



普通高等教育“十三五”创新型规划教材
理论+实践+数字资源一体化规划教材

紧扣教学大纲，突出重点
强化应用能力，迁移拓展
支持教学做考，立体资源



工程力学

主审 张明柱

主编 赵卫兵 刘玲 王霞

GONGCHENG LIXUE

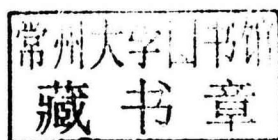


电子科技大学出版社

普通高等教育“十三五”创新型规划教材
理论+实践+数字资源一体化规划教材

工 程 力 学

赵卫兵 刘玲 王霞 主编



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 赵卫兵, 刘玲, 王霞主编. — 成都 :
电子科技大学出版社, 2016.4
ISBN 978-7-5647-3536-4

I. ①工… II. ①赵… ②刘… ③王… III. ①工程力
学—高等学校—教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 072150 号

内 容 简 介

本教材重点介绍构件在平衡状态下的受力分析及受力关系、工程构件在力作用下的基本变形形式及安全设计要求,力求重点突出、层次分明,重视与工程实际的结合,并且注重力学相关术语的介绍。内容上可分两大部分,第1章至第4章是静力学部分,主要介绍构件受力分析及平衡时力之间的关系;第5章以后章节是材料力学部分,主要介绍构件安全设计要求及安全设计方法。

本教材适用于高等院校机械类、近机械类各专业的学生使用,也可供有关工程技术人员参考。

工程力学

主 编 赵卫兵 刘 玲 王 霞

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编:610051)

策划编辑: 杜 倩

责任编辑: 李 鸿

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 天津市蓟县宏图印务有限公司

成品尺寸: 203mm×260mm 印张 20 字数 千字

版 次: 2016 年 5 月第 1 版

印 次: 2016 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3536-4

定 价: 39.80 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话:028-83202463;本社邮购电话:028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

前言 PREFACE

本教材是在电子科技大学出版社组织的普通高等教育“十三五”创新型规划教材编写会议精神的指导下,为适应应用型本科的“产学研、校企合作”的要求,着力贯彻以“强应用”为目的、以“必需、够用”为度的编写特色的基础上编写而成的。本教材在编写过程中既注意学习、吸收有关院校近期力学教学内容改革的成果,又尽量反映编者长期从事教学所积累的经验 and 体会,更加注重与工程实践相结合。

本教材的主要特色是在更加注重联系工程实际的同时,每章前加入了学习要点,使学生在预习时清楚本章的重点、难点;加入了知识框架图,清楚地介绍了每章各重要知识点的内容及其之间的关系;每章以实例引导为切入点,引入工程实践中出现的问题,通过知识点的学习解决工程实际问题;并在每章课后以简洁的语言进行了总结。

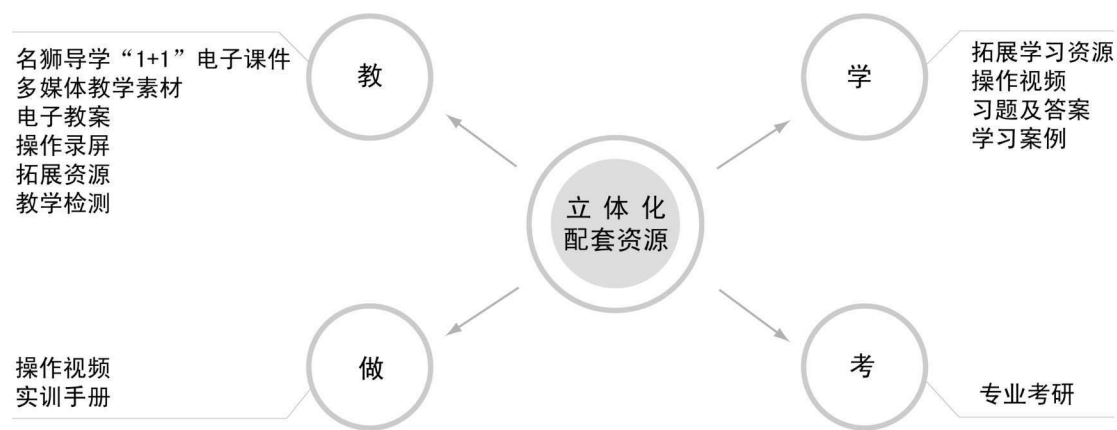
本教材重点介绍构件在平衡状态下的受力分析及受力关系、工程构件在力作用下的基本变形形式及安全性设计要求,力求重点突出、层次分明,重视与工程实际的结合,并且注重力学相关术语的介绍。内容上可分两大部分,第1章至第4章是静力学部分,主要介绍构件受力分析及平衡时力之间的关系;第5章以后章节是材料力学部分,主要介绍构件在满足强度、刚度、稳定性的要求下,以最经济的成本,确定合理的形状和尺寸,选择适宜的材料,提供必要的理论基础和计算方法。

