

高等职业教育机电类专业规划教材

机械设计基础

● 汪金营 诸刚 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书以应用为主线,将工程力学、工程材料、机械原理及机械零件等内容有机地结合在一起,突出为后续专业课程学习服务的目的,是学习相关专业课程和从事机械设计以及近机类技术工作的必备基础教材。全书共分五个部分,主要包括工程力学基础、工程材料、工程机构、机械传动以及联接、轴系零件及其他。书中系统详细地介绍了构件的受力分析与计算、构件的承载能力分析、常用金属材料、热处理及选用、其他工程材料简介、平面连杆机构、凸轮机构、间歇运动机构、带传动与链传动、齿轮传动与轮系传动、蜗杆传动与螺旋传动、工程中的联接、轴与轴承、联轴器与离合器。

本书主要作为高等职业教育机电类专业的教学用书,也可供相关专业、成人教育或工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/汪金营, 诸刚主编. —北京: 机械工业出版社, 2010. 7
高等职业教育机电类专业规划教材
ISBN 978-7-111-31160-7

I. ①机… II. ①汪…②诸… III. ①机械设计-高等学校: 技术学校-教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 126387 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 王海峰 责任编辑: 王丽滨
版式设计: 张世琴 责任校对: 张莉娟
责任印制: 杨 曦
北京京丰印刷厂印刷
2010 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷
184mm × 260mm · 20 印张 · 493 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-31160-7
定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心: (010) 88361066
销售一部: (010) 68326294
销售二部: (010) 88379649
读者服务部: (010) 68993821

门户网: <http://www.cmpbook.com>
教材网: <http://www.cmpedu.com>
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据高等职业教育机电类专业人才培养目标的原则精神编写的，是一本应用型教学用书。书中对相关课程的内容进行优化整合，将工程力学、工程材料与工程机构、机械传动以及联接、轴系零件及其他以机械设计的思想为主线融合而成，重点讲述机械设计的基本知识，培养学生进行机械设计的技能，使学生具有一定的分析计算及运用、选用一般机械的能力。作为教学改革的教材，本书在编写过程中突出了以下几点：

1) 从高等职业教育培养应用型、技能型人才的总体目标出发，更加重视工程实践能力的培养。在本书的每一章中均安排了工程训练环节，旨在提高学生的实践能力和综合能力。

2) 作为机电类专业的基础教材，本书内容定位在服务于后续专业课程的学习上，即以“应用”为目的，以“必需、够用”为尺度。

3) 以基于工作过程的行动导向为原则，通过各种典型的工程案例，用任务驱动的模式导出各章的内容。

4) 为了引导学生不断探索和进取，在本书的每一章中均安排了“分析与探究”和“知识拓展”等内容，以启发学生的思维能力。

5) 本书内容涉及面较宽泛，但深浅较为适度，结构比较紧凑、合理有序。书中内容全部采用新版国家标准，使用规定的专业术语和技术符号。

北京农业职业学院汪金营、诸刚担任本书主编，负责本书的整体构思和全面统筹。参加编写的有，北京农业职业学院汪金营（绪论、第七章、第八章）、诸刚（第一章、第二章）、胡瑶玫（第十一章、第十二章）、蔡萍（第九章）、杨学坤（第五章、第六章）、郭辉（第三章、第四章），北京劳动保障职业学院赵海静（第十章、第十三章）。全书由北京电子科技职业学院李默生担任主审。教材在编写过程中，还得到了其他一些院校及老师的支持与帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，错误与不足之处在所难免，恳请相关人士及读者赐教。

编 者

目 录

前言	
绪论	1

第一部分 工程力学基础

第一章 构件的受力分析与计算	3
第一节 静力学基本知识	5
第二节 力在直角坐标轴上的投影、 力对点之矩、力偶	11
第三节 平面力系平衡方程及其应用	14
第四节 空间力系简介	18
阅读与思考	22
知识归纳	24
项目检查与评估	25
第二章 构件的承载能力分析	29
第一节 承载能力分析的基本知识	31
第二节 轴向拉伸和压缩	33
第三节 剪切和挤压	39
第四节 圆轴扭转	43
第五节 平面弯曲	48
第六节 组合变形	56
阅读与思考	60
知识归纳	62
项目检查与评估	63

第二部分 工程材料

第三章 常用金属材料及热处理 工艺的选用	67
第一节 金属材料的工程性能	68
第二节 常用金属材料的选用	71
第三节 钢的常用热处理	92
阅读与思考	93
知识归纳	95
项目检查与评估	97
第四章 其他工程材料简介	99
第一节 高分子材料	99
第二节 陶瓷材料	102
第三节 复合材料	103

阅读与思考	108
知识归纳	109
项目检查与评估	110

第三部分 工程机构

第五章 平面连杆机构	112
第一节 平面机构的运动简图和自 由度	113
第二节 平面连杆机构的组成、类 型及其应用	119
第三节 平面四杆机构的基本特性	123
阅读与思考	126
知识归纳	126
项目检查与评估	127
第六章 凸轮机构	130
第一节 凸轮机构的应用与分类	131
第二节 从动件的常用运动规律	133
第三节 图解法设计盘形凸轮的轮 廓曲线	135
第四节 凸轮机构设计中应注意的 问题	138
阅读与思考	140
知识归纳	141
项目检查与评估	142
第七章 间歇运动机构	144
第一节 棘轮机构	145
第二节 槽轮机构	147
第三节 不完全齿轮机构	148
阅读与思考	149
知识归纳	150
项目检查与评估	150

