



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家精品课程主教材



精密机械设计基础

(第2版)

◎ 许贤泽 戴书华 编著 ◎ 盛步云 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家精品课程主教材

精密机械设计基础

(第2版)

许贤泽 戴书华 编著

盛步云 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材、国家精品课程主教材，以精密机械中常用机构和零部件为研究对象，从设计该类机构和零部件时应具备的基础理论、基本技能和基本方法等方面介绍其工作原理、特点、应用范围、选型、材料、精度和设计计算的一般原理和方法。

全书包括绪论和 16 章内容。第 1~2 章讲述精密机械设计所需的力学基础知识；第 3~7 章讲述精密机械中常用机构的工作原理和运动特性等基本知识；第 8~12 章讲述精密机械设计中所用材料的热处理方法、常用机械零部件的特点和设计计算的知识；第 13~15 章讲述在精密机械中常用弹性元件、基座和导轨的设计方法；第 16 章对精密机械设计中常用连接形式进行了介绍。

本书适合作为测控技术与仪器、光学工程、电子信息工程及机电类专业精密机械设计课程的教材，亦可供有关专业师生、工程技术人员参考使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

精密机械设计基础 / 许贤泽, 戴书华编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2012.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-16160-5

I. ① 精… II. ① 许… ② 戴… III. ① 机械设计—高等学校—教材 IV. ① TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 037452 号

策划编辑: 章海涛

责任编辑: 章海涛 文字编辑: 赵晨阳 特约编辑: 张 玉

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14.5 字数: 408 千字

印 次: 2012 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

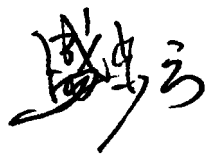
服务热线: (010) 88258888。

序

近年来，科教事业突飞猛进，教育与科研的投入使全国各地的高校如雨后春笋般蓬勃发展。而大学的根本任务是培养人才，因此优秀的教师和高质量的教材是不可缺少的因素。教育部为全面提高高等教育的质量，特制订普通高等教育“十一五”国家级教材的规划。《精密机械设计基础（第2版）》作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，理所当然应承担起其重任。

“精密机械设计”课程是仪器仪表类专业的一门专业基础课，是测控技术与仪器专业的专业主干课。编著者根据其特点，以精密机械中常用机构和零部件为研究对象，从设计该类机构和零部件时应具备的基础理论、基本技能和基本方法等几方面组织编写，从机构分析、工作能力、精度和结构等诸方面来研究这些机构和零部件，并介绍其工作原理、特点、应用范围、选型、材料、精度以及设计计算的一般原理和方法，因此，作为大学教材具有科学性、可读性和新颖性。本教材还力求做到科学严谨、深入浅出，适应时代的要求，反映当代科学技术的发展前沿。

当然，任何一本教材都需要经过教师反复使用，不断更新改进，才能成为一本优秀教材。《精密机械设计基础（第2版）》通过前期教学中的使用，在听取教师和学生意见的基础上进行了认真编写，相信会对仪器仪表类专业有所帮助。最后，希望教学和教材质量不断提高，培养出更多高水平的学生。



武汉理工大学机电学院

第 2 版前言

本书为国家精品课程“精密机械设计”的主教材，被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是仪器仪表类专业基础课教学用书。

高等教育改革，对人才培养目标和培养模式、专业设置和教学计划、课程体系和内涵、教学方法和手段等方面提出了新的要求。按照仪器仪表类专业改革“以综合设计能力的培养为主线，相关课程整体优化”的总体思路，“精密机械设计”课程的任务应以培养学生对系统总体方案设计、机械零部件工作能力设计和结构设计的能力为主，使学生能够掌握一般精密机械零部件工作能力的分析方法和设计方法。因此，“精密机械设计”课程的教学改革必须适应这种形势，要符合培养学生较宽领域的基本知识、能力和素质的要求。

“精密机械设计”作为仪器仪表类专业的一门专业基础课，主要任务是使学生初步掌握有关精密机械设计的基本原理和方法，进行精密机械中常用零部件的设计。作者试图在满足教学基本要求的情况下，贯彻少而精的原则，力求做到精选内容，适当拓宽知识面，反映学科成就。因此，本书从力学基础知识、机械原理、金属材料及热处理、机械设计、现代设计方法实践等阐述本课程的知识点，同时兼顾相关专业的要求，附录中补充了机械制图的基础知识，可供相关专业作为专业基础课教学的教材选用。

除绪论外，本书包括 16 章内容。第 1~2 章讲述精密机械设计所需的力学基础知识；第 3~7 章讲述精密机械中常用机构的工作原理和运动特性等基本知识；第 8~12 章讲述精密机械设计所用材料的热处理方法、常用机械零部件的特点和设计计算的知识；第 13~15 章讲述在精密机械常用弹性元件、基座和导轨的设计方法；第 16 章对精密机械设计中常用连接形式进行了介绍。

本书由许贤泽、戴书华编著，李忠兵、乐意、李军维、冯灿、刘朋、康泽、徐逢秋、艾为桂、董琴琴、张梦薇、刘刚和王刚也参与了本书的编写。全书由许贤泽统稿。

盛步云教授审阅了本书，并提出了许多宝贵意见，在此深表谢意！

书中引用了许多文献资料，未能一一列出，在此谨致谢意。

限于作者的水平，谬误及欠妥之处在所难免，作者衷心希望广大读者提出宝贵的意见，并对其不妥之处进行批评指正。

本书免费提供教学资源（含电子课件），读者可以登录到 <http://www.hxedu.com.cn>（华信教育资源网），注册之后进行下载。读者反馈：unicode@phei.com.cn。