本教材适用于高等院校机械类、近机械类各专业的学生使用,也可供有关工程技术人员参考。

本教材由安阳工学院来彦玲(第1、2章)、侯晓兵(第3、4章,附录)、李军民(第5、6、7章)、刘玲(第8、9、10章)、王霞(第11、12、13章)、赵卫兵(第14章)编

写,由赵卫兵、刘玲、王霞担任主编,李军民、侯晓兵、来彦玲担任副主编。

丛书立体化配套资源



由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

目录 CONTENTS

第 1 篇 静力学

第 1 章 静力学基础和物体的受力分析	2
1.1 静力学基本概念	3
1.2 静力学公理	6
1.3 约束和约束力	8
1.4 物体的受力分析与受力图	12
第 2 章 平面力系	18
2.1 平面汇交力系	19
2.2 平面力偶系	23
2.3 平面一般力系	26
2.4 平面平行力系	32
2.5 简单刚体系统的平衡问题	33
第 3 章 空间力系	41
3.1 空间汇交力系	42
3.2 力对点之矩和力对轴之矩	45
3.3 空间力偶	48
3.4 空间任意力系向一点简化	51

3.5	空间任意力系的平衡	53
3.6	重心	56
第 4 章	摩擦	65
4.1	滑动摩擦	66
4.2	考虑滑动摩擦时的平衡问题	68
4.3	滚动摩阻	71
 第 2 篇 材料力学 		
第 5 章	材料力学的基本概念	76
5.1	材料力学的任务与研究对象	77
5.2	材料力学的基本假设	78
5.3	外力与内力	79
5.4	应力与应变	81
5.5	杆件变形的基本形式	83
第 6 章	拉伸、压缩与剪切	87
6.1	轴力与轴力图	88
6.2	拉压杆的应力与圣维南原理	91
6.3	材料拉伸时的力学性能	94
6.4	材料压缩时的力学性能	98
6.5	轴向拉压杆的强度计算	99
6.6	轴向拉伸或压缩时的变形	103
6.7	拉伸、压缩超静定问题	106
6.8	应力集中	107
6.9	剪切与挤压的实用计算	108
第 7 章	扭转	119
7.1	概述	120
7.2	外力偶矩的计算、扭矩及扭矩图	121
7.3	纯剪切	123
7.4	圆轴扭转时的应力及强度计算	125

7.5 圆轴扭转时的变形与刚度计算	130
第 8 章 弯曲内力	137
8.1 弯曲的概念	138
8.2 受弯杆件的简化	139
8.3 弯曲内力	140
8.4 剪力、弯矩与载荷集度的微分关系	147
8.5 平面刚架和曲杆的内力	151
第 9 章 弯曲强度	158
9.1 与应力分析相关的截面图形的几何量	159
9.2 纯弯曲时梁横截面上的正应力分析	168
9.3 弯曲切应力	175
9.4 梁弯曲时的强度计算	180
9.5 提高梁弯曲强度的措施	185
9.6 非对称弯曲与弯曲中心的概念	187
第 10 章 弯曲刚度	194
10.1 梁弯曲变形与位移的基本概念	195
10.2 积分法求梁的变形	197
10.3 叠加法求梁的变形	200
10.4 梁的弯曲刚度计算	204
10.5 简单超静定梁	206
10.6 提高弯曲刚度的途径	208
第 11 章 应力状态分析与强度理论	212
11.1 应力状态概述	213
11.2 平面应力状态分析——解析法	215
11.3 平面应力状态分析——图解法	220
11.4 三向应力状态分析简介	224
11.5 广义胡克定律	225
11.6 复杂应力状态的应变能密度	229
11.7 强度理论	230

