，外圈与座孔的配合为基轴制。通常内圈与轴颈的配合选 N6、M6、K6、Js6 等过盈配合；外圈与座孔的配合选 K7、J7、H7、G7 等较松的配合，以便外圈相对于座孔在工作中产生微小的转动来改善受力分布。选择配合时，可参考实践经验和机械设计手册。

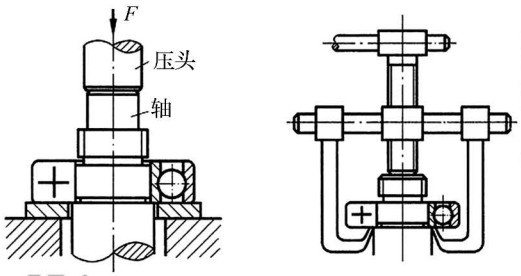
2）滚动轴承的装拆

滚动轴承装拆时，压力应直接加于配合较紧的轴承套圈的端面上，不允许通过滚动体来传递装拆压力，以免损伤轴承和其他零件。通常轴承内圈与轴颈配合较紧，故应在内圈上施加压力。将轴承压套在轴颈上的安装方法有两种：一种是压入法，可用压力机安装，也可用软锤直接打入或用手锤和套管进行安装，如图 5.25 所示；另一种是热套法，对于尺寸较大的轴承，为了安装方便，常把轴承放在 80～120℃的油中加热使内圈胀大，进行热装。也可用干冰冷却轴颈而后冷装。拆卸轴承须用专用的拆卸工具，如压力机或称作“拉马”的拆卸器（见图 5.26）。



（a）将轴承压装在轴上　（b）用手锤敲击安装轴承

图 5.25　滚动轴承的安装



（a）用压力机拆卸轴承　（b）用拆卸器拆卸轴承

图 5.26　滚动轴承的拆卸

7. 滚动轴承的失效形式和维护

1）滚动轴承的失效形式

（1）疲劳点蚀。轴承工作时，滚动体与内外套滚道接触处产生脉动循环交变应力，当应力循环达到某一数值后，使表层下产生疲劳裂纹，并逐渐扩展到表面从而在接触表面形成疲劳点蚀。对于一般运转的轴承，疲劳点蚀是主要的失效形式。

（2）塑性变形。在低速、重载和冲击载荷作用下，滚动体和滚道接触处的局部应力会超过材料的屈服极限而出现塑性变形（凹坑）。塑性变形超过一定值就使轴承失效。

（3）磨损。使用中维护、保养不当或润滑密封不良，会使轴承严重磨损而失效。

2）滚动轴承的安装与维护

（1）一定要保证滚动轴承承受均匀的受载，在机器的启动以及工作过程中，保证载荷稳定，切忌出现忽大忽小。

（2）注意滚动轴承的润滑以及密封措施。使用相同牌号的润滑剂，防止润滑剂过期或者润滑剂不足的情况发生。避免机器长期闲置不用，防止轴承生锈。定期进行轴承密封

元件的检查，观察是否有漏油或者是灰尘进入，必要时要更换密封元件。

（3）对轴承进行正确的安装以及拆卸工作。在安装之前，要对轴承进行清洗。安装时，一定要保证轴承所受的压力平均分布，防止出现单方向压力，造成轴承倾斜或者是安装偏心。另外，保证轴颈和轴承座孔之间相互配合合适。在安装结束后，要对其进行试运转，如果温度过高，则是游隙太小的原因造成；如果出现异常响声，则是游隙太大的原因造成。另外，在轴承损坏之后进行拆卸的过程中，切忌不可通过滚动体传递施压，防止出现轴承保持架损坏。必要时要利用拉拔器。

知识总结	随堂练习

5.4 键和花键

键和花键主要用来连接轴与带毂零件，如齿轮和带轮等，以实现周向固定从而传递运动和转矩，或实现轴上零件的轴向移动。

5.4.1 键

键是一种标准零件。键的连接按键的结构形式可分为平键连接、半圆键连接、楔键连接。

1. 平键连接

平键的下半部分装在轴上的键槽中，上半部分装在轮毂的键槽中。键的顶面与轮毂之间有少量间隙，键靠侧面传递扭矩。轮毂与轴通过圆柱表面配合实现轮毂中心与轴心的对中，故定心性较好。

平键的两侧面是工作面，上、下表面为非工作面。

根据用途，平键又可分为普通平键、导向平键和滑键。

1）普通平键

普通平键用于静连接。其端部形状有圆头（A 型）、方头（B 型）和单圆头（C 型）

中国民航出版社有限公司版权所有

三种，如图 5.27 所示。A 型和 C 型平键都用于立铣刀加工的键槽中，但 A 型用于轴的中部，C 型用于轴的端部，B 型用于盘铣刀加工的键槽中。

普通平键结构简单，对中性好，易于加工，装拆方便，因而应用最广。

普通平键和键槽尺寸已标准化。

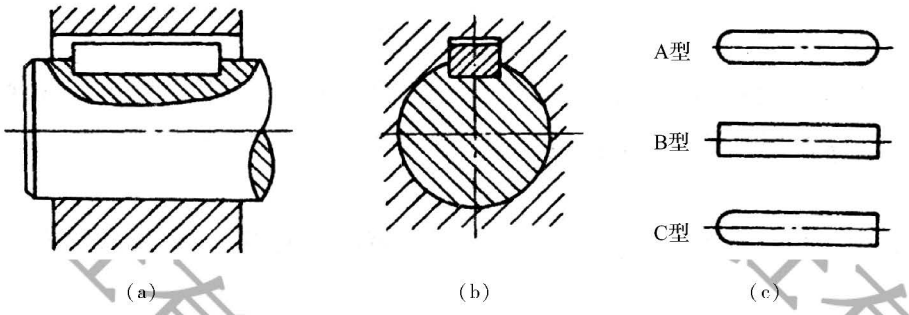


图 5.27　普通平键连接

2）导向平键

导向平键用于动连接。当被连接的毂类零件在工作中必须在轴上作轴向移动时，则可采用导向平键。导向平键是一种较长的平键。用螺钉将导向平键固定在轴的键槽中，如图 5.28 所示。

为了卸键方便，键中部制有一螺孔，用于起键。带毂零件可以沿着导向平键移动。导向平键通常用于轴上零件轴向移动量不大的场合，如变速箱中的滑移齿轮。

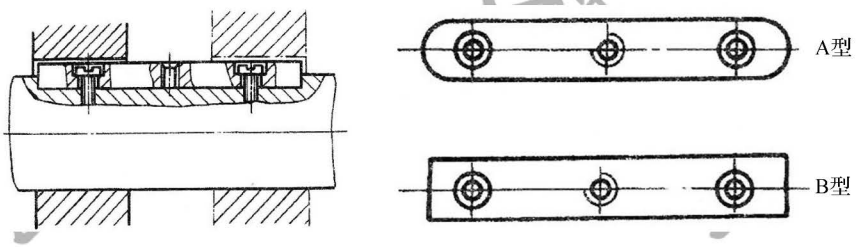


图 5.28　导向平键

3）滑键

当零件需滑移的距离较大时，因所需导向平键的长度过大，制造困难，故宜采用滑键，如图 5.29 所示。滑键固定在轮毂上，轴上零件带键在轴上的键槽中作轴向移动。用于轴上零件轴向移动量较大的场合。

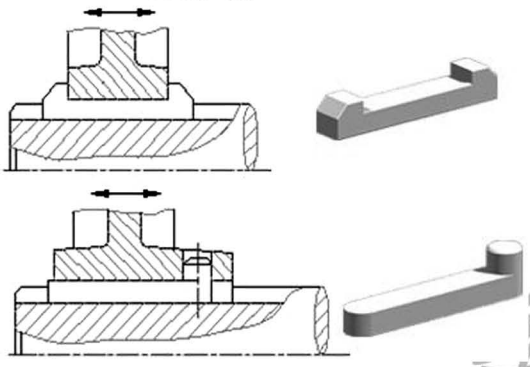


图 5.29　滑键

2. 半圆键连接

键呈半圆形，其侧面为工作面，键能在轴上的键槽中绕其圆心摆动，以适应轮毂上键槽的斜度，安装方便。常用于锥形轴端与轮毂的连接。如图 5.30 所示。

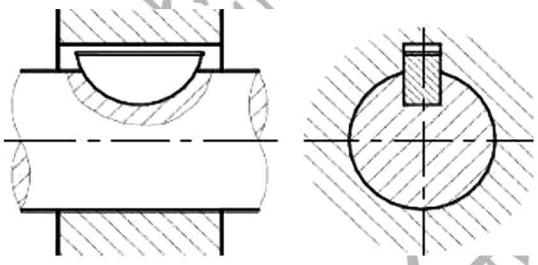


图 5.30　半圆键

轴上键槽用尺寸与半圆键相同的半圆键槽铣刀铣出，因而键在槽中能绕其几何中心摆动以适应轮毂中键槽的斜度。半圆键工作时，靠侧面来传递转矩。工艺性较好，装配方便；但轴上槽较深对轴的强度削弱较大。一般用于轻载静连接，适用轴的锥形端部与轮毂的连接。

3. 楔键连接

楔键的上、下表面为工作面，两侧面为非工作面。键的上表面与键槽底面均有1∶100的斜度。工作时，键的上下两工作面分别与轮毂和轴的键槽工作面压紧，靠其摩擦力和挤压传递扭矩。如图 5.31 所示。

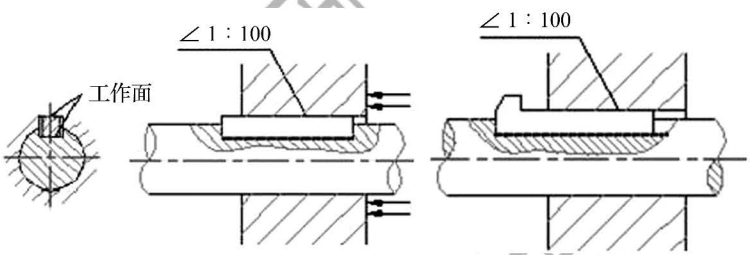


图 5.31　楔键

装配时需打入，靠楔紧作用传递转矩；能轴向固定零件和传递单方向的轴向力。但使轴上零件与轴的配合产生偏心与偏斜。用于精度要求不高、转速较低时传递较大的、双向的或有振动的转矩。有钩头的用于不能从另一端将键打出的场合。钩头供拆卸用，应注意加保护罩。

4. 键的失效形式及处理方法

对于静连接的普通平键连接、半圆键连接，其主要失效形式是工作面（键、轴、轮毂三者中较弱）被压溃，有时也会出现键的剪断。用于动连接的导向平键的主要失效形式是磨损。楔键连接的主要失效形式也是磨损。

当采用的键强度不够时，可增加键的长度。当强度不够而又不能增加键长时，可增加键的数目，如可采用两个平键按 180°对称布置。也可以通过将平键连接改为花键连接来增大强度，提高传动能力。

5.4.2　花键

1. 花键连接的类型、特点和应用

花键连接是将具有均布的多个凸齿的轴置于轮毂相应的凹槽中所构成的连接，由内花键和外花键组成，其工作面是键齿的侧面。内、外花键均为多齿零件，在内圆柱表面上的花键为内花键，在外圆柱表面上的花键为外花键，如图 5.32 所示。

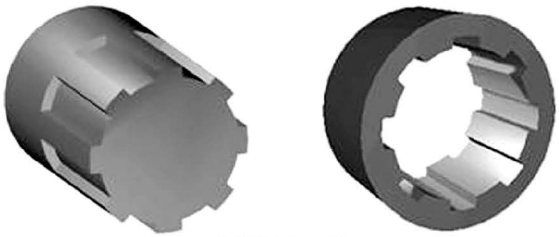


图 5.32　外花键和内花键

由于结构形式和制造工艺的不同，与平键连接比较，花键连接在强度、工艺和使用方面有下列特点：

（1）因为在轴上与毂孔上直接而均匀地制出较多的齿与槽，故连接受力较为均匀；

（2）因槽较浅，齿根处应力集中较小，轴与毂的强度削弱较少；

（3）齿数较多，总接触面积较大，因而可承受较大的载荷；

（4）轴上零件与轴的对中性好，这对高速及精密机器很重要；

（5）导向性好，这对动连接很重要；

（6）可用磨削的方法提高加工精度及连接质量；

（7）制造工艺较复杂，有时需要专门设备，成本较高。

显然，花键连接是平键连接在数目上的发展，适用于定心精度要求高、传递转矩大或经常滑移的连接。花键连接是多齿传递载荷，故比平键连接的承载能力高，定心性和导向性好，对轴的削弱小（齿浅、应力集中小）。

2. 花键的分类

花键已标准化。按齿形的不同，花键分为矩形、渐开线形和三角形三种，其中以矩形花键应用最广。

1）矩形花键

按齿高的不同，矩形花键的齿形尺寸在标准中规定两个系列，即轻系列和中系列。轻系列的承载能力较低，多用于静连接或轻载连接；中系列用于中等载荷。

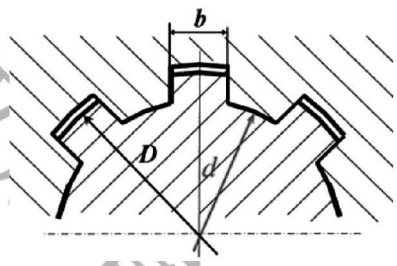


图 5.33　矩形花键

矩形花键的定心方式为小径定心，即外花键和内花键的小径为配合面。其特点是定心精度高，定心的稳定性好，能用磨削的方法消除热处理引起的变形，如图 5.33 所示。

矩形花键连接是应用最为广泛的花键连接，如用于航空发动机、汽车、燃气轮机、机床、工程机械、拖拉机、农业机械及一般机械传动装置等。

2）渐开线花键

渐开线花键的齿廓为渐开线，分度圆压力角有 30°及 45°两种，齿顶高分别为 0.5m 和 0.4m（m 为模数），如图 5.34 所示。渐开线花键可以用制造齿轮的方法来加工，工艺性较好，易获得较高的制造精度和互换性。

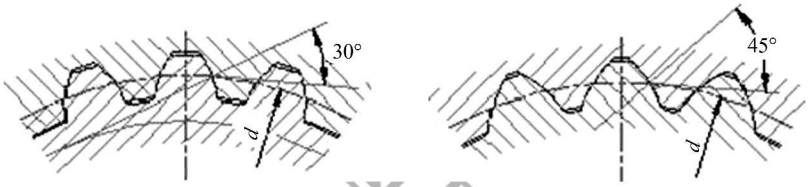


图 5.34　渐开线花键

渐开线花键的定心方式为齿形定心（外径定心）。受载时齿上有径向力，能起自动定心作用，有利于各齿受力均匀，强度高，寿命长。

渐开线花键用于载荷较大，定心精度要求较高以及尺寸较大的连接，如航空发动机、燃气轮机、汽车等。压力角 45° 的花键工作面高度小，承载能力较低，多用于轻载、小直径和薄型零件的连接。

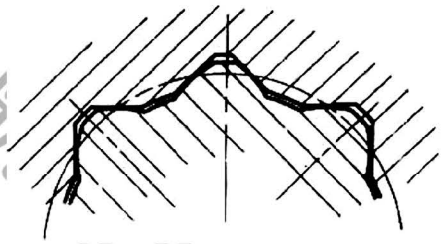


图 5.35　三角形花键

3）三角形花键

内花键齿形为直线齿形，外花键齿形为压力角等于 45° 的渐开线，如图 5.35 所示。三角形花键只用齿侧定心。三角形花键的键齿小而多，承载能力较低，常用于直径较小或薄壁零件间的连接。

知识总结	随堂练习

5.5　联轴器

联轴器是用来连接驱动轴和从动轴使它们一同旋转，并传递运动和转矩的一种机械装置。用联轴器连接的两轴只有在机器停车后，经拆卸才能使两轴分开。驱动轴一般是电动机、柴油机、蒸汽机等，或是齿轮箱的输出轴。从动轴一般是水泵、空压机、鼓风机、轮毂、齿轮箱等的输入轴。

联轴器广泛用于机械传动中，在飞机操纵系统中也得到广泛应用。

通常按联轴器内部是否包含弹性零件分为刚性联轴器和弹性联轴器两大类。

5.5.1　刚性联轴器

刚性联轴器即将两根设备轴以刚性的方式来连接，具有较高的传动精度（能同步传

中国民航出版社有限公司版权所有

动），补偿轴间偏差的作用有限，适用于载荷平稳或有轻微冲击的两轴连接。刚性联轴器按是否具有补偿两轴相对位移的能力，分为固定式和可移式（补偿式）两种。

1. 固定式刚性联轴器

固定式刚性联轴器构造简单，成本低，但不具有补偿两轴相对位移的能力，不能缓冲吸振，对两轴的同轴度要求较高。固定式刚性联轴器有套筒式联轴器和凸缘式联轴器等几种。

1）套筒联轴器

套筒联轴器利用公用套筒以键或销连接两轴，如图 5.36 所示。它的径向尺寸小，装拆时轴需作轴向移动。一般用于低速、轻载、直径小于 60~100 mm 轴的连接。

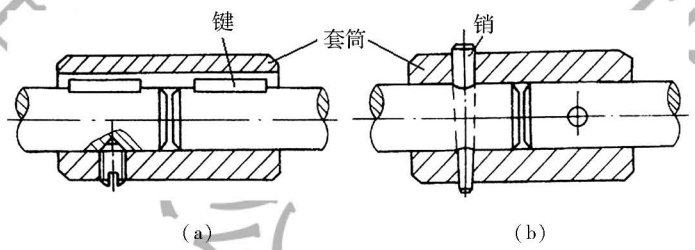


图 5.36　套筒联轴器

2）凸缘联轴器

凸缘联轴器是把两个分别具有凹凸缘的半联轴器用键与两轴连接，然后用螺栓把两个半联轴器连成一体，如图 5.37 所示。

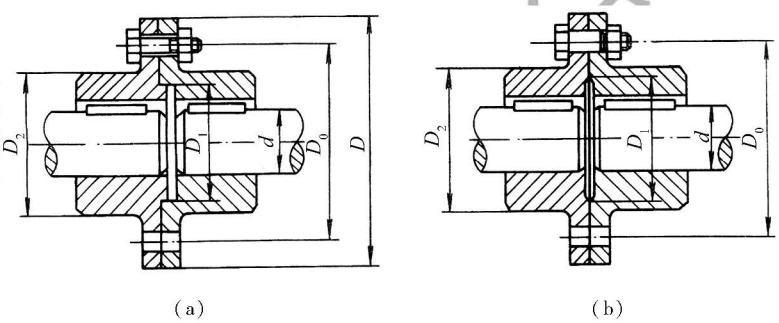


图 5.37　凸缘联轴器

凸缘联轴器对中方法之一是通过一个半联轴器上的凸肩与另一半联轴器上的凹槽相配合而对中［见图 5.37（a）］；凸缘联轴器对中方法之二是通过铰制孔用螺栓与孔的紧配合对中［见图 5.37（b）］。

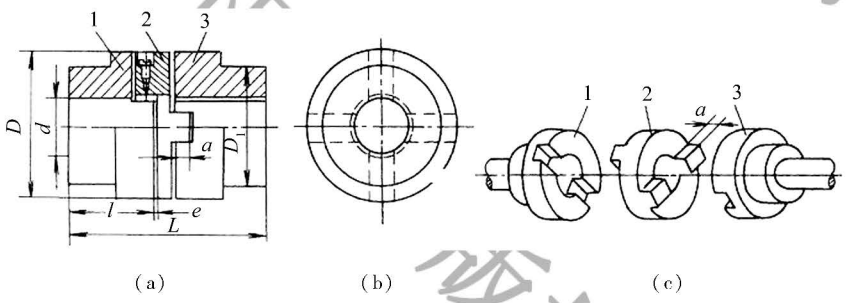
第一种方法在装拆时，轴需要轴向移动；而第二种方法则不需要。该联轴器适用于扭矩大、转速较低、工作平稳、刚性大的轴。

2. 可移式刚性联轴器

可移式刚性联轴器具有补偿两轴相对位移的能力。它是利用联轴器工作零件之间构成的动连接来补偿两轴的偏斜和位移的。可移式刚性联轴器有十字滑块联轴器、齿轮联轴器和万向联轴器等几种。可移式刚性联轴器又称为无弹性元件挠性联轴器。

1）十字滑块联轴器

十字滑块联轴器由两个端面开有凹槽的半联轴器 1、3 和一个两端有凸块的中间圆盘 2 组成，如图 5.38 所示。中间圆盘的两端凸块位于互相垂直的两个直径方向上，在装配时分别与 1、3 的凹槽相嵌合，由于凸牙可在槽中滑动，因此，可以补偿安装和运转中产生的两轴线的偏差。在两轴线有偏移的情况下，中间圆盘作较高转速的偏心回转，产生了离心力从而增大动载荷及磨损。为了减小离心力，中间圆盘制成空心的。



(a)　　(b)　　(c)

图 5.38　十字滑块联轴器

十字滑块联轴器结构简单、价廉，传递扭矩较大、装拆方便，但不能进行调节，同心度要求较高；用于连接低速（n <250 r/min）、无剧烈冲击、刚度大的轴，两轴径向相对位移不大于 0.01d +0.25 mm（d 为轴径），许用相对角位移为 30′。

2）齿轮联轴器

齿轮联轴器由齿数相等的两个具有渐开线外齿的轴套 2、4 和两个具有渐开线内齿的外壳 1、3 相啮合而组成，如图 5.39 所示。轴套 2、4 用键分别与主、从动轴相连接，两个外壳则用螺栓连接在一起。外壳内贮润滑油，以润滑轮齿。由于外齿的齿顶是制成球面的且啮合齿间有较大的侧隙，所以齿轮联轴器两轴线允许有较大的综合位移。

齿轮联轴器能传递很大的转矩和补偿较大的位移，在高速下工作可靠，且外形尺寸紧凑，易于安装，因此广泛应用于高速及重载机械，如飞机、坦克中，但是齿轮联轴器结构较复杂，制造成本高，且不宜用在启动频繁、正反转多变的场合。

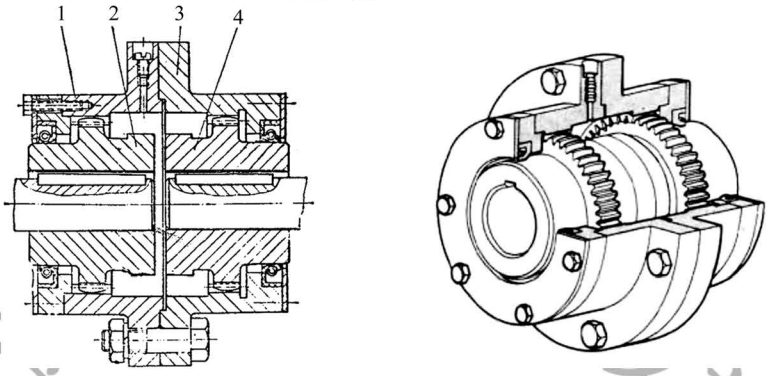
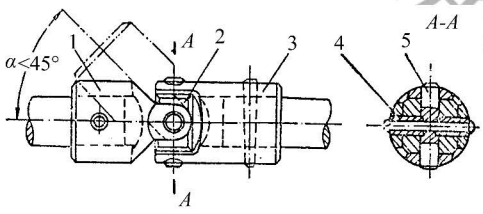


图 5.39　齿轮联轴器

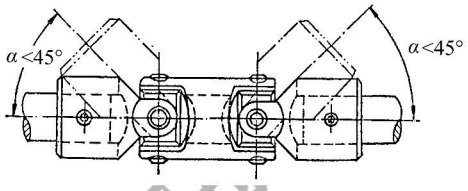
3）万向联轴器

万向联轴器由两个叉形接头 1、3，一个十字形零件 2 和销轴 4、5 所组成，如图 5.40 所示。销轴 4 与 5 互相垂直配置，并分别把两个叉形接头与中间件 2 连接起来，构成联轴器。由于叉形接头和销轴之间构成可动铰连接，因而允许两轴间有较大的角位移，其角度可达 35°~45°。这种连接的主要缺点是当两轴线有夹角时，主动轴等速转动而从动轴角速度将在一定范围内作周期性的变化。因而产生附加动载荷，使传动不平稳。为消除这一缺点，常将万向联轴器成对使用，构成双万向联轴器，如图 5.40（b）所示。但在安装时必须保证主动轴和从动轴与中间轴轴线间的夹角相等（见图 5.41），中间轴两端的叉形接头位于同一平面内。