作者

目 录

| | |
|-----------------------------|----|
| 绪论 | 1 |
| 第 1 章 精密机械零件的受力分析与平衡 | 3 |
| 1.1 力学的基本概念 | 3 |
| 1.2 约束、约束反力与受力图 | 5 |
| 1.3 精密机械零件的受力平衡 | 7 |
| 习题 1 | 11 |
| 第 2 章 精密机械零件受力变形与应力分析 | 12 |
| 2.1 精密机械零件的强度和刚度 | 12 |
| 2.2 杆件的拉伸与压缩 | 13 |
| 2.3 机械零件的剪切 | 16 |
| 2.4 机械零件的扭转 | 18 |
| 2.4.1 轴类零件的扭转内力和应力 | 18 |
| 2.4.2 轴类零件的扭转强度和刚度计算 | 20 |
| 2.5 梁类零件的平面弯曲 | 22 |
| 2.5.1 梁类零件的类型 | 22 |
| 2.5.2 梁类零件弯曲时的内力与应力 | 23 |
| 2.5.3 梁类零件弯曲的强度计算 | 26 |
| 习题 2 | 27 |
| 第 3 章 平面机构的运动简图与自由度计算 | 30 |
| 3.1 运动副及其分类 | 30 |
| 3.2 平面机构运动简图 | 31 |
| 3.3 平面机构的自由度计算 | 33 |
| 习题 3 | 37 |
| 第 4 章 平面连杆机构 | 38 |
| 4.1 铰链四杆机构的基本形式和特性 | 38 |
| 4.1.1 曲柄摇杆机构 | 38 |
| 4.1.2 双曲柄机构 | 40 |
| 4.1.3 双摇杆机构 | 41 |
| 4.2 铰链四杆机构曲柄存在的条件 | 42 |
| 4.3 铰链四杆机构的演化 | 43 |
| 4.4 平面四杆机构的设计 | 45 |
| 习题 4 | 46 |
| 第 5 章 凸轮机构 | 48 |
| 5.1 凸轮机构的应用和分类 | 48 |
| 5.1.1 凸轮机构的应用 | 48 |
| 5.1.2 凸轮机构的分类 | 48 |
| 5.2 从动件的常用运动规律 | 49 |
| 5.2.1 等速运动规律 | 50 |

| | | |
|--------------|----------------------------------|-----------|
| 5.2.2 | 等加速等减速运动规律 | 51 |
| 5.2.3 | 简谐运动规律 | 51 |
| 5.3 | 图解法设计盘形凸轮轮廓 | 52 |
| 5.4 | 凸轮机构基本尺寸的确定 | 53 |
| | 习题 5 | 55 |
| 第 6 章 | 齿轮机构 | 56 |
| 6.1 | 齿轮机构的特点和分类 | 56 |
| 6.2 | 齿廓啮合基本定理 | 56 |
| 6.3 | 渐开线齿廓 | 57 |
| 6.4 | 齿轮各部分名称及渐开线标准直齿圆柱齿轮的几何尺寸计算 | 59 |
| 6.4.1 | 齿轮各部分名称 | 59 |
| 6.4.2 | 标准直齿圆柱齿轮几何尺寸的计算 | 60 |
| 6.5 | 渐开线标准直齿圆柱齿轮的啮合传动 | 61 |
| 6.6 | 渐开线齿轮的切齿原理与根切现象 | 64 |
| 6.6.1 | 渐开线齿轮的切齿原理 | 64 |
| 6.6.2 | 根切现象和最小齿数 | 66 |
| 6.6.3 | 变位齿轮 | 66 |
| 6.7 | 斜齿圆柱齿轮机构 | 67 |
| 6.7.1 | 斜齿圆柱齿轮齿廓曲面的形成及其啮合特点 | 67 |
| 6.7.2 | 斜齿圆柱齿轮的基本参数和几何尺寸的计算 | 68 |
| 6.7.3 | 斜齿圆柱齿轮的正确啮合条件和重合度 | 70 |
| 6.7.4 | 斜齿圆柱齿轮的当量齿数 | 70 |
| 6.7.5 | 斜齿圆柱齿轮的优缺点 | 71 |
| 6.8 | 圆锥齿轮机构 | 71 |
| 6.9 | 蜗杆蜗轮机构 | 74 |
| | 习题 6 | 78 |
| 第 7 章 | 轮系 | 79 |
| 7.1 | 轮系的类型 | 79 |
| 7.2 | 定轴轮系传动比计算 | 79 |
| 7.3 | 周转轮系传动比计算 | 81 |
| 7.4 | 复合轮系传动比计算 | 84 |
| 7.5 | 轮系的功能 | 85 |
| 7.6 | 几种特殊的行星齿轮传动简介 | 87 |
| | 习题 7 | 88 |
| 第 8 章 | 精密机械设计概论 | 90 |
| 8.1 | 精密机械设计的要求、程序与方法 | 90 |
| 8.1.1 | 精密机械设计的基本要求 | 90 |
| 8.1.2 | 精密机械设计的一般程序 | 90 |
| 8.1.3 | 精密机械设计方法 | 91 |
| 8.2 | 精密机械零件的强度 | 92 |
| 8.2.1 | 载荷和应力 | 92 |
| 8.2.2 | 静应力作用下零件的强度 | 93 |
| 8.2.3 | 变应力作用下零件的强度 | 93 |
| 8.2.4 | 零件的接触疲劳强度 | 94 |
| 8.3 | 精密机械零件的常用材料及钢的热处理 | 95 |