第 12 章 组合变形	243
12.1 组合变形的概念	244
12.2 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	245
12.3 扭转与弯曲的组合变形	250
第 13 章 压杆稳定问题	261
13.1 压杆稳定的概念	262
13.2 细长压杆的临界载荷	264
13.3 欧拉公式的应用范围与临界应力总图	267
13.4 压杆的稳定性校核	271
13.5 提高压杆稳定性措施	273
第 14 章 动载荷与交变应力	280
14.1 概 述	281
14.2 构件做等加速直线运动时的动应力计算	282
14.3 旋转构件的受力分析与动应力计算	283
14.4 杆件受冲击时的应力与变形	285
14.5 交变应力与疲劳失效	290
14.6 影响疲劳极限的因素	294
14.7 对称循环下构件的疲劳强度计算	295
附录 型钢表	299
参考文献	312

第 1 篇 静力学

静力学研究物体的平衡问题,即研究物体在力系作用下的平衡规律。平衡是物体机械运动的一种特殊形式。一般工程问题中,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。例如,桥梁、各种机器以及做匀速直线运动的汽车等,都是处于平衡状态。

当物体处于平衡状态时,作用于物体上的力应满足一定的条件,这个条件称为力系的平衡条件。研究物体的平衡问题,就是研究物体在各种力系作用下的平衡条件,进而解决工程技术问题。静力学具体研究以下三个方面的问题。

1. 物体的受力分析

即分析物体的受力情况和方向。

2. 力系的简化

所谓力系,是指作用在物体上的一群力。用一个简单的力系等效地替换原来复杂的力系,这个过程称为力系的简化。一个物体常常受到较为复杂的力系作用,将力系简化以后,比较容易了解一个复杂力系对物体的总的作用效果。

3. 力系的平衡条件

不同类型的力系,其平衡条件也有所不同。归纳物体在各种力系作用下的平衡条件及平衡方程,求解静力平衡问题是静力学最主要的任务。

静力学是工程力学的基础部分,在工程实际中有着广泛的应用。例如,各种机器零部件和工程结构的设计都需要静力学的知识。此外,静力学所研究的内容对于研究物体的运动和变形都有着十分重要的意义,因而也是运动学、动力学和材料力学的理论基础。

第 1 章 静力学基础和物体的受力分析

【学习重点】

- 1.力、刚体、平衡、约束和约束力的概念；静力学公理及其应用。
- 2.工程上几种常见约束的特征及其约束力的画法。
- 3.受力分析和受力图(单个物体及物体系)。

【学习难点】

约束的概念及其特征；物体的受力分析及其受力图。



【实例引导】

如图 1-1 所示,中国传统屋顶采用大梁、檩条的结构结实稳固。为什么这种看似简单的结构可以牢固的支撑整个屋顶?大梁和檩条之间是如何连接的?相互之间作用力又是怎样的?

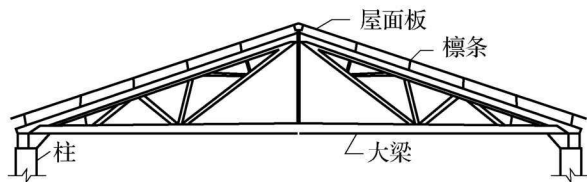


图 1-1 屋顶结构图

1.1 静力学基本概念

1.1.1 力

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或使物体变形。前者称为力对物体的运动效应(外效应),后者称为力对物体的变形效应(内效应)。理论力学研究的是运动效应,材料力学研究的是变形效应。

力对物体的作用效果取决于三个要素:力的大小、方向和作用点。人们通常用一个矢量来描述力的三要素,如图 1-2 所示,常用一个带箭头的线段表示力,线段长度 AB 按一定的比例表示力的大小,线段的方位和箭头表示力的方向,其始端或末端表示力的作用点。沿矢量线段 AB 所画出的直线称为力的作用线。文字符号用黑体字如 $\mathbf{F}$ 代表力矢量,用非黑体的同一字母如 F 表示力的大小。书写时可在表示力的字母上加一带箭头的横线,如 $\vec{F}$ 表示力矢量。