万向联轴器有较大的角向补偿能力，结构紧凑，维护方便，传动效率高，能传递较大转矩，广泛用于飞机、车辆和机床中。



（a）



（b）

图 5.40　万向联轴器

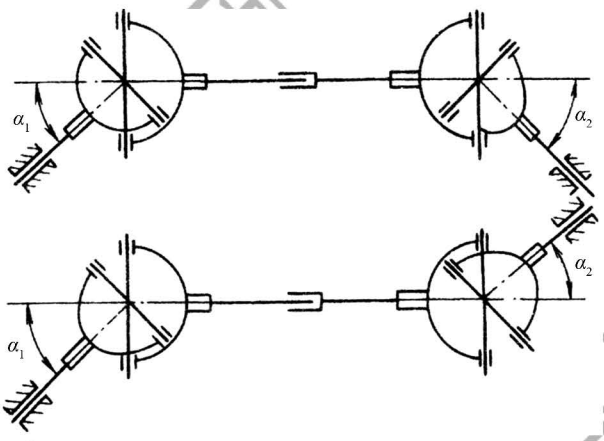


图 5.41　双万向联轴器的安装角度

5.5.2　弹性联轴器

弹性联轴器装有弹性零件，具有缓冲、消振的功能，还可以在不同程度上补偿两轴间的偏差，适用于载荷不平稳并有严重冲击和振动的两轴连接。根据弹性零件材料类型可分为金属弹性元件联轴器和非金属弹性元件联轴器。

1. 金属弹性元件联轴器

金属弹性元件联轴器除了具有较好的缓冲减震性能外，承载能力较大，适用于速度和载荷变化较大及高温或低温场合。主要有以下几种类型：弹性阻尼簧片联轴器、挠性杆联轴器、膜片联轴器和蛇形弹簧联轴器等。

特点如下：

（1）弹性元件的强度比较高，与传递同等扭矩的其他联轴器相比，不但体积小，而且结构紧凑。

（2）性能非常稳定，而且寿命也很长。

（3）制造工艺比较复杂，成本比较高。

（4）金属弹性元件常见的是膜片、波纹管、连杆等。

应用场合如下：

（1）大功率和高转速的泵和风机。

（2）冲击扭矩较大，负载变化剧烈的机械。

（3）精密传动的机械和数据传输系统。

（4）高温、高精度传动要求的场合。

金属弹性元件联轴器中最常用的是膜片联轴器。膜片是膜片联轴器的核心部件，按膜片的形状可分为束腰式、圆环式、分离连杆式、轮辐式、多边式。膜片联轴器靠膜片的弹

性变形来补偿所连两轴的相对位移，是一种高性能的金属弹性元件挠性联轴器，不用润滑，结构较紧凑，强度高，使用寿命长，无旋转间隙，不受温度和油污影响，具有耐酸、耐碱、防腐蚀的特点，适用于高温、高速、有腐蚀介质工况环境的轴系传动，广泛用于各种机械装置的轴系传动，如水泵（尤其是大功率、化工泵）、风机、压缩机、液压机械、石油机械、印刷机械、纺织机械、化工机械、矿山机械、冶金机械、航空（直升机）、舰艇高速动力传动系统，经动平衡后应用于高速传动轴系已比较普遍。如图 5.42 所示。

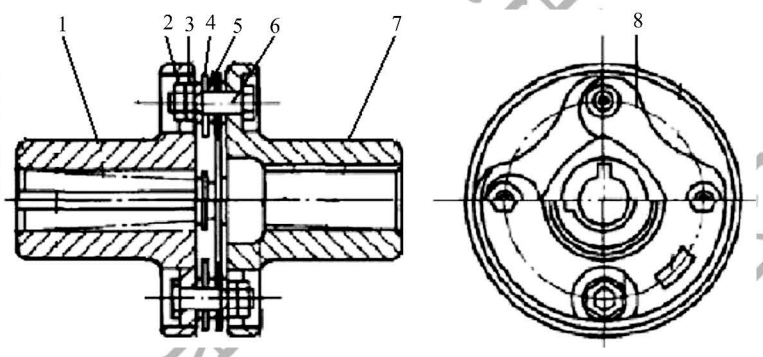


图 5.42　膜片联轴器示意图

注：1、7—半联轴器；2—扣紧螺母；3—六角螺母；4—隔圈；5—支撑圈；6—六角头铰制孔螺栓；8—膜片

根据联轴器的工作状况，可以将联轴器的受力总结为下列四种：

（1）角向安装误差引起的弯曲应力。在轴线角向的安装实际误差，使膜片沿轴线方向发生周期性弯曲变形，而且它是决定联轴器膜片疲劳寿命的主要原因。

（2）轴向安装的误差，使膜片沿轴线方向发生弯曲变形。

（3）高速旋转时由于惯性所产生的离心应力。

（4）扭矩产生的薄膜应力。

膜片联轴器由几组膜片（不锈钢薄板）用螺栓交错地与两半联轴器连接，每组膜片由数片叠集而成，膜片分为连杆式和不同形状的整片式。膜片联轴器靠膜片的弹性变形来补偿所连两轴的相对位移，是一种高性能的金属强元件挠性联轴器。

（a）单膜片联轴器　　（b）双膜片联轴器

图 5.43　膜片联轴器

单膜片联轴器如图 5.43（a）所示。此外，有两个膜片的，也有三个膜片的，中间有一个或两个刚性元件，两边再连在轴套上，图 5.43（b）所示为双膜片联轴器。

单膜片联轴器和双膜片联轴器的不同之处是处理各种偏差的能力不同。单膜片联轴器不太适应偏心，而双膜片联轴器可以同时曲向不同的方向，以此来补偿偏心。

膜片联轴器的特点如下：

（1）高刚性、高转矩、低惯性；

（2）采用环形或方形弹性不锈刚片变形；

（3）大扭矩承载，高扭矩刚性和卓越的灵敏度；

（4）零回转间隙，顺时针和逆时针回转特性相同；

（5）免维护、超强抗油和耐腐蚀性；

（6）双不锈钢膜片可补偿径向、角向、轴向偏差，单膜片则不能补偿径向偏差。

2. 非金属弹性元件联轴器

非金属弹性元件联轴器的弹性元件是用橡胶、聚氨酯和尼龙等材料制成。

优点：弹性模量范围大，质量轻、内摩擦大、阻尼性能好、单位体积储存的变形能多、无机械摩擦、无需润滑等。

缺点：非金属材料强度低、承载能力小，耐高、低温性能差，易老化变质，使用寿命短，动力性能较难控制。

非金属弹性元件联轴器分为弹性套柱销联轴器和弹性柱销联轴器两种。

1）弹性套柱销联轴器

弹性套柱销联轴器的构造与凸缘联轴器相似，只是用套有弹性圈的柱销代替了连接螺栓，如图 5.44 所示。橡胶圈的变形可以补偿两轴线的径向和角偏斜；另外，在安装这种联轴器时，留有间隙 C，以便两轴作少量的轴向位移。这种联轴器所允许的最大偏移量为径向允许 $Y=0.3\sim0.6$ mm，轴向允许 $X=2\sim7.5$ mm，角偏斜允许 $\alpha=1°$。

弹性套柱销联轴器结构简单，安装方便，更换容易，尺寸小，重量轻。弹性套变形量不大，与销孔的配合间隙不宜过大，缓冲和减震性不高，补偿两轴之间的相对位移较小。广泛应用于冲击载荷不大，由电动机驱动，底座刚性好，对中精确的各种中小功率传动轴系中。

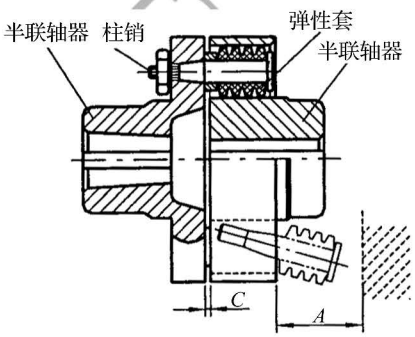


图 5.44　弹性套柱销联轴器

2）弹性柱销联轴器

弹性柱销联轴器的机构与弹性套柱销联轴器相同，不过其柱销本身是弹性元件，如图 5.45 所示。柱销的材料有尼龙、酚醛胶木棒和硬木，尼龙制的柱销有一定的弹性能补偿两轴间相对位移，并具有一定缓冲、减震能力。柱销联轴器结构简单，制造、装配及维修都比较方便，适用于轴向窜动较大，启动频繁，需经常正、反转的传动等场合。

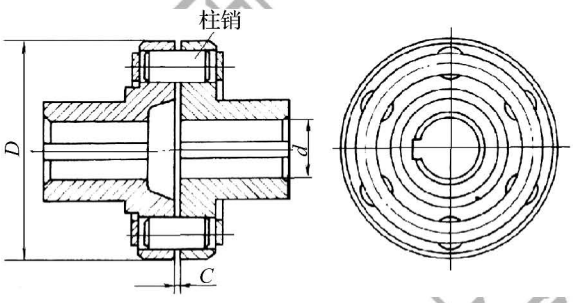


图 5.45　柱销联轴器

知识总结	随堂练习

5.6　离合器

离合器是一种随时能使主、从动轴两者接合或分开的机械传动装置。它通常用于传动系统的启动、停止、变速或换向等场合。

离合器的类型很多，常用的离合器有牙嵌离合器、摩擦离合器和超越离合器三种。

5.6.1　牙嵌离合器

牙嵌离合器是用两个可以互相齿合的端面侧齿接合与分离来实现两轴离合的。它主要由两个端面上有齿牙的半离合器组合，如图 5.46 所示。左边半个离合器 1 固定在主动轴上，右边半个离合器 3 利用导向平键或花键与从动轴连接，并由操纵机构 4 使其作轴向移动，以实现两个半离合器的离合。另外，在主动轴端的半离合器上固定一个对中环 2，使两个半离合器容易对中。

中国民航出版社有限公司版权所有

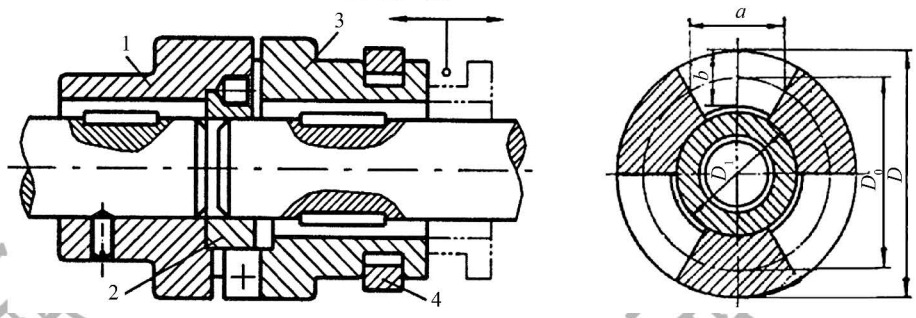


图 5.46　牙嵌离合器

牙嵌离合器的牙型主要有矩形、梯形和锯齿形三种，如图 5.47 所示。矩形牙无轴向分力，故不便于接合和分离，磨损后无法补偿，故应用较少；梯形牙强度高，能传递较大的扭矩，能自动补偿牙的磨损与间隙，从而减小冲击，故应用较广；锯齿牙的强度最高，能传递更大的转矩，但只能传递单向扭矩。

牙嵌离合器的牙数一般为 3～60，梯形、矩形和锯齿牙数一般为 3～15。传递转矩愈大，牙数应愈少；要求接合时间愈短，牙数应愈多。

牙嵌离合器的优点是结构简单，尺寸小，没有滑动，并能传递较大的转矩；其缺点是在运转中接合时有冲击，转速差愈大愈严重，故适用于两轴转速差较小或静止时接合的场合。另外，牙嵌离合器不适合外露，因为，一旦灰尘进入会影响牙的啮合，从而影响工作效率和精度，同时也会减小离合器的寿命。因此，此离合器不要用在污染严重、存在很多灰尘的环境中，如果避免不了用这种离合器，要注意密封。

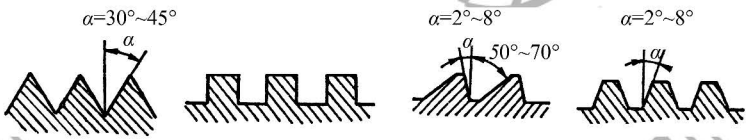


图 5.47　牙嵌离合器的牙型

5.6.2　摩擦离合器

1. 多盘式摩擦离合器

摩擦离合器是靠主、从动盘（片）的接触面间的摩擦力来传递转矩的。常见的摩擦离合器有单盘式和多盘式两种。图 5.48 所示为多盘式摩擦离合器。

多盘式摩擦离合器的结构如图 5.48（a）所示。其主动轴 1 与鼓轮 2 相连接。从动轴 10 与套筒 9 相连接。有两组摩擦盘 4 和 5，其结构如图 5.48（b）所示。外摩擦盘 4 空套在套筒 9 上，其外缘凸齿插入鼓轮 2 的内缘纵向齿槽中。当主动轴转动时，固定在其上的

鼓轮就带动摩擦盘 4 一起转动。内摩擦盘 5 的内缘凹槽与套筒 9 外凸齿相配合，并分别采用类似导向花键的连接。内摩擦片外缘不与任何零件接触。内、外摩擦片交错放置。当它们受到轴向力时，两组摩擦盘都能作轴向移动。当操纵滑环 7 左移时，曲臂压杆 8 被压下，推动压板 3 将内、外摩擦盘相互压紧，离合器处于接合状态，即主动轴带动从动轴一起转动；反之，滑环 7 右移时离合器处于分离脱开状态，主动轴就不能带动从动轴一起转动。图中 3 为压板，10 为调节螺母，可调节摩擦盘之间的压力。这种离合器摩擦盘的对数愈多，传递的转矩也愈大。但对数过多会影响分离动作的灵活性，故一般限制在 15 对以下。

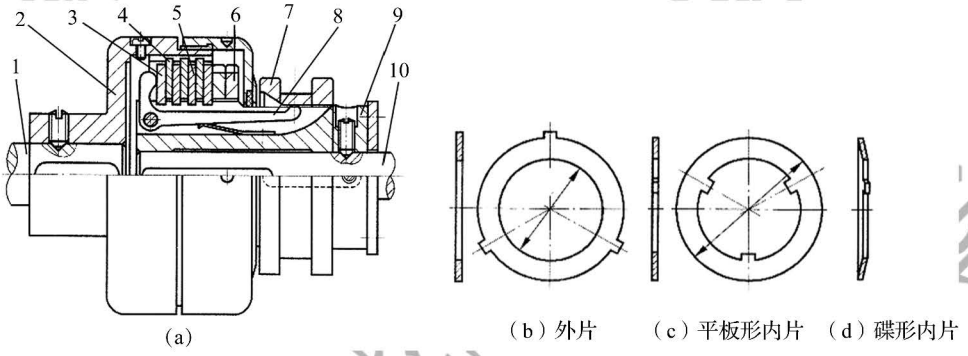


图 5.48　多盘式摩擦离合器及摩擦盘结构

2. 单盘式摩擦离合器

图 5.49 为单盘式摩擦离合器工作原理图。

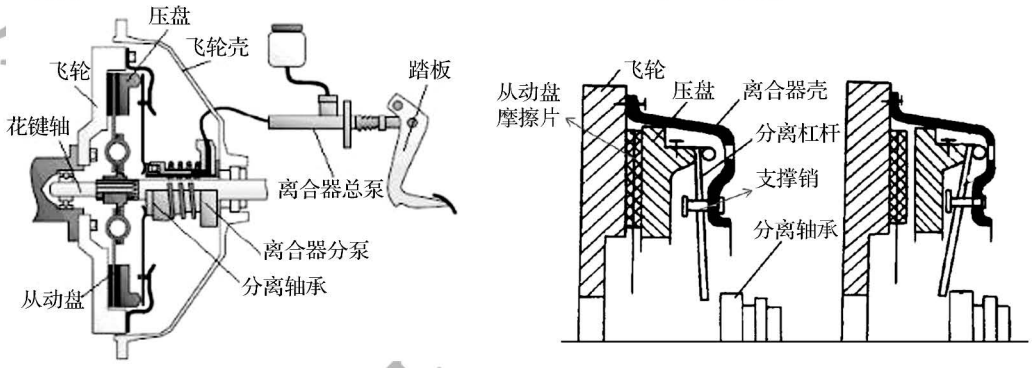


图 5.49　单盘式摩擦离合器工作原理图

工作原理如下所述。

1）接合状态

松开离合踏板或者将离合开关打在接合位状态，分离杠杆内端与分离轴承向右移动，

在支撑销的作用下，分离杠杆顶端向左移动，将飞轮、从动盘摩擦片和压盘三者压紧在一起，发动机的转矩经过飞轮及压盘通过从动盘两摩擦面的摩擦作用传给从动盘，再由从动轴输入变速器。

2）分离过程

压下离合踏板或者将离合开关打在分离位状态，分离杠杆内端与分离轴承向左移动，在支撑销的作用下，分离杠杆顶端向右移动，飞轮、从动盘摩擦片和压盘三者解除压紧，摩擦作用消失，离合器的主、从动部分分离，中断动力传动。

摩擦离合器与牙嵌离合器相比具有以下优点：

（1）可以在任何速度下进行接合；

（2）接合过程平稳，无冲击、振动；

（3）过载时摩擦面间发生打滑，可起安全保护作用。

但摩擦离合器也存在着一些缺点：

（1）在工作过程中会产生滑动摩擦，而引起摩擦片发热和磨损；

（2）外廓尺寸较大，结构复杂；

（3）不适于传动比要求严格的场合。

5.6.3　超越离合器

超越离合器也称为自由轮，有单向、双向之分，它是从动轴可以超越主动轴的一种装置。当从动件的转速超过主动件的转速时，超越离合器会将主动件和从动件断开，避免从动件反带主动件的情况。直升机上常在发动机输出轴和主减速器之间安装有超越离合器，防止旋翼反带动发动机转的情况发生。

常见的是单向超越离合器，其结构如图5.50所示。单向超越离合器主动件（外套2）带动从动件（轴6），从动轴6与星轮1用键连接，星轮外空套着外套2，星轮上有5个安装座孔，孔内装有弹簧5与顶杆4。它们将滚柱3压向星轮与外套的楔缝，使滚柱与星轮、外圈接触。

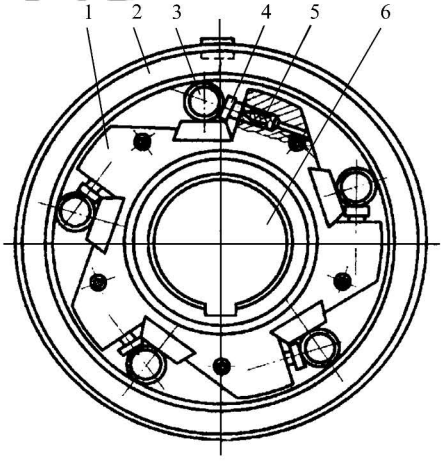


图5.50　单向超越离合器

当外套反时针旋转时，滚柱受外套推动前移被楔紧在槽内，星轮在滚柱的作用下与外套一起转动。但当星轮受另外动力驱动，其转速超越外套时，滚柱就退回到槽中较宽的部位，不再楔紧在槽内，此时外圈就与星轮分离，而不妨碍星轮快速旋转。

知识总结	随堂练习

5.7 管路系统

在现代飞机上有液压、燃油、冷气等多种以液体或气体为工作介质的管路系统，而这些系统主要是由硬管、软管、接头、连接件和管路的固定件组成的带有压力的封闭管理通路，以保证液体或气体在通道中流动和传递能量。

管路系统是飞机系统主要的基本组成部分之一，一旦系统导管或接头出现故障或泄漏，将导致飞机操纵失灵，造成飞机失事。因此，对于飞机维修人员来说，掌握软、硬管的识别与拆装等是非常重要的。

5.7.1 管路

1. 飞机管路系统的组成

飞机的管路系统一般由导管、管接头组件、管卡等组成。

根据不同的类型，管接头组件可包含以下部件：接头、管螺帽、衬套筒、密封圈等。

2. 飞机管路系统的分类

根据飞机系统的不同，管路系统可分为气源系统管路、燃油系统管路、液压系统管路、滑油系统管路、氧气系统管路、水系统管路等。

根据管路本身的特性，管路可分为硬管、软管。硬管通常用于连接位置固定、距离较远的部件。波音 737NG 硬管常用的材料有铝合金、钛合金、不锈钢、铜合金等。柔性软管主要应用于：连接运动部件和静止部件，管道承受强烈振动的地方，作为金属管道系统的连接件。柔性软管只能用于温度不高的场合，一般用于低于 250°F 的部位。

另外，管路还可按照材料、尺寸、工作压力等进行分类。

中国民航出版社有限公司版权所有

3. 飞机各系统管路的标识

根据不同飞机系统的管路所载运介质的不同，管路上会有相应的标识来加以区分。管路标识颜色与管路载运介质的对应关系如表5-9所示。

表5-9　管路标识颜色与载运介质对应表

管路标识颜色	管路载运介质
Red/红色	Fuel/燃油
Orange/橙色	Compressed Gas/压缩气体
Yellow/黄色	Lubrication/润滑剂
Green/绿色	Breathing Oxygen/氧气
Blue/蓝色	Coolant/冷气剂
Gray/灰色	De-icing /除冰剂
Maroon/褐红色	Fire Protection/防火系统
Green；Gray/绿色；灰色	Rocket Oxidizer/氧化剂
Orange；Blue/橙色；蓝色	Pneumatic/气压
Maroon；Gray/褐红色；灰色	Air Conditioning/空调
Blue；Yellow/蓝色；黄色	Hydraulic/液压
Orange；Gray/橙色；灰色	Instrument Air/仪表
Maroon；Orange/褐红色；橙色	Electrical Conduit /电

4. 管路的尺寸标记

（1）硬管规格尺寸的标记。

金属管是按外径标注尺寸的，其计量单位为1/16 in。如6号管，其外径是6/16 in，即3/8 in；8号管，其外径是8/16 in，即1/2 in。

注意：同一规格的硬管，其管壁还有多种厚度。因而安装管道时，不但应知道管道的材料和外径，而且还要知道管道的壁厚。壁厚的计量单位是1/1000 in。

（2）软管按内径标注尺寸的，其计量单位是1/16 in。

5.7.2　接头

按照不同连接和密封方式，管接头可以分为喇叭口接头、无喇叭口接头、柔性接头、快卸式接头、波式接头。

中国民航出版社有限公司版权所有

1. 喇叭口接头

如图 5.51 所示，喇叭口接头由插入式接头、喇叭管口、衬套筒和管螺帽组成。这种连接方式适用于中、低压力管路系统。

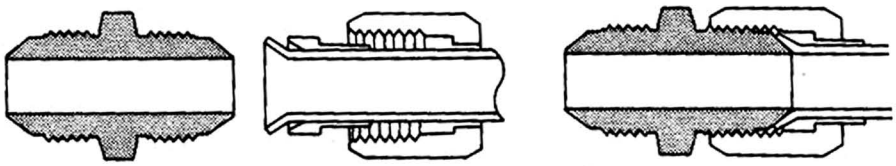


图 5.51　喇叭口接头组件

喇叭口接头的密封形式：

（1）插入式接头的锥面与喇叭管口内表面紧密接合。

（2）喇叭管口外表面的衬套筒用于支撑管子，防止管口边缘的振动。

（3）管螺帽套在衬套筒外面，拧紧时压紧衬套筒和管口，使管口紧插入端接头，实现封严。

2. 无喇叭口接头

无喇叭口接头由端接头、装有锥形衬套的管口和管螺帽组成，如图 5.52 所示。这种连接方式适用于中、高压力管路系统。

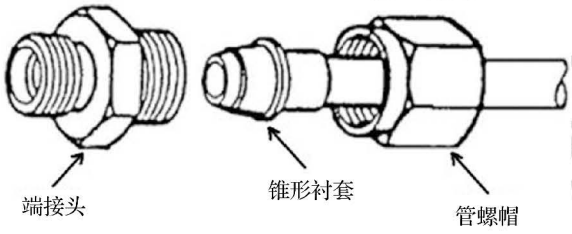


图 5.52　无喇叭口接头组件

无喇叭口接头的密封形式（如图 5.53 所示）如下：

（1）装有锥形衬套的管口插入端接头，管子前端面与端接头内沟槽接合，实现第一次封严。

（2）锥形衬套与端接头内表面紧密贴合，实现第二次封严。

（3）锥形衬套上的凸台与端接头端面紧密贴合，实现第三次封严。

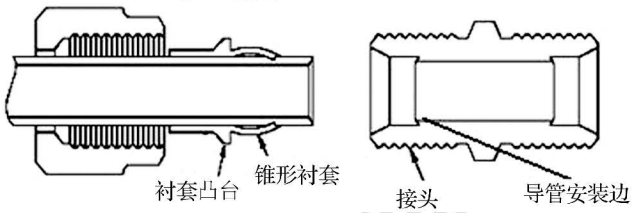


图 5.53　无喇叭口接头

3. 柔性接头

柔性接头分为挤压式接头和装配式接头。挤压式接头为一次性加工成形，不可更换。装配式接头由螺帽、螺纹接套和管套组成，由人工组装成形，可以更换。

4. 快卸式（自封式）接头

如图 5.54 所示，快卸式（自封式）接头由两个接头和内部弹簧控制活门组成。

快卸式接头适用于管路需要频繁拆卸的地方。这种接头可以迅速拆开管路而不损失流体且空气不易进入系统，适用于高、中、低压力管路系统。

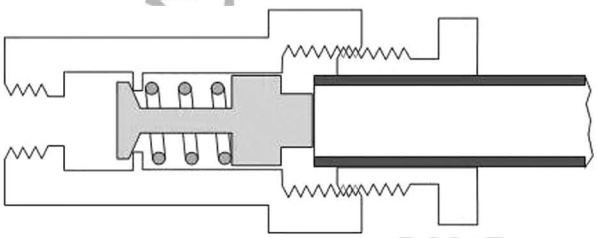


图 5.54　快卸式接头

5. 波式接头

波式接头一般是用一段软管连接两个硬管，在软管的两端用两个管夹加以固定。这种接头的特点是连接时对中要求较低，并且能够在一定程度上降低振动的传递。如图 5.55 所示。波式接头常用于连接润滑油、冷却剂和低压燃油系统的管路。