| | | |
|---------------|-----------------------|------------|
| 8.3.1 | 常用材料 | 96 |
| 8.3.2 | 钢的热处理 | 97 |
| 8.3.3 | 材料的选用原则 | 99 |
| 8.4 | 精密机械零件的结构工艺性 | 100 |
| 8.5 | 精密机械零件的刚度 | 100 |
| | 习题 8 | 101 |
| 第 9 章 | 齿轮传动 | 102 |
| 9.1 | 齿轮传动的失效形式及设计准则 | 102 |
| 9.2 | 齿轮材料及热处理 | 104 |
| 9.3 | 齿轮传动精度 | 105 |
| 9.4 | 直齿圆柱齿轮传动的强度计算 | 106 |
| 9.4.1 | 受力分析 | 106 |
| 9.4.2 | 计算载荷 | 107 |
| 9.4.3 | 齿面接触强度计算 | 107 |
| 9.4.4 | 齿根弯曲强度计算 | 109 |
| 9.5 | 斜齿圆柱齿轮传动强度计算 | 112 |
| 9.6 | 直齿圆锥齿轮传动 | 114 |
| 9.7 | 蜗杆传动 | 115 |
| 9.8 | 齿轮传动链的设计 | 117 |
| 9.8.1 | 齿轮传动形式的选择 | 117 |
| 9.8.2 | 传动比的分配 | 117 |
| 9.8.3 | 齿数、模数的确定 | 119 |
| 9.8.4 | 齿轮传动的空回及消除方法 | 120 |
| 9.8.5 | 齿轮传动链的结构设计 | 121 |
| | 习题 9 | 124 |
| 第 10 章 | 带传动 | 126 |
| 10.1 | 带传动的类型和应用 | 126 |
| 10.2 | 带传动的受力分析 | 127 |
| 10.3 | 带传动中带的应力分析 | 129 |
| 10.4 | 带传动的弹性滑动和打滑 | 130 |
| 10.5 | 普通 V 带传动的设计计算 | 131 |
| 10.5.1 | 单根普通 V 带的许用功率 | 132 |
| 10.5.2 | 普通 V 带的型号和根数的确定 | 134 |
| 10.5.3 | 主要参数的选择 | 134 |
| 10.6 | V 带轮设计及带传动张紧装置 | 136 |
| 10.6.1 | V 带轮设计 | 136 |
| 10.6.2 | V 带传动的张紧装置 | 136 |
| 10.7 | 同步带传动简介 | 139 |
| 10.7.1 | 概述 | 139 |
| 10.7.2 | 带轮 | 142 |
| 10.7.3 | 同步带传动的设计计算 | 142 |
| | 习题 10 | 144 |
| 第 11 章 | 螺旋传动 | 145 |
| 11.1 | 螺旋传动的类别 | 145 |
| 11.2 | 螺旋传动的计算 | 145 |

| | | |
|---------------|----------------------|-----|
| 11.3 | 螺旋机构误差分析 | 149 |
| 11.4 | 提高螺旋传动精度的措施 | 152 |
| 11.5 | 螺旋传动的结构形式 | 155 |
| 11.5.1 | 滑动螺旋传动 | 155 |
| 11.5.2 | 滚珠螺旋传动 | 157 |
| 习题 11 | | 161 |
| 第 12 章 | 轴 | 162 |
| 12.1 | 概述 | 162 |
| 12.2 | 轴的结构设计 | 164 |
| 12.3 | 轴的强度计算 | 166 |
| 12.4 | 轴的刚度计算 | 169 |
| 习题 12 | | 170 |
| 第 13 章 | 轴承 | 171 |
| 13.1 | 轴承的分类 | 171 |
| 13.2 | 滑动轴承的结构形式与轴承材料 | 171 |
| 13.3 | 滚动轴承的基本类型和特点 | 173 |
| 13.4 | 滚动轴承的代号 | 175 |
| 13.5 | 滚动轴承的选择计算 | 177 |
| 13.6 | 滚动轴承的组合设计 | 181 |
| 习题 13 | | 186 |
| 第 14 章 | 弹性元件 | 187 |
| 14.1 | 弹性元件的类型、功能及材料 | 187 |
| 14.2 | 螺旋弹簧 | 189 |
| 14.3 | 片簧和热敏双金属片簧 | 194 |
| 14.4 | 其他类型的弹性元件简介 | 196 |
| 习题 14 | | 199 |
| 第 15 章 | 导轨和基座 | 200 |
| 15.1 | 导轨的作用、特点和分类 | 200 |
| 15.2 | 导轨设计的基本要求 | 201 |
| 15.3 | 导轨导向设计 | 205 |
| 15.4 | 滚动导轨 | 206 |
| 15.5 | 基座 | 208 |
| 15.5.1 | 基座的结构特点及主要技术要求 | 208 |
| 15.5.2 | 基座与支撑件的结构设计 | 211 |
| 15.5.3 | 基座与支撑件的材料选择 | 214 |
| 习题 15 | | 215 |
| 第 16 章 | 连接 | 216 |
| 16.1 | 概述 | 216 |
| 16.2 | 螺纹的基本知识 | 216 |
| 16.3 | 螺纹连接的主要类型及应用 | 217 |
| 16.4 | 螺纹连接的预紧与防松 | 218 |
| 16.5 | 键连接和花键连接 | 220 |
| 16.6 | 销连接 | 221 |
| 习题 16 | | 222 |
| 参考文献 | | 223 |

绪 论

在长期的生产实践中,人类为了减轻劳动强度,改善劳动条件,提高劳动生产率,创造和发展了各种各样的机械和仪器,精密机械是其不可缺少的一部分。精密机械在生产和科学技术的发展过程中起着重要的作用,是仪器设计的基础和必不可少的组成部分,被越来越广泛地应用在工业、农业、国防和科学技术现代化建设等领域中,是实现对各种信息进行采集、传输、转换、处理、存储、显示和控制的基础部分。在当今信息时代,精密机械不仅促进了光电技术、传感技术、微电子技术、通信技术和计算机应用技术的发展,而且通过与这些技术的结合,加速了精密机械自身的发展,并形成了一些新的研究领域和技术。