第四部分 机械传动

第八章 带传动与链传动	151
第一节 带传动的工作原理、类型、 特点及应用	152
第二节 V带的结构、标准及带轮的	

结构和材料	155	计准则	218
第三节 带传动的工作情况分析	160	第九节 圆柱齿轮传动强度计算	222
第四节 普通 V 带传动的设计计算	164	第十节 齿轮结构及齿轮传动的 润滑和效率	227
第五节 V 带传动的张紧装置及安装 和维护	170	第十一节 轮系	232
第六节 链传动的组成、类型和特点	172	阅读与思考	239
第七节 滚子链和链轮	173	知识归纳	240
第八节 链传动的使用维护	176	项目检查与评估	241
阅读与思考	177	第五部分 联接、轴系零件及其他	
知识归纳	181	第十一章 工程中的联接	245
项目检查与评估	182	第一节 键联接	246
第九章 蜗杆传动与螺旋传动	184	第二节 销联接	251
第一节 蜗杆传动的组成、特点 及分类	185	第三节 螺纹联接	252
第二节 普通圆柱蜗杆传动的主 要参数和几何尺寸计算	186	第四节 仪器仪表零件的联接	263
第三节 蜗杆传动的失效形式、 材料及结构	189	阅读与思考	266
第四节 蜗杆传动的效率、润滑 和热平衡计算	190	知识归纳	267
第五节 螺旋传动简介	192	项目检查与评估	268
阅读与思考	194	第十二章 轴与轴承	270
知识归纳	195	第一节 轴的分类、材料及热处理	270
项目检查与评估	195	第二节 轴的结构设计与强度计算	273
第十章 齿轮传动和轮系传动	197	第三节 滑动摩擦及其润滑	281
第一节 齿轮传动的特点和类型	198	第四节 滑动轴承	284
第二节 齿廓啮合基本定律与渐 开线齿廓	201	第五节 滚动轴承	289
第三节 渐开线标准直齿圆柱齿 轮的基本参数和几何尺寸	202	第六节 滚动轴承的代号及类型 选择	293
第四节 渐开线直齿圆柱齿轮的 啮合传动	205	第七节 滚动轴承的组合设计	296
第五节 渐开线齿轮的切齿原理 与根切现象	208	阅读与思考	301
第六节 标准斜齿圆柱齿轮传动	211	知识归纳	301
第七节 标准直齿锥齿轮传动简介	215	项目检查与评估	302
第八节 轮齿常用材料、失效形 式与直齿圆柱齿轮的设		第十三章 联轴器与离合器	305
		第一节 联轴器	305
		第二节 离合器	309
		阅读与思考	311
		知识归纳	312
		项目检查与评估	312
		参考文献	313

绪 论

一、机械设计课程的地位和作用

用机械进行生产是现代生产的主要方式。物质资料的生产,是人类赖以生存和发展的基础。为了减轻劳动强度,提高生产效率,人们创造了各种各样的机械设备。机械工业在整个国民经济中有着举足轻重的地位。现代化的机器生产,是生产力高度发展的重要标志。

人类通过长期的生产实践,发明和制造了各种机器。机器的类型很多,用途也各不相同,但它们具有以下共同特征:

- 1) 它们都是人为的各个物体的组合。
- 2) 各个物体之间具有确定的相对运动。
- 3) 它们都能代替或减轻人类的劳动,去完成相应的工作。

通过分析可知,任何一台完整的机器通常都是由原动机、工作部分、传动部分和控制部分所组成。

(1) 原动机 原动机是整个机器的动力部分,如电动机。除最常用的电动机外,还有内燃机和蒸汽机等。原动机的作用是把其他形式的能转变为机械能,以驱动机器运动和做功。

(2) 工作部分 工作部分是直接完成工艺动作的部分。通常,工作部分随机器功能要求的不同而不同。

(3) 传动部分 传动部分是将原动机的运动和动力传递给工作部分的中间环节。常见的机械传动有带传动、链传动、齿轮传动及蜗杆传动等,常用的机构、支承及联接件是满足这些传动的基本单元。

(4) 控制部分 控制部分是控制机械各组成部分运动的装置,使操作者能随时实现或终止机械的各种预定功能。常见的控制方法有机械控制、电子控制、电气控制、光波控制及液压控制。

机械设计基础教学是高等职业教育的技术基础课程,主要研究机器的工作部分和传动部分。

二、机械设计基础课程研究的内容和学习目的

由于机械设计基础课程主要研究机器的工作部分和传动部分,故本书大致分为以下几个部分。

(1) 工程力学基础部分 掌握物体的受力分析与平衡条件,了解杆件基本变形形式和应力分析的基本概念和方法。

(2) 工程材料部分 了解机械常用工程材料和热处理的基本知识,并能够根据工程实际选择典型的工程材料。

(3) 工程机构部分 掌握机械传动中常用机构的类型、工作原理、特点、应用和简单计算,并具有选用典型机构的能力。

(4) 机械传动部分 掌握机械传动中主要零部件的类型、工作原理、特点和应用,并

具有运用和分析简单传动装置的能力。

(5) 联接、轴系零件及其他 了解工程中的联接,轴与轴承,联轴器与离合器等,并具有选用的能力。

“机械设计基础”是关于机械设计和部分机械制造的一门综合性课程,涉及的知识很广,应用和实践性极强。重要的是,如何将诸多知识综合运用,提高分析问题、解决问题的能力。学习时要勤于观察各种机械和零件,结合课程内容多思考,主动地理论联系实际,增加感性认识,以帮助本课程的学习。

