



全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

精密机械设计

◎ 许贤泽 主 编



严格按照教育部仪器科学与技术教学指导委员会要求
贯彻少而精的原则，力求精选内容，适当拓宽知识面
突出系统总体方案设计、机械零部件设计和结构设计



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

精密机械设计

许贤泽 主 编

张红艳 张 瑜 王利恒 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是由“国家教育部仪器科学与技术教学指导委员会”委员编写的《精密机械设计》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 17 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 13~16 章讲述在精密机械中常用弹性元件、基座和导轨、常用机构的设计方法;第 17 章对精密机械设计中常用的连接形式——螺纹连接进行了简单介绍。

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,也可供有关专业师生、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 / 许贤泽主编. — 北京: 电子工业出版社, 2013.8

(全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-121-21243-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 186729 号

策划编辑: 郭穗娟

责任编辑: 底 波

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 19.5 字数: 500 千字

印 次: 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 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。

《全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材》

编委会名单

主 任：许贤泽

副主任：谭跃刚 刘波峰 郝晓剑 杨述斌 付 华

委 员：赵 燕 黄安贻 郭斯羽 武洪涛 靳 鸿

陶晓杰 杨书仪 李志华 秦 斌 王 欣

李德俊 孙士平 冯先成 白福忠 张国强

王后能 张雪飞 谭保华 郑红霞

前 言

高等工程教育改革,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、教学方法和手段等各个方面都提出了新的要求。按照国家教育部仪器科学与技术教学指导委员会的要求,仪器科学技术类专业改革“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。

精密机械设计作为测控技术与仪器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组织编写,可供相关专业作为专业基础课教学的教材选用。

本书包括 17 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 13~16 章讲述精密机械常用弹性元件、基座和导轨、常用机构的设计方法;第 17 章对精密机械设计中的常用连接形式——螺纹连接进行了简单的介绍。

本书由武汉大学许贤泽教授担任主编,张红艳、张瑜和王利恒担任副主编。编写分工如下:许贤泽编写第 1、2、6、7、8、9、10、16 章,张红艳编写第 3、4、5、11 章,张瑜编写第 12、13 章,王利恒编写第 14、15、17 章。赵文成、楚梁、陈少阳、王庆也参与了本书的部分编写任务,全书由许贤泽教授统稿。

编写时,本书引用了许多文献资料,未能一一列出。在此,对这些文献资料的作者谨致谢意。

尽管我们为编写本书付出了心血和努力,但疏漏及欠妥之处在所难免。我们衷心希望广大读者提出宝贵意见,并对本书中的不妥之处予以批评指正。

编 者
2013 年 8 月

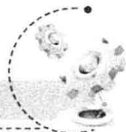
目 录

第 1 章 精密机械零件的受力分析与平衡	1
1.1 力学的基本概念	1
1.1.1 力的概念	1
1.1.2 刚体的概念	2
1.1.3 平衡的概念	2
1.1.4 静力学公理	2
1.2 约束、约束反力与受力图	4
1.2.1 约束与约束反力	4
1.2.2 机械零件中常见的约束类型及其反力	4
1.2.3 受力图	6
1.3 精密机械零件的受力平衡	7
1.3.1 共线力的平衡	7
1.3.2 平面力系的平衡	8
1.3.3 空间力系的平衡	8
习题	12
第 2 章 精密机械零件受力变形与应力分析	14
2.1 精密机械零件的强度与刚度	14
2.2 杆件的拉伸与压缩	15
2.2.1 拉伸与压缩时的内力与应力	15
2.2.2 拉伸与压缩时的强度计算	17
2.3 机械零件的剪切	19
2.3.1 剪切时的内力与应力	19
2.3.2 剪切的强度计算	21
2.4 机械零件的扭转	22
2.4.1 轴类零件的扭转内力和应力	22
2.4.2 轴类零件的扭转强度和刚度计算	25
2.5 梁类零件的平面弯曲	27
2.5.1 梁类零件的类型	27
2.5.2 梁类零件弯曲时的内力与应力	28
2.5.3 梁类零件弯曲的强度计算	32
习题	34