随着精密仪器朝着光机电算一体化和智能化方向的发展,传统的纯机械的仪器越来越少,智能化和多功能的新型仪器不断出现,显示了精密机械向小型化和灵巧化方向的发展。但是,这种发展仍建立在传统的机械理论上,因为不管新型仪器的性能和功能多么先进和强大,都不可能完全脱离机械系统和结构而独立存在。常规的精密机械设计方法仍是实现现代精密仪器机械系统的重要手段,不同的只是运用了新的工具和方法来实现常规设计。因此,在现代仪器设计中,精密机械仍具有不可替代的重要地位。

对于现代精密仪器总体设计人才来说,在掌握好光学、电子和计算机等先进技术的同时,一定要掌握好精密机械设计的基本原理和方法,才能设计出先进的、多功能的和智能化的光机电算一体的新型仪器设备,以满足国家的经济建设和国防建设的需要。

基于这一思想,在进行精密机械设计时,一般认为它是“机器”和“机构”的总称,不管它们的构造、工作原理、用途等如何不同,其实它们都有下列3个特征:① 它们是人造的实物组合;② 各实物之间具有确定的相对运动;③ 用来代替或减轻人类的劳动,从而完成有用的机械功或转换机械能。

在工程实际中,常见的机构有连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等。各种机构都是用来传递运动和力的可动装置。人们在日常生活和生产中都会接触到许多机器,如缝纫机、复印机、各种机床、汽车等。不同类型的机器具有不同的形式、构造和用途,通过分析不难看出,这些机器就其组成而言,都是由各种机构组合而成的,而机构是由构件组成的。机构中的构件可以是单一的零件,也可以是几个零件的组合物。所以,构件和零件是两个不同的概念,构件是“运动单元”,而零件是“制造单元”。随着数学、电子学、自动控制、计算机等现代科学技术的进步和发展,人类综合应用了各方面的知识和技术,不断创造出各种新型的精密机械及其产品。这类精密机械除具有使其内部各机构正常动作的先进控制系统外,还包含信息采集、处理和传递系统。

因此,机构与机器的区别在于:机构只是一个构件系统,而机器除构件系统之外还包括电气、液压等其他装置;机构只用于传递运动和力,机器除传递运动和力之外,还应当具有变换或传递能量、物料、信息的功能。但是在研究构件的运动和受力情况时,机器与机构之间并无区别。因此,习惯上用“机械”一词作为机器和机构的总称。

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。机械中的零件可分为两类:一类称为通用零件,在各种机械中都能遇到,如螺钉、齿轮、轴、弹簧等;另一类称为专用零件,只在某些机械中使用,如内燃机的活塞、汽轮机的叶片等。

“精密机械设计基础”课程主要研究精密机械中的常用机构、通用机械零件和部件。

本课程的内容、性质和任务

“精密机械设计基础”是一门重要的技术基础课，将机械制图、工程力学基础、金属材料与热处理、机械原理和机械设计等课程精简并有机地结合起来，以满足非机械类专业对机械基础知识的需要。本课程主要介绍精密机械及仪器上的常用机构和通用零件的工作原理、结构特点、基本的设计理论和计算方法，从机构分析、工作能力、精度和结构等诸方面来研究这些机构和零部件，并介绍其工作原理、特点、应用范围、选型、材料、受力分析、精度及设计计算的一般原则和方法。

其具体内容如下：

- ◎ 工程力学基础部分——通过精密机械零件受力分析与平衡的分析，针对几种简单常用的构件介绍精密机械中的强度、刚度、应力分析的基本概念和方法。
- ◎ 机械原理部分——论述组成机械的基本单元构件的结构特性，以及常用机构（连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系等）的工作原理和运动特征等基本知识，并介绍其基本设计方法。
- ◎ 机械设计部分——结合通用零件的结构特点、材料选择、受力分析、失效形式、设计计算理论和方法等，对常用精密机械零部件的工作原理、特点、计算依据和设计方法进行阐述，同时对现代设计方法中的实践软件进行介绍。

通过本课程的学习，学生应该：

- ◎ 了解精密机械中零件的受力分析方法、材料与热处理的基本知识，并能在工程设计中正确选用。
- ◎ 初步掌握常用机构的结构分析、运动分析、力的分析及其设计方法，具备分析和选择基本机构的能力。
- ◎ 掌握通用零部件的工作原理、特点、选型及其计算方法，培养学生能运用所学基础理论知识，解决精密机械零部件的设计问题，具有简单机械的结构设计能力。

同时，“精密机械设计基础”课程是一门实践性很强的应用型课程，善于观察、勤于思考和勇于实践是学好本课程的关键和要领，在学习中要注意抓住各部分内容的特性及它们之间的共性，从而可达到举一反三的效果，埋下创造、发明的种子。

在高等学校仪器仪表类专业的教学计划中，“精密机械设计基础”课程一般被列为主干课程，它将综合运用工程力学、机械制图和本课程所学知识来解决有关精密机械方面的设计问题。

第 1 章 精密机械零件的受力分析与平衡

力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的机械运动状态发生变化。在工程实践中，人们逐渐认识到，物体的机械运动状态发生变化（包括变形）都是由于其他物体对该物体施加力的结果。精密机械零件也不例外，因此研究其平衡和受力问题就比较重要。本章主要介绍力的基本概念、受力分析及平衡问题。

1.1 力学的基本概念

1. 力的概念

力学作为一门古老的科学发展至今已经走过了数百年的历史，并将随着时代的进步不断发展。古往今来，人们在日常生活和劳动中会发现，任何两个物体在相互作用时，这两个物体的运动状态（它们的速度大小和方向，或两者之一）都会发生变化。随着生产力的发展、实践的丰富和人们的认识水平不断提高，人们也逐步建立了力的科学概念。通常表述为：力是物体间相互的作用，这种作用使得物体的运动状态发生变化，同时物体也发生了变形。如果没有物体间的相互作用，力便不能存在。