三、机械设计基础课程的学习方法

由于机械设计基础课程所具有的特点,我们在学习时首先要认真理解机械设计的基本概念、基本定理和基本方法,并通过案例予以巩固。同时,要掌握分析问题和解决问题的方法,提高相应的运算能力。其次,在学习机械设计基础课程时,还要注意复习一些先修课程的相关内容,在学习后面知识的同时,注意已学知识的运用,做到所学知识的融会贯通。最后,还要对所学习的内容进行阶段性总结,使学习的过程变成复习、归纳、提高的过程。

此外,由于本课程是理论与实践结合紧密的课程,因此,在学习时,要非常重视实践技能训练这一环节,要认真对待本书每章后的【工程训练】,通过实践巩固理论知识。

第一部分 工程力学基础

工程力学是为机械设计提供理论的基础和依据，它分为两大部分，即理论力学和材料力学。理论力学的主要内容有静力学、运动学和动力学（本教材只研究静力学部分）；材料力学则主要讨论物体在几种基本变形（拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转、平面弯曲及组合变形）下的强度、刚度和稳定性问题（本教材未涉及稳定性问题）。

任何科学研究的过程，都是认识事物客观规律的过程。而认识事物的客观规律必须基于对事物的观察和试验，然后忽略一些次要的因素，进行合理地简化而抽象成为“力学模型”，再通过一定的逻辑推理和数学演绎，建立起相应的理论体系。工程力学的研究，就是基于这种思路发展起来并形成一套完善的体系。

第一章 构件的受力分析与计算

【工程实例】

实例一 夹紧力作用点的选择。如图 1-1 所示，在加工工件顶面时，由于夹紧力方向无法垂直压下，只能从侧面夹紧工件。图 1-1a 所示夹紧力 F_1 作用于 A 点（低于水平定位销 1 的轴线），则工件不会移动或翻转；图 1-1b 所示夹紧力 F_2 作用于 B 点（高于水平定位销 1 的轴线），工件将产生翻转。此例说明，作用力方向和作用点的确定在工程中具有重要的意义。

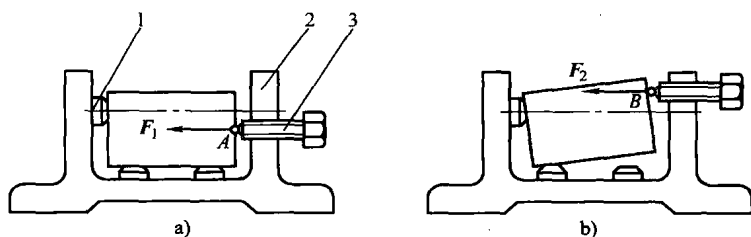


图 1-1 夹紧力作用点的选择

a) 正确 b) 错误

1—定位销 2—夹具体 3—紧固螺钉

实例二 退轴承时力的作用。在机修工作中，要想在一侧为固定端（不通）的装置中退出轴承是一件比较困难的事。若采用图 1-2 所示的装置，将能取得较好的效果。退出轴承的方法是：首先将张紧圈 1 套在吊杆 7 上放入轴承孔内，并注意要超出轴承内侧端

面, 旋转螺母 5, 使吊杆 7 对张紧圈 1 移动, 使张紧圈膨胀并张紧轴承; 然后用两块等高块 4、9 垫在工件 3 上, 支撑住压块 8, 用扳手固定住吊杆 7, 旋转螺母 6, 就能顺利地退出轴承。此例说明, 作用力方向和作用点, 特别是力的作用点的选择是退出轴承的关键因素。

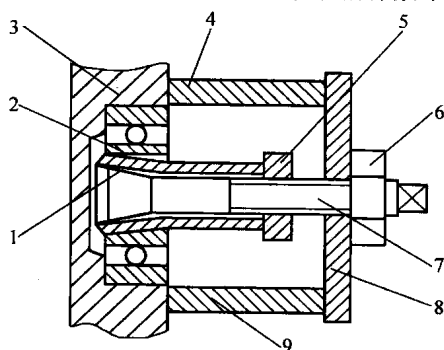


图 1-2 退出轴承时力的作用点和方向的选择

1—张紧圈 2—轴承 3—工件

4、9—等高块 5、6—螺母 7—吊杆 8—压块

实例三 车刀对中心。车刀对中心的方法如图 1-3 所示。把一块薄扁料置于棒料工件和刀尖之间, 向前摇动中滑板, 利用刀尖将扁料轻轻地顶在圆棒料上。观察薄扁料的倾斜方向, 若扁料位于图 1-3a 所示铅锤位置, 则说明刀尖与圆棒料中心等高, 即为刀尖的正确位置。若扁料位于图 1-3b 所示左

倾斜位置, 说明刀尖在工件的下方; 若扁料位于图 1-3c 所示右倾斜位置, 说明刀尖在工件的上方; 这两种位置都是错误的。该方法运用了后述的二力平衡公理。

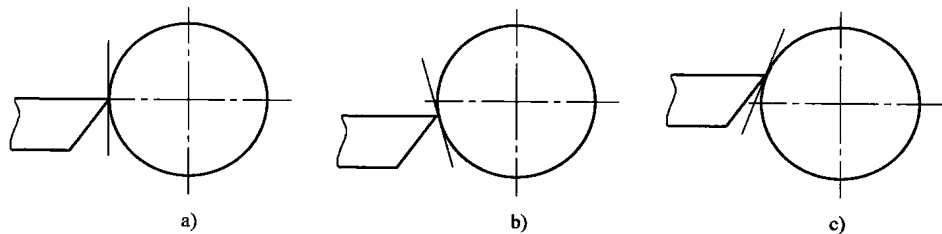


图 1-3 车刀对中心的方法

a) 位置正确 b) 刀尖在工件的下方 c) 刀尖在工件的上方

【学习目标】

1. 掌握静力学的基本知识, 并能熟练地应用静力学的四个基本公理; 掌握工程中常见的约束类型, 熟练绘制物体及典型机构的受力图。
2. 掌握力系计算的基础知识, 即力的投影、力对点之矩、力偶的计算方法。
3. 理解平面力系的平衡方程, 掌握其在工程中的应用; 了解平面力系特殊情况的平衡方程及其应用。
4. 了解空间力系的概念, 掌握轮轴类零件平衡问题的平面解法。