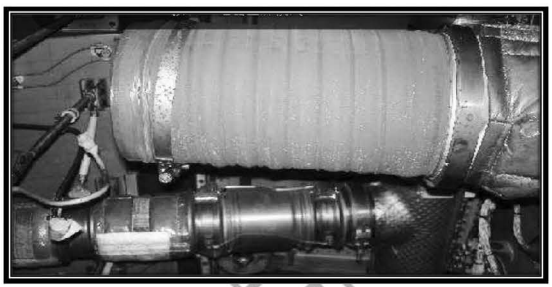


图 5.55　波式接头

5.7.3 飞机管路的标准施工

1. 管路的拆卸

1）拆卸前的准备

（1）准备好拆卸管路所需要的工具、毛巾、油桶以及接头保护盖等。

（2）拆卸管路前对相应的系统进行释压，根据手册完成相应系统的抑制和挂牌警示工作，并根据需要排放相应的油液。

（3）拆卸油液管路前应该做好安全防护工作，按规定佩戴安全防护镜和胶手套。

（4）拆卸前应先对管路、接头及所在的区域进行必要的清洁。

（5）根据需要拆下或松开相邻的管路及电插头，以便获得足够的拆装空间。

2）管路拆卸

（1）拆下管路上的管卡。

（2）对于带管螺帽的接头，判断松开管螺帽的旋转方向，如图 5.56 所示。

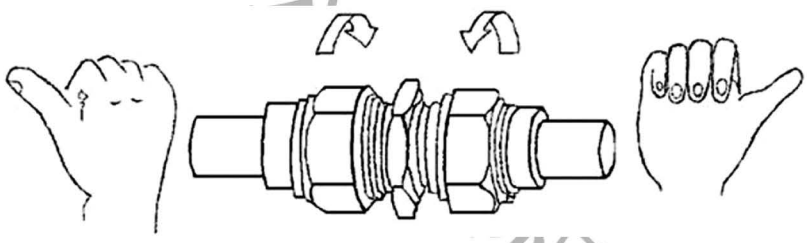


图 5.56 拆卸管路的旋转方向示意图

（3）脱开管路两端的管接头，并从飞机上取下管路。

注意事项：

① 对于油液管路，应在管路接头下方放置油桶，先脱开低处的接头，将管路内的油液排入油桶内。

② 应该使用两把扳手松开管螺帽，一把用于固定管接头，一把用于松开管螺帽。

③ 在拆装过程中，不要随意改变硬管的弯曲度，否则可能造成管路的错误安装或造成管路的不正确受力。

（4）根据需要取下接头处的密封圈，并根据需要报废密封圈。

（5）在开口处安装保护盖，防止外来物进入管路内。

（6）对拆下的管路做好标识（挂牌），标明管路的安装位置，以免造成管路的错误安装。

（7）对管路及工作区域的油液进行清洁。

注意事项：拆卸管路时可能造成油液的泄漏，应该根据油液的种类，采用正确的方式

进行清洁。

2. 管路的安装

1）安装前的准备

（1）对管路、接头及所在的区域进行必要的清洁。

（2）安装前应对管路进行检查，确保管路、管螺帽、管接头等无损伤，密封状况及螺纹连接状况良好，否则应该进行更换。

① 检查管路及接头的密封状况是否良好。

② 检查管路是否有压痕和擦伤。

③ 检查管路是否有变形、裂纹和腐蚀。

④ 检查管螺帽、衬套、接头是否有变形、裂纹和损伤，管螺帽和管接头的螺纹是否有损伤。

⑤ 检查软管外套是否有断丝、扭结、破损。如果一个平面出现两根以上的断丝或有几根断丝出现在一个集中区域，不能使用该软管。

2）管路安装

（1）取下开口处的保护盖。

（2）根据需要，在管接头外螺纹及衬套凸肩处涂抹相应的防咬剂。

注意事项：不同系统的管路接头螺纹所使用的防咬剂不同。不得使防咬剂进入管路及接头的内表面和封严处。

（3）根据标识将管路放置到相应的安装位置。

（4）根据需要在管接头处安装相应的封圈。

（5）对于带管螺帽的接头，判断安装管螺帽的旋转方向，如图 5.57 所示。

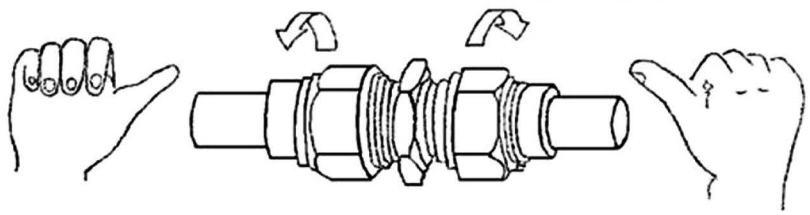


图 5.57　安装管路的旋转方向示意图

（6）先用手安装管路两端的管接头，切勿直接用工具拧紧管接头。

以无喇叭口接头为例：将管螺帽和管接头对齐使管路顶到接头端部，并使管路与接头处于同一条轴线上，如图 5.58 所示。用手平顺带紧管螺帽（可轻微摇动管路），直到管螺帽接触到衬套凸肩，不可用扳手直接拧紧对正管路。

图 5.58　管路与接头对齐示意图

（7）用工具拧紧管接头，并根据手册打上力矩。

拧紧管螺帽时（包括打力矩），应该使用两把扳手，一把扳手用于拧紧管螺帽，另一把扳手用于固定管接头。

如果力矩扳手接近不方便，可先用手拧紧管螺帽，然后再用扳手拧紧 1/6～1/3 圈。

（8）安装相应的管卡，不得随意更改管卡的位置。

注意事项：① 请勿将管卡安装在管路修复的位置上。② 确保管卡对管路无产生额外的载荷，否则会造成管路的磨损。

（9）根据需要恢复安装相邻的管路及电插头。

3）管路的安装要求

（1）在拆装过程中，不要随意改变硬管的弯曲度，否则可能造成管路的错误安装或造成管路的不正确受力。如图 5.59 所示。

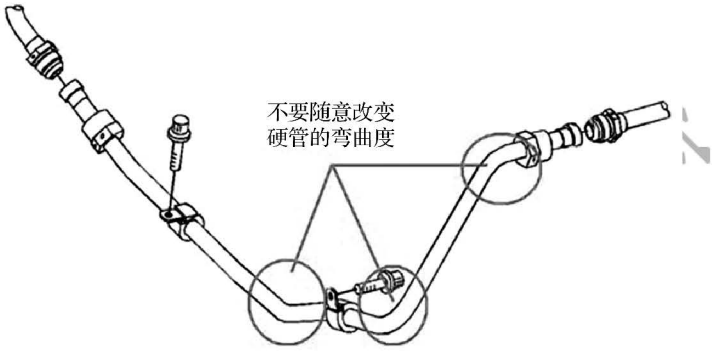


图 5.59　管路不能随意弯曲

（2）安装软管时不得发生扭转。如果管路发生扭转，在使用一段时间后，可能会造成软管的损伤或接头的渗漏。拧紧管螺帽后，可通过软管上的标志线检查软管是否发生扭转。如图 5.60 所示。

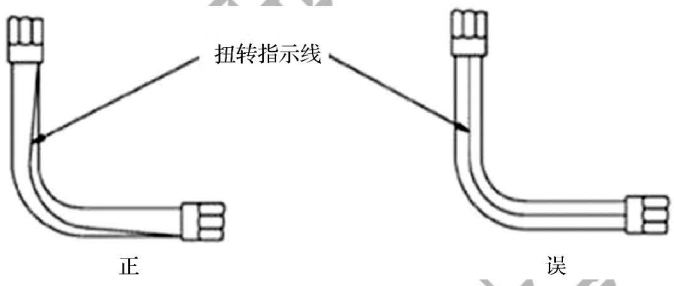


图 5.60　管路不得扭转

（3）要确保软管的长度、松紧程度适中，确保有 5%～8%的松弛度。如图 5.61 所示。

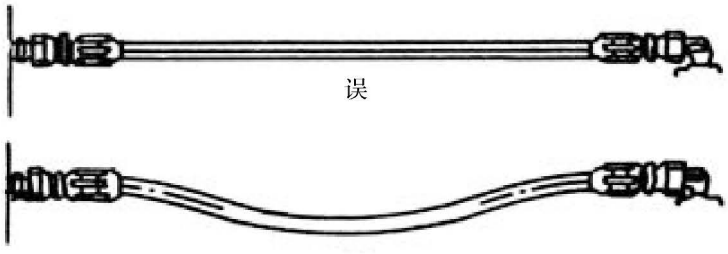


图 5.61　软管松紧程度适中

（4）确保软管弯度适中，符合手册要求，防止管路弯曲过度而损伤管路。软管接头处非弯曲段的长度，不得小于软管直径的 2 倍。如图 5.62 所示。

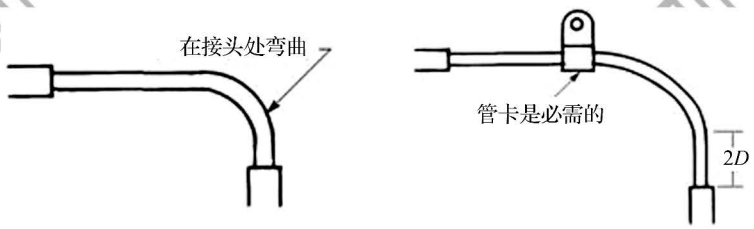
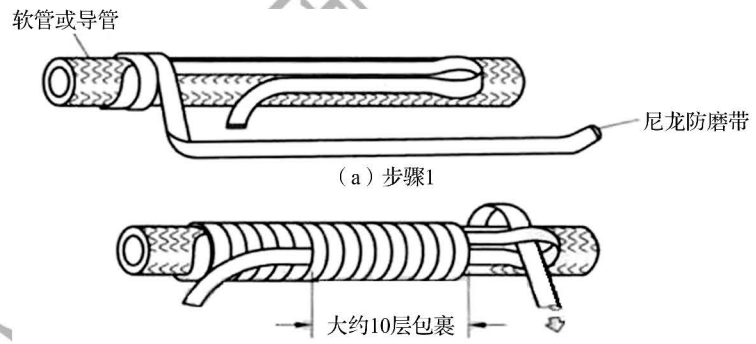


图 5.62　软管弯度适中

（5）必要时可用防磨带子包缠软管以防擦伤。如图 5.63 所示。



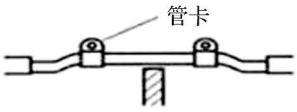
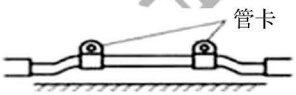
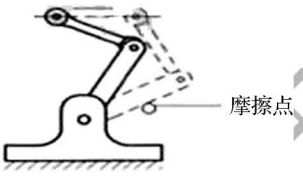
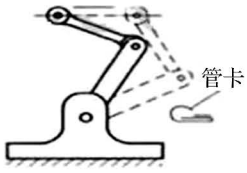
（a）步骤1

（b）步骤2

图 5.63　软管防磨带包扎

（6）确保管路与其他部件或导线之间的距离符合手册要求。如果出现表 5-10 所示的情形，应采用相应的方式用管卡隔开。

表 5-10　管路安装要求

不接受	接受
	
	
	

3. 管路检查

（1）管路的日常维护中应注意以下检查：

①检查管路接头处力矩标示线是否移位；

②检查管路接头是否渗漏；

③检查管路是否损伤（凹坑、擦伤等）；

④检查管路上管卡是否松动、损伤；

⑤检查管路安装间距是否符合要求。

（2）管路间隙检查。管路间隙应满足如下要求：

①支撑处与未支撑处。

支撑处：与邻近结构，管路，至少 0.1 in；

未支撑处：与邻近结构，管路，至少 0.25 in。

②燃油系统：与导线至少 2 in。

③液压系统管路：与导线至少 0.5 in。

④临近管路间的间隙为 0.25 in。

为了保证管路间隙，可以用图 5.64 所示的卡箍形式来将管路固定。

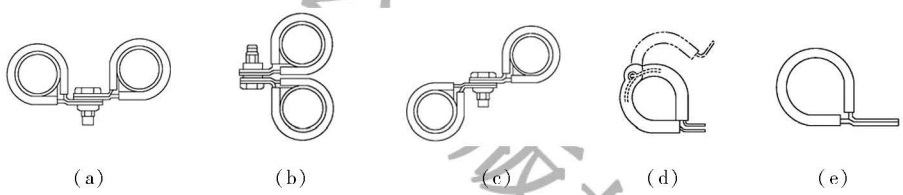


图 5.64　软管卡箍形式

（3）安装完管路后，应对管路进行渗漏测试：

①清洁管路和接头以便更清楚地检查渗漏情况。

②对相应的系统增压 15 分钟。

③检查管路及接头是否发生渗漏。

④如果发生渗漏，重新拧紧管接头，必要时检查管接头是否存在污染及损伤。

⑤再次增压 15 分钟，检查渗漏。

⑥如果再次发生渗漏，则应该更换新的管路或接头。

注意事项：如果同一系统更换 2 根以上的管路，为了防止管路的错误安装，可对系统进行操作测试，确保系统工作正常。

中国民航出版社有限公司版权所有

知识总结	随堂练习

复习思考题

1. 弹簧的主要功用有哪些？
2. 常用弹簧有哪些类型？各有什么特点？
3. 弹簧指数 C 对弹簧性能有何影响？
4. 平键连接有何特点？失效形式有哪几种？
5. 花键连接有何特点？常用的花键有哪几种？其特点是什么？
6. 联轴器有何功用？
7. 常用的联轴器有哪些类型？说明它们的特点和使用场合。
8. 离合器有何功用？它与联轴器有何异同？
9. 常用的离合器有哪些类型？说明它们的特点和使用场合？
10. 轴上零件轴向固定和周向固定的方法有哪几种？各有何特点？
11. 轴承有何功用？如何分类？
12. 常用的滑动轴承有哪几种结构形式？各有何特点？
13. 何为液体动压滑动轴承和液体静压滑动轴承？
14. 形成液体动压滑动轴承的基本条件是什么？
15. 滑动轴承的主要失效形式有哪几种？
16. 滚动轴承有哪些基本组成元件？各元件的作用如何？
17. 滚动轴承的主要类型有哪几种？各有什么特点？
18. 滚动轴承的代号由哪三部分组成？基本代号中各位数字的意义是什么？
19. 试说明下列轴承代号的意义：

    60210/P6；612/32；N2312；70216AC；71311C；LN207
20. 滚动轴承内、外圈轴向固定的方法各有哪几种？
21. 滚动轴承常用的安装方法有哪几种？
22. 滚动轴承的主要失效形式有哪几种？其失效原因是什么？
23. 选择滚动轴承类型时要考虑哪些因素？

中国民航出版社有限公司版权所有

24. 飞机管路系统的组成有哪些？
25. 飞机管路系统的分类有哪些？
26. 简述飞机管路标识与管路运载介质的关系。
27. 硬管和软管的尺寸标记有什么区别？
28. 管路接头有哪些种类？
29. 喇叭口管接头组件由哪些零件组成？
30. 喇叭口接头如何密封的？
31. 无喇叭口管接头组件由哪些零件组成？
32. 无喇叭口接头如何密封的？
33. 简述快卸接头的作用。
34. 简述管路拆卸步骤。
35. 简述管路安装步骤。
36. 简述管路安装的注意事项。
37. 简述管路日常检查事项。
38. 简述管路的渗漏测试程序。

中国民航出版社有限公司版权所有

第 6 章　润滑与密封

学习要求：

- 了解润滑的作用，熟悉摩擦与润滑的类型及飞机上常用的润滑剂和润滑方式；
- 了解密封的分类、常用的密封材料和飞机及飞机发动机常用的密封方式。

第 6 章　课程导学	

6.1　润滑

润滑是通过减少摩擦及磨损，从而达到延长部件使用寿命的作用。磨损会导致机械部件接触部位材料损耗，从而影响部件的力学性能。例如，发动机转轴在旋转过程中，若滚动接触面润滑良好，则轴承的疲劳寿命延长；相反的，油脂黏度低，润滑油膜厚度太薄，则缩短疲劳寿命。其次，磨损会产生热量，利用润滑剂可以及时将摩擦部件冷却。润滑还可防止异物侵入关节和轴承内部，起到防锈、防腐的作用。

润滑一般分为油脂润滑和油液润滑两种。润滑工作是飞机维修工作的一项基本技能。飞机润滑通用要求可参考 737NG AMM12-20-00、757AMM12-21-00、SOPM20-50-07 以及 BAC5008，飞机部件定期润滑参考 AMM12 相应章节。

6.1.1　摩擦与润滑状态

机器运转时，在作相对运动的零部件间的接触表面，不可避免地要产生摩擦。摩擦

中国民航出版社有限公司版权所有

（Friction）是相互接触的两物体在接触面上发生阻碍相对运动的现象。物体之间的摩擦，主要是由于接触表面凹凸不平及物体分子之间的吸引力所引起的。

摩擦会造成能量损耗以及使摩擦表面发热、磨损。当磨损量超过允许极限后，会影响机械的性能，严重时会导致机械失效。据估计，目前世界上约 1/3～1/2 的能量消耗在各种形式的摩擦中，约有 80%的零件因磨损而报废。润滑（Lubrication）是在相对运动摩擦的表面上加润滑剂，以降低摩擦、减缓磨损的有效方法。

摩擦可分为两类：滑动摩擦和滚动摩擦。

滑动摩擦是指两个物体的表面相互接触并相对滑动时产生的摩擦。滑动摩擦是面接触。例如，发动机活塞与气缸壁的摩擦。

滚动摩擦是指球形或圆形物体沿另一物体表面滚动时所产生的摩擦。滚动摩擦是点接触或线接触。例如，滚珠轴承和滚柱轴承的摩擦。

为了减小摩擦，通常在摩擦表面间加入润滑剂分开摩擦面，根据摩擦表面间润滑情况的不同，可分以下几种润滑状态。

1. 无润滑状态

无润滑状态又称干摩擦［见图 6.1（a）］。这种情况下，摩擦表面间无任何润滑剂存在，发生运动时，摩擦表面直接接触。干摩擦的摩擦系数 f 较大，约为 0.1～1.5。

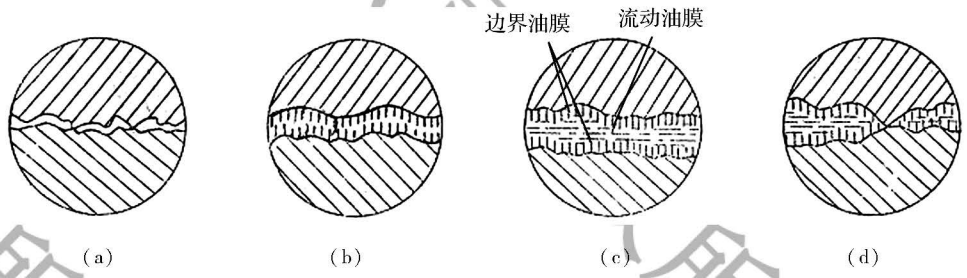


图 6.1　润滑状态

2. 边界润滑状态

边界润滑状态又称为边界摩擦［见图 6.1（b）］。这种情况下，摩擦表面具有边界油膜。边界油膜是指润滑油在金属表面分子力作用下存在的肉眼看不见的最薄油膜，其厚度约为 0.1～0.4 μm。当摩擦副相对运动时，摩擦表面间有边界油膜隔开，从而降低了摩擦系数。边界摩擦系数 f 约为 0.05～0.1。边界油膜承载能力差，在压力和温度较高时会破裂而形成干摩擦。由于摩擦表面微观的凹凸不平，在载荷作用下，接触凸峰处的压力很大，当两界面相互滑动时，接触点上的温度也很高，导致边界油膜部分破裂，使摩擦表面某些凸点直接接触。

3. 液体润滑状态

液体润滑状态又称为液体摩擦［见图6.1（c）］。这种情况下，摩擦副表面完全被润滑油层（即边界油膜和流动油膜）隔开。界面之间的摩擦被液体分子间的内摩擦所取代，其摩擦系数大大降低，f约为0.001~0.01。

4. 混合润滑状态

混合润滑状态又称混合摩擦［见图6.1（d）］。半干摩擦和半液体摩擦都属于混合摩擦。半干摩擦是指在摩擦表面间同时存在着干摩擦和边界摩擦的情况。半液体摩擦是指在摩擦表面间同时存在着液体摩擦和边界摩擦，并偶有部分干摩擦。

在飞机和发动机的维护和修理中采用合理的润滑是十分重要的。合理的润滑可以降低接触面间的摩擦阻力，减轻磨损，提高机械的效率并延长机械的寿命。此外，润滑还能起冲洗杂质、降低工作温度、防止锈蚀、减震、缓冲和密封等作用。

通常，除了利用摩擦的场合之外，机器的摩擦表面之间应避免出现无润滑状态，最低限度应维持边界润滑状态或混合润滑状态，工作需要时应实现液体润滑状态。

6.1.2 润滑剂

飞机上常用的润滑剂（Lubricant）有航空润滑油（Oil）和航空润滑脂（Grease）两种。

1. 航空润滑油

1）对航空润滑油性质的主要要求

（1）黏度（Viscosity）要适当。

润滑油的黏度是表示润滑油流动时由于分子内摩擦所产生的阻力而构成的黏滞性。它是评价润滑油流动性的指标。

润滑油的黏度随温度和压力而变化，其中温度的影响最显著。润滑油黏度随温度上升而下降，随温度下降而增高；润滑油的黏度随压力升高而增大。实践证明，当压力在5 MPa以下时，黏度变化很小，可以忽略不计。

润滑油应具有适当的黏度，才能保证零件的各摩擦面得到可靠的润滑，同时又使摩擦消耗的能量最少。润滑油黏度太小，就不能保持足够厚度的油膜，容易使零件磨损；黏度愈大，承载能力愈高。但黏度太大，又会增加摩擦阻力使消耗的能量增多。应根据零件工作条件来选择润滑油的黏度。例如，航空活塞式发动机的曲轴，转速较小，但承受载荷大，同时发动机工作时，滑油距燃烧区较近，温度较高，所以应选用黏度较大的润滑油；航空喷气发动机的涡轮轴转速较高，但负载较小，润滑油与高温燃气不直接接触，加上散热条件又较好，所以应选用黏度较小的润滑油。另外，润滑油的黏度随温度的变化要小。

（2）化学稳定性要好。

化学稳定性是指润滑油抵抗氧化的能力。润滑油的化学稳定性一般随温度升高而降

低。当发动机工作时，其滑油系统中的润滑油循环次数很多，这就使滑油与空气中的氧接触机会增多，而且滑油的温度高，使滑油容易被氧化。滑油氧化后会生成积炭、胶质和有机酸等，这些物质会堵塞油滤、腐蚀金属。所以，航空发动机使用的滑油应具有良好的化学稳定性。

另外，润滑油的凝固点要低，对金属要无腐蚀性以及无机械杂质和水分。

2）常用航空润滑油的品种与使用范围

常用国产航空润滑油的品种与使用范围见表 6-1。

表 6-1　常用国产航空润滑油的品种与使用范围

油名	牌号	使用范围
8 号喷气机润滑油	HP-8	燃气涡轮发动机润滑系统及飞机上不能加注润滑脂的摩擦部位
8 号合成航空润滑油	HP-8H	在-45℃气温条件下，用于燃气涡轮发动机润滑系统
4050 合成航空润滑油	4050 油	工作温度范围为-40～+200℃，用于涡轮风扇与涡轮轴发动机润滑系统
4104 合成航空润滑油	4104 油	工作温度范围为-40～+140℃，用于涡轮螺旋桨发动机轴承、齿轮及其他摩擦部位的润滑
4109 合成航空润滑油	4109 油	涡轮喷气发动机润滑系统
14 号航空润滑油	HH-14	冬季用于航空活塞式发动机润滑系统
20 号航空润滑油	HH-20	航空活塞式发动机润滑系统及飞机上不能加润滑脂的摩擦部位