力作用于物体，使得物体运动状态发生改变的效应称为力的外效应；而力使物体产生变形的效应称为力的内效应。

实践表明，力对物体的效应由以下三个要素决定：力的大小、力的方向（包括方位和指向）和力的作用点。三个要素之一发生改变，力的作用效应也将发生变化。

力的国际单位通常用牛顿或千牛顿表示，简称为 N（牛）或 kN（千牛）。在工程单位制中，取北纬 45° 的海平面上，地球吸引质量为 1 kg（千克）的标准砝码所产生的力，作为力的单位，这个力的单位称为 kgf（千克力）。因此，牛顿和千克力的换算关系为 $1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$ 。

力对物体的效应不仅取决于它的大小，还取决于它的方向，所以力是矢量。

力可以用一个有向线段来表示，如图 1-1 所示。线段的长度按一定的比例表示力的大小（图中 F 的大小为 3 N）；线段的方位和箭头的指向表示力的方向；线段的起点（或终点）表示力的作用点。经过力的作用点沿力的方向引出的直线称为力的作用线。

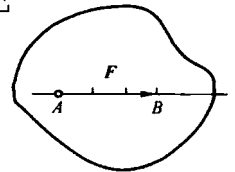


图 1-1 力的矢量表示

2. 刚体的概念

在研究力对物体的效应时，通常将所考虑的物体作为刚体看待。所谓刚体，就是在任何力的作用下，物体的大小和形状都保持不变的物体。实际上，任何物体受力后都将发生形状和大小的改变。但在正常情况下，工程上的机械零件和结构构件在力的作用下发生的变形很微小，对研究力的外效应影响很小，可以忽略不计。所以，刚体的概念是建立在人们对实际物体的一种理想化结果之上的。

3. 平衡的概念

平衡是指物体相对于地球处于静止或做匀速直线运动的状态。显然，平衡是物体机械运动的

特殊形式。因为，运动是绝对的，平衡、静止是相对的。作用在刚体上使刚体处于平衡状态的力系称为平衡力系。平衡力系应满足的条件称为平衡条件。

4. 静力学公理

静力学公理是人们在长期的生活和实践中总结出来的最基本的力学规律。这些规律在指导人们实践的过程中又被证明是正确的，是符合客观实际的。

【二力平衡理论】为了使受两个力作用的刚体保持平衡，其充分必要条件是：两力大小相等、方向相反、作用线相同，如图 1-2 所示。

对于变形物体，这个条件是必要的，又是不充分的。例如，绳索受到等值、反向、共线的两个拉力时处于平衡，但受到等值、反向、共线的两个压力时就不能平衡。

在两个力的作用下处于平衡的物体称为二力体，若为不计自重的杆件则称为二力杆。作用在二力体上的两个力，它们必通过两个力作用点的连线（与杆件的形状无关），且等值、反向，如图 1-3 所示。

【加减平衡力系理论】在工程实际中，我们通常把作用在物体上的几个力或一组力称为力系，而当物体在力系的作用下处于平衡状态时，又把这样的力系称为平衡力系。并且，在作用于刚体上的任意一个力系中，加上或减去任意平衡力系，并不改变原力系对刚体的效应，因此得到常用的“力的可传性原理”推论。

作用于刚体上的力可沿其作用线移至刚体上的任意一点，而不改变此力对刚体的作用效应。这就是力的可传性原理。如图 1-4 所示，作用于刚体 A 点的作用力 F，可沿其作用线移动到 B 点得到力 F'。但是刚体的状态在前后并没有发生改变，即力的作用效应相同。

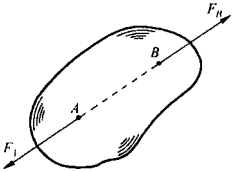


图 1-2 刚体的平衡

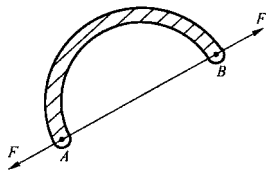


图 1-3 二力体的平衡

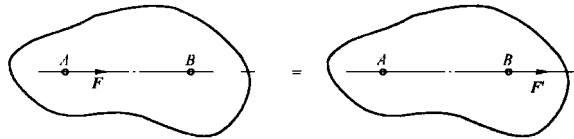


图 1-4 力的传递

由力的可传性原理可知，力对刚体的作用取决于力的大小、方向和作用线三个要素。

注意，力的可传性原理仅仅适用于刚体，对于需要考虑形变的物体，力不能沿其作用线移动，因为移动后将改变物体内部的受力和变形情况。如图 1-5 所示的 AB 杆，原来受两拉力的作用产生拉伸变形，如图 1-5(a)所示；但若将两力沿着作用线分别移动到杆的另一端，如图 1-5(b)所示，杆将受压而产生压缩变形。

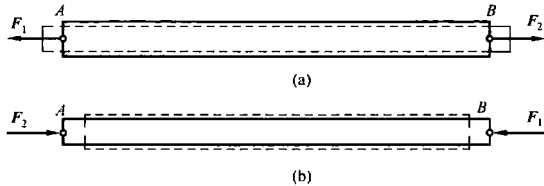


图 1-5 杆的受力与变形

【力的平行四边形法则】作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力。合力同样作用于同一点，其大小和方向由以两个分力为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示，即合力矢量等于这两个分力的矢量和，如图 1-6 所示，其矢量表达式为 $F_R = F_1 + F_2$ 。

求两共点力的合力时，为了方便作图表示，只需要绘出力平行四边形的 1/2 即可，通常是

三角形，如图 1-7 所示。其方法是自任意 O 点先画一力矢 F_1 ，再由 F_1 的终端画一力矢 F_2 ，最后由 O 点至力矢 F_2 的终端画出矢量 F_R ， F_R 代表 F_1 与 F_2 的合力。合力的作用点仍为力 F_1 、 F_2 的汇交点 O 。此作图法称为力的三角形法则。显然，改变 F_1 与 F_2 的顺序，其结果不变。