【重点与难点】

1. 静力学公理、推论及应用。
2. 工程中常见约束类型的约束反力的画法。
3. 物体系统及分离体的受力分析及受力图的绘制。
4. 力在直角坐标轴上的投影、力对点之矩的概念及计算、力偶的概念及计算。
5. 平面力系平衡方程及应用。

6. 空间力系中轮轴类零件平衡问题的平面解法。

任何机器和机构都是由构件和零部件组成的, 这些零部件的受力分析与计算对其的选型和使用寿命起着关键的作用。因此, 可以认为, 在机械工程及其他相关工程中, 都要对构件和零部件进行受力分析与计算, 如各种机床、起重机械以及土木工程等。本章主要研究对构件和零部件的受力分析、及其在平衡状态下力的分析与计算等知识。

第一节 静力学基本知识

一、力

人们在长期的生活和生产实践中, 逐步形成的对力的感性认识, 这种感性认识再上升到理性, 就建立起了抽象的力的概念。例如, 抬物体时, 物体压在肩上, 由于肌肉紧张而感受到力的作用; 用手推小车, 小车就由静止开始运动; 受地球引力作用自高空落下的物体, 速度越来越大; 落锤锻压工件时, 工件就产生变形等等。所谓力就是物体间的相互作用, 作用效应使物体的运动状态和形状发生改变, 前者称为力的外效应, 后者称为力的内效应。静力学部分仅研究力的外效应。

实践证明, 力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点 (力的三要素)。

在法定计量单位制中, 力的单位名称是牛 [顿] (单位符号为 N), 常用单位名称还有千牛 [顿] (单位符号为 kN) 等。

力是矢量, 常用有向线段表示, 如图 1-4 所示。线段的长度表示力的大小 (按一定的比例), 线段的方位和箭头指向表示力的方向, 线段的起点或终点表示力的作用点。通常用黑斜体字母表示力矢量 (手写在字母上加箭头或短横线), 而与之对应的普通体字母表示力的大小。

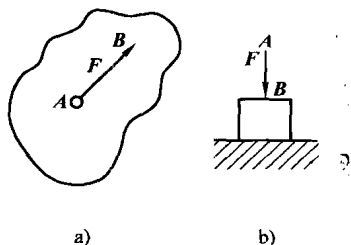


图 1-4 力的表示方法

a) 作用于 A 点的力 b) 作用于 B 点的力

力又分为集中力、均布力 (其中均布力为本章的研究问题) 和力系等几种形式。

二、刚体

工程中, 在对实际物体的受力进行研究时, 首先要把它理想化, 即将其合理地抽象为力学模型, 以便进行数学描述。静力学中对物体进行分析所用的力学模型就是刚体。

刚体是指在外力作用下, 其几何尺寸和形状都不会发生变化的物体。事实上, 任何物体在外力作用下都会发生或多或少、或大或小的变形, 但在讨论物体受力分析及平衡问题时, 这些变形是次要的, 可以忽略不计, 而将物体看成是刚体。刚体在现实中是不存在的, 是理想化的模型。在静力学中所研究的物体只限于刚体。在研究构件的变形时, 就不能再把物体看成是刚体了, 而要看成是变形体。

三、平衡

所谓平衡, 就是指物体在力或力系的作用下相对于惯性参考系保持静止或匀速直线运动的状态。在一般工程技术问题中, 把固连于地球上的参考系视为惯性参考系, 即物体的平衡是相对于地球而言的。例如, 静止在地面上的机械设备、厂房、以及作匀速运动的车辆等。平衡是物体机械运动的一种特殊形式, 作用在物体上的力系, 只有满足一定的条件时, 才会

使物体处于平衡。满足平衡条件的力系成为平衡力系。力系的平衡条件在工程中有着重要的意义，它是对机械结构或零部件进行静力分析计算时的基础。

四、静力学公理

公理是人类在长期生产实践中所积累的经验，并经过抽象和归纳而形成的客观规律。静力学公理是关于力的基本性质的概括与总结，是静力学以及力学的理论基础。

公理一 二力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力使刚体平衡的必要和充分条件是：两个力大小相等、方向相反且作用于同一直线上。

该公理是关于平衡的最简单和最基本的性质，是各种力系平衡的理论依据。

凡是只在两个点受力，且不计自重的平衡物体称为二力构件或二力杆。由二力平衡公理可知，无论二力杆是直的还是弯的，其受力方向必沿着两受力点的连线且等值反向。如图 1-5 所示的 AB 杆就是二力构件（二力杆）。