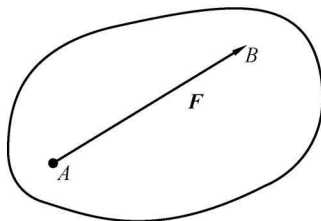


图 1-2 力矢量

在国际单位制中,力的单位用牛顿(N)或千牛顿(kN)表示,且 $1\text{ kN} = 1000\text{ N}$,工程中常用到千克力(kgf),其换算关系为 $1\text{ kgf} = 9.8\text{ N}$ 。

力的作用点是指力作用在物体上的位置。实际上,当两个物体相互作用时,多数情况下接触处并不是一个点,而是具有一定面积的一个面。如果力的作用面积相对于物体的几何尺寸很小,可以抽象为一个点,那么这种作用于一点的力称为集中力。如果力的作用面积比较大,不能忽略,则称为分布力。如果力均匀分布于作用区域称为均布力,否则称为非均布力。

如果力分布在某个面上,称为面分布力,如水箱壁受到的水压力、建筑物外墙受到的风压力等,它常用每单位面积上所受力的大小来度量,称为面分布力集度,国际单位是牛顿/米²(N/m^2);如果力分布在某个体积上,称为体分布力,如物体所受的重力,它常用每单位体积上所受力的大小来度量,称为体分布力集度,国际单位是牛顿/米³(N/m^3)。而当载荷分

布于狭长形状的体积或面积上时,则可忽略横向范围而简化为沿其长度方向中心线分布的线分布力,它常用单位长度上所受力的大小来度量,称为线分布力集度,用符号 q 表示,国际单位是牛顿/米(N/m)。

1.1.2 刚体

刚体是在力的作用下大小和形状都不改变的物体。自然界中任何物体受力后都要发生变形。如果物体变形较小,在研究平衡或运动时是次要因素,变形可以忽略不计,将它抽象和简化为理想的力学模型——刚体。如图 1-3 所示的横梁,在力 F 的作用下其挠度 δ 仅为梁长度 l 的千分之几。在考察横梁平衡时可以忽略因挠度引起的梁长度的微小变化,仍用梁的原长进行计算,这样不致引起显著的误差,却简化了计算过程,又能满足工程精度要求。

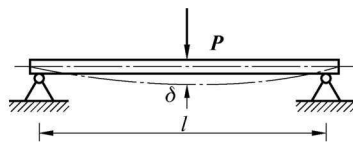


图 1-3 横梁

理论力学研究的物体都视为刚体,静力学又称为刚体静力学。当变形是所研究问题的主要因素时,就不能将物体抽象简化为刚体,而需要把物体抽象简化为另一种理想模型——变形体,这将在材料力学章节进行学习。

1.1.3 力系

作用在物体上的一群力称为力系。由 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 组成的力系记为 $(F_1, F_2, \dots, F_n)$ 。

根据力系中各力的作用线分布情况不同,可将力系分为下列几种:如果各力的作用线在同一平面内,则称为平面力系;如果各力的作用线不共面,则称为空间力系;如果各力的作用线汇交于一点,则称为汇交力系;如果各力作用线相互平行,则称为平行力系;如果各力的作用线既不相交于一点,也不相互平行,则称为任意力系或称一般力系。如图 1-4 所示。