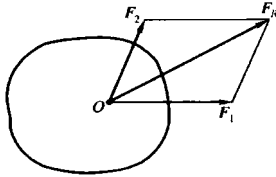


图 1-6 力的矢量和表示

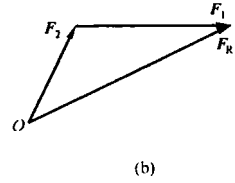
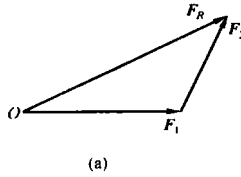


图 1-7 力的三角形表示

因此，利用力的平行四边形法则或力的三角形法则，可以将一个力分解为两个力，但必须是沿着两个已知方向分解为两个分力。

【三力平衡汇交定理】 当刚体受不平行的三个力作用（其中两个力的作用线相交于一点）而平衡时，这三个力的作用线必交汇于一点。如图 1-8 所示，三个不平行的力 F_1 、 F_2 和 F_3 作用于刚体上使得刚体平衡， F_1 和 F_2 的作用线必相交于点 O ，将 F_1 和 F_2 分别沿作用线移到 O 点，画出其合力 F_R ， F_R 应与 F_3 相平衡，根据二力平衡的条件得出 F_R 应与 F_3 共线，即 F_3 的作用线必通过 O 点。根据此定理，可以确定刚体在受不平行三力而处于平衡时未知力的方向。

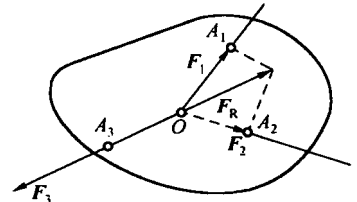


图 1-8 刚体的三力平衡

【作用与反作用定律】 当两个物体间相互作用时，其作用力总是大小相等、方向相反、作用线相同，分别作用于两个物体上。这两个力互为作用力和反作用力。

1.2 约束、约束反力与受力图

1. 约束与约束反力

在机械零件受力分析中，通常把零件在某些方向的运动加以限制，这就是约束；构成约束的周围物体则称为约束体。当然，约束体也会作用于研究对象上一定的力，我们称之为约束反力，简称反力。

约束反力的方向总是与约束体所能限制的运动方向相反，这种方法是确定约束反力方向的一个原则。约束反力以外的其他力称为主动力。在机械零件的静力学中，约束反力和物体所受的主动力组成平衡力系，因此可用平衡条件求出约束反力。

2. 机械零件中常见的约束类型及其反力

(1) 柔索约束

由柔软的绳索、三角带、链条等构成的约束称为柔索约束。当物体受到柔索的约束时，柔索只能限制物体沿柔索伸长方向的位移。因此，柔索给被约束物体的力，方向一定沿着柔索，并且只能是拉力。如图 1-9(a)所示，两根绳索悬吊一重物。根据柔索反力的特点，可知绳索作用于重物的约束反力是沿绳索的拉力 F_A 和 F_B 。图 1-9(b)为带传动装置，皮带对带轮的约束反力沿两个带轮的外公切线方向，大小分别为 F_1 和 F_2 。

(2) 光滑接触面约束

当物体与光滑支撑面接触时，如图 1-10(a)所示，由于不计摩擦，因此支撑面并不能限制物体沿其切线方向移动，仅能够阻止物体沿接触面的法线方向向下运动。因此，光滑接触面给被约束物体的力，其方向沿接触面的公法线，并且指向被约束物体，用字母 N 表示，如图 1-10(b)所示。

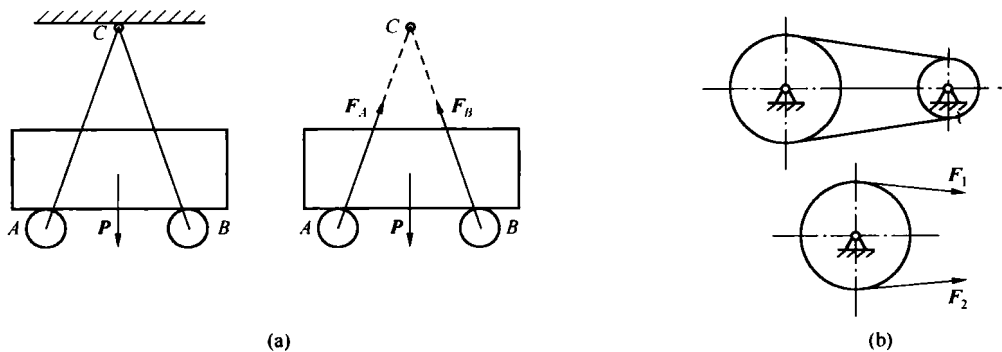


图 1-9 柔索约束

(3) 光滑圆柱铰链约束

工程上常用铰链将桥梁、起重机的起重臂等结构同支撑面或机架等连接起来，这就构成了铰链支座。如图 1-11(a)所示，构件 A 通过其上的圆柱形孔套在构件 B 上的圆柱形销钉 C 上。构件 A 的运动受到销钉的制约，如果不计摩擦就构成了光滑圆柱铰链约束。由于销钉的直径一般比孔的直径小，故销钉的外表面与孔的内表面接触时为线接触。此接触线为圆柱的一条母线，可用其中点 K 来代替。根据光滑接触面的约束反力特点，销钉 C 作用于构件 A 的约束反力 F_N 的方向也不能确定。在实际受力分析时，可利用力的正交分解将该约束反力表示为两个正交分量 F_x 和 F_y ，如图 1-11(b)所示。这类约束在工程中有以下几种主要形式。