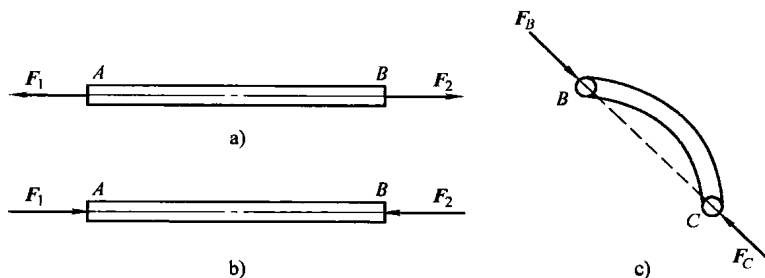


图 1-5 二力构件

a) 受拉直杆的二力构件 b) 受压直杆的二力构件 c) 曲杆的二力构件

公理二 加减平衡力系公理

作用在刚体上的已知力系中，加上或减去任意一个平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用效应。

推论 1 力的可传性原理

作用于刚体上的力，可沿其作用线移至刚体上的任一点，而不改变对刚体的效应。如图 1-6 所示小车的受力情况表示了力的可传性原理。

公理二及其推论 1 是力系等效变换的依据。由力的可传性原理可知，力的三要素对于刚体而言即为力的大小、方向和作用线。

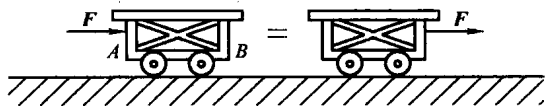


图 1-6 力的可传性原理

应该注意，力的可传性原理只适用于刚

体，而不适用于变形体，如图 1-7 所示。如图 1-7a 所示的变形杆 AB ，受到等值、共线、反向的拉力作用，杆被拉长。如果把这两个力沿作用线分别移动到杆的另一端，如图 1-7b 所示，此时杆就被压缩了。

公理三 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力的合力仍作用于该点，其大小和方向由这两个力为邻边的平行四边形的对角线来表示，即为力的平行四边形法则如图 1-8 所示。

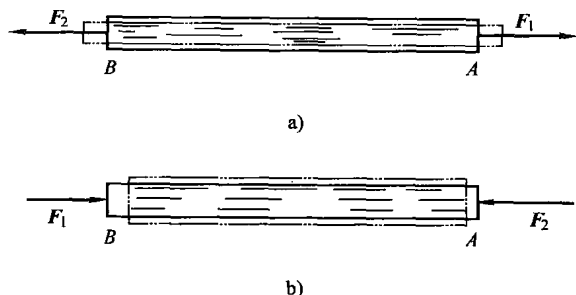


图 1-7 力的不可传递
a) 拉力作用 b) 压力作用

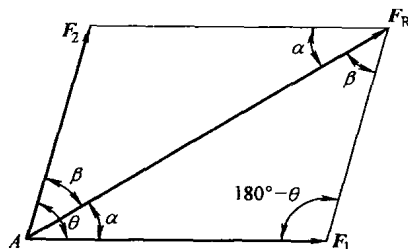


图 1-8 力的平行四边形法则

这种合成力的方法，称为矢量加法，合力称为这两个力的矢量和（或几何和）。可用公式表示为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

公理三说明了力的可加性，它是力系简化的依据。平行四边形法则又称为矢量加法，不仅适用于力的合成，对所有矢量（如速度等）的合成均适用。

F_R 的大小可以由余弦定理计算， F_R 的方向可以用它与 F_1 （或 F_2 ）之间的夹角 α （或 β ）表示。

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\theta(180^\circ - \theta)}$$

$$\tan\alpha = \frac{F_2\sin\theta}{F_1 + F_2\cos\theta}$$

推论 2 三力平衡汇交定理

刚体受三个共面但不平行的力作用而处于平衡时，三个力的作用线必然汇交于一点。

公理四 作用与反作用公理

两物体间的相互作用力总是大小相等、方向相反、沿同一直线且分别作用在两个物体上。

公理四说明，力总是成对出现的，有作用力就必有反作用力，二者同时存在又同时消失。作用力和反作用力分别作用在两个物体上，与二力平衡有本质的区别。

五、约束与约束反力

1. 约束和约束反力的概念

能在空间作任意位移的物体称为自由体，例如人造卫星、炮弹等。位移受到某些限制的物体称为非自由体，例如悬挂的物体、机场跑道上的飞机、电动机的转轴等。

在工程实际中，每个构件都以一定的形式与周围物体相互连接，因而其运动受到一定的限制。凡是对构件运动起限制作用的物体称为该构件的约束。

约束限制被约束物体运动的原因是因为约束对被约束物体有力的作用，称为约束力或约束反力。物体的受力分为两类，一类是使物体产生运动或运动趋势的力，称为主动力，如重

力、电磁力、水和风的压力等；另一类是限制物体运动的力，称为约束反力。

约束反力的作用点在被约束物体与约束的接触点处，其方向与其所限制的物体运动方向或运动趋势相反，这是分析约束反力的基本原则。

2. 工程中常见的约束类型

(1) 柔性体约束 由绳索、带和链条等各种柔性物体所形成的约束，称为柔性体约束。

柔性体约束的特点是只能受拉不能受压，只能限制物体沿柔性物体中心线背离柔性物体的运动，不能限制物体沿其他方向的运动；约束反力通过接触点沿柔性物体的中心线背离被约束物体，即物体受拉力，常用字母 F_T 表示。如图 1-9 所示，起吊重物时，绳索（钢丝绳、链条等）对重物的约束，带传动装置中带对带轮的约束均是柔性体约束。