第 3 章 平面连杆机构的运动简图与自由度计算	36
3.1 运动副及其分类	36
3.1.1 机构的组成及其分类	36
3.1.2 运动副及其分类	39
3.2 平面机构运动简图	41
3.3 平面机构的自由度计算	43
3.3.1 机构自由度的计算	43
3.3.2 机构具有确定性运动的条件	44
3.3.3 计算机构自由度的注意事项	46
习题	48
第 4 章 平面连杆机构	49
4.1 平面四杆机构的基本形式和特性	49
4.1.1 铰链四杆机构的基本形式	50
4.1.2 铰链四杆机构的主要特性	51
4.2 平面四杆机构曲柄存在的条件	55
4.3 铰链四杆机构的演化	56
4.4 平面四杆机构的设计	61
4.4.1 按照给定的行程速比系数设计四杆机构	61
4.4.2 按照给定连杆位置设计四杆机构	63
习题	64
第 5 章 凸轮机构	65
5.1 凸轮机构的应用和分类	65
5.1.1 凸轮机构的应用	65
5.1.2 凸轮机构的分类	66
5.2 从动件的常用规律	67
5.2.1 凸轮机构的运动过程和基本参数	67
5.2.2 凸轮从动件常用运动规律	68
5.3 图解法设计盘形凸轮轮廓	72
5.3.1 图解法设计盘形凸轮轮廓	72
5.3.2 解析法设计盘形凸轮轮廓	73
5.4 凸轮机构基本尺寸的确定	75
习题	77



第 6 章 齿轮机构	79	习题	106
6.1 齿轮机构的特点和分类	79	第 7 章 轮系	107
6.2 齿廓啮合基本定理	79	7.1 轮系的类型	107
6.3 渐开线齿廓	81	7.1.1 定轴轮系	107
6.3.1 渐开线的形成及其性质	81	7.1.2 周转轮系	107
6.3.2 渐开线齿廓满足齿廓啮合基本定律	82	7.2 定轴轮系传动比计算	107
6.3.3 渐开线齿廓的其他啮合特性	82	7.3 周转轮系传动比计算	109
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	83	7.3.1 周转轮系的组成	109
6.4.1 齿轮各部分名称	83	7.3.2 周转轮系传动比的计算	110
6.4.2 标准直齿圆柱齿轮几何尺寸的计算	85	7.4 复合轮系传动比计算	112
6.5 渐开线标准直齿圆柱齿轮的啮合传动	86	7.5 轮系的功能	113
6.5.1 齿轮传动的正确啮合条件	86	7.6 几种特殊的行星齿轮传动简介	116
6.5.2 标准中心距	86	7.6.1 少齿差行星齿轮传动	116
6.5.3 连续传动条件	87	7.6.2 谐波齿轮传动	117
6.6 渐开线齿轮的切齿原理与根切现象	89	习题	118
6.6.1 渐开线齿轮的切齿原理	89	第 8 章 精密机械设计概论	119
6.6.2 根切现象和最小齿数	91	8.1 精密机械设计的要求、程序与方法	119
6.6.3 变位齿轮	92	8.1.1 精密机械设计的基本要求	119
6.7 斜齿圆柱齿轮机构	93	8.1.2 精密机械设计的一般程序	120
6.7.1 斜齿圆柱齿轮齿廓曲面的形成及其啮合特点	93	8.1.3 精密机械设计方法	121
6.7.2 斜齿圆柱齿轮的基本参数和几何尺寸的计算	94	8.2 精密机械零件的强度	122
6.7.3 斜齿轮的正确啮合条件和重合度	96	8.2.1 载荷和应力	122
6.7.4 斜齿轮的当量齿数	97	8.2.2 静应力作用下零件的强度	123
6.7.5 斜齿轮的优缺点	97	8.2.3 变应力作用下零件的强度	124
6.8 圆锥齿轮机构	98	8.2.4 零件的接触疲劳强度	125
6.8.1 直齿圆锥齿轮的传动比	98	8.3 精密机械零件的常用材料及钢的热处理	126
6.8.2 直齿圆锥齿轮的背锥和当量齿数	98	8.3.1 常用材料	126
6.8.3 直齿圆锥齿轮几何尺寸计算	100	8.3.2 钢的热处理	128
6.9 蜗杆蜗轮机构	101	8.3.3 材料的选用原则	130
6.9.1 蜗杆蜗轮机构的传动特点	101	8.4 精密机械零件的结构工艺性	131
6.9.2 蜗杆蜗轮传动的类型	101	8.5 精密机械零件的刚度	132
6.9.3 蜗杆蜗轮传动的正确啮合条件	102	习题	133
6.9.4 蜗杆蜗轮传动的主要参数和几何尺寸	102	第 9 章 齿轮传动	134
		9.1 齿轮传动的失效形式及设计准则	134
		9.1.1 齿轮传动的失效形式	134
		9.1.2 齿轮传动的设计准则	136
		9.2 齿轮材料及热处理	136
		9.2.1 齿轮材料	136
		9.2.2 齿轮的热处理方法	137
		9.3 齿轮传动精度	138