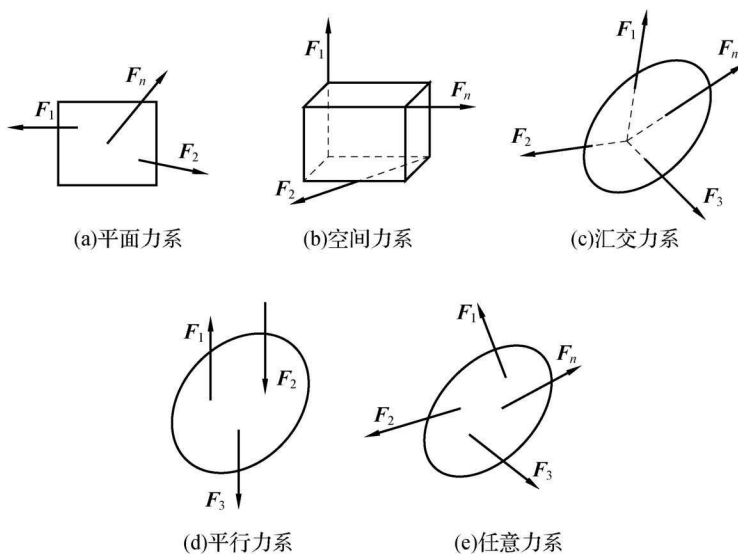


图 1-4 各种力系

如果作用在一个物体上的力系可由另一个力系代替,而不改变原力系对物体的作用效应,则这两个力系互为等效力系。如果一个力与一个力系等效,则这个力称为该力系的合力。

1.1.4 平衡

平衡是机械运动的一种特殊形式,是指物体相对于惯性参考系处于静止或做匀速直线运动的状态。例如,房屋、桥梁、车间里各种机器设备以及做匀速直线运动的车辆等,都处于平衡状态。使物体处于平衡状态的力系称为平衡力系。物体处于平衡状态必须满足的条件称为力系的平衡条件。

需要注意,运动是绝对的,平衡只是相对的和暂时的。如果作用于物体上的平衡力系发生变化,平衡就会被打破,物体就由平衡状态转化为非平衡状态。

1.1.5 力对点之矩

力可以使刚体的运动状态发生改变,当力使刚体发生移动时,作用效应可用力矢量来度量;当力使刚体发生转动时,作用效应可用力对点之矩来度量。

如图1-5所示,平面上作用一个力 F ,在同一平面内任取一点 O ,点 O 称为矩心,点 O 到力的作用线的垂直距离 h 称为力臂。规定力 F 与力臂 h 的乘积来度量力 F 使物体绕 O 点的转动效应,称为力 F 对点 O 的矩,用符号 $M_O(F)$ 表示。在平面力系中,力对点之矩是一个代数量,其计算如下

$$M_O(F) = \pm Fh = \pm 2S_{\triangle OAB}$$

式中, $S_{\triangle OAB}$ ——三角形 OAB 的面积;

$\pm$ ——力矩的转动方向,力使物体绕矩心逆时针转动取正号;反之,力使物体绕矩心顺时针转动取负号。

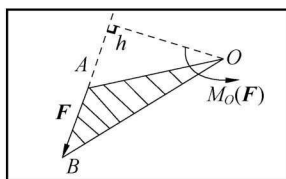


图 1-5 力矩示意图

国际制单位中,力矩的单位是牛顿·米($N \cdot m$)或千牛顿·米($kN \cdot m$)。

1.1.6 合力矩定理

合力矩定理:平面汇交力系的合力对平面内任一点之矩等于所有各分力对同一点之矩的代数和,即

$$M_O(F_R) = \sum M_O(F_i)$$

该定理不仅适用于平面汇交力系,对任何有合力的力系均成立。

【提示】

力矩是相对某一矩心而定义的,离开了矩心,力矩就没有意义。当力沿作用线移动时,力对点之矩保持不变;当力的作用线过矩心,则它对矩心的力矩为零。

1.2 静力学公理

静力学公理是人们对长期生产和生活实践经验的总结,并经反复证实的关于力的性质的客观真理。静力学公理是静力学理论的基础。

公理一 二力平衡公理

如图 1-6 所示,作用在刚体上两个力,使刚体保持平衡的必要与充分条件是这两个力的大小相等、方向相反并作用于同一直线上。

这个公理只适用于刚体,对于变形体来说,这个条件是必要的,而不是充分的。如图 1-7(a) 所示,绳索受到两个等值反向共线的拉力作用时可以平衡;但受到两个等值反向共线的压力作用时不能平衡,绳索会发生弯曲变形,如图 1-7(b) 所示。