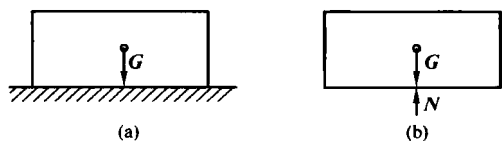


图 1-10 光滑接触面支撑

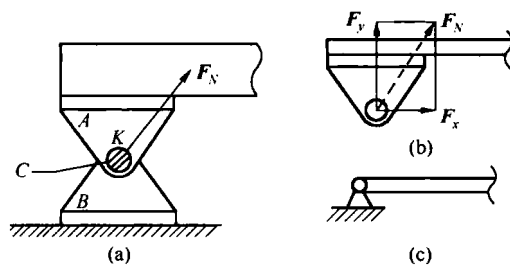


图 1-11 固定铰链支座

① **固定铰链支座**——如果构成圆柱铰链约束中的一个构件固定在地面或机架上作为支座，则称此铰链为固定铰链支座，其约束反力一般用两个正交分量表示，如图 1-11(b)所示。图 1-11(c)为固定铰链支座的简化画法。图 1-12 中的 O 为固定铰链支座，A 为中间铰链。

② **活动铰链支座**——如果固定铰链支座中的底座不用螺钉而改用辊轴与支撑面接触，便形成了活动铰链支座。其约束反力垂直于光滑支撑面，如图 1-13(a)所示。图 1-13(b)、(c)为活动铰链支座的简化画法。

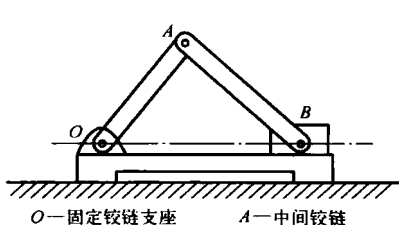


图 1-12 带中间铰链的固定铰链支座

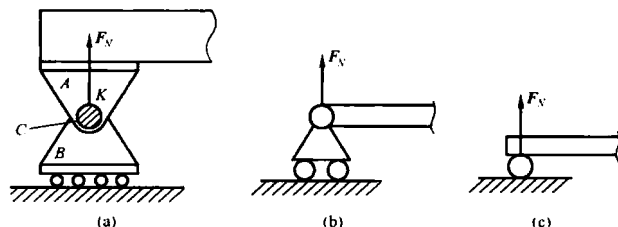


图 1-13 活动铰链支座

③ **中间铰链**——将两个构件用圆柱铰链连接在一起成为中间铰链，其约束反力一般也用两个正交分量表示，如图 1-12 中 A 所示。

在工程结构中，两端用光滑铰链与其他物体连接起来的刚体杆，如果不计杆的自重且杆上无其他动力的作用，若杆处于平衡状态，则该刚体杆是一个二力杆。显然，由光滑铰链约束的约束反力特点可知，上述刚体杆两端所受到的两个约束反力必然为一对平衡力。由二力平衡公理可知，这两个约束反力必然大小相等，方向相反，作用线相同。

3. 受力图

在求解静力平衡的问题时，必须首先分析物体的受力情况，即进行受力分析。根据问题的已知条件和待求量，从有关结构中恰当选择某物体（或几个物体组成的系统）作为研究对象。这时，可设想将所选择的对象从与周围的约束（含物体）的接触中分离出来，即解除其所受的约束而代之以相应的约束反力。这一过程称为解除约束。解除约束后的物体称为分离体，画有分离体及其所受的全部力（包括主动力和约束反力）的简图称为受力图。下面举例说明物体受力图的画法。

【例 1-1】 三角架由 AB 和 BC 两杆连接而成。销钉 B 处悬挂一个重为 G 的物体， A 、 C 两处用铰链与墙固连，如图 1-14(a)所示。如果不计杆的自重，试分析销钉 B 的受力。

解：以销钉 B 为研究对象，将销钉 B 从整个结构中分离出来。

销钉 B 除受主动力 G 作用外，还受到杆 AB 对其的拉力和 BC 对其的支撑力。由于两杆都是两端铰接而自重不计的二力杆，所以它们的反力 S_{AB} 、 S_{CB} 的方向将分别沿着两铰链中心的连线。又根据两杆对销钉 B 所起的拉或支撑的作用，即可定出反力 S_{AB} 、 S_{CB} 的指向，如图 1-14(b)所示。

【例 1-2】 重量为 G 的梯子 AB ，放在光滑的水平地面和铅直墙面上，在 D 点用水平绳索与墙壁相连，如图 1-15(a)所示。试画出梯子的受力图。

解：把要研究的部分梯子单独抽取出来，并画出分离体图。先画出梯子的重力 G ，作用于梯子的重心，方向铅直向下。再画墙壁和地面对梯子的约束反力。根据光滑接触面约束的特点， A 、 B 处的约束反力 F_{NA} 和 F_{NB} 分别与墙壁和地面垂直并指向梯子，绳索的约束反力 F_D 应沿着绳索的方向为一拉力。图 1-15(b)即为梯子的受力图。