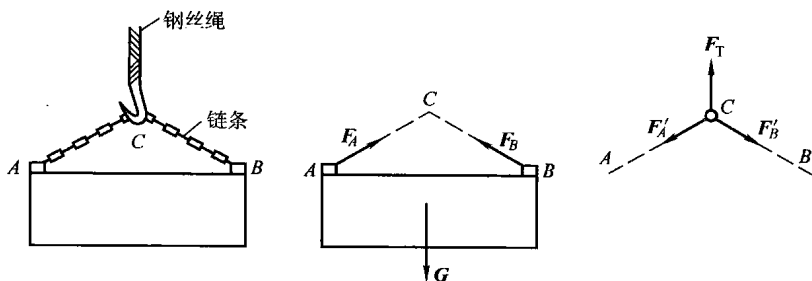


图 1-9 柔性体约束

(2) 光滑面约束 由光滑面形成的约束称光滑面约束。

光滑面约束的特点是只能受压不能受拉，只能限制物体沿接触面公法线指向支承面的运动，即只限制靠近不限制背离，只限制法向不限制切向。光滑面约束反力通过接触点沿接触面的公法线指向被约束物体，即物体受压力，常用字母 F_N 表示，如图 1-10 所示。

(3) 光滑的圆柱铰链约束 圆柱铰链约束是用圆柱销钉将两个构件联接在一起的约束，若不计接触处的摩擦，则称为光滑圆柱铰链约束，简称铰链约束。由于其实质是光滑面约束，约束反力一定通过接触点的公法线方向，即通过销钉的中心。

铰链约束只能限制物体间的相对移动，不能限制其相对转动，具体形式有以下几种。

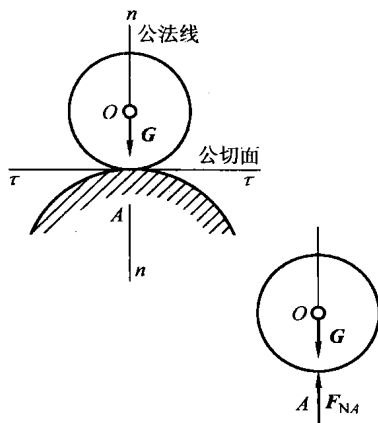


图 1-10 光滑面约束

1) 固定铰支座约束。若相连的两个构件有一个固定在地面或机架上，则称为固定铰支座约束或固定铰链约束，如图 1-11 所示，其简图如图 1-11f 所示。约束反力通过接触点并通过销钉的中心，由于接触点的位置不能确定，所以，约束反力的方向也不能确定，通常用两个正交分力 F_x 、 F_y 来表示，如图 1-11e 所示。

2) 中间铰支座。若相联的两个构件均无固定，则称为中间铰链连接，简称中间铰支座，如图 1-12 所示。与固定铰支座相同，其约束反力通常也用两个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示，如图 1-12c 所示。

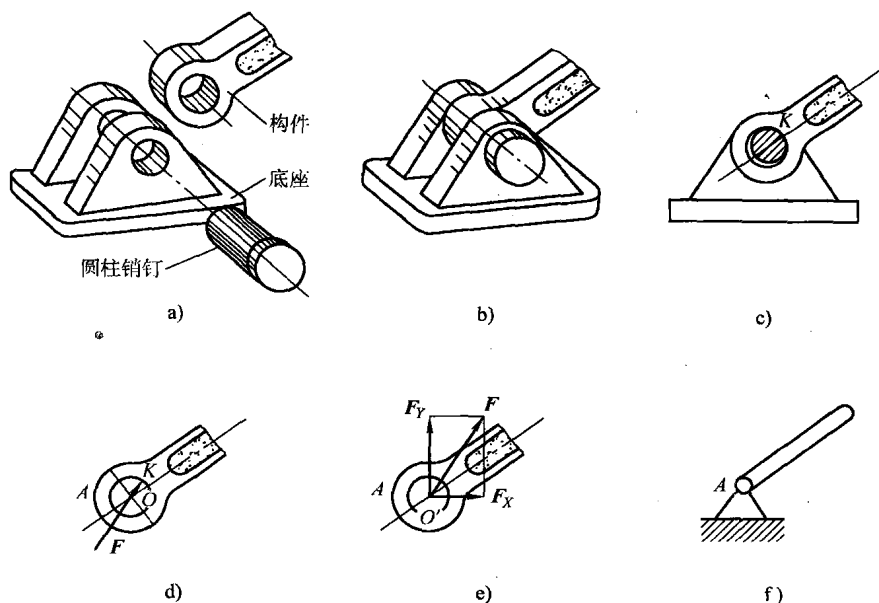


图 1-11 固定铰支座约束

- a) 固定铰支座的各个零件 b) 固定铰支座的实物 c) 固定铰支座的平面图形
d) 固定铰支座的受力分析 e) 固定铰支座约束反力的画法 f) 固定铰支座的简图

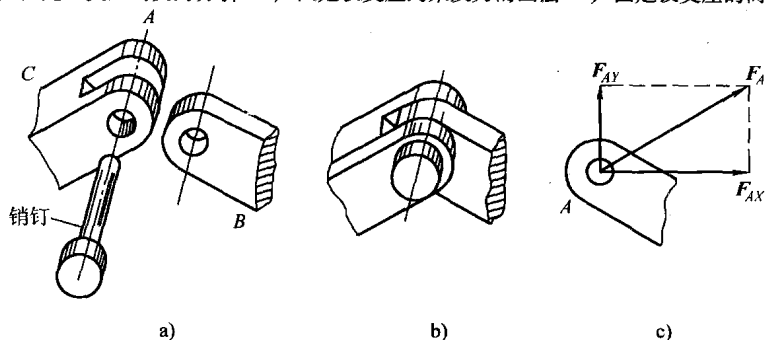


图 1-12 中间铰支座

- a) 中间铰支座的各个零件 b) 中间铰支座的实物 c) 中间铰支座的受力分析

3) 活动铰支座。若在固定铰支座的下面放置一排辊轴，支座可以沿支承面移动，则称为活动铰支座，如图 1-13 所示，其简图如图 1-13b 所示。活动铰支座只能限制物体沿垂直于支承面方向的运动，不能限制物体沿支承面的运动和绕销钉的转动，约束反力通过铰支座中心并垂直于支承面（既可压物体，也可拉物体），如图 1-13b 所示。