9.4 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	139	第 11 章 螺旋传动	185
9.4.1 受力分析	139	11.1 螺旋传动的类别	185
9.4.2 计算载荷	140	11.1.1 螺纹的生成	185
9.4.3 齿面接触强度计算	140	11.1.2 螺纹的主要参数	186
9.4.4 齿根弯曲强度计算	143	11.1.3 螺纹的牙形及种类	186
9.5 斜齿圆柱齿轮传动强度计算	146	11.1.4 螺旋传动的基本形式及其特点	187
9.5.1 受力分析	146	11.2 螺旋传动的计算	192
9.5.2 强度计算	147	11.2.1 螺旋副材料的选择	192
9.6 直齿圆锥齿轮传动	148	11.2.2 螺旋副常用的计算	192
9.6.1 受力分析	148	11.3 螺旋机构误差分析	196
9.6.2 强度计算	148	11.4 提高螺旋传动精度的措施	200
9.7 蜗杆传动	149	习题	202
9.7.1 受力分析	149	第 12 章 轴	203
9.7.2 蜗杆传动的失效形式和材料的选择	150	12.1 轴的概述	203
9.7.3 强度计算	151	12.2 轴的结构设计	205
9.8 齿轮传动链的设计	152	12.2.1 轴上零件的固定	206
9.8.1 齿轮传动形式的选择	152	12.2.2 轴的结构工艺性	209
9.8.2 传动比的分配	152	12.3 轴的强度计算	212
9.8.3 齿数、模数的确定	154	12.3.1 按许用切应力计算估算轴的最小直径	212
9.8.4 齿轮传动的空回及消除方法	155	12.3.2 弯曲应力校核计算	213
9.8.5 齿轮传动链的结构设计	156	12.4 轴的刚度计算	216
习题	160	习题	218
第 10 章 带传动	162	第 13 章 轴承	219
10.1 带传动的类型和应用	162	13.1 轴承的分类	219
10.2 带传动的受力分析	164	13.2 滑动轴承的结构形式与轴承材料	219
10.3 带传动中带的应力分析	166	13.2.1 圆柱形滑动轴承	220
10.4 带传动的弹性滑动和打滑	168	13.2.2 圆锥形滑动轴承	226
10.5 普通 V 带传动的设计计算	169	13.2.3 顶尖或轴尖支承	227
10.5.1 单根普通 V 带的许用功率	170	13.3 滚动轴承的基本类型和特点	229
10.5.2 普通 V 带的型号和根数的确定	172	13.4 滚动轴承的代号	231
10.5.3 主要参数的选择	173	13.5 滚动轴承的选择计算	236
10.6 V 带轮设计及带传动张紧装置	174	13.5.1 滚动轴承选择的考虑因素	236
10.6.1 V 带轮设计	174	13.5.2 滚动轴承选择的基本计算	237
10.6.2 V 带传动的张紧装置	175	13.6 滚动轴承的组合设计	242
10.7 同步带传动简介	178	13.6.1 滚动轴承的轴向固定	242
10.7.1 概述	178	13.6.2 滚动轴承组合的轴向固定及调整	243
10.7.2 带轮	181	13.6.3 轴承的密封	244
10.7.3 同步带传动的设计计算	181	习题	246
习题	184		