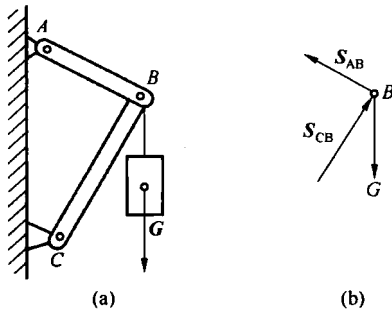


图 1-14 三角架结构支撑

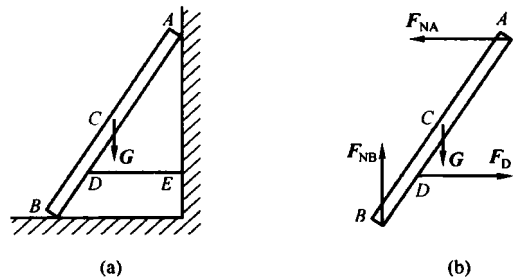


图 1-15 梯子支撑

1.3 精密机械零件的受力平衡

1. 共线力的平衡

一个力系作用于物体而不发生任何外效应，则受此力系作用的物体处于平衡状态。对于一个物体来说，要想处于平衡状态，除了使物体不能有任何方向的移动外，还必须使物体绕任意一点都不能转动。所以，物体受力的平衡条件必须满足：① 力系中各力沿任一方向的分力的代数和应等于零；② 力系中各力对于任意一点（或轴）的力矩的代数和应等于零。

最简单的平衡状态是物体在两个力作用下的平衡。根据二力平衡定律，若两个力使物体平衡，此

二力必须大小相等、方向相反，作用在同一直线上，如图 1-16 所示。其平衡方程式为 $\sum \mathbf{F} = 0$ ，或各力对力的作用线以外任意一点 A 的力矩的代数和等于零，即 $\sum M_A(\mathbf{F}) = 0$ 。满足以上两个平衡方程式的任何一个，都能保证力系的平衡。显然，此平衡条件可推广应用于共线力系中任意一个力作用下物体的平衡。所以，共线力系的平衡只有一个独立平衡方程式。

2. 平面力系的平衡

对于平面力系，假如在一个平面中某一物体受到不共线的三个力的作用，如图 1-17 所示，要使得物体平衡，其中两个力的合力必须与第三个力的大小相等、方向相反，即三个力的合力为零。由此可知，在平面力系中，不论多少个力作用于物体，使物体平衡的必要条件是各力的矢量和为零，即 $\sum \mathbf{F} = 0$ ，或者各力在平面坐标系 x 、 y 两轴上投影的代数和均等于零，即 $\sum F_x = 0$ ， $\sum F_y = 0$ 。

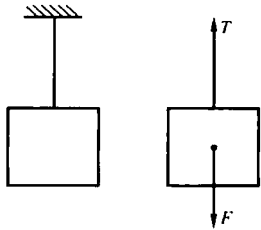


图 1-16 二力作用下物体的平衡

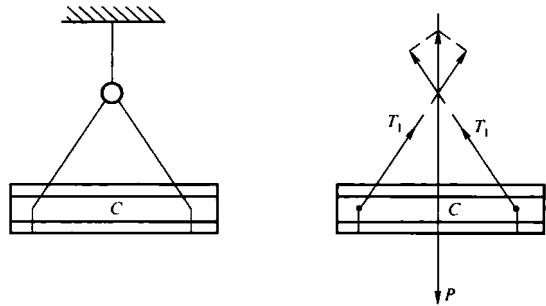


图 1-17 平面内三力作用下物体的平衡

力系仅满足合力等于零的条件，不一定能使物体处于平衡。假如当三个力作用于物体时，两个力的合力与第三个力大小相等、方向相反，但不共线，会形成一个力偶。即对力的作用线以外任一点（或轴）的力矩和不等零，亦即存在一个力偶矩。这时物体仍可产生转动效应而不能平衡。故平面力系中除了必须满足在平面坐标系 x 、 y 两轴上投影的代数和均等于零外，还应具备物体平衡的充分条件，即必须满足各力对平面内任意一点 O 的力矩和也等于零，即 $\sum M_O(\mathbf{F}) = 0$ ，故平面力系平衡的代数条件为： $\sum F_x = 0$ ， $\sum F_y = 0$ ， $\sum M_O(\mathbf{F}) = 0$ 。

3. 空间力系的平衡

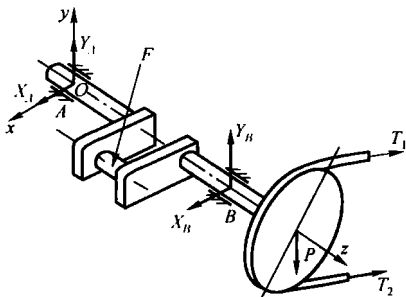


图 1-18 空间力系作用情况

对于空间的力系而言，由于各力的作用并不在同一个平面内，如图 1-18 所示。如仅满足上述平面力系中的三个平衡方程式，并不能保证物体平衡。物体仍然可以沿着 z 轴移动与转动。由此可知，要使空间力系作用下的物体平衡，必须使物体在三个相互垂直的轴线方向都没移动，而且物体绕 Ox 、 Oy 、 Oz 三个轴都没转动。为此，必须相应地具有 6 个平衡条件，即各力在 x 、 y 、 z 三轴方向投影的代数和等于零，绕 Ox 、 Oy 、 Oz 三轴的力矩和等于零，由此得出空间力系的代数条件为： $\sum F_x = 0$ ， $\sum F_y = 0$ ， $\sum F_z = 0$ ， $\sum M_x(\mathbf{F}) = 0$ ， $\sum M_y(\mathbf{F}) = 0$ ， $\sum M_z(\mathbf{F}) = 0$ 。

而对于空间上的共点力系，只要各力在相互垂直的三轴上投影的代数和均为零，则各力必互成平衡，即空间共点力系的 3 个平衡方程式为： $\sum F_x = 0$ ， $\sum F_y = 0$ ， $\sum F_z = 0$ 。

而对于空间上的平行力系，只要各力（沿与其平行的轴线方向，如 z 轴方向）的代数和等于零，且各力对于与其不相平行的两轴的力矩和均为零，则此力系必成平衡。即空间平行力系的 3 个平衡方程为： $\sum F_z = 0$ ， $\sum M_x(\mathbf{F}) = 0$ ， $\sum M_y(\mathbf{F}) = 0$ 。