六、物体的受力分析和受力图

在工程实际中，为了确定未知的约束反力，需要根据已知的主动力，应用主动力和约束反力之间的平衡条件进行求解。为此，首先

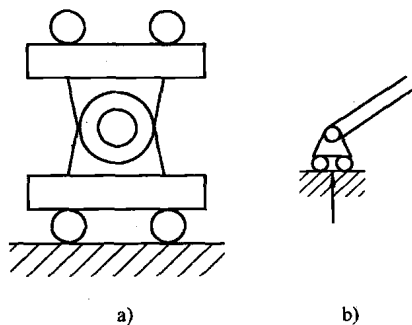


图 1-13 活动铰支座

- a) 活动铰支座的实物 b) 活动铰支座约束反力

要对物体进行受力分析。受力分析是指研究某个物体受到的力,并分析这些力对物体的作用情况,即指出各个力的作用位置、大小和方向。为了清晰地表示物体的受力情况,常需要将研究的物体从周围物体中取出来,然后把其他物体对研究对象的全部力用简图形式画出来。将物体所受的全部主动力和约束反力都表示出来的图形称为受力图。受力图揭示了研究对象与周围物体间相互作用的关系,正确地画出受力图,是分析和计算力学问题的前提。

1. 绘制受力图的基本步骤

- 1) 明确研究对象,画出研究对象的分离体简图。
- 2) 在分离体简图上画出全部主动力(如重力、推力等)。
- 3) 在分离体解除约束处,画出相应的约束反力。

例 1-1 高炉上料车受力示意图如图 1-14a 所示,由绞车通过钢丝绳牵引在倾角为 α 的斜桥钢轨上运动。已知上料车连同载荷共重 G ,画出料车的受力图。

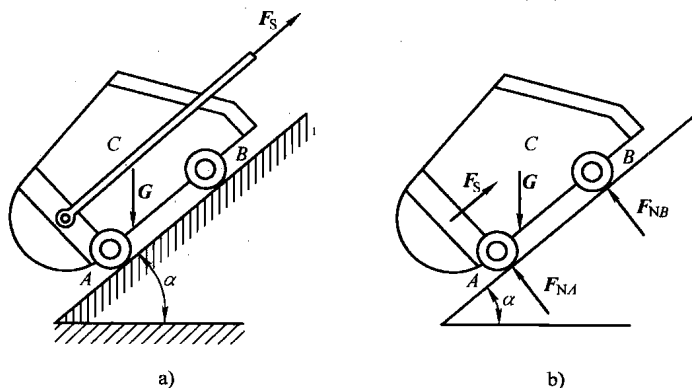


图 1-14 高炉上料车的受力分析

a) 上料车受力示意图 b) 上料车的受力图

解 (1) 以上料车整体为研究对象 解除斜面和钢丝绳对上料车的约束,画出分离体的简图。

(2) 画出主动力 上料车受重力 G ,方向铅垂向下,作用点在 C 处;牵引力 F_s ,方向沿斜面向上,作用线过 C 点。

(3) 画出全部的约束反力 上料车受到的约束有钢轨对其的光滑面约束,约束反力为 F_{NA} 与 F_{NB} ,上料车的受力图如图 1-14b 所示。

例 1-2 杆件的受力分析如图 1-15 所示,水平杆 AD 与墙面铰接,中间由曲杆 BC 支撑, F 作用在 AD 上为已知力。各杆的自重不计,试绘出杆 AD 与 BC 的受力图。

分析 在此系统中,杆 AD 有三点受力,杆 BC 为两点受力,且彼此之间有相互作用力。曲杆 BC 是二力构件,在 B 、 C 端受一对大小相等、方向相反,沿 BC 连线的力的作用,由作用力与反作用力公理可知杆 AD 在 C 处的受力方向。据此,我们在分析物系中各物体的受力情况时,应先分析系统中的二力构件的受力情况。

解 (1) 曲杆 BC 以曲杆 BC 为研究对象,画出分离体简图。其约束反力为沿 BC 杆连线的压力 F_B 与 F_C ,如图 1-15b 所示。

(2) 杆 AD 再以杆 AD 为研究对象,画出分离体简图。 AD 杆上有作用于 D 点的主动力

F ; 在 C 点受到曲杆 BC 的作用力 F'_C , $F'_C = F_C$, F'_C 且与 F_C 反向; A 端为固定铰链支座, 约束反力用 F_{Ax} 、 F_{Ay} 表示, 受力图如图 1-15c 所示。