常用美国航空润滑油的品种与使用范围见表 6-2。

表 6-2　常用美国航空润滑油的品种与使用范围

油名	标准	使用范围
航空润滑油	MIL-L-22851C	航空活塞式发动机润滑系统
航空涡轮油 1010 号，1005 号	MIL-L-6081C	航空燃气涡轮发动机润滑系统
3 厘斯航空合成润滑油	MIL-L-7808H	工作温度范围为-54～+149℃涡轮喷气发动机润滑系统及其设备
5 厘斯航空合成润滑油	MIL-L-23699C	工作温度范围为-40～+200℃大型喷气飞机发动机润滑系统
飞机涡轮发动机酯基润滑油	MIL-L-27502	航空燃气涡轮发动机润滑系统，工作温度范围为-40～+220℃

中国民航出版社有限公司版权所有

2. 航空润滑脂

润滑脂实际上是一种稠化的润滑油。将润滑油与稠化剂在高温下混合再冷却，稠化剂分子组成胶团或微晶粒均匀地分散在润滑油中，即形成胶体状的润滑脂。

润滑脂与润滑油相比，它的特点是：

（1）黏性大，不易流失；

（2）黏性随温度变化的影响较小；

（3）黏附能力强，密封性好；

（4）流动性差，摩擦阻力大，不利于散热。

常用国产航空润滑脂的品种与使用范围见表 6-3。

常用美国航空润滑脂的品种与使用范围见表 6-4。

表 6-3　国产航空润滑脂的主要种类及用途

类别	名称	主要用途
减摩润滑脂	2 号低温润滑脂（ZL7-2）	具有很好的耐寒性，较好的耐热性，能在－60～＋120℃之间保持良好的润滑。主要用于飞机操纵系统的摩擦部位、起落架的铰接处
	4 号高温润滑脂（ZL6-4）	具有很好的耐热性，能在 180℃以下工作，耐寒性较差。主要用于飞机的机轮轴承、气门杆和摇臂等受力较大、温度较高的零件处
	7007 号通用航空润滑脂	工作温度范围为－60～＋120℃。主要润滑航空电机轴承、齿轮、操纵机构支点、仪表轴承
	7255 号航空润滑脂	工作温度范围为－55～＋180℃。主要用于润滑大型飞机的升降舵、主着陆齿轮、操纵钢索、电机、冲压空气涡轮等
防护润滑脂	1 号防锈润滑脂	用于封存加铅汽油工作的活塞式航空发动机内部
	2 号防锈润滑脂	用于封存加铅汽油工作的活塞式航空发动机外部
	工业凡士林（LF-40，LF-54）	具有良好的化学安定性和耐水性，黏度较大，耐热性较差。广泛用于油封飞机金属零件
密封润滑脂	2 号多效密封润滑脂（ZB10-2）	具有很好的密封性，对金属的黏附能力强，与水不起作用。用于密封飞机上水和空气导管接头和开关
	5 号耐汽油密封润滑脂（ZA10-5）	具有很好的密封性。用于密封飞机发动机燃油系统和润滑系统的接头和开关

中国民航出版社有限公司版权所有

表 6-4　美国航空润滑脂的种类及应用

名称	标准	商品牌号	应用
通用航空润滑脂	MIL-G-23827A	航空壳牌7号润滑脂	工作温度范围为-73～+121℃，用于飞机操纵系统，电动机、仪表的轴承，齿轮、传动螺杆等滑动或滚动表面
通用航空润滑脂	MIL-G-81322C	航空壳牌22号润滑脂	工作温度范围为-54～+177℃，用于润滑高速、高温范围工作的飞机附件、机轮轴承、齿轮箱等
直升机摆动轴承润滑脂	MIL-G-25537B	航空壳牌14号润滑脂	工作温度范围为-54～+71℃，主要润滑飞机小振幅振动轴承
高温抗燃料润滑脂	MIL-G-27617	FS1292	用于飞机燃料系统的锥形塞阀、垫圈、轴承等。使用温度：Ⅰ型：-54～+149℃；Ⅱ型：-0～+204℃
耐汽油、滑油润滑脂	MIL-G-6032C	航空壳牌S.7108号润滑脂	工作温度范围为-30～+150℃，用于抗汽油、抗滑油、抗醇或抗水的系统中
航空滚动轴承润滑脂	MIL-G-25013D	航空壳牌15号润滑脂	工作温度范围为-73～+232℃，主要用于飞机各种受力轴承

因此，润滑脂适宜使用在飞机上负荷大、周围不密封和不经常加油的摩擦部位，用以减少摩擦，防止零件磨损；保护金属表面，防止生锈；密封零件间的间隙，防止漏气或外界尘土、水分等进入。润滑脂不宜用于高速场合，也不宜作循环润滑剂。

航空润滑脂按其基本作用与使用范围，可分为减摩润滑脂、防护润滑脂和密封润滑脂三类。

减摩润滑脂主要用来减少零件摩擦和磨损。

防护润滑脂主要用于保护零件表面，防止腐蚀。

密封润滑脂主要用于密封燃油、滑油、液压、防冰及冷气等系统的结合处的密封螺帽、螺纹等部位。

6.1.3　润滑方式

用于飞机和发动机上的润滑方式主要有三种：溅油润滑、压力供油润滑和手工定时加油润滑。

1. 溅油润滑

溅油润滑是利用转动件将油带至润滑部位进行润滑的一种方式。图 6.2（a）所示为齿轮箱中的大齿轮下部浸没于润滑油中，当齿轮转动时就将滑油带至啮合部位进行润滑。同时也使润滑油飞溅起来散布到其他零件上使其得到润滑。图 6.2（b）所示为利用曲轴转动把油池中的油溅到缸壁，使各零件得到润滑。

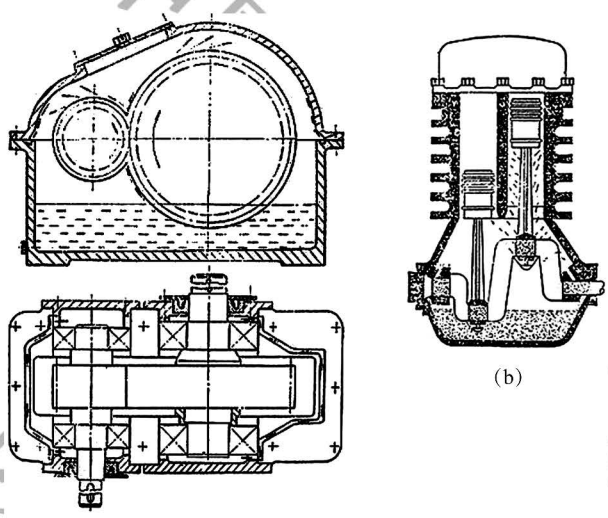


图 6.2　溅油润滑

这种润滑方式能保证润滑油在开车后自动送至摩擦副，而停车时自行停送。其润滑可靠，耗油少，可循环使用，维护简单。但要保持一定的油位并定期更换润滑油。这种润滑方式常用于齿轮箱、曲轴箱内部零件的润滑。如飞机操纵系统中传动齿轮箱内部零件的润滑和飞机冲压涡轮齿轮箱内部零件的润滑均采用这种方法。

2. 压力供油润滑

图 6.3 为地面设备压力供油润滑的典型。这种润滑方式是利用油泵把润滑油加压至一定的工作压力，经过油管把油连续输送到各润滑部位。这种方法供油量充分，润滑油循环使用，除润滑作用外，还能起冷却和冲洗磨屑的作用，常用于高速、大功率闭式传动中，如飞机发动机转子轴承的润滑。此外，润滑油贮于油池中，可减少搅拌和喷溅，避免氧化和沾污，使用时间较长。但润滑系统较复杂，必须在系统内配置油泵、油管、过滤器、控制阀等元件。

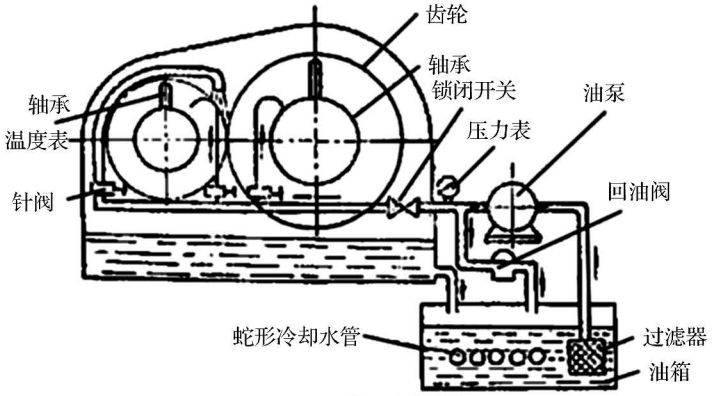


图 6.3　地面设备压力供油润滑

飞机发动机主轴轴承和发动机齿轮箱均采用压力供油润滑。它们利用油泵把润滑油加压至一定的工作压力，经过油管把滑油连续输送到各润滑部位，滑油循环使用。但是与地面设备压力供油润滑所不同的是，它们还设有通气和余油系统。图 6.4 为 CFM56-3 发动机滑油系统简图。

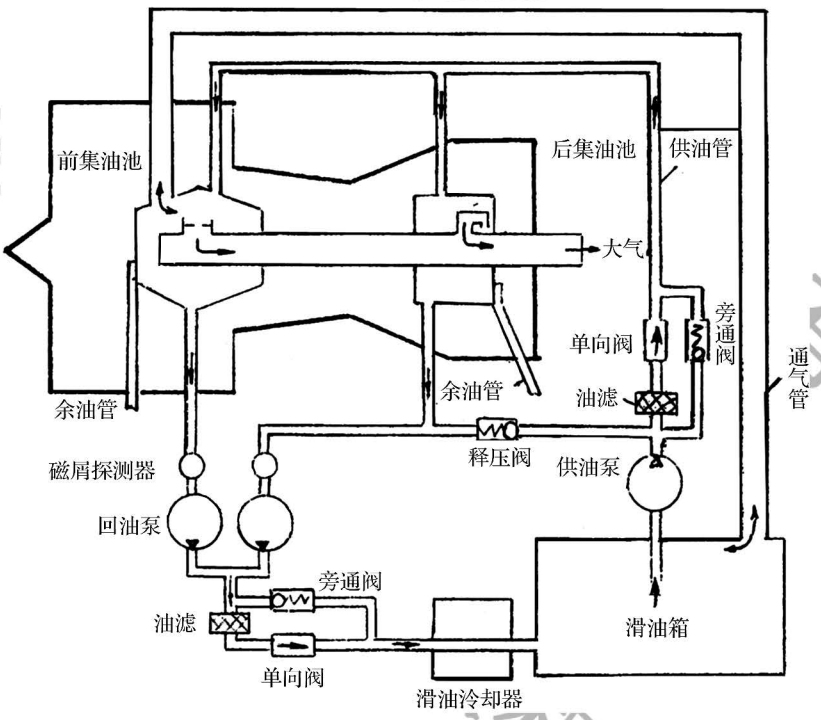


图 6.4　具有通气和余油系统的压力供油润滑

在该发动机滑油系统中设置通气系统能确保飞机在高空时，滑油能可靠地流到油泵的进口，并能以适当的形状从喷嘴中喷出，同时也能为回油系统提供适当的压强。设置通气系统还能提高空气封严的效率，减少封严空气通往大气时所带走的滑油量。余油系统则是在关键部位，把可能漏出的滑油收集起来，排往飞机余油系统，然后排出机体。另外，飞机发动机压力供油润滑系统还设有回油泵，将用过的滑油从集油池中吸出，再经导管输回滑油箱。

有些场合将压力供油润滑与溅油润滑组合起来使用，例如在某些型号的航空发动机中就应用了压力供油与溅油组合润滑。

3. 手工定时润滑

在飞机维护中，利用各种油枪，靠手工定期对需要润滑部位加润滑油或润滑脂进行手工定时润滑。手工定时润滑的方式常用于需要润滑油、润滑脂较少的开放部位，如飞机襟翼传动螺杆的润滑就采用手工定时润滑。

6.1.4 飞机维修润滑项目一：左主起落架润滑

1. 项目介绍

本项工作是对波音 737NG 飞机左主起落架进行定期润滑维护，维护程序与右主起落架相同。润滑工作程序参考飞机维护手册 AMM12-21-11-640-801 任务号。该程序有三个子任务：（1）主起落架上端部件勤务；（2）主起落架下端部件勤务；（3）主起落架衬套勤务。工作区域为左起落架（代码 734）与左起落架轮舱（代码 133）。工作类型为：LU（对应 MPD 工作类型：LUB）。图 6.5 为左主起落架上端勤务部件结构图。

注：MPD：维修计划清单；

LUB：LUBRICATION，润滑。

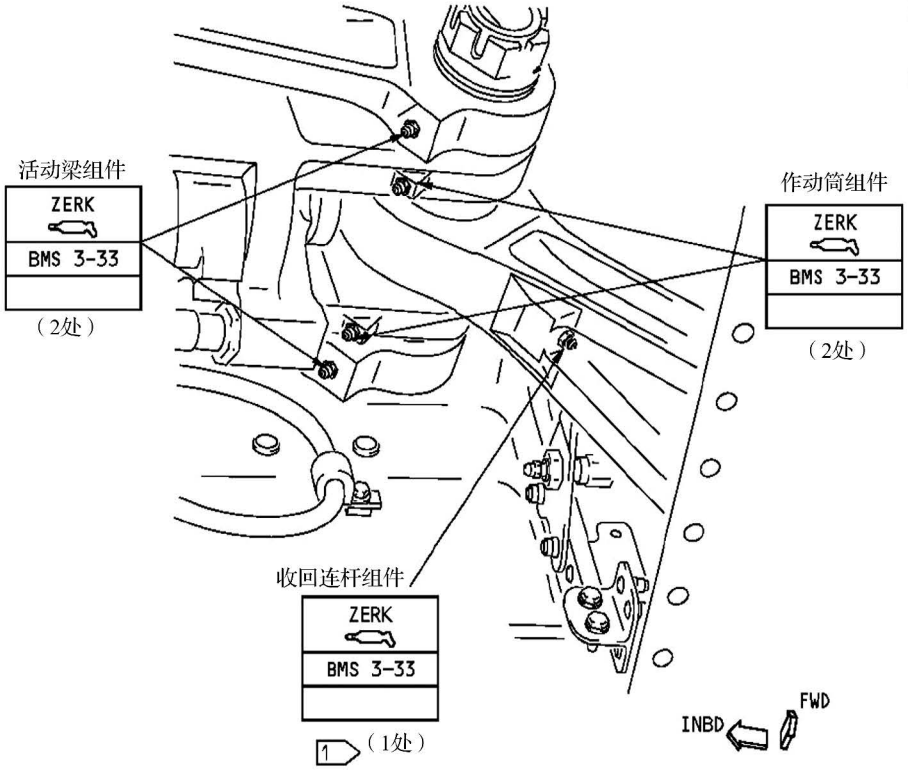


图 6.5 左主起落架上端勤务部件结构图

2. 施工程序

根据手册要求，施工程序分为三个步骤，如图 6.6 所示。

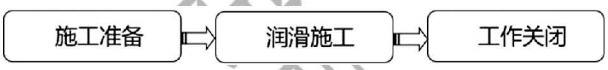


图 6.6　施工程序简图

1）施工准备

施工准备阶段需要检查是否已经将所有起落架下位锁销锁好，防止起落架意外收上，造成人员的伤害和设备的损坏。飞机维护人员做好自我防护，穿戴好手套和护眼装置，因为高压润滑剂会对人身造成伤害。

施工前应按照手册上的“润滑方块图”，确定注油嘴类型、润滑油液类型、每个工卡中润滑点的数量，以及手册中特别标注的特殊说明。如图 6.7 所示。

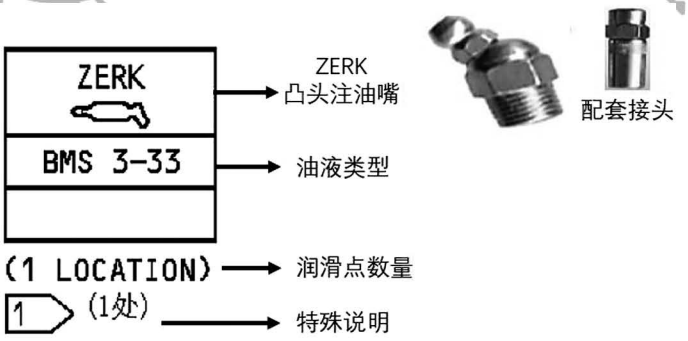


图 6.7　润滑方块图

然后打开固定后缘内侧下方的接近盖板，551DB。

2）润滑施工

润滑施工的过程应严格按照手册执行，以下是润滑施工的施工标准：

（1）润滑前清洁注油工具和注油接头。

（2）如果使用气动工具，确保设置的压力小于 2500 psi。没有特殊要求的话可以将压力设置在 100~200 psi，该压力已经足够将旧油挤出。

（3）正确连接和使用注油枪，确保注油时连接牢靠，防止松脱时油脂飞溅。

（4）注油开始时，如果发现压力异常，应做仔细检查，确认没问题后才可继续施工，必要时更换注油嘴。

（5）注油直至旧油脂从指定的出口挤出，新油脂从指定出口挤出。如图 6.8 所示。

（6）如果未能正确挤出，可能是油路堵塞或是油脂硬化，也可能是密封失效。

（7）清洁部件表面，去除多余的油脂。

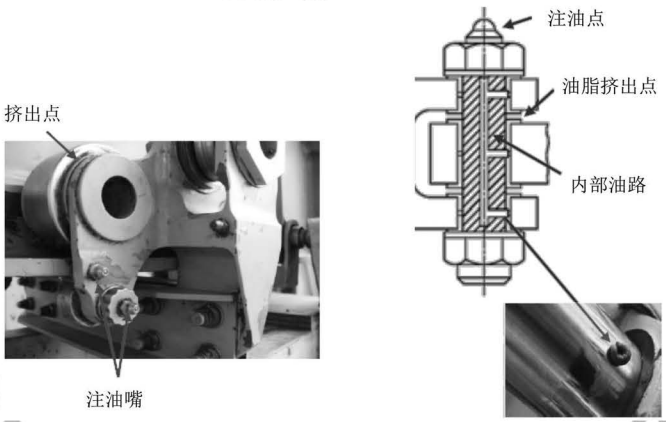


图 6.8　油脂注油位置与挤出位置示例

3）工作关闭

关闭 551DB 维护盖板，将飞机恢复。

4）特殊情况处理

情形一：润滑时油嘴脱落。

应检查注油嘴和部件是否存在堵塞。如有必要，分解部件清除堵塞物。依据 AMM20-10-24 安装新油嘴。

情形二：注油嘴丢失无法修复。

应完成临时润滑。参考 AMM20-10-24 注油嘴损坏或丢失情况下的临时润滑步骤，选择适用的油枪（STD-438）与合理的油脂，再将转接头 COM-7616（即 B411）安装在油枪上。在润滑的过程中要确保转接头 B411 紧密地塞在丢失注油嘴的油孔中。

情形三：油脂错用的异常情况。

应完成油脂更换。按手册要求选择材料，完成油路清洗。尽可能采取分解部件，直接清洗的方式。无法分解时，可使用诸如新油脂进行替换的方式清洗。

6.1.5　飞机维修润滑项目二：钢索润滑

1. 项目介绍

2006 年，某航空公司一架波音 757 飞机的机组反映前轮大角度右转弯时，操纵较困难。航后作动前轮转弯发现右转 20°左右，有卡滞现象，检查转弯系统钢索正常，润滑转弯机构后，操作前起转弯工作正常，无卡滞现象。证明之前的卡滞是转弯机构缺乏润滑导致的。

下面我们以波音 737NG 飞机前轮转弯的钢索润滑为例，对钢索润滑程序进行学习。润滑工作程序参考飞机维护手册 AMM12-26-00-600-801 任务号。该程序只有一个任务，即

润滑控制钢索。所有前轮转弯钢索是碳钢所制，除了 NWSA/B 环路，本训练项目只需完成碳钢钢索润滑。图 6.9 为前轮转弯系统钢索结构图。

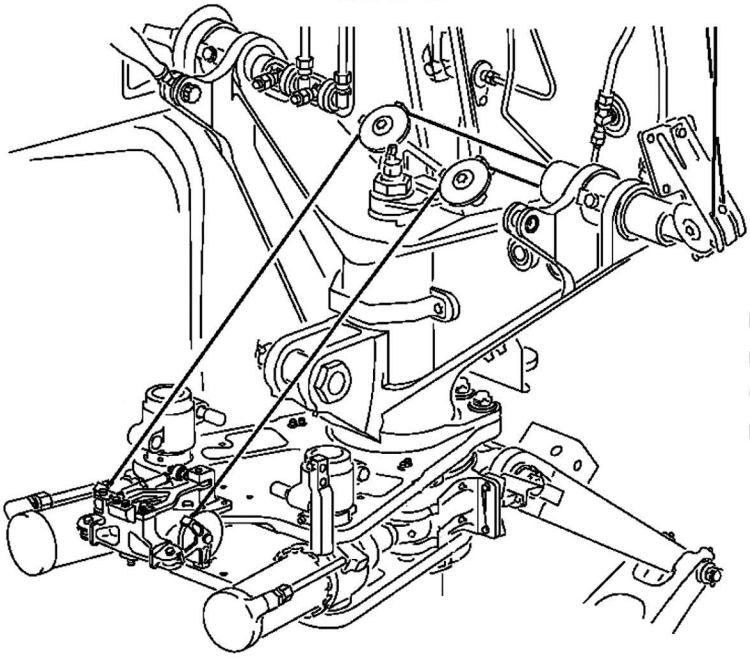


图 6.9　前轮转弯系统钢索结构图

2. 施工程序

1）区分钢索材料，确定涂抹的位置

由于油脂会附着外界污染物，有可能对不锈钢材料的钢索造成损伤，因此不锈钢材料的钢索不需要润滑。如不锈钢 CRES 钢索，如果接触到润滑油或滑油，这些物质会附着、滋生腐蚀物导致钢索内部细股上表面腐蚀，从而缩短钢索的寿命。碳钢钢索应按手册要求，使用 BMS3-33 进行润滑。

2）润滑前清洁

使用不起毛的干净棉布清洁钢索，将钢索上的旧油和污物清除。

3）润滑施工

在碳钢控制钢索的全长度行程使用 BMS3-33 油脂（推荐使用）或 BMS3-24 油脂（备用）均匀地涂抹薄薄的一层，对钢索进行润滑。要求施加在钢索上的油脂薄且均匀，如图 6.10 所示。这里需要注意的是，由于钢索在全行程运动时，滑轮、扇形盘、鼓轮等部件同样会得到润滑，因此在对钢索润滑时，不必润滑这些部件。润滑时，不要将溶剂、油脂或滑油接触到不锈钢钢索，这些材料将收集大量污物，损坏不锈钢钢索的内面，减少钢索的使用寿命。

4）润滑后清洁

钢索润滑后，使用一块干净的棉布对钢索擦拭，去除多余的油脂，只需在钢索表面留有一层可见的油膜，可采用印色法检查确认，如图 6.11 所示。

图 6.10　钢索润滑施工图

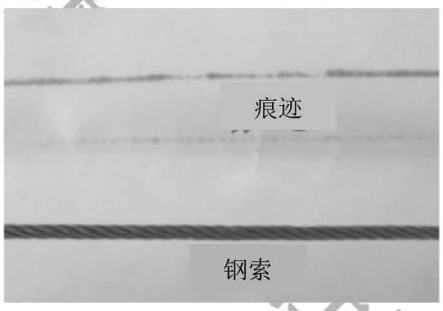


图 6.11 印色法检查

知识总结	随堂练习

6.2　密封

在飞机和各类机械设备中，为了防止灰尘、水分以及有害介质侵入机体，同时阻止润滑剂或工作介质的泄漏，必须用密封材料进行密封（Seal）。另外，对飞机的某些结构，如机身增压舱、结构油箱等也必须进行密封，防止结构漏气、漏油。密封一般可分为静密封和动密封两大类。

6.2.1　静密封

静密封是密封表面与接合零件间没有相对运动的密封。它主要是保证两接合面间有一个连续的压力区，以防止泄漏。

中国民航出版有限公司版权所有

1. 静密封的材料

静密封可采用多种密封材料进行密封。常用的密封材料有密封垫、密封胶和密封腻子三类。

1）密封垫（Gasket）

在接合面间加密封垫进行静密封是最常用的方法，如图 6.12 所示。密封垫的剖面形状以“O”形和矩形为多。飞机上常用的密封垫有金属垫、橡胶垫、纤维垫和复合材料垫等。

（1）金属垫。

金属垫是用塑性较好的金属制成，常用的有纯铜垫、黄铜垫、纯铅垫、纯铝垫和钢垫等。金属垫与其他密封垫比较，有较大的强度以及耐高温。它主要用在结合面受力较大的附件上，如法兰盘、管嘴、电嘴和减压活门等所用的垫片或垫圈。