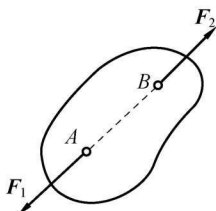


图 1-6 二力平衡

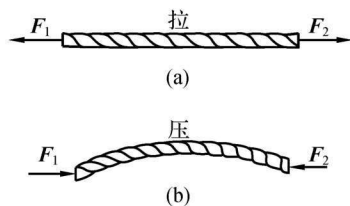


图 1-7 绳子拉压受力

工程问题中常仅有受到两个力作用的构件,称之为二力构件。如果二力构件为杆类构件,则称为二力杆。当二力构件处于平衡状态时,由公理一可知,构件上所受的两个力必定大小相等,方向相反,作用线共线。如图 1-8 所示杆件,当不计自重时,可看成是二力构件。

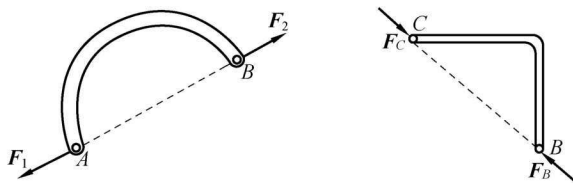


图 1-8 二力构件

【提示】

该公理常被用来简化已知力系,但仅适用于刚体。对于变形体来说,加减平衡力系,将会改变力对物体的变形效应。

公理二 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的任意力系上,加上或减去任何平衡力系,并不改变原力系对刚体的效应。

推论 力的可传性原理

作用于刚体上的力可以沿其作用线移至刚体内的任意一点,而不改变它对刚体的效应。

证明:设力 F 作用于刚体上 A 点,如图 1-9(a) 所示,在其作用线上某点 B 处加上一对平衡力 F_1 和 F_2 ,如图 1-9(b) 所示,并使 $F = F_1 = -F_2$ 。由加减平衡力系公理可知,这对平衡力不会改变力 F 对刚体的效应。将 F 和 F_2 看作是一对平衡力,根据此公理,可以去掉,刚体

上只剩下作用于 B 点的力 F_1 , 如图 1-9(c) 所示。这样, 原来的力 F 从刚体上由点 A 沿其作用线移到了点 B , 而没有改变它对刚体的作用效应, 于是推理成立。

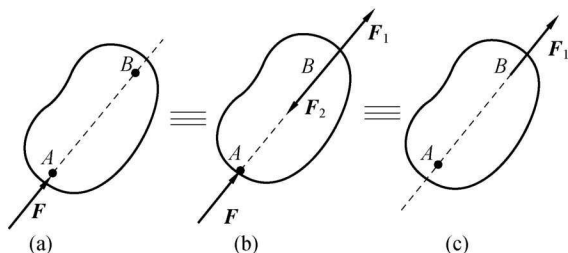


图 1-9 力的可传性

由此可知, 对于刚体而言, 力的作用点已不再是决定力的作用效果的要素, 其三要素可改为: 大小、方向、作用线。这样, 刚体上的作用力可以沿着作用线移动, 因此可称其为滑动矢量。

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, 可以合成为一个合力。合力的作用点仍在该点, 合力的大小和方向由以这两个力为边所构成的平行四边形的对角线来确定。

力的平行四边形法则表明, 力矢量可按平行四边形法则进行合成与分解。设在物体的 A 点作用有力 F_1 和 F_2 , 如图 1-10(a) 所示。其矢量表达式为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

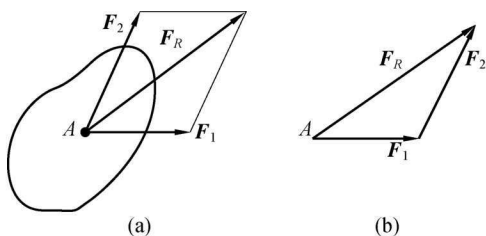


图 1-10 力的平行四边形法则

推论 三力平衡汇交定理

刚体受三个力作用而平衡, 如果其中两个力的作用线相交于一点, 则另一个力的作用线也必交于同一点, 且三个力的作用线在同一平面内。

证明: 设刚体在 A, B, C 三点分别受到不平行的三个力 F_1, F_2 和 F_3 的作用, 使刚体处于平衡, 如图 1-11 所示。假如 F_1 和 F_2 的作用线交于 O 点。由力的可传性原理, 将力 F_1 和 F_2 分别沿作用线移至 O 点。根据力的平行四边形法则, 将力 F_1 和 F_2 合成为合力 F_R , 以 F_R 来代替 F_1 和 F_2 的作用。由于刚体处于平衡状态, 那么 F_3 与 F_R 平衡。根据二力平衡公理, 力 F_3 与 F_R 必定共线, 所以力 F_3 必在力 F_1 和 F_2 所构成的