第 14 章 弹性元件	247	第 16 章 精密机械中的常用机构	276
14.1 弹性元件的类型、功能及材料	247	16.1 微动机构	276
14.1.1 弹性元件的分类	247	16.1.1 螺旋微动机构	276
14.1.2 弹性元件的功能	248	16.1.2 差动螺旋微动机构	277
14.1.3 弹性元件的特性	249	16.1.3 螺旋——斜面微动机构	277
14.1.4 弹性元件的材料	252	16.1.4 螺旋——杠杆微动机构	278
14.2 螺旋弹簧	253	16.1.5 齿轮——杠杆微动机构	279
14.2.1 压缩弹簧	253	16.2 示数装置	279
14.2.2 拉伸弹簧	254	16.2.1 标尺指针（指标）示数装置	280
14.2.3 扭转弹簧	255	16.2.2 标尺及指针	280
14.2.4 螺旋弹簧的设计计算	255	16.2.3 示数装置的误差	281
14.3 片簧和热敏双金属片簧	258	16.3 记录装置	281
14.4 其他类型的弹性元件简介	260	16.3.1 连续记录	282
习题	262	16.3.2 间歇记录	283
第 15 章 导轨和基座	263	16.4 计数装置	284
15.1 导轨的作用、特点和分类	263	16.5 锁紧装置	285
15.2 导轨设计的基本要求	264	16.6 减振器	287
15.2.1 导向精度	264	16.6.1 减振系统设计原理	287
15.2.2 刚度	265	16.6.2 减振器的类型及选用	290
15.2.3 耐磨性	265	习题	291
15.2.4 低速运动平稳性	266	第 17 章 连接	292
15.2.5 结构简单、工艺性好	266	17.1 概述	292
15.3 导轨导向设计	266	17.2 螺纹的基本知识	292
15.3.1 按运动学原理设计	266	17.2.1 螺纹的分类及特点	292
15.3.2 按误差平均原理设计	267	17.2.2 螺纹的主要参数	294
15.4 滚动导轨	268	17.3 螺纹连接的主要类型及应用	295
15.4.1 分类	268	17.4 螺纹连接的预紧与防松	296
15.4.2 结构特点	269	17.4.1 螺纹连接的预紧	296
15.5 基座	270	17.4.2 螺纹连接的防松	297
15.5.1 基座的结构特点及主要技术要求	270	17.5 键连接和花键连接	299
15.5.2 基座与支承件的结构设计	272	17.5.1 键连接的类型	299
15.5.3 基座与支承件的材料选择	275	17.5.2 花键连接	301
习题	275	17.6 销连接	302
		习题	302
		参考文献	303

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，所以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

1.1.1 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（即它们的速度、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，力对物体的效应由如下 3 个要素决定：力的大小、力的方向（包括方位和指向），以及力的作用点。3 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 kgf = 9.8 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）；线段的方向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。

力的矢量通常用黑体字母表示（如 $\boldsymbol{F}$ ），其大小则用普通字母表示（如 F ）。

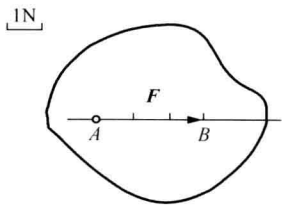
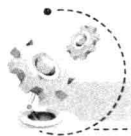


图 1-1 力的矢量表示



1.1.2 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。故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。

1.1.3 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。

1.1.4 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,但又是不充分的。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。