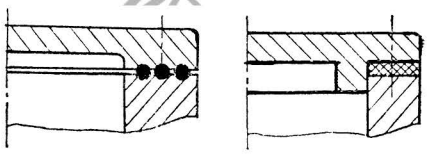


图 6.12　密封垫

（2）橡胶垫。

橡胶垫或橡胶圈广泛用于密封滑油系统、燃油系统、液压系统和空气系统。橡胶圈的横截面，通常以“O”形为多，所以常称其为 O 形圈。不同橡胶材料制成的橡胶圈，其性质和用途都不完全相同。用天然橡胶制成的橡胶圈抗油性差，通常用作防止漏气、漏水的密封垫；用丁腈橡胶制成的橡胶垫抗油性好，通常用作燃油和滑油等系统的密封垫。

在维护飞机时要注意，各系统的橡胶圈是不能随便替换的。例如，液压系统中更换密封圈的规则是使用与生产厂家维护资料中要求完全一样件号的密封圈。飞机上用的各种密封圈一般都用纸袋包装，而且每个包装袋只装一个橡胶密封圈。包装袋上注有件号、密封圈材料成分、生产（硫化）日期以及生产厂名。件号是识别要用的 O 形密封圈正确与否的唯一方法。但是大多数的 O 形密封圈表面还标有一连串的颜色点或颜色带来表明能与何种油液兼容，例如：

蓝点或带——空气或 MIL-H-5056 液压油；

红点或带——燃油；

黄点或带——合成发动机滑油；

白色带——石油基发动机滑油；

绿色带——磷酸盐酯基（Skydrol）液压油。

生产日期是按年份和季度给出的，例如，密封圈包装袋上标有 3Q80，则表示该密封圈的生产日期为 1980 年第三季度，如果存放时间超过 24 个月，通常认为该密封圈不是新的了。

（3）纤维垫。

飞机上所用的纤维密封垫主要有纸垫、软胶布垫和石棉垫等。纸垫是用油浸润的纸板制成，常用于齿轮箱盖、轴承端盖处以及油路系统的密封。

软胶布垫是用棉布浸过树脂然后热压而成。它主要用于飞机附件中受压力较大的地方

封严。

石棉垫是以石棉纤维为主，由少量合成橡胶将其黏结在一起而成。它主要用于高温场合。

（4）复合材料垫。

飞机上常用的复合材料垫有铜包石棉垫和涂胶铜丝石棉垫两种。铜包石棉垫是用两层薄铜片，中间夹以石棉压制而成的。它能耐高温、高压，多用在高温零件结合处，如用作喷气发动机燃烧室传焰管和活塞式发动机排气管、电嘴等零件的密封垫。涂胶铜丝石棉垫是由纯铜丝或黄铜丝与石棉线织成的布，经橡胶及石墨处理后制成的，用来密封工作温度在150℃以下的零件结合处。

以上所述的密封垫各有特点，在飞机维护工作中应注意按照规定使用，在拆装各系统附件时，不能随意调换或代替。有的航空维修单位规定拆下的旧密封圈应剪断，以防再用。

2）密封胶（Sealant）

密封胶是由基料（橡胶）、补强剂、增黏剂和硫化剂等组成的。我国航空上常用的密封胶主要用于飞机座舱和座舱盖以及金属板材铆接、螺栓连接结构的缝内或表面密封，也可用于与燃油、水或海水接触的螺栓、铆钉及其他金属结合处缝内或表面的密封。例如，XM-22密封胶主要用于飞机的机翼、机身和整体燃油箱的密封。

3）密封腻子（Putty）

密封腻子分为腻子和腻子布（即密封带）两种。密封腻子不需硫化，没有施工期限制。它与金属黏结力不强，耐水和耐油性差，工作温度范围较小。密封腻子只起辅助密封作用，一般与密封胶共同使用，很少单独使用。

2. 结构的密封形式

为了防止结构漏气、漏水、漏油，需要在结构上采用各种密封形式，以满足结构的密封性能要求。结构的基本密封形式有以下几种。

1）缝内密封

这种密封是在两个零件贴合面之间充填密封材料（放置密封垫或涂密封胶）的一种密封形式，如图6.13所示。在缝内密封中，以缝内涂密封胶的可靠性最好。缝内铺胶膜密封的密封效果与涂胶密封相似，其优点是干净，显著地改善了劳动条件。缝内铺密封带密封的突出优点是没有施工期的限制，使用方便，但耐热性和耐油性较差。另外，在采用缝内铺密封带的方法密封时，密封带的厚度必须大于贴合平面之间的缝隙。

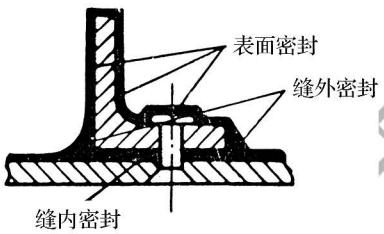


图6.13　结构的密封形式

缝内密封结构采用的密封胶或密封带均属橡胶系列材料，它存在老化问题。胶层老化以后，不仅降低了密封效果，同时也降低了铆缝强度。老化的密封物难以更换。因此，在结构修理中，通常不采用缝内密封。

2）缝外密封

这种密封是在两个零件接缝外表涂密封材料的一种密封形式，见图 6.13。其特点是工艺简单，便于修补和排除故障，一般与缝内密封配合使用或单独使用。

3）表面密封

这种密封是将稀释的密封材料涂在密封区整个表面上的一种密封形式，见图 6.13。表面密封是一种辅助密封方法，便于修补和排除故障，但密封材料用量较大，会增加飞机结构重量。

4）混合密封

这是以上三种密封形式或两种密封形式混合使用的一种密封形式，见图 6.13。混合密封效果好，密封可靠。

5）紧固件密封

紧固件密封是在铆钉、螺钉等紧固件上附加的密封。它采用密封元件（见图 6.14）或靠其自身能起到密封作用的一种密封形式（干涉铆接）来达到密封。一般地说，在紧固件密封中，涂胶密封效果好，但施工复杂，劳动条件差。加胶圈或加铝套密封比较方便，密封也较可靠。

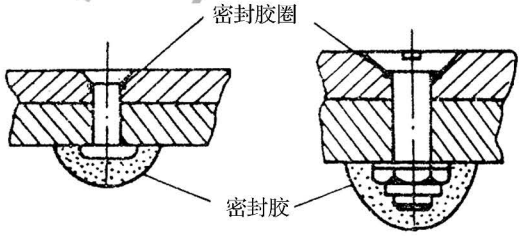


图 6.14　紧固件密封

6.2.2　动密封

动密封是指密封表面与接合零件间有相对运动的密封。根据其相对运动形式的不同可分为旋转密封和移动密封。另外，根据密封件与运动件是否接触，又可分为接触式密封和非接触式密封。

1. 接触式密封

这种密封是在轴和孔的缝隙中填塞弹性材料并与转动（或移动）轴间形成摩擦接触，阻止油或其他物质通过而起密封作用的。其密封的有效性取决于密封材料的弹性及其在摩擦表面上所产生和保持的压力。常用的接触式密封如下。

1）毛毡密封

将羊毛制成的矩形剖面的毛毡团放在轴承透盖或机座的梯形槽内，见图 6.15（a）；或用压盖轴向压紧，使毡圈受压缩而产生径向压力抱在轴上，达到密封目的，如图 6.15

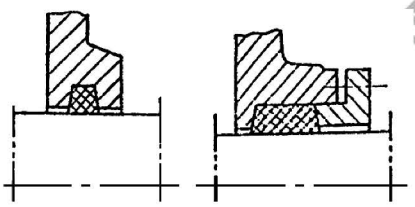


图 6.15　毛毡密封

(b) 所示。实际生产中也常用石棉、橡胶、塑料代替毛毡。这种密封结构简单，成本低，但密封效果差，一般用在低速、润滑脂润滑处，主要起防尘作用。

2）密封圈密封

密封圈用橡胶、皮革或塑料制成，常用的是由各种橡胶制的密封圈。密封圈可以根据需要做成不同的剖面形状。最常用的是 O 形密封圈，其剖面为圆形。O 形密封圈具有结构简单、密封效果好、可以密封两个方向、摩擦力小、装拆方便等优点。O 形密封圈可用于静密封也可用于往复运动和旋转运动的动密封；可用于外径密封，也可用于内径密封。O 形密封圈装在沟槽中受到油压作用而发生变形，紧贴沟槽和间隙而起密封作用。当油液欲往外泄漏时，密封圈借助流体的压力挤向沟槽的一侧，在接触边缘上压力增高，构成有效的密封，如图 6.16 (a) 所示。这种随介质压力升高而提高密封效果的性能称为“自封”，压力过大会使两个部件之间的 O 形密封圈凸出，见图 6.16 (b)。在高压系统中，为避免 O 形密封圈凸出，常在 O 形密封圈受压侧的相反一面设置挡圈，如图 6.17 所示。挡圈是用比 O 形圈本身更硬的材料制成的支撑圈。

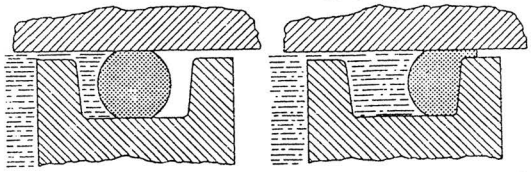


图 6.16　O 形密封圈的密封作用

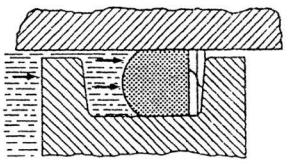


图 6.17　O 形密封圈的支撑

除 O 形密封圈外，常用的密封圈还有 U 形、V 形和 J 形等剖面的唇缘式密封圈，它们都具有唇形的结构。典型的唇缘式密封圈的构造，如图 6.18 (a) 所示。它由橡胶圈 1、金属骨架 2 和弹簧圈 3 组成。唇缘式密封圈依靠唇部 4 自身的弹性和环形圆柱螺旋弹簧的压力压紧在轴上实现密封。使用时，将密封圈唇口的方向朝向密封的部位，如图 6.18 (b) 所示。密封唇口对着轴承，主要防止油液外泄。唇缘式密封圈有这样的特点：当介质压力愈高，密封唇与轴就贴得愈紧，密封效果愈好。唇缘式密封圈有自封作用。如果主要为了防止外部杂物侵入，则密封唇口应背向轴承，如图 6.18 (c) 所示；如果同时要防止内泄外漏，则应用两个相反方向的密封圈，见图 6.18 (d)。唇缘式密封图一般用于往复运动密封。

接触式密封的缺点是密封表面间的摩擦将引起温度的升高，致使密封元件逐渐硬化从而破坏了密封作用，所以其使用速度受到一定的限制。

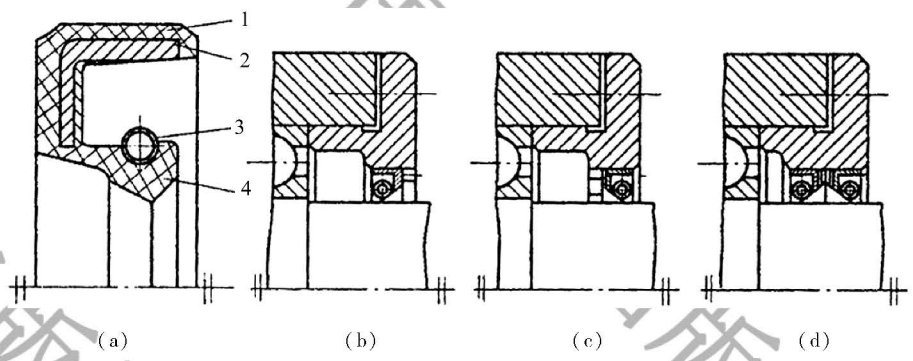


图 6.18　唇缘式密封圈及其配置

1. 橡胶圈；2. 金属骨架；3. 弹簧圈；4. 唇部

2. 非接触式密封

非接触式密封的密封元件与运动件不接触，而且密封元件是金属制的，故可用于高速、高温场合。常用的有以下几种。

1）缝隙式密封

图 6.19 为缝隙式密封的不同结构。如图 6.19（a）所示，在轴与轴承盖通孔之间留有一个细小的环形间隙，其径向间隙为 0.25~0.40 mm（轴颈直径 $d \leqslant 50$ mm 时）；0.5~1.0 mm（$d > 50$ mm 时）。间隙愈长愈小，密封效果愈好。为了提高密封效果，可在轴承盖孔内开多个并列的环形槽，见图 6.19（b）。并在槽中填满润滑脂，以阻止轴承内的润滑脂沿轴隙向外泄漏，也可防止杂物的侵入。

如果用于润滑油的密封时，可在轴承盖的孔壁上车出螺纹槽，见图 6.19（c）。欲向外泄漏的润滑油因螺旋的输送作用被送回轴承内。螺纹槽可以是左旋或右旋，须根据轴的转向具体确定。

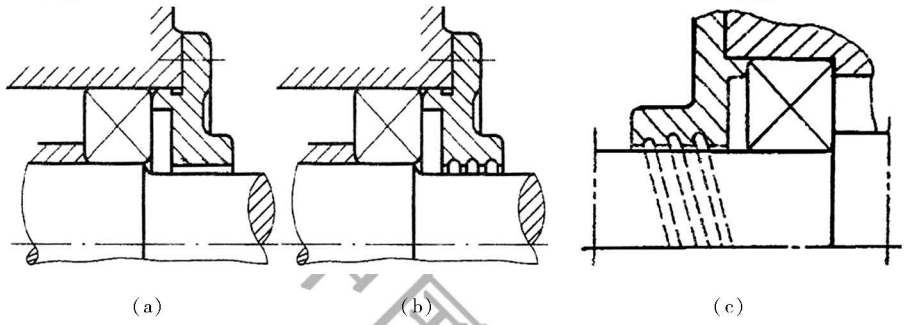


图 6.19　缝隙式密封的结构形式

另外，用于飞机发动机的压气机转子和静子之间气体密封时，一般通过尽可能减小径向间隙来减少漏气损失。由于径向间隙很小，为了防止在工作时因振动或热胀冷缩等原因造成转子与静子相碰而损坏，常在静子壁上涂软质涂层。涂层的材料根据气流的温度而定，通常有石墨、滑石粉、铝粉及其他混合物。因为涂层比叶片硬度低，这样即使叶片与它接触也不会刮伤叶片，如图 6.20 所示。

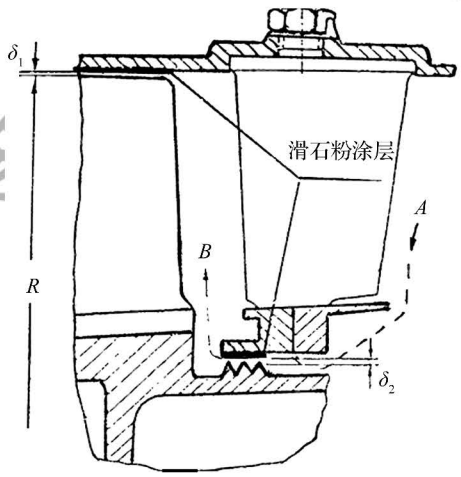


图 6.20　小缝隙密封的结构形式

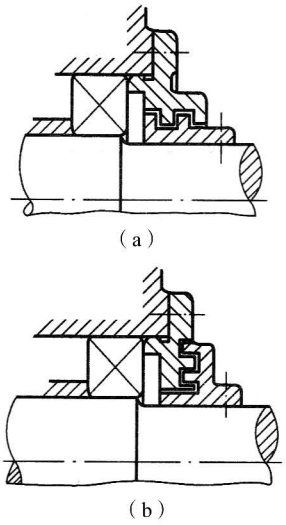


图 6.21　迷宫式密封

2）迷宫式密封

这种密封从结构上使静止件与转动件之间有拐几道弯的缝隙，构成“迷宫”，使油不易漏出。图 6.21（a）是径向迷宫式密封，其轴向尺寸紧凑，但径向尺寸较大；图 6.21（b）是轴向迷宫式密封，其轴向尺寸较大，但径向尺寸紧凑，而且轴承端盖要剖分。一般都在槽中填满润滑脂，以提高密封效果。

迷宫式密封，无论对润滑油还是润滑脂都相当可靠，而且速度愈高，效果愈好。迷宫式密封结构较复杂，成本较高。

3）甩油环密封

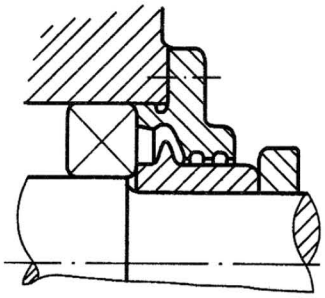


图 6.22　甩油环密封

图 6.22 所示为一齿沟式甩油环，它不仅可以把轴承内侧润滑箱体内零件的润滑油甩回箱内，也可以防止轴承中的润滑脂流入箱内。

3. 流动气体增压密封

流动气体增压密封是利用具有一定压力的流动气体对所需密封部位进行增压，使被密封部位的气体压力大于欲往外泄漏介质（如滑油或气体）的压力，从而达到密封效果的一种密封方法。

流动气体增压密封装置由压力气源和引气输送管组成。流动气体密封常为非接触式配合密封，可起到极好的密封作用。

流动气体增压密封常用于高温部位以及其他方式密封不佳的场合。在飞机发动机中为了防止滑油从轴承腔漏入发动机主气流内，保持座舱增压用的空气清洁并减少滑油的消耗量以及保证高温机件工作的安全，一般都采用流动气体增压密封。例如，在 CFM56-3 飞机发动机中就采用了流动气体增压密封与迷宫式密封，如图 6.23 所示，CFM56-3 飞机发动机通过引气管引入低压压气机的具有一定压力的气体，再经导管输送到油封与气封之间的区域，该气体的压力大于滑油一侧的压力，所以阻止了润滑油的流出，达到密封目的。

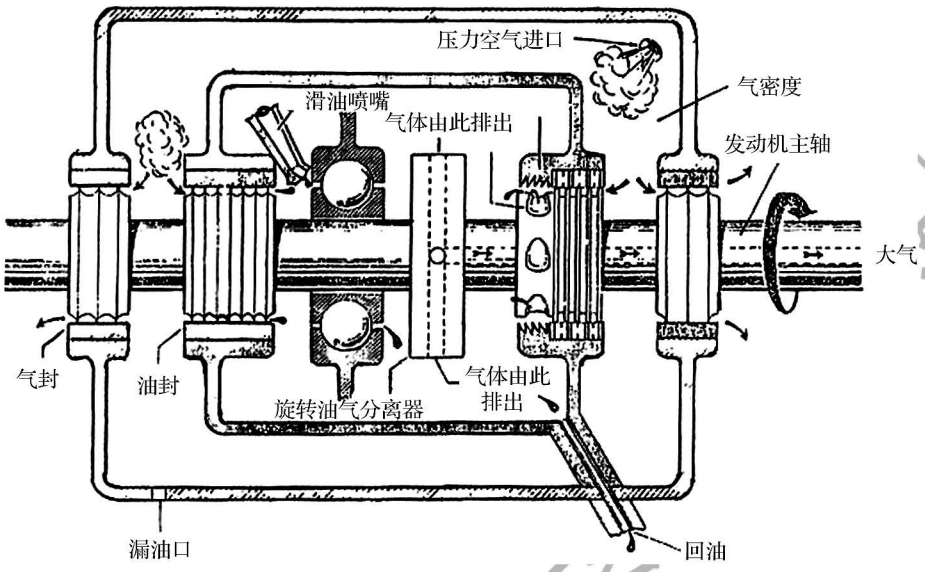


图 6.23　流动气体增压密封

6.2.3　飞机维修密封项目一：燃油箱结构内密封剂渗漏修理

1. 项目介绍

燃油渗漏会导致火灾，危及飞行安全。民航飞机上使用的燃油油箱均为结构油箱，即飞机结构本身用于存储燃油，而金属结构不密封会与腐蚀介质接触。因此，飞机油箱的结构内部会通过密封剂对油箱进行密封，防止结构腐蚀，降低火险。密封剂的正确使用是飞机结构维修中重要的技能。

下面以波音 737NG 飞机燃油箱结构内密封剂渗漏修理为例，学习如何正确使用密封胶。此密封工作程序参考飞机维护手册 AMM 28-11-00-300-803 任务号。图 6.24 为飞机油箱结构图。

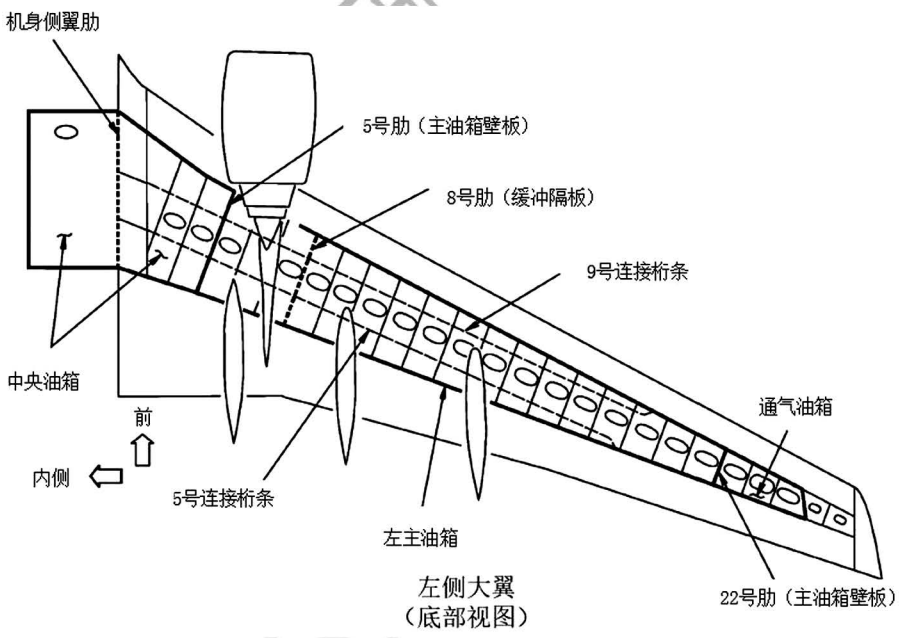


图 6.24　飞机油箱结构图

2. 施工程序

由于工作区域的特殊性，在对密封剂进行修理之前，需按飞机维修手册的要求做好准备工作，包括以下内容：

（1）油箱放油，可参考 AMM28-26-00-650-801。

（2）清洁和进入燃油箱，可参考 AMM28-11-00-910-802。

（3）完成燃油泄漏探测程序，以寻找渗漏源，可参考 AMM28-11-00-790-801。

密封胶的施工过程由以下几步组成，图 6.25 为飞机密封施工过程简图。

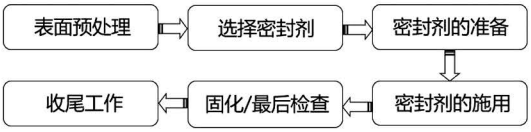


图 6.25　飞机密封施工过程简图

1）表面预处理

首先，将密封剂从填角密封上剪下，确保平滑地切割密封剂，在损坏的密封剂的端部切割成一个斜坡使得新的密封剂可以重叠在留下的密封剂上，参见图 6.26。如果填角密封搭接良好，则不需要将密封剂切割到裸露金属。

其次，是清洁工作，确保清除所有松动的密封剂。先用研磨垫和 93 系列溶剂除去旧的预涂层，再用干净的刷子和浸有 93 系列溶剂的棉布清洁表面，清洁区域必须与邻近的区域重叠，最后使用干净的干棉布擦干。

在涂敷密封剂之前立即用溶剂清洁表面并擦干，不要让表面上的溶剂干燥，也不要用手指触摸该区域。

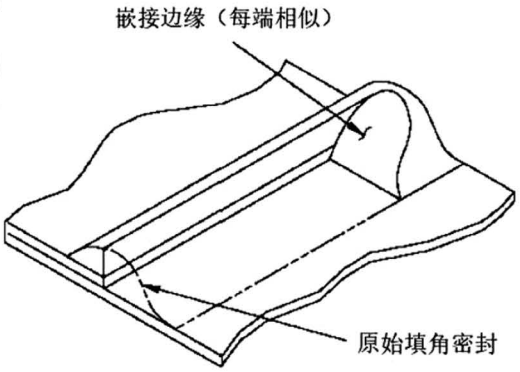


图 6.26　原始密封胶去除

2）选择密封剂

使用工作程序说明或维护手册所指定的正确密封剂，根据所使用的区域以及用途的不同而选择（手册中给出的密封剂是通过件号标明的，有些没有件号的用供应商代码标明）。

表 6-5　波音 737NG 飞机燃油箱结构用密封剂列表

SEALANT	CLASS	APPLICATION TIME (MINIMUM) HOURS [1]	TACK-FREE TIME (MINIMUM) HOURS [1]	SQUEEZE-OUT LIFE (MINIMUM) HOURS [1]	CURING TIME (MINIMUM) HOURS [1]
Proseal 860 [3]	B-1/6	1/6	1.5 [2]	—	4
PR-1826 [4]	B-1/4	1/4	1	—	2
PR-1828 [4] [6]	B-1/2	1/2	2.5	—	3
BMS 5-45	A-2 (Grade 1)	2	36	—	72
	A-2 (Grade 2)	2	24	—	48
	B-1/2 [7]	1/2	10	—	12
	B-2	2	12	6	24
	C-24 [5]	8	—	24	168
	C-48 [5]	12	—	48	336
	C-168 [5]	48	—	168	1344