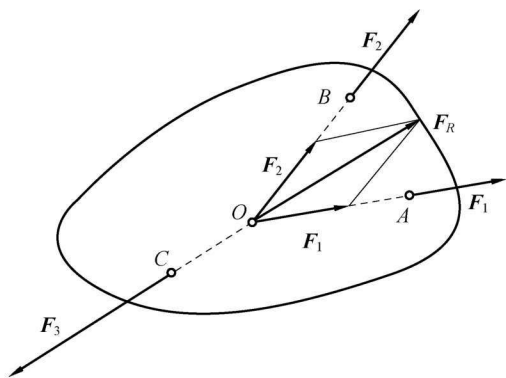


图 1-11 三力平衡必汇交

【提示】

运用力的平行四边形法则求合力时, 可以不画出整个平行四边形, 而只画出平行四边形的一半, 简化为一个三角形, 如图 1-10(b) 所示。该公理是力系简化的重要基础, 对刚体和变形体都成立。

根据平行四边形法则也可以将力分解, 但分解的结果不唯一。在工程问题中, 通常是将力分解为两个互为正交的分力。

平行四边形平面上,且通过交点 O 。

该定理的逆定理不成立。

公理四 作用力与反作用力定律

两物体间的作用力与反作用力总是同时存在,其大小相等,方向相反,作用线共线,分别作用在两个物体上。

这个公理阐述了物体间相互作用的关系,表明作用力和反作用力总是成对出现的。需要注意的是,作用力和反作用力分别作用在两个物体上,因此不能视为平衡力系。

公理五 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡,若将此变形体刚化为刚体,其平衡状态保持不变。

由此可知,可以利用静力学所研究的关于刚体的平衡条件,来处理变形体的平衡问题。即处于平衡状态的变形体,总可以将其视为刚体来研究。

【提示】

刚体的平衡条件对于变形体来说,只是必要条件并非充分条件。例如,绳索在两个等值、反向、共线的拉力作用下处于平衡,若将其视为刚杆,仍然保持平衡状态,如图 1-12(a) 所示;但对于刚杆在两个等值、反向、共线的压力作用下平衡时,若将其变为绳索不能保持平衡,如图 1-12(b) 所示。

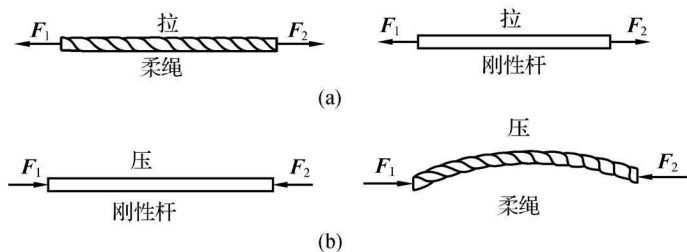


图 1-12 刚体的平衡

1.3 约束和约束力

1.3.1 基本概念

位移不受任何限制,在空间可以自由运动的物体,称为自由体。例如,空中的飞机、炮弹等。当物体受到了其他物体的限制,空间的位移受到了一定的限制,这种物体称为非自由体。例如,悬挂在绳索上的重物,支承于墙上的梁,沿铁轨行驶的机车等都是非自由体。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束。例如,绳索对于重物、墙对于梁、铁轨对于机车等,都是约束。工程实际中大多数物体都是非自由体。

由于约束阻碍着物体的自由运动,所以约束对物体的作用,实际上就是力,这种力称为约束力。约束力的方向总是与该约束所能够阻碍的运动方向相反,作用在约束与被约束物体相互接触之处。应用这个准则,可以确定约束力的方向或作用线的位置。

除约束力以外,作用在物体上的力一般还有重力、风力、电磁力等。因为这些力能主动地使物体运动或使物体有运动趋势,故称为主动力。主动力一般都是已知的,而约束力一般是未知的,需要通过静力学的力系平衡条件求得。

下面介绍几种在工程中常遇到的简单约束类型和确定约束力方向的方法。