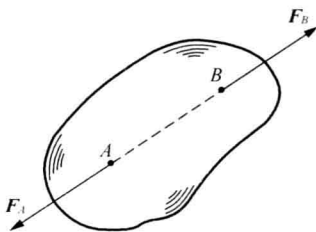


图 1-2 刚体的平衡

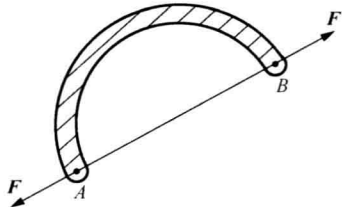


图 1-3 二力体的平衡

【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。并且我们发现在作用于刚体上的任一力系中,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。

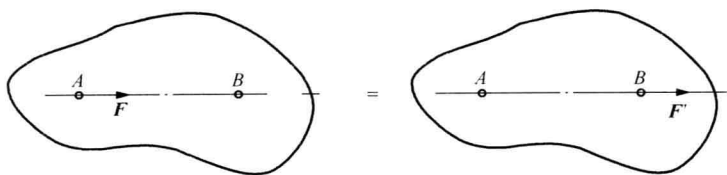


图 1-4 力的传递

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 3 个要素。

在这里必须注意的是, 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。

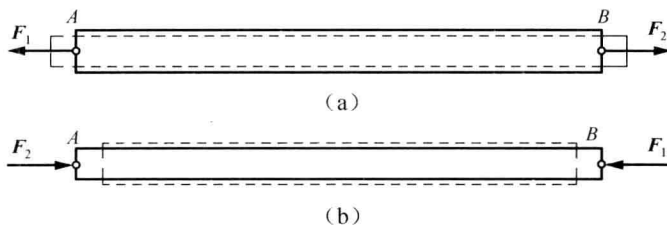


图 1-5 杆的受力与变形

【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。合力同样也作用于同一点, 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: $\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$ 。

求两共点力的合力时, 为了方便作图表示, 只需要绘出力的平行四边形的一半就可以了, 通常是三角形, 如图 1-7 所示。其方法是自任意 O 点先画出一力矢 $\mathbf{F}_1$, 然后再由 $\mathbf{F}_1$ 的终端画一力矢 $\mathbf{F}_2$, 最后由 O 点至力矢 $\mathbf{F}_2$ 的终端画出矢量 $\mathbf{F}_R$, $\mathbf{F}_R$ 代表 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 的合力。合力的作用点仍为力 $\mathbf{F}_1$, $\mathbf{F}_2$ 的汇交点 O 。此作图法称为力的三角形法则。显然, 改变 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 的顺序, 其结果不变。

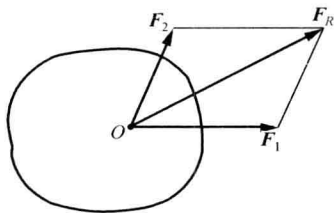


图 1-6 力的矢量和表示

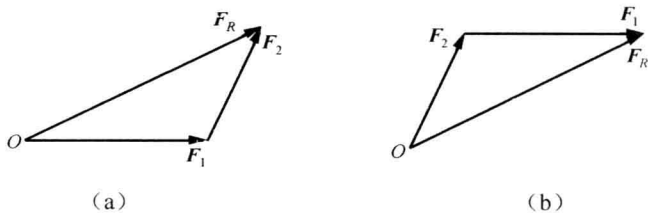


图 1-7 力的三角形表示

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。

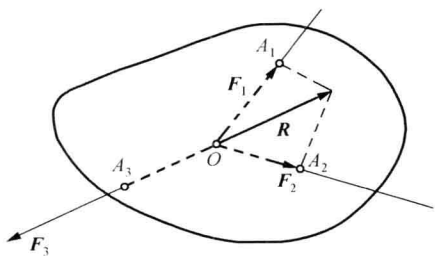
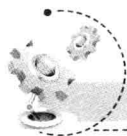