注：资料来源：波音 AMM 手册。

检查所选密封剂类型是否正确（如密封剂的施用和挤出时限是否符合修补件和紧固件的装配要求），施涂方法是否符合规定要求。

3）密封剂的准备

由于密封剂化合物是有毒的，应首先确保混合密封剂的工作区域内有良好的通风。

查看标签，检查基料和催化剂是否配套，确保批号相同并核实有效期。如果密封剂已经变干、发黏或呈块状，停止使用。

在进行配比之前，充分搅匀两部分混合物，然后按照说明程序对两部分混合物按正确比例进行调配；在调配中所使用的催化剂不能少于 5 g，这样密封剂的混合总量才可满足要求。

使用干净的抹刀或其他合适的工具充分搅拌各部分混合物。方法是：先将催化剂充分搅拌直到固体物质被打散成均匀的流质，然后再搅匀基料，慢慢将两部分混合，注意由于催化剂有毒性，在混合时是把催化剂加到基料中并充分搅拌。保证两者要充分混合，并在搅拌时不要混入气泡。检查基料与催化剂已用净（双料密封剂必须完全混合）。如果已完全混合，密封剂应是均匀的流质，颜色均一。如果能看到斑点或条纹（一般是催化剂尚未混合的残存），则说明没有完全混合，这样会影响固化性和使用效果。使用冷冻的密封剂，应放在常温下加温直到容器上的凝结水耗干。一定要让密封剂完全融化，冷的密封剂不能贴附在结构表面。融化后的密封剂会很容易地从喷枪中挤出并且可良好地附着在表面。不要将解冻后的密封剂再次冷藏。

4）密封剂的施用

首先，应确保所有使用的密封工具是清洁的。然后，缓慢连续地将密封剂涂到工作表面，密封要充足，能够完全覆盖施涂区域。最后，用整形工具调整外形，抚平密封胶让表面光滑，除去所有多余的密封剂，清洁施涂区域及密封工具。关于密封胶尺寸及外形的限制应遵循手册中的要求。

5）固化及最后的检查

注意把握密封剂的固化时间，覆盖其他密封胶之前要让密封剂充分固化后才可进行。

6）收尾工作

最后检查一遍涂抹密封剂的部位，检查是否有缺陷，如果必要的话还要重新密封。分解工具，清洗干净，然后存放好。密封区域要清洁且没有碎片杂物。

6.2.4 飞机维修密封项目二：O 形密封圈的拆卸与安装

飞机液压系统可以为飞机的操纵系统、起落架收放、转弯、刹车、反推等提供液压动力。液压油箱顶部会通空气给油箱增压至 50 psi，液压油箱增压组件上的过滤器装有 O 形密封圈，防止压力泄漏。

更换密封圈是飞机结构维修中常见的工作，飞机上使用的大多数密封圈和垫圈都是以 O 形圈的形式制造的。O 形密封圈在两个方向上都提供有效密封。这种密封是通过其材料挤压的弹性变形来完成的。下面我们以 737NG 飞机空气增压组件过滤器中的 O 形密封圈为例，学习如何正确更换此类型密封圈。此项工作程序参考飞机维护手册 AMM29-09-01-

130-002 与 AMM29-09-01-420-013 任务号。图 6.27、6.28、6.29 为飞机液压油箱空气增压过滤器组件结构图以及 O 形密封圈的位置。

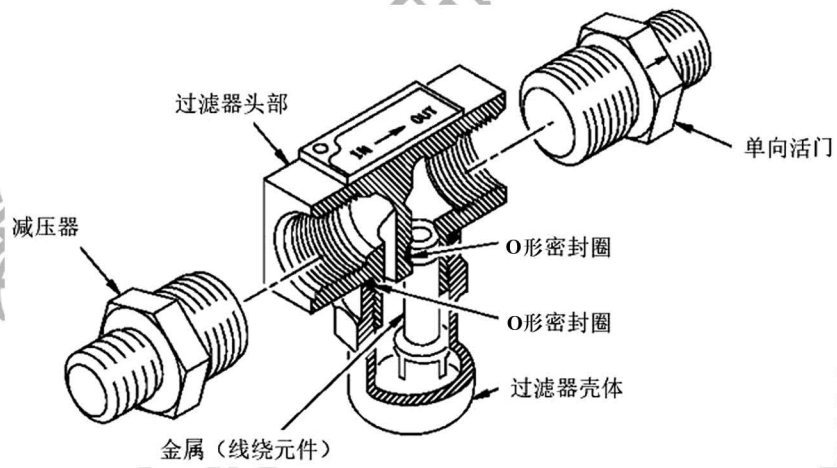


图 6.27　飞机液压油箱空气增压过滤器组件结构

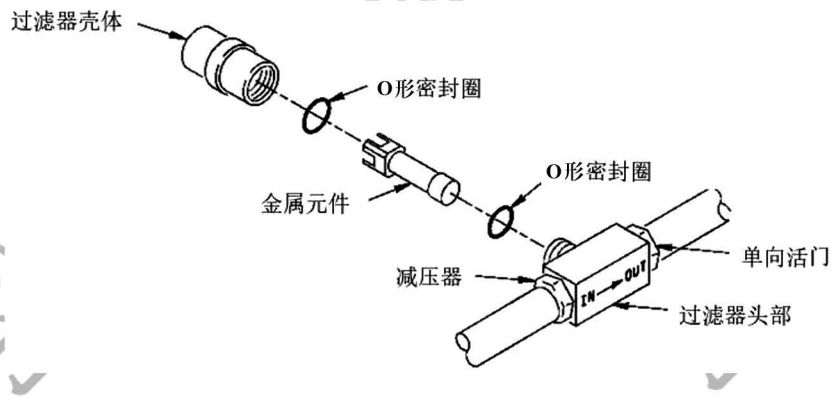


图 6.28　飞机液压油箱空气增压过滤器组件——O 形密封圈位置

拆卸、安装 O 形密封圈时常用一些专用工具。O 形密封圈的拆除方法如图 6.30 所示。拆除时，要根据 O 形密封圈安装结构选择合适的工具。

对于拆下的旧封圈，一定要进行报废处理。

在安装 O 形密封圈前，应确保使用正确的密封圈。首先，密封圈与滤芯都为全新；其次，应确认件号跟手册要求的一致并与旧封圈进行比较；最后，检查新封圈，确认其状况良好，没有损伤。每一个用于更换的 O 形封圈都应从其密封包装中取出，并检查有无缺陷，如瑕疵、磨损、切口或穿孔。虽然 O 形封圈乍一看可能是完好的，但可能存在轻

微的表面缺陷。在不断变化的操作压力下的飞机系统中，这些缺陷通常会令 O 形密封圈无法达到令人满意的密封性能；因此，一旦发现影响 O 形密封圈性能的缺陷时，比如小裂纹、异物颗粒，或其他能导致渗漏或缩短 O 形圈寿命的不规则物质，应予以废弃。

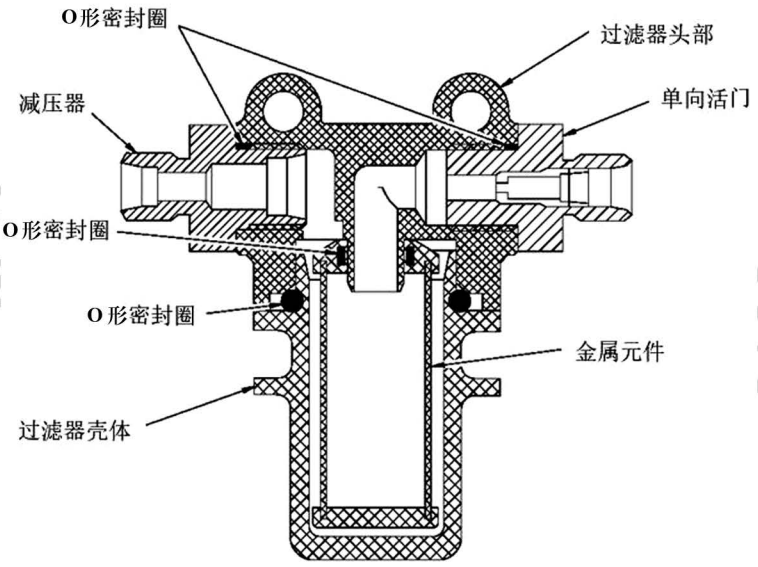


图 6.29　空气增压过滤器组件——O 形密封圈位置

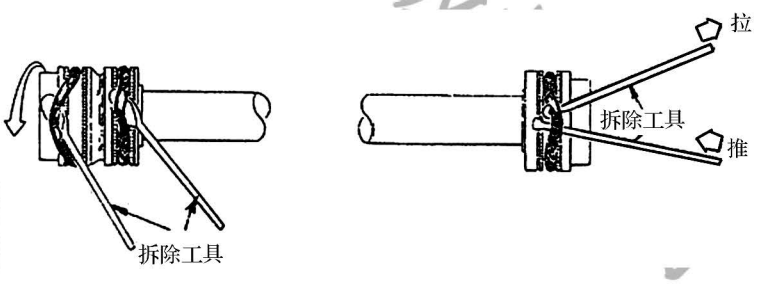


图 6.30　O 形密封圈的拆除方法

使用 MCS352B、D00054 或 D00153 轻轻润滑新的 O 形密封圈后，将两个密封圈安装到过滤器壳体上。在安装 O 形密封圈时，要特别小心，别让螺纹锋利的边缘或工具割伤或损坏密封圈。O 形密封圈的安装方法如图 6.31 所示，本项目为外部 O 形密封圈的安装。在安装过程中，避免滚动和扭曲 O 形封圈，如果可能，保持 O 形圈轮廓线的位置不变。当 O 形封圈安装需要跨越或穿过锐利的螺纹区域、脊、槽和边缘时，使用保护措施，将 O 形封圈安装到位后，用手指轻轻转动 O 形圈，以消除安装过程中可能出现的任何扭曲。

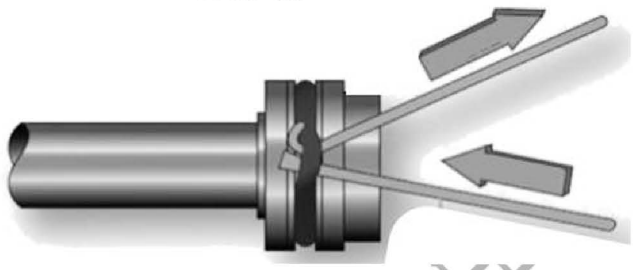


图 6.31　O 形密封圈的安装方法

知识总结	随堂练习

复习思考题

1. 何谓滑动摩擦？何谓滚动摩擦？
2. 润滑有哪几种状态？需要润滑的摩擦面至少应保持哪种状态的润滑？
3. 润滑的作用有哪些？
4. 对航空润滑油有哪些要求？
5. 试述常用国产航空润滑油的品种及使用范围。
6. 润滑脂与润滑油相比，有哪些特点？润滑脂一般用在什么场合？
7. 试述常用国产航空润滑脂的品种及使用范围。
8. 常用的润滑方式有哪几种？各有什么特点？
9. 何谓静密封？何谓动密封？
10. 飞机上各系统相同尺寸规格的橡胶密封圈为什么不能互相随意代替？
11. O 形密封圈表面的色点或色带表示什么？
12. 密封垫由哪几种材料制成的？各有什么特点？
13. 静密封的材料有哪三类？
14. 结构的密封形式有哪几种？各有何特点？

中国民航出版社有限公司版权所有

15. 试述拆装 O 形密封圈的方法。
16. 试述 O 形密封圈和唇缘式密封圈的密封特点。
17. 常用的非接触式密封有哪几种？各有何特点？
18. 何谓流动气体增压密封？

中国民航出版社有限公司版权所有

附录

附录 1　课程网络资源及教材中二维码使用说明

本书建设了配套的网络学习资源，学习者可以通过智慧职教网站（https：//www. icve. com. cn），免费注册学习账号，拓展学习网络课程资源。同时，在教材的每一章添加了该章导学的二维码，在每一节后面添加了该节知识总结和随堂练习的二维码，方便学习者课前预习和课后复习巩固。

学习者可以通过智慧职教网站（https：//www. icve. com. cn）免费注册学习账号（如图 F1. 1 所示），学习网络课程资源。

图 F1. 1　智慧职教网站首页截图

在智慧职教网站首页搜索“航空机械基础”—点击“薛建海老师主持，广州民航职业技术学院开设”的“航空机械基础”课程（如图 F1. 2 所示），即可添加学习。与教材上二维码关联的章节导学、知识总结和随堂练习，在网络课程的“教材配套”模块。

图 F1. 2　“航空机械基础”课程截图

学习者如果需要通过扫码快速学习课程导学、知识总结和随堂测验，请按如下步骤操作：

（1）智慧职教网站首页，通过微信扫码下载并安装“云课堂 APP”，也可以直接扫码图 F1.1 上的二维码下载；

（2）在云课堂 APP 底部菜单，找到“资源库”，点击“课程—查看全部”—搜索“航空机械基础”—点击“薛建海老师主持，广州民航职业技术学院开设”的“航空机械基础”课程—“参加学习”；

（3）打开云课堂 APP，在底部菜单，点击“职教云”，点击右上方三个圆点标志，出现下拉菜单，通过扫一扫功能，扫描书上的二维码（如图 F1.3 所示）。

图 F1.3　职教云 APP 首页截图

如果 APP 处于登录状态，可以直接扫码进行快速学习和测验。如果 APP 未登录，会弹出智慧职教网站首页，在弹出的页面上利用已申请账号登录，再次利用 APP 扫码就可以快速学习。

另外，航空机械基础教学交流群（见图 F1.4）是专为“航空机械基础”课程设置的教学群。群里成员为广州民航职业技术学院、上海民航职业技术学院、云南交通职业技术学院和中国民航出版社等业内的老师，旨在促进“航空机械基础”课程的交流学习，各院校师生及读者在教材使用和学习过程中，若发现问题，可在本群反映，我们将第一时间给予反馈。

群名称:航空机械基础教学交流群
群　号:867270281

图 F1.4　航空机械基础教学交流群

附录 2　航空机械基础课程设计概述

一、航空机械基础课程设计的教学任务与要求

1. 本课程的任务

航空机械基础课程设计是依据广州民航职业技术学院《航空机械基础课程设计》课程标准，参照民用航空器维修人员执照 AC-66R1-02《民用航空器维修人员执照基础部分考试大纲》、AC-66R1-03《民用航空器部件修理人员执照考试大纲》和《民航工人技术等级标准及培训大纲》而设计制定的实践性课程。

本课程的任务是对飞机传动附件进行拆装和分解，进而分析其构造和传动原理，绘制其机构运动简图、装配示意图和零件图，并对其主要零件进行设计校核计算。

2. 本课程的要求

（1）熟悉常用机械传动装置的构造、工作原理和零件之间的连接方式，能够正确维护常用航空机械传动装置；

（2）熟悉和了解常用机械零件的构造、规格标准，了解机械零件设计过程，从而进一步巩固所学的知识，加深对航空机械的认识和理解；

（3）能够根据有关标准的规定，初步学会综合运用所学的基本理论知识和基本技能解决生产实际问题；

（4）培养拆装机器及零部件的能力，学会正确使用工具、量具；

（5）培养团结协作、耐心细致和严肃认真的工作作风和态度。

二、航空机械基础课程设计日程安排

附表 2-1　航空机械基础课程设计日程安排表

序号	项目	设计内容	建议课时（天）
1	分解拆卸零部件	1. 分组查阅资料及有关书籍，教师进行必要的提示和指导。 2. 仔细观察部件外形、结构，各零件间的连接与安装情况。 3. 制定拆卸步骤，然后依次拆卸和分解零部件，并记录各零件的相互位置和连接安装方法。 注意： （1）分解拆卸时，应分析该部件的工作原理和传动路线； （2）分析各零件的作用、材料、工艺结构、热处理和表面处理等技术要求； （3）将拆下的零件擦干净，编号后，放入托盘内，注意清点零件数量，决不允许丢失和损坏零件	1

续表

序号	项目	设计内容	建议课时（天）
2	画装配简图和零件图	1. 徒手画出装配示意图，测量并标注尺寸； 2. 徒手画出主要零件的零件图，测量并标注尺寸； 3. 绘制机构运动简图、装配图示意图和主要零件的零件图	2
3	设计校核计算	1. 对部件中的主要零件进行设计校核计算； 2. 计算传动装置的传动比，完成计算报告一份	1
4	装配	1. 清点和清洁零件，对需润滑的零件和部位加滑油或油脂； 2. 按拆卸的逆程序，精心装配、恢复原状，保证零部件的性能	0.5
5	答辩	按照学生本人实施和完成的课题内容进行答辩	0.5

中国民航出版社有限公司版权所有

附录 3　航空机械基础课程设计课题任务书

课题 1　飞机克鲁格襟翼传动齿轮盒课程设计任务书

一、飞机克鲁格襟翼传动齿轮盒的预备知识

1. 克鲁格襟翼传动齿轮盒的功用与构造

克鲁格襟翼传动齿轮盒是飞机机翼前缘缝翼操纵系统中的一个传动装置。克鲁格襟翼传动齿轮盒有三个功用：一是带动克鲁格襟翼螺杆转动，实现克鲁格襟翼的收放动作；二是带动外侧同步传感器工作；三是增加传动力矩，防止缝翼传动机构在静压或气动力作用下发生蠕动和逆转。克鲁格襟翼传动齿轮盒的外形，如图 F3.1 所示。

图 F3.1　克鲁格襟翼传动齿轮盒外形

克鲁格襟翼齿轮盒由齿轮盒、摩擦制动器和内侧缝翼同步传感器三部分构成，如图 F3.2 所示。

齿轮盒由壳体、输入齿轮、中间齿轮和输出齿轮等组成。输出齿轮通过传动轴与克鲁格襟翼螺杆连接。

克鲁格襟翼传动齿轮盒的传动部分既有两级平行齿轮传动，又有蜗轮蜗杆传动，为轮系传动，如图 F3.3 所示。原装的克鲁格襟翼齿轮盒内注满润滑油，因此，为满足润滑和防腐的需要，重新组装该部件时，要更换密封材料，重新注入润滑油。

摩擦制动器部分由主轴（即输入轴）、摩擦片、定位圈和弹簧等组成。

内侧缝翼同步传感器部分由空心轴、蜗杆、蜗轮和钢索鼓轮等组成，它与装在缝翼螺杆外侧的同步传感器一起使缝翼同步机构工作。

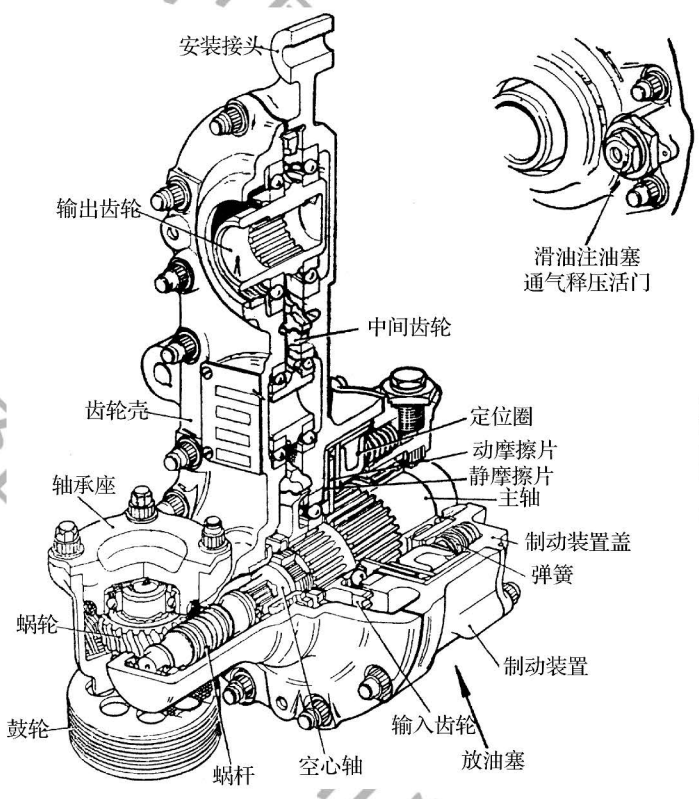


图 F3.2　克鲁格襟翼传动齿轮盒的构造

图 F3.3　克鲁格襟翼传动齿轮盒中的传动件

2. 克鲁格襟翼传动齿轮盒的工作原理

由缝翼操纵器内侧传动杆将动力输送给克鲁格襟翼传动齿轮盒，带动其主轴转动，主

轴一面使摩擦制动器工作，一面带动齿轮盒部分的输入齿轮转动，同时还通过空心轴和螺杆带动外侧同步传感器工作。齿轮盒部分的输入齿轮通过中间齿轮带动输出齿轮转动，使克鲁格襟翼螺杆工作。

二、本课题的任务和要求

对照实物，结合参考资料进一步全面理解本课题的有关知识。在初步了解克鲁格襟翼传动齿轮盒的基础上，按照航空机械基础课程设计日程安排表依次进行下列内容的课程设计。

（1）拆除克鲁格襟翼传动齿轮盒的端盖。

选用合适工具，拆下克鲁格襟翼齿轮盒上的各个端盖使其内部的零件暴露。在拆装过程中，要注意遵循安全操作规程正确地拆卸，并且将拆下的零件编号按序放置。

（2）进行克鲁格襟翼传动齿轮盒的传动分析，绘制该装置的机构运动简图。

从输入轴开始观察和分析克鲁格襟翼传动齿轮盒的传动路线，辨别和确定各运动副，绘制克鲁格襟翼传动齿轮盒的机构运动简图。

（3）绘制克鲁格襟翼传动齿轮盒的装配示意图。

拆卸和分解克鲁格襟翼传动齿轮盒，同时绘制其装配示意图。注意：在分解时，要记录分解步骤和零件的名称、数量、连接形式、配合关系以及具体的安装位置，同时将拆下的零件按序放置。

（4）测绘零件。

对拆下的齿轮轴和齿轮等主要零件进行测绘。确定和记录各齿轮和蜗轮的齿数、蜗杆的头数和旋向等参数。参考有关资料，绘制一张主要零件（齿轮轴或齿轮）的零件图。

（5）计算各分路的传动比，计算齿轮参数。

（6）装配克鲁格襟翼传动齿轮盒。

清洁和润滑各零件，然后，按拆卸和分解克鲁格襟翼传动齿轮盒的逆顺序，原样装配好齿轮盒。

（7）答辩。

整理和装订完成的图纸和计算报告，回顾和总结本课题涉及的知识和要点，回答相关的问题。

三、复习题

（1）简述克鲁格襟翼传动齿轮盒由哪些零件组成。举例说明其中标准件的规格尺寸、国标代号。

（2）简述克鲁格襟翼传动齿轮盒的工作原理。

（3）简述克鲁格襟翼传动齿轮盒的传动路线以及各构件连接的运动副名称。

（4）简述拆装克鲁格襟翼传动齿轮盒的顺序以及在拆装过程中如何保证零部件不被损坏。

（5）简述拆卸本部件过程中应用了哪些工具和量具以及它们的名称、规格及使用注意事项。

中国民航出版社有限公司 版权所有

（6）简述蜗杆传动的正确啮合条件及蜗杆旋向的判定方法。

（7）解释齿轮主要参数的名称。

课题 2　发动机附件齿轮箱课程设计任务书

一、发动机附件齿轮箱的预备知识

1. 发动机附件齿轮箱的功用

该发动机附件齿轮箱为斯贝发动机的右齿轮箱，属于外部附件齿轮箱。发动机附件齿轮箱具有由圆锥齿轮系和平行齿轮系复合型的定轴轮系组成的多路传动，其功用是在发动机高压压气机轴的驱动下，带动发动机低压燃油泵、发动机高压燃油泵、主滑油泵、液压泵、恒速传动装置、发电机和燃油流量调节器等附件工作。它安装于发动机中介机匣的右下方。

2. 发动机附件齿轮箱的构造

发动机附件齿轮箱主要由壳体、齿轮组及其支撑轴承等构件构成。齿轮箱壳体由前后两个镁合金半壳体组成，它们用螺栓连接成一体。发动机附件齿轮箱内部结构，如图 F3.4 所示。