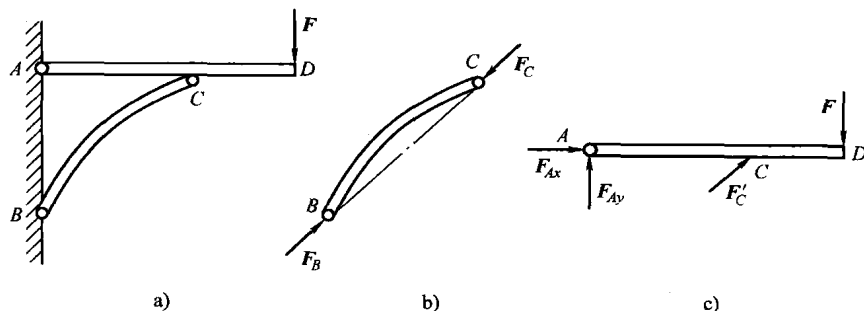


图 1-15 杆件的受力分析

a) 整体构架 b) BC 杆的受力图 c) AD 杆的受力图

2. 画受力图的注意事项

- 1) 明确研究对象。正确地选取研究对象, 解除与之有联系的所有约束, 画出分离体简图。分离体的形状、方位必须与原物体保持一致。
- 2) 在分离体上画出受到的所有主动力和约束反力。与研究对象不相关的主动力和约束反力都不能画出来。
- 3) 要根据约束的类型, 画出相应的约束反力。
- 4) 在分析物体系统受力时, 先找出二力构件, 这样有助于一些未知力方位的判断。
- 5) 画物体中某个物体受力时, 必须注意到作用力与反作用力的关系, 作用力的方向一经确定, 反作用力的方向必须与它相反。
- 6) 在以物系为研究对象时, 系统内各物体间的相互作用力不再出现。

第二节 力在直角坐标轴上的投影、力对点之矩、力偶

在工程实际中, 作用于物体上的力系是较为复杂的。研究物体的平衡问题, 就必须在保证作用效应完全相同的前提下, 将复杂的力系简化为简单力系。本节主要解决这些问题。

一、力的投影概念及求法

1. 力在平面直角坐标轴上的投影

力在坐标轴上的投影如图 1-16 所示。已知力 F 在平面直角坐标轴 x 、 y 正向的夹角为 α 、 β , 于是力 F 在轴 x 、 y 上的投影可以表示为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= F \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

即力在某轴上的投影等于力的大小乘以力与投影轴正向夹角的余弦。可以看出, 力与投影轴正向间的夹角为锐角时, 其投影为正; 力与投影轴正向间的夹角为钝角时, 其投影为负。这就表明了力在坐标轴上的投影为

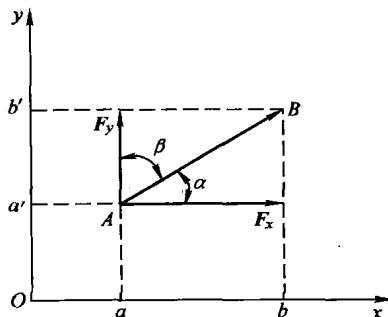


图 1-16 力在坐标轴上的投影

代数量。

2. 力在直角坐标轴上投影的符号

力在坐标轴上的投影是代数量，正负规定如下：若从力的始端对应的垂足到末端对应的垂足的趋势（指向）与坐标轴的正向一致，则力在坐标轴上的投影为正，反之为负。图 1-16 所示的 F_x 取正值， F_y 取正值。

若力 F 的大小为 F ，与 x 和 y 轴的夹角分别为 α 、 β ，则 F 在 x 、 y 轴上的投影分别为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \pm F \cos \alpha = \pm F \sin \beta \\ F_y &= \pm F \sin \alpha = \pm F \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表明，力在坐标轴上投影的大小等于力的大小与力与该轴所夹锐角的余弦的乘积。

若已知力 F 在坐标轴上的投影 F_x 和 F_y ，也可以求出力 F 的大小和方向。

$$\left. \begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \cos \alpha &= \frac{F_x}{F}, \quad \cos \beta = \frac{F_y}{F} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

3. 合力投影定理

若由 n 个力 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 组成的平面汇交力系作用在刚体上，其合力为 F_R ，可以证明为

$$\left. \begin{aligned} \text{若} \quad F_R &= F_1 + F_2 + \dots + F_n \\ \text{则} \quad F_{Rx} &= F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} = \sum F_x \\ F_{Ry} &= F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} = \sum F_y \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 说明，合力在任意轴上的投影等于各分力在同一轴上投影的代数和，这就是合力投影定理。

二、力对点之矩

1. 力对点之矩的概念

在生产劳动中，人们通过杠杆、绞盘等简单机械来移动重物时，就能体会到力对物体存在的转动效应。如图 1-17 所示，用扳手拧紧螺母时，力 F 使螺母绕 O 点转动的效应不仅与力 F 的大小有关，而且还与转动中心 O 到 F 的作用线的距离 d 有关。

大量实践表明，转动效应随 F 或 d 的增加而增强，可用 F 与 d 的乘积来度量。另外转动方向不同，效应也不同。为了表示不同的转动方向，还应在乘积前加上适当的正负号。

在力学中，为度量力使物体绕某点（矩心 O ）的转动效应，将力的大小（ F ）与矩心到力的作用线的距离（力臂 d ）的乘积 Fd 冠以适当的正负号，所得的物理量称为力 F 对 O 点之矩，简称力矩，记做 $m_o(F)$

$$m_o(F) = \pm Fd \quad (1-6)$$

力对点之矩是一个代数量，其正负号的规定为：力使物体绕矩心逆时针转动时，取正

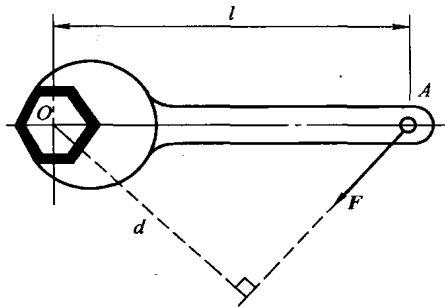


图 1-17 扳手拧紧螺母