图 1-8 刚体的三力平衡

【三力平衡汇交定理】 当刚体受不平行的 3 个力作用（其中两个力的作用线相交于一点）而平衡时，这 3 个力的作用线必汇交于一点。如图 1-8 所示，3 个不平行的力 F_1 、 F_2 、 F_3 作用于刚体上使得刚体平衡，由于 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 R ， R 应与 F_3 相平衡，根据二力平衡的条件得出 R 应与 F_3 共线，也即 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 3 力而处于平衡时，未知力的方向。

【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

1.2.1 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；把构成约束的周围物体称为约束体。当然，约束体也会作用于研究对象上一定的力，我们把它称为约束反力，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。

1.2.2 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，方向一定是沿着柔索，并且只能是拉力。

如图 1-9 (a) 所示，可见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) 所示的为带传动装置。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。当物体与光滑支承面接触时，如图 1-10 所示，由于不计摩擦，因此支承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。

(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承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，故销钉的外表面和孔的内表面接



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力 F_x 和 F_y ，如图 1-11 (b) 所示。这类约束在工程中有下列几种主要形式。

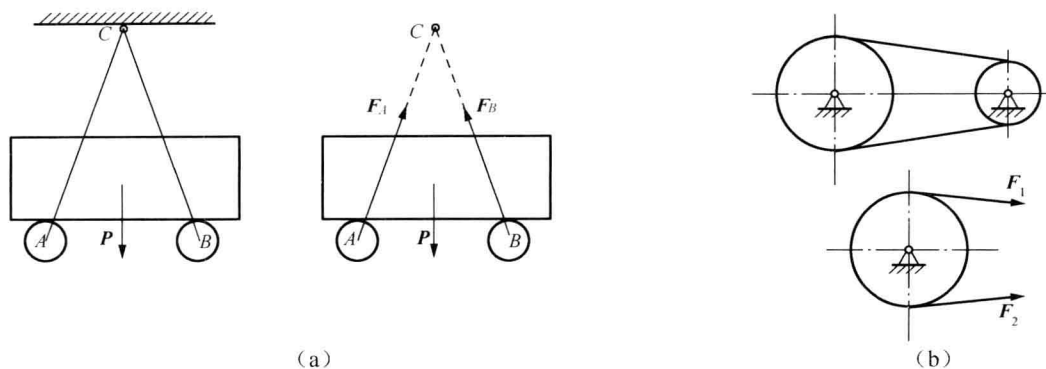


图 1-9 柔索约束

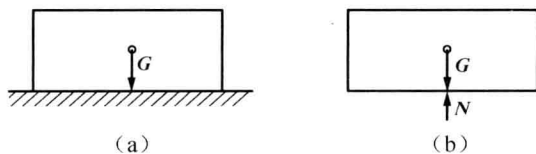


图 1-10 光滑接触面支承

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。

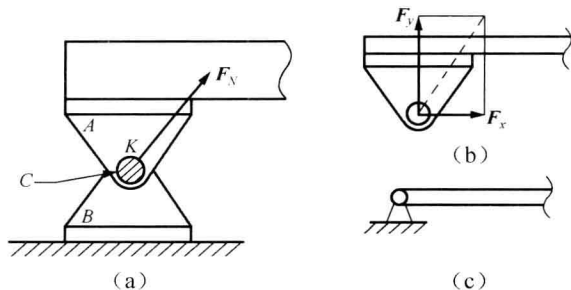


图 1-11 固定铰链支座

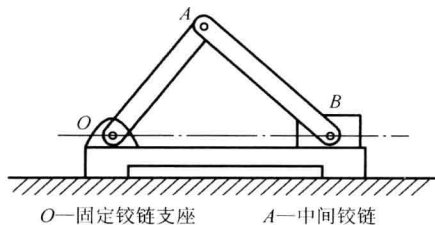


图 1-12 带中间铰链的固定铰链支座

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承面接触，便形成了活动铰链支座。其约束反力垂直于光滑支承面，如图 1-13 (a) 所示。图 1-13 (b)、(c) 所示为活动铰链支座的简化画法。