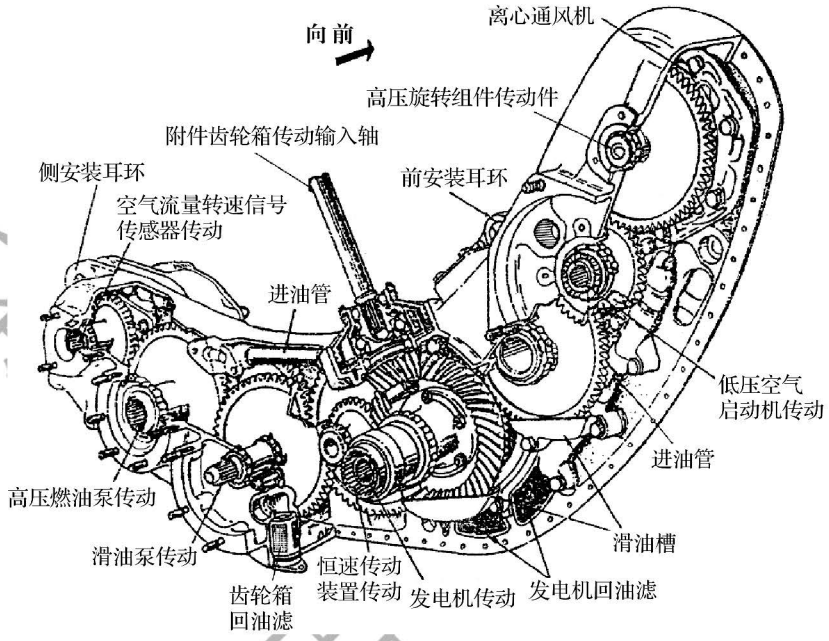


图 F3.4　发动机附件齿轮箱内部结构（后视）

在该附件齿轮箱的后方制有启动机马达、恒速传动装置、主滑油泵、高压燃油泵、防喘系统转速信号传感器等的安装座，如图 F3.5 所示。

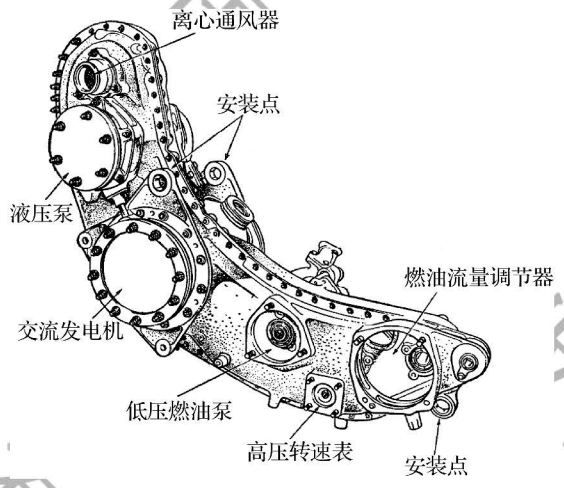


图 F3.5　发动机附件齿轮箱前视图

3. 发动机附件齿轮箱工作原理

高压压气机轴前端内花键带动一根花键套筒旋转，固定在该花键套筒前端的大圆锥齿轮又带动与其啮合的圆锥齿轮轴（即发动机附件齿轮箱传动输入轴）转动，通过该传动输入轴将动力传给发动机附件齿轮箱；附件齿轮箱再通过分路传动，带动各种附件同时工作，如图 F3.6 所示。

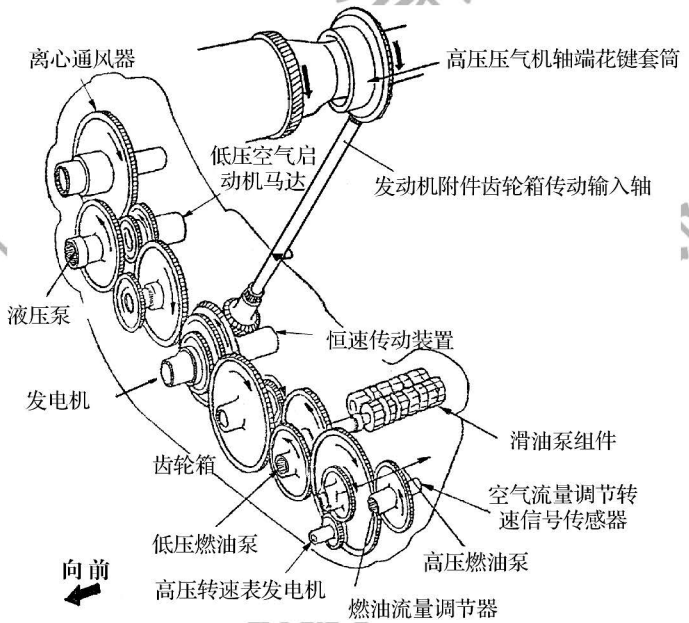


图 F3.6　发动机附件齿轮箱中的传动轮系

二、本课题的任务和要求

在初步了解发动机附件传动齿轮箱的基础上，按照航空机械基础课程设计日程安排表依次进行下列内容的课程设计。

（1）拆卸分解发动机附件齿轮箱。

选用合适工具，拆卸发动机附件齿轮箱盖使齿轮系暴露，如图 F3.7 所示。

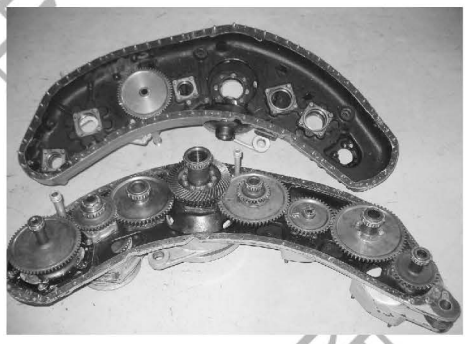


图 F3.7　发动机附件齿轮箱分解

（2）进行发动机附件齿轮箱的传动分析，绘制该装置的机构运动简图。

对照实物，结合参考资料进一步全面理解所学的知识。从传动输入轴开始观察和分析发动机附件齿轮箱的传动路线，弄懂附件齿轮箱的工作原理及与各附件的传动关系，辨别和确定各运动副，绘制发动机附件齿轮箱的机构运动简图。

（3）绘制发动机附件齿轮箱的装配示意图。

拆卸和分解齿轮箱各齿轮组件。绘制其装配示意图。注意：在分解时，要记录分解步骤和零件的名称、数量、连接形式、配合关系以及具体的安装位置，同时将拆下的零件按序放置。

（4）测绘零件。

对拆下的齿轮轴和齿轮等主要零件进行测绘。确定和记录各齿轮的齿数、斜齿圆柱齿轮的旋向等参数。参考有关资料，绘制一张主要零件（齿轮轴或齿轮）的零件图。

（5）计算各分路的传动比，计算齿轮参数，完成计算报告。

（6）装配发动机附件齿轮箱。

清洁和润滑各零件，然后，按拆卸和分解发动机附件齿轮箱的逆顺序，原样装配好齿轮箱，恢复其性能。

（7）答辩。

整理和装订完成的图纸和计算报告，回顾和总结本课题涉及的知识和要点，回答相关的问题。

三、复习题

（1）简述发动机附件齿轮箱由哪些零件组成，举例说明其中标准件的规格尺寸、国标代号。

（2）简述发动机附件齿轮箱的工作原理。

（3）简述发动机附件齿轮箱的各分路传动路线以及它们的传动比 i 的定义，各构件连接的运动副名称。

（4）简述拆装发动机附件齿轮箱的顺序以及在拆装过程中如何保证零部件不被损坏。

（5）简述拆卸本部件过程中应用了哪些工具和量具以及它们的名称、规格和使用注意事项。

（6）解释齿轮的主要参数名称。

（7）一对圆柱齿轮传动正确啮合的条件是什么？惰轮的作用是什么？

课题 3　飞机缝翼螺杆课程设计任务书

一、飞机缝翼螺杆的预备知识

1. 缝翼螺杆的功用与构造

缝翼螺杆是一个螺旋作动筒，它用来将传动轴的旋转运动转变为操纵缝翼收放的直线伸缩运动。

缝翼螺杆由壳体、输入蜗杆轴、蜗轮、螺套、螺杆、反转制动摩擦装置等组成，如图 F3. 8 所示。壳体通过安装在具有万向接头功能的连接件上与机翼前缘的安装肋固定连接。螺杆壳体内部注有润滑油，其他部分注有润滑油脂。输入蜗杆轴安装在壳体的下方，轴两端内部均有齿槽与传动轴的联轴器连接。蜗杆和蜗轮啮合，蜗轮内有齿槽与螺套结合。螺套内装有螺杆，两者的螺纹槽之间装有 72 粒滚珠。螺杆的前端有与缝翼连接的叉形接头，后端装有止动螺钉。在螺套两端伸出缝翼螺杆壳体处装有刮冰器和螺杆刷，用于刮除螺杆螺纹槽上可能凝结的冰屑。

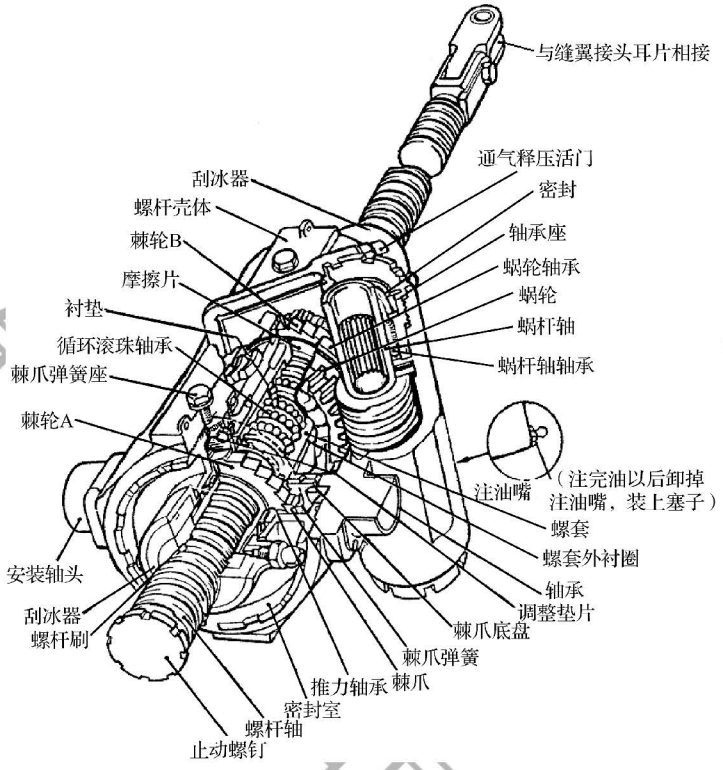


图 F3. 8　缝翼螺杆

反转制动摩擦片装置由两个摩擦片、两个棘轮和四个弹簧棘爪组成。摩擦片和棘轮套在螺套上，弹簧棘爪安装在壳体上。

2. 缝翼螺杆的工作原理

通常，每块缝翼有两个缝翼螺杆作动。缝翼螺杆是一个螺旋作动筒，它用来将传动轴的旋转运动转变为操纵缝翼收放的直线伸缩运动。

缝翼螺杆的工作情况，如图 F3.9 所示。缝翼传动轴通过缝翼螺杆的输入蜗杆轴，将旋转运动传给蜗轮和螺套，使螺杆前后移动，从而带动缝翼放出或收进，其工作行程为 276 mm。缝翼螺杆传动时，螺套转动，螺杆作直线运动。

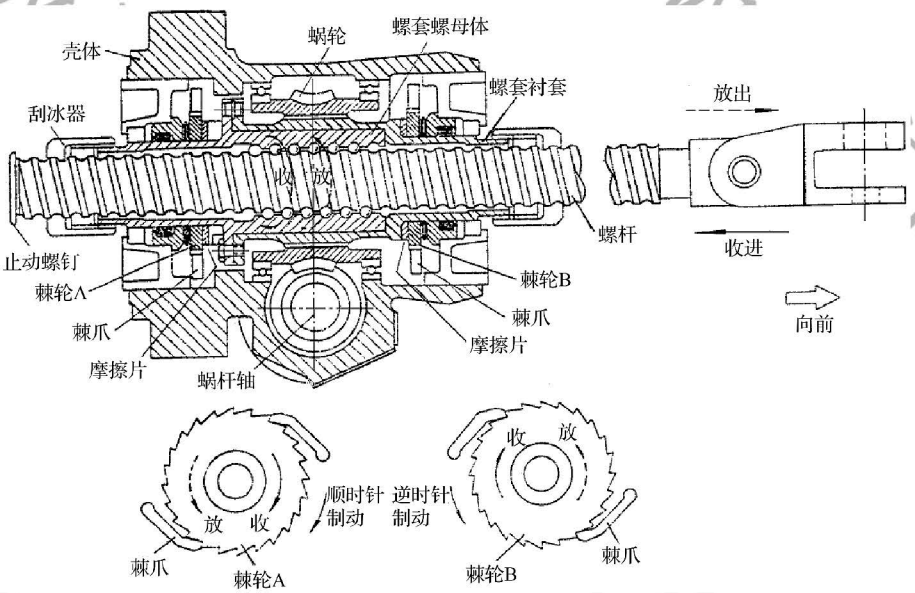


图 F3.9　缝翼螺杆传动及反转制动摩擦片装置的工作

反转制动摩擦片装置的工作情况如下：

（1）当缝翼在放出的过程中，缝翼螺杆的螺套在蜗轮的驱动下反时针转动（从后向前看）。螺杆向前伸出，推缝翼放出。此时，缝翼上的空气动力经螺杆传给螺套，再由螺套经过棘轮 A 及其摩擦片传给缝翼螺杆的壳体，并带动棘轮 A 也反时针转动。由于棘轮 A 在反时针转动时不起制动作用，所以，缝翼可以顺利放出。

（2）当缝翼放好后，缝翼上作用的空气动力要使螺套与棘轮 A 压紧，此时，螺套有顺时针方向转动的趋势。由于棘轮 A 在顺时针转动时起制动作用，所以，螺套不能转动螺杆也就不能缩进，故缝翼不会因空气动力的作用而向收进方向蠕动。

（3）当缝翼在收进的过程中，螺套在蜗轮的驱动下顺时针转动，螺杆向后缩进，将缝翼收进。此时，螺套与棘轮 A 压紧，并且棘轮 A 起制动作用，这样可使缝翼收进速度减慢些。

（4）当缝翼收好后，由于作用于机翼前缘的空气动力（吸力）要使螺套与 B 棘轮压

紧，此时，螺套有反时针方向转动的趋势。由于棘轮 B 在反时针转动时起制动作用，所以，螺套不能转动，螺杆也就不能向前伸出，故缝翼不会因空气动力而向放出方向蠕动。

二、本课题的任务和要求

对照实物，结合参考资料进一步全面理解本课题的有关知识。在初步了解缝翼螺杆的基础上，按照航空机械基础课程设计日程安排表依次进行下列内容的课程设计。

（1）拆除缝翼螺杆的端盖。

选用合适工具，拆下缝翼螺杆的各个端盖使其内部的零件暴露。

（2）进行缝翼螺杆的传动分析，绘制该装置的机构运动简图。

从输入轴开始观察和分析缝翼螺杆的传动路线，辨别和确定各运动副，绘制缝翼螺杆的机构运动简图。

（3）绘制缝翼螺杆的装配示意图。

拆卸和分解缝翼螺杆，同时绘制其装配示意图。缝翼螺杆分解后的零件，如图 F3.10 所示。缝翼螺杆的传动件，如图 F3.11 所示。注意：在拆卸分解过程中，要注意遵循安全操作规程正确地拆卸，并且将拆下的零件编号按序放置。同时，要记录分解步骤和零件的名称、数量、连接形式、配合关系以及具体的安装位置。

图 F3.10　缝翼螺杆装置的分解图

图 F3.11　缝翼螺杆的传动件

（4）测绘零件。

对拆下的缝翼螺杆、螺套、蜗杆、蜗轮和棘轮等主要零件进行测绘。确定和记录缝翼螺杆和螺套的螺距、头数和旋向等参数。参考有关资料，绘制一张主要零件（螺杆、螺套、蜗杆、蜗轮或棘轮）的零件图。

（5）计算缝翼螺杆的传动比，计算蜗轮和蜗杆的参数，完成计算报告。

（6）装配缝翼螺杆。

清洁和润滑各零件，然后，按拆卸和分解缝翼螺杆的逆顺序，原样装配好缝翼螺杆，恢复其性能。

（7）答辩。

整理和装订完成的图纸和计算报告，回顾和总结本课题涉及的知识和要点，回答相关的问题。

三、复习题

（1）简述缝翼螺杆由哪些零件组成，举例说明其中标准件的规格尺寸、国标代号。

（2）简述缝翼螺杆的工作原理。

（3）简述缝翼螺杆的传动路线以及各构件连接的运动副名称。

（4）简述拆装缝翼螺杆的程序以及在拆装过程中如何保证零部件不被损坏。

（5）简述拆卸本部件过程中应用了哪些工具和量具以及它们的名称、规格及使用注意事项。

（6）缝翼螺杆是什么形式的传动机构？螺杆的移动是如何控制的？

（7）该机构有无自锁功能？部件中的棘轮 A、棘轮 B 的作用是什么？

（8）该部件的壳体与端盖是如何连接固定的？用什么规格、什么名称的工具把它们拆开的？

课题 4　飞机扰流板传动器课程设计任务书

一、飞机扰流板传动器的预备知识

1. 扰流板传动器构造

扰流板传动器由齿轮盒和传动器两部分组成，如图 F3.12 所示。两部分的壳体由螺栓连接。齿轮盒内有一根输入轴，轴上有一个小圆锥齿轮，另外有一个大圆锥齿轮与它啮合，它的轴伸入传动器壳体内。传动器内有螺杆、带滚轮的螺套、滚轮滑轨和槽形凸轮臂及输出轴等。

螺杆通过滚珠轴承支承在传动器壳体内，其前端与大圆锥齿轮轴连接。螺套两端有短轴，每边各装两个滚轮，一个在滚轮滑轨内，一个在槽形凸轮臂内。两个槽形凸轮臂装在输出轴上，它们的槽包括一长段直槽和一小段弧形槽。当螺套的滚轮在弧形槽内时，折流板在放平位置，当滚轮从弧形槽滚到直槽内时，槽形凸轮臂就转动一个角度，扰流板就转到翘起 10°的位置。

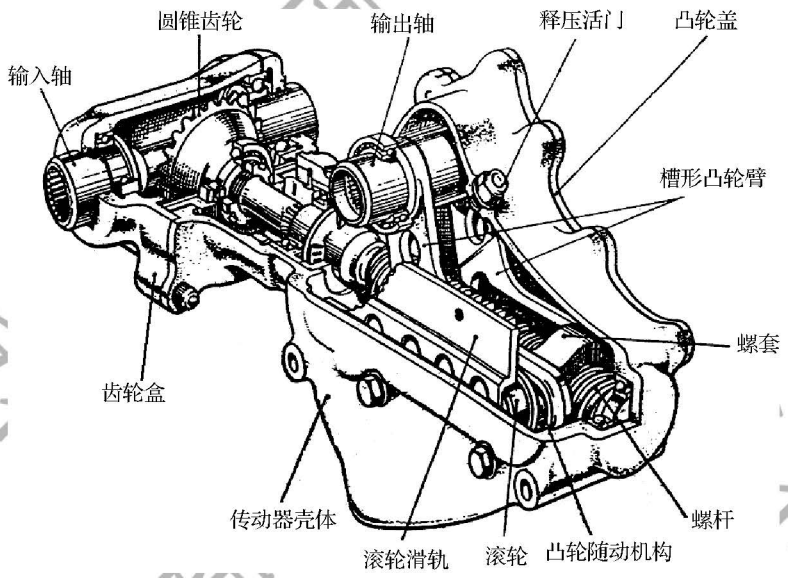
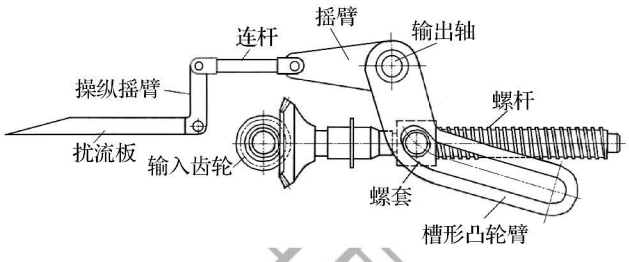


图 F3.12　扰流板传动器

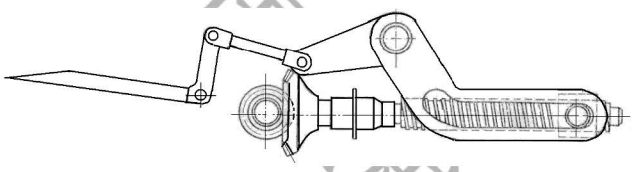
2. 扰流板传动器的工作原理

扰流板是在当襟翼放下到 10°~45°时才动作的。此时，襟翼传动系统的传动轴带动扰流板传动器的输入轴转动，经圆锥齿轮传动，使螺杆转动，螺套作直线移动带动槽形凸轮臂转动，再经输出轴带动摇臂、连杆和操纵摇臂使扰流板向上偏转。

当襟翼在收上位置时，无运动传至扰流板传动器的输入轴，因此螺杆不转动。此时，螺套在后面位置，螺套上的滚轮在槽形凸轮臂弧形槽内，扰流板保持在平放位置不动，如图 F3.13（a）所示。当襟翼从收上位置向放下位置运动时，螺杆转动，使螺套向前移动。当襟翼放到 10°时，滚轮正好从弧形槽滚到直槽内，迫使凸轮臂带动输出轴转动一个角度，再通过摇臂、连杆和操纵摇臂使扰流板向上翘起 10°；当襟翼在放下 10°~45°的过程中，螺套在继续向前移动，因为滚轮一直在槽形凸轮臂的直槽内滚动，从而凸轮臂带动输出轴保持原位不转动，所以，直到襟翼放下到 45°，扰流板总是保持在翘起 10°的位置，如图 F3.13（b）所示。当襟翼从放下位置收起时，其动作情况与上述相反。



（a）



（b）

图 F3.13　扰流板传动器的工作

二、本课题的任务和要求

对照实物，结合参考资料进一步全面理解本课题的有关知识。在初步了解扰流板传动器的基础上，按照航空机械基础课程设计日程安排表依次进行下列内容的课程设计。

（1）拆除扰流板传动器的端盖。

选用合适工具，拆下扰流板传动器上的两个端盖使其内部的零件暴露。在拆装过程中，要注意遵循安全操作规程正确地拆卸。

（2）进行扰流板传动器的传动分析，绘制该装置的机构运动简图。

从输入轴开始观察和分析扰流板传动器的传动路线，辨别和确定各运动副及螺旋传动的类型，绘制扰流板传动器的机构运动简图。

（3）绘制扰流板传动器的装配示意图。

拆卸和分解扰流板传动器，如图 F3.14 所示。注意：在分解时，要记录分解步骤和零件的名称、数量、连接形式、配合关系以及具体的安装位置，同时将拆下的零件按序放置。在拆卸和分解扰流板传动器的过程中，可边分解边绘制其装配示意图。

图 F3.14　扰流板传动器零件分解

（4）测绘零件。

对拆下的齿轮轴、螺杆和槽形凸轮臂等主要零件进行测绘。确定和记录各齿轮的齿数，计算齿轮参数；确定和记录螺杆的螺距、头数和旋向等参数。参考有关资料，绘制一张主要零件（齿轮轴、螺杆、槽形凸轮臂或滚轮滑轨）的零件图。

（5）计算扰流板传动器的传动比。

（6）装配扰流板传动器。

清洁和润滑各零件，然后，按拆卸和分解扰流板传动器的逆顺序，原样装配好扰流板传动器，恢复其性能。

（7）答辩。

整理和装订完成的图纸和计算报告，回顾和总结本课题涉及的知识和要点，回答相关的问题。

三、复习题

（1）简述扰流板传动器由哪些零件组成，举例说明其中标准件的规格尺寸、国标代号。

（2）简述扰流板传动器的工作原理。

（3）简述扰流板传动器的传动路线以及各构件之间连接运动副的名称。

（4）简述拆装扰流板传动器的程序以及在拆装过程中如何保证零部件不被损坏。

（5）简述拆卸本部件过程中应用了哪些工具和量具以及它们的名称、规格及使用注意事项。

（6）简述本部件螺旋传动的类型。

（7）当螺杆传动一圈，螺套移动多少距离？

（8）一对圆锥齿轮传动正确啮合的条件是什么？

课题 5　齿轮减速器课程设计任务书

一、齿轮减速器的预备知识

1. 齿轮减速器的构造

齿轮减速器是原动机和工作机之间的独立的闭式传动装置。它的作用是用来降低转速和改变转矩，以满足工作需要。齿轮减速器主要由箱体、输入轴、齿轮组、输出轴等构成。齿轮组则由若干对圆柱齿轮、锥齿轮或蜗轮蜗杆组成。根据传动齿轮配置结构形式的不同，齿轮减速器可分为普通齿轮减速器和行星齿轮减速器。常用的普通齿轮减速器有一级齿轮减速器、二级齿轮减速器和多级减速器，如图 F3. 15 所示。

图 F3. 15　普通齿轮减速器

中国民航出版社有限公司版权所有

2. 齿轮减速器的工作原理

齿轮减速器的减速功能是通过一对或者多对相互啮合齿轮的齿数差异来实现的。来自原动机的动力通过带传动或齿轮传动等形式传给齿轮减速器的输入轴。此时，输入轴为主动轴。输入轴上的小齿轮 Z_1 通过与从动轴上的大齿轮 Z_2 啮合传动，将动力传给从动轴。由于主动轮小齿轮 Z_1 的齿数少，从动轮大齿轮 Z_2 的齿数多，所以，从动轴得到减速。减速的多少可用传动比 i 表达。

$$i=\frac{n_1}{n_2}=\frac{Z_2}{Z_1}=\frac{\text{所有从动轮齿数的乘积}}{\text{所有主动轮齿数的乘积}}$$

式中，n_1、n_2 分别表示主动轮、从动轮的转速，Z_1、Z_2 分别表示主动轮、从动轮的齿数。传动比 i 越大，转速降低得越多。

二、本课题的任务和要求

对照实物，结合参考资料进一步全面理解本课题的有关知识。在初步了解齿轮减速器的基础上，按照航空机械基础课程设计日程安排表依次进行下列内容的课程设计。

（1）拆除齿轮减速器的端盖。

选用合适工具，拆下齿轮减速器上的端盖使其内部齿轮传动零件暴露。在拆装过程中，要注意遵循安全操作规程正确地拆卸。

（2）进行齿轮减速器的传动分析，绘制该装置的机构运动简图。

从输入轴开始观察和分析齿轮减速器的传动路线，辨别和确定各运动副，绘制齿轮减速器各个挡位的机构运动简图。

（3）绘制齿轮减速器的装配示意图。

拆卸和分解齿轮减速器。注意：在分解时，要记录分解步骤和零件的名称、数量、连接形式、配合关系以及具体的安装位置，同时将拆下的零件按序放置。在拆卸和分解齿轮减速器的过程中，可边分解边绘制其装配示意图。某型齿轮减速器的分解零件，如图 F3. 16 所示。

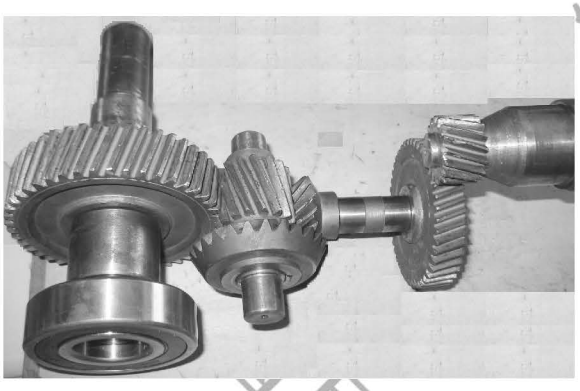


图 F3. 16　某型齿轮减速器的传动件

（4）测绘零件。

对拆下的齿轮轴和齿轮等主要零件进行测绘。确定和记录各齿轮的齿数，计算齿轮参数，完成计算报告。参考有关资料，绘制一张主要零件的零件图。

（5）计算齿轮减速器的传动比。

（6）装配齿轮减速器。

清洁和润滑各零件，然后，按拆卸和分解齿轮减速器的逆顺序，原样装配好齿轮减速器，恢复其性能。

（7）答辩。

整理和装订完成的图纸和计算报告，回顾和总结本课题涉及的知识和要点，回答相关的问题。

三、复习题

（1）简述齿轮减速器由哪些零件组成，举例说明其中标准件的规格尺寸、国标代号。

（2）简述齿轮减速器的工作原理。

（3）简述齿轮减速器的传动路线及其传动比 i 的定义。

（4）简述各构件连接的运动副名称。

（5）简述拆装齿轮减速器的顺序以及在拆装过程中如何保证零部件不被损坏。

（6）简述拆卸本部件过程中应用了哪些工具和量具以及它们的名称、规格及使用注意事项。

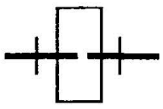
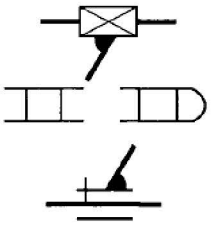
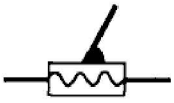
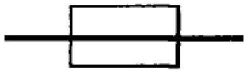
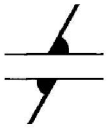
（7）解释齿轮的主要参数名称。

（8）一对斜（锥）齿圆柱齿轮传动正确啮合的条件是什么？

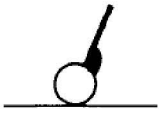
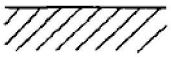
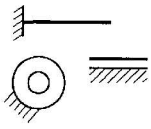
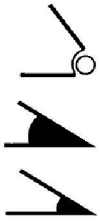
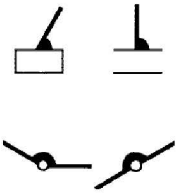
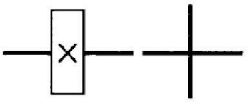
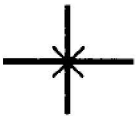
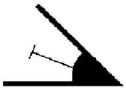
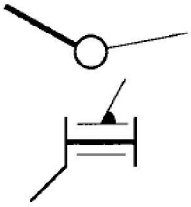
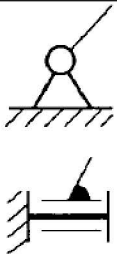
中国民航出版社有限公司版权所有

附表

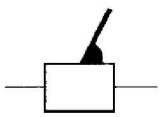
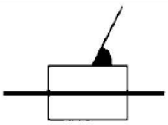
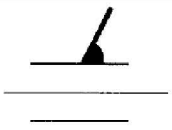
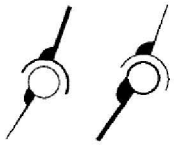
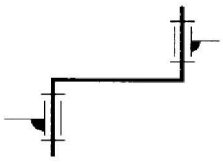
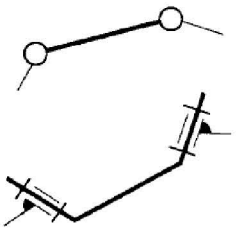
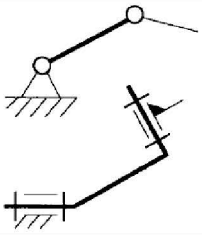
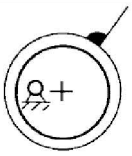
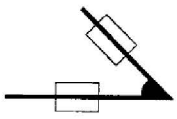
附表 1　机构运动简图用图形符号（GB/T 4460—2013）

条号	名称	基本符号	可用符号	附注
5 运动副的简图图形符号				
5.1 具有一个自由度的运动副				
5.1.1	回转副 （a）平面机构 （b）空间机构			
5.1.2	棱柱副（移动副）			
5.1.3	螺旋副			
5.2	具有两个自由度的运动副			
5.2.1	圆柱副			
5.2.2	球销副			
5.3	具有三个自由度的运动副			
5.3.1	球面副			
5.3.2	平面副			
5.4	具有四个自由度的运动副			
5.4.1	球与圆柱副			
5.5	具有五个自由度的运动副			

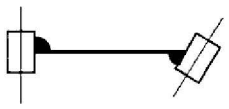
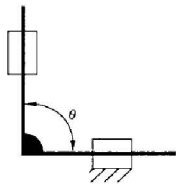
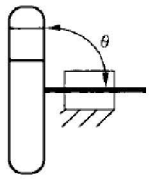
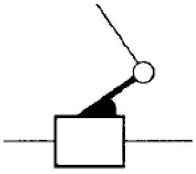
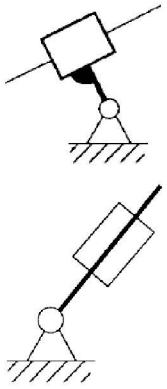
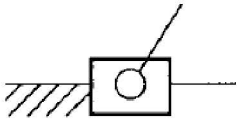
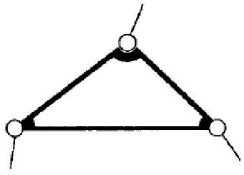
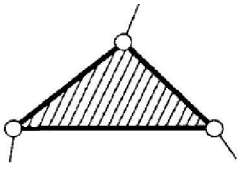
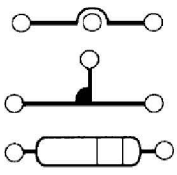
续表

条号	名称	基本符号	可用符号	附注
5.5.1	球与圆柱副			
6 构件及其组成部分连接的简图图形符号				
6.1	机架			
6.2	轴、杆			
6.3	构件组成部分的永久连接			
6.4	组成部分与轴（杆）的固定连接			
6.5	构件组成部分的可调连接			
7 多杆构件及其组成部分的简图图形符号				
7.1	低副机构			细实线所画为相邻构件
7.2	单副元素构件			
7.2.1	构件是回转副的一部分 （a）平面机构 （b）空间机构			
7.2.2	机架是回转副的一部分 （a）平面机构 （b）空间机构			

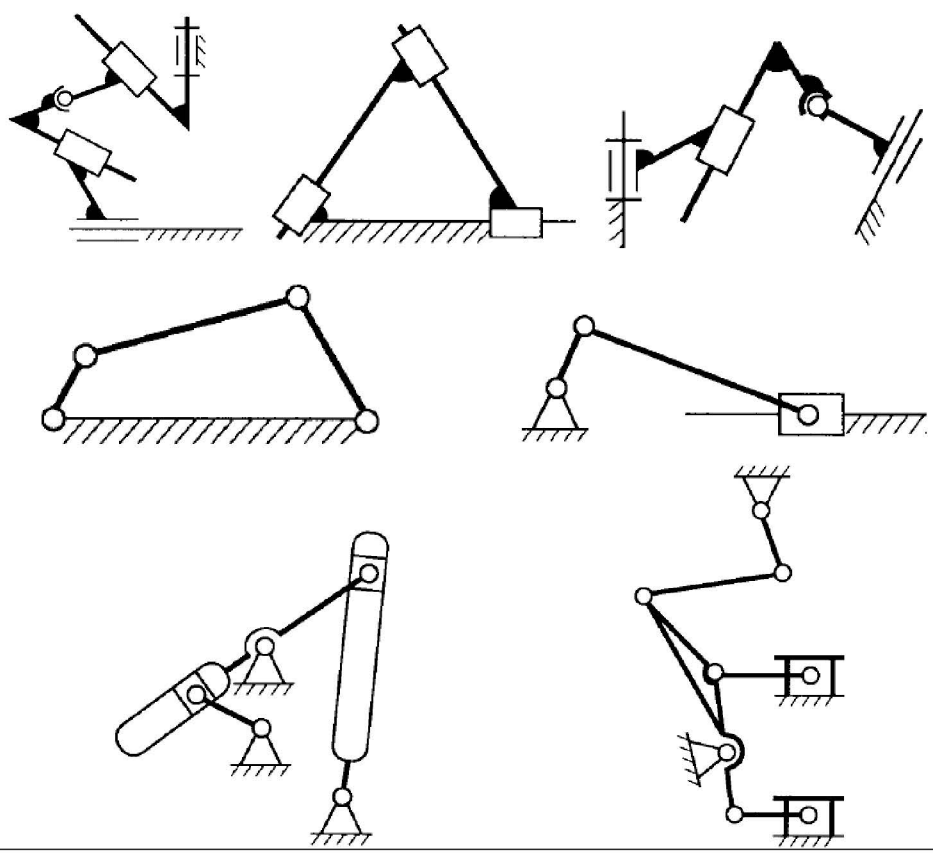
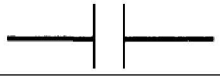
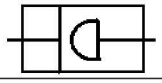
续表

条号	名称	基本符号	可用符号	附注
7.2.3	构件是棱柱副的一部分			
7.2.3	构件是圆柱副的一部分			
7.2.3	构件是球面副的一部分			
7.3	双副元素构件			
7.3.1	连接两个回转副的构件			
7.3.1.1	连杆 （a）平面机构 （b）空间机构			
7.3.1.2	曲柄（或摇杆） （a）平面机构 （b）空间机构			
7.3.1.3	偏心轮			
7.3.2	连接两个棱柱副的构件			

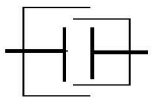
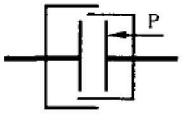
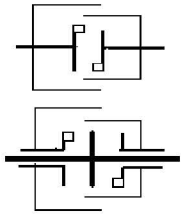
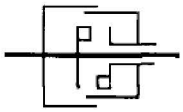
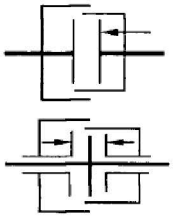
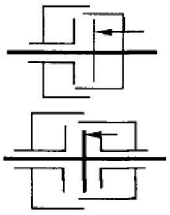
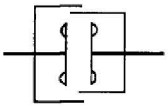
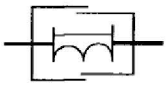
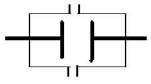
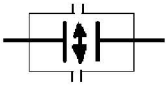
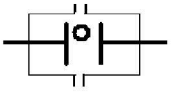
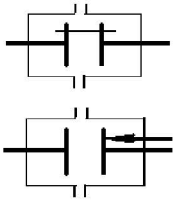
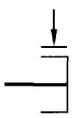
续表

条号	名称	基本符号	可用符号	附注
7.3.2.1	通用情况			
7.3.2.2	滑块			
7.3.3	连接回转副与棱柱副的构件			
7.3.3.1	通用情况			
7.3.3.2	导杆			
7.3.3.3	滑块			
7.4	三副元素构件			
7.5	多副元素构件			符号与双副元素、三副元素构件类似

续表

条号	名称	基本符号	可用符号	附注
7.6	示例 			
	11 联轴器、离合器及制动器简图图形符号			
11.1	联轴器一般符号（不指明类型）			
11.1.1	固定联轴器			
11.1.2	可移式联轴器			
11.1.3	弹性联轴器			

续表

条号	名称	基本符号	可用符号	附注
11.2	可控离合器			对于11.2、11.3及11.4，当需要表明操纵方式时，可使用下列符号： M——机动的； H——液动的； P——气动的； E——电动的（如电磁）。 例：具有气动开关启动的单向摩擦离合器 
11.2.1	啮合式离合器 （a）单向式 （b）双向式			
11.2.2	摩擦式离合器 （a）单向式 （b）双向式			
11.2.3	液压离合器一般符号			
11.2.4	电磁离合器			
11.3	自动离合器一般符号			
11.3.1	离心摩擦离合器			
11.3.2	超越离合器			
11.3.3	安全离合器 （a）带有易损元件 （b）无易损元件			
11.4	制动器一般符号			不规定制动器外观

附表 2　公制螺纹直径与螺距标准组合系列、基本尺寸（GB/T 193—2003）

公称直径 D、d			螺距 P		牙小径 D_1、d_2	公称直径 D、d			螺距 P		牙小径 D_1、d_2
第1系列	第2系列	第3系列	粗牙	细牙		第1系列	第2系列	第3系列	粗牙	细牙	
2.5			0.45	0.35	2.013			32	3.5	2,1.5	29.835
3			0.5	0.35	2.459		33		3.5	(3),2,1.5	29.211
	3.5		0.6	0.35	2.850			35[b]		1.5	
4			0.7	0.5	3.242	36			4	3,2,1.5	31.670
	4.5		0.75	0.5	3.688			38		1.5	
5			0.8	0.5	4.134		39		4	3,2,1.5	34.670
		5.5		0.5				40		3,2,1.5	
6			1	0.75	4.917	42			4.5	4,3,2,1.5	37.129
	7		1	0.75	5.917		45		4.5	4,3,2,1.5	40.129
8			1.25	1, 0.75	6.647	48			5	4,3,2,1.5	42.587
		9	1.25	1, 0.75	7.647			50		3,2,1.5	
10			1.5	1.25,1,0.75	8.376		52		5	4,3,2,1.5	46.587
	11		1.5	1.5,1,0.75	9.376			55		4,3,2,1.5	
12			1.75	1.25,1	10.106	56			5.5	4,3,2,1.5	50.046
	14		2	1.5,1.25[a],1	11835			58		4,3,2,1.5	
		15		1.5,1			60		5.5	4,3,2,1.5	54.046
16			2	1.5,1	13.835			62		4,3,2,1.5	
		17		1.5,1			64		6	4,3,2,1.5	57.505
	18		2.5	2,1.5,1	15.294			65		4,3,2,1.5	
20			2.5	2,1.5,1	17.294		68		6	4,3,2,1.5	61.505
	22		2.5	2,1.5,1	19.294			70		6,4,3,2,1.5	
24			3	2,1.5,1	20.752	72				6,4,3,2,1.5	
		25		2,1.5,1				75		4,3,2,1.5	
		26		1.5			76			6,4,3,2,1.5	
	27		3	2,1.5,1	23.752			78		2	
		28		2,1.5,1			80			6,4,3,2,1.5	
30			3.5	(3),2,1.5,1	26.211			82		2	

注：1. 优先选用第 1 系列，括号内尺寸尽可能不用。

2. 上标 a 仅用于发动机的火花塞。

3. 上标 b 仅用于轴承的锁紧螺母。

中国民航出版社有限公司版权所有

附表 3　美制统一螺纹（UN）的标准系列（ASME B1.1—2003）

公称直径		基本大径（in）	牙数										
			分类螺距系列			恒定螺距系列							
第1系列	第2系列		粗牙 UNC	细牙 UNF	超细牙 UNEF	4 UN	6 UN	8 UN	12 UN	16 UN	20 UN	28 UN	32 UN
6		0.1380	32	40									UNC
8		0.1640											UNC
10		0.1900											UNF
	12	0.216											
1/4		0.2500	20	28	32						UNC	UNF	UNEF
5/16		0.3125	18	24	32						20	28	UNEF
3/8		0.3750	16	24	32					UNC	20	28	UNEF
7/16		0.4375	14	20	28					16	UNF	UNEF	32
1/2		0.5000	13	20	28					16	UNF	UNEF	32
9/16		0.5625	12	18	24				UNC	16	20	28	32
5/8		0.6250	11	18	24				12	16	20	28	32
	11/16	0.6875			24				12	16	20	28	32
3/4		0.7500	10	16	20				12	UNF	UNEF	28	32
	13/16	0.8125			20				12	16	UNEF	28	32
7/8		0.8750	9	14	20				12	16	UNEF	28	32
	15/16	0.9375			20				12	16	UNEF	28	32
1		1.0000	8	12	20			UNC	UNF	16	UNEF	28	32
	$1\frac{1}{16}$	1.0625			18			8	12	16	20	28	
$1\frac{1}{8}$		1.1250	7	12	18			8	UNF	16	20	28	
	$1\frac{3}{16}$	1.1875			18			8	12	16	20	28	
$1\frac{1}{4}$		1.2500	7	12	18			8	UNF	16	20	28	
	$1\frac{5}{16}$	1.3125			18			8	12	16	20	28	
$1\frac{3}{8}$		1.3750	6	12	18		UNC	8	UNF	16	20	28	
	$1\frac{7}{16}$	1.4375			18		6	8	12	16	20	28	

中国民航出版社有限公司版权所有

续表

公称直径		基本大径（in）	牙数										
			分类螺距系列			恒定螺距系列							
第1系列	第2系列		粗牙 UNC	细牙 UNF	超细牙 UNEF	4 UN	6 UN	8 UN	12 UN	16 UN	20 UN	28 UN	32 UN
$1\frac{1}{2}$		1.5000	6	12	18		UNC	8	UNF	16	20	28	
	$1\frac{9}{16}$	1.5625			18		6	8	12	16	20		
$1\frac{5}{8}$		1.6250			18		6	8	12	16	20		
	$1\frac{11}{16}$	1.6875			18		6	8	12	16	20		
$1\frac{3}{4}$		1.7500					6	8	12	16	20		
	$1\frac{13}{16}$	1.8125					6	8	12	16	20		
$1\frac{7}{8}$		1.8750					6	8	12	16	20		
	$1\frac{15}{16}$	1.9375					6	8	12	16	20		
2		2.000	$4\frac{1}{2}$				6	8	12	16	20		
	$2\frac{1}{8}$	2.1250	$4\frac{1}{2}$				6	8	12	16	20		
$2\frac{1}{4}$		2.2500					6	8	12	16	20		
	$2\frac{3}{8}$	2.3750					6	8	12	16	20		
$2\frac{1}{2}$		2.5000	4			UNC	6	8	12	16	20		
	$2\frac{5}{8}$	2.6250				4	6	8	12	16	20		
$2\frac{3}{4}$		2.7500	4			UNC	6	8	12	16	20		
	$2\frac{7}{8}$	2.8750				4	6	8	12	16	20		
3		3.0000	4			UNC	6	8	12	16	20		

中国民航出版社有限公司版权所有

续表

公称直径		基本大径(in)	牙数										
			分类螺距系列			恒定螺距系列							
第1系列	第2系列		粗牙UNC	细牙UNF	超细牙UNEF	4UN	6UN	8UN	12UN	16UN	20UN	28UN	32UN
	$3\frac{1}{8}$	3.1250				4	6	8	12	16			
$3\frac{1}{4}$		3.2500	4			UNC	6	8	12	16			
	$3\frac{3}{8}$	3.375			18		6	8	12	16	20		
$3\frac{1}{2}$		3.5000	4			UNC	6	8	12	16			
	$3\frac{5}{8}$	3.6250				4	6	8	12	16			
$3\frac{3}{4}$		3.7500	4			UNC	6	8	12	16			
	$3\frac{7}{8}$	3.875				4	6	8	12	16			
4		4.0000	4			UNC	6	8	12	16			
	$4\frac{1}{8}$	4.1250				4	6	8	12	16			
$4\frac{1}{4}$		4.2500				4	6	8	12	16			
	$4\frac{3}{8}$	4.375				4	6	8	12	16			
$4\frac{1}{2}$		4.5000				4	6	8	12	16			
	$4\frac{5}{8}$	4.6250				4	6	8	12	16			
$4\frac{3}{4}$		4.7500				4	6	8	12	16			
	$4\frac{7}{8}$	4.875				4	6	8	12	16			
5		5.0000				4	6	8	12	16			
	$5\frac{1}{8}$	5.1250				4	6	8	12	16			

中国民航出版社有限公司版权所有

续表

公称直径		基本大径（in）	牙数										
			分类螺距系列			恒定螺距系列							
第1系列	第2系列		粗牙 UNC	细牙 UNF	超细牙 UNEF	4 UN	6 UN	8 UN	12 UN	16 UN	20 UN	28 UN	32 UN
$5\frac{1}{4}$		5.2500				4	6	8	12	16			
	$5\frac{3}{8}$	5.375				4	6	8	12	16			
$5\frac{1}{2}$		5.5000	4			4	6	8	12	16			
	$5\frac{5}{8}$	5.6250				4	6	8	12	16			
$5\frac{3}{4}$		5.7500				4	6	8	12	16			
	$5\frac{7}{8}$	5.875				4	6	8	12	16			
6		6.0000				4	6	8	12	16			

注：1. 优先选用粗牙和细牙系列。粗牙系列用于大量生产的螺纹紧固件；细牙系列用于高强度螺纹紧固件。

2. 超细牙系列用于微调螺纹、薄壁管和薄螺母。

3. 对粗牙、细牙和超细牙系列无法满足的设计，可采用恒定螺距系列。

4. 表中小于1/4 in的小直径系列为公称直径代号（不是公称直径的英寸值）。

中国民航出版社有限公司版权所有

参考文献

[1] 南景富．机械基础．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2002
[2] 中华人民共和国交通运输部令（2020 年 第 10 号）．民用航空器维修人员执照管理规则（CCAR-66-R3）
[3] 王少岩．机械设计基础．大连：大连理工大学出版社，2004
[4] 黄森彬．机械设计基础．北京：高等教育出版社，1998
[5] 隋明阳．机械设计基础．北京：机械工业出版社，2002
[6] 杜绍邦．机械零件．广州：广东高等教育出版社，1986
[7] 符颖示．机械基础知识．北京：高等教育出版社，1991
[8] 李天声，候金水，胡承愚．机械原理与机械零件．合肥：中国科学技术大学出版社，1990
[9] 陈正福．机械原理及机械零件．北京：高等教育出版社，1992
[10] 李斌才．航空润滑油与润滑脂．北京：中国石化出版社，1987
[11] 徐鑫福．飞机飞行操纵系统．北京：北京航空航天大学出版社，1989
[12] A&P. Technician General Textbook（2nd Edition）
[13] Avation Technician Training Series General Section Textbook

中国民航出版社有限公司版权所有

责任编辑　陈　晨
封面设计　罗针盘

航空机械基础
（第四版）

本书是飞机机电设备维修、飞机发动机维修、飞机结构修理、飞机电子设备维修、飞机部件维修、航空地面设备维修和通用航空器维修专业适用的基础课程教材，2007年首次出版，十余年内三次再版，数万学子受益。第四版教材更新丰富了应用实例，使用最新国家标准，配套网络课程资源，可全面适应新时代立体化教学需求。

做民航教材出版的领军者
做民航学术文化的传播者

中国民航出版社教材编辑部
联系电话：010-64294885
E-mail：minhangbook@sina.com

中国民航出版社
淘宝店

中国民航出版社
微店

ISBN 978-7-5128-0892-8

定价：59.00元