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。

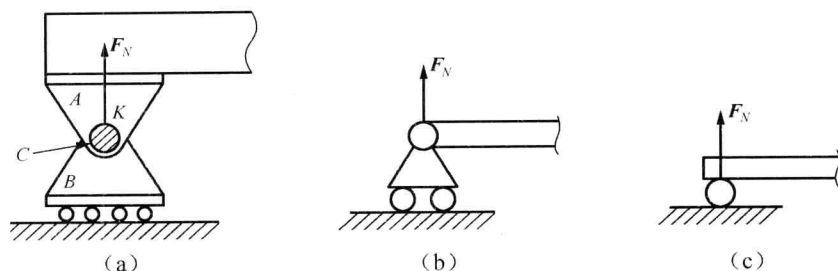


图 1-13 活动铰链支座

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。

1.2.3 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一物体（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，画出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。下面通过举例来说明物体受力图的画法。

例 1-1 三脚架由 AB 、 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_{BC} 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_{BC} 的指向，如图 1-14 (b) 所示。

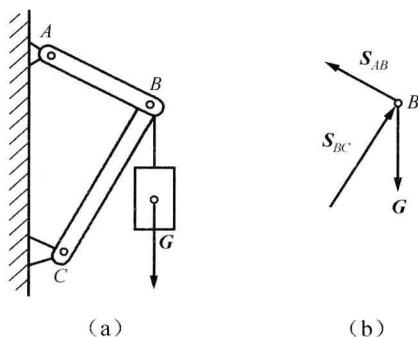


图 1-14 三脚架结构支承



例 1-2 重量为 G 的梯子 AB , 搁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。

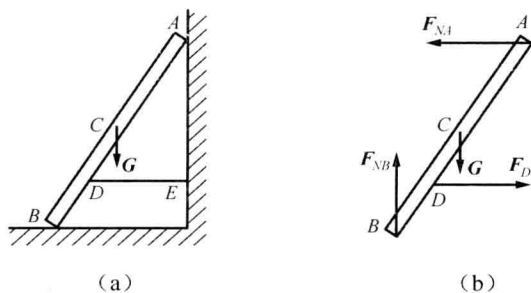


图 1-15 梯子支承

1.3 精密机械零件的受力平衡

1.3.1 共线力的平衡

一个力系作用于物体不发生任何外效应, 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: 力系中各力沿任一方向的分力的代数和应等于零; 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之中的任何一个, 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。故共线力系的平衡只有一个独立平衡方程式。

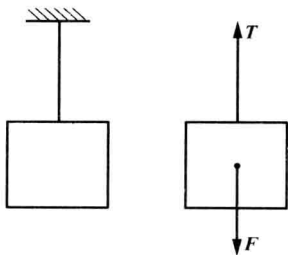


图 1-16 二力作用下物体的平衡



1.3.2 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3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3个力的大小相等、方向相反。也就是3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 $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$ 。

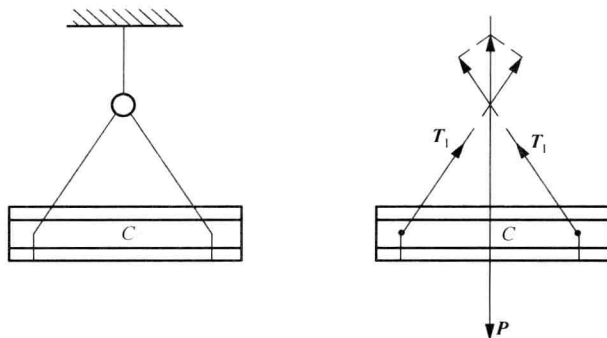


图 1-17 平面内三力作用下物体的平衡

但力系仅满足合力等于零的条件,还不一定能使物体处于平衡。假如当3个力作用于物体时,两个力的合力与第3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)的力矩和不等于零,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:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum M_O(\mathbf{F}) &= 0\end{aligned}$$

1.3.3 空间力系的平衡

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3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3个相互垂直的轴线方向都没移动,同时还必须使物体绕 Ox 、 Oy 、 Oz 3个轴都没有转动。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:

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0$$