



全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

工程

力学

(第二版)

主编 张晓梅 潘庆丰

煤炭工业出版社

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

工 程 力 学

(第二版)

主 编 张晓梅 潘庆丰

煤炭工业出版社

·北 京·

内 容 提 要

本书共 12 章,内容包括:静力学基础、平面特殊力系、平面一般力系、空间力系、运动力学、轴向拉伸和压缩、剪切与挤压、圆轴扭转、平面弯曲、组合变形的强度计算、压杆稳定以及实验指导等。

本书为高等职业技术学院、高等专科学校相应专业的教材,也可供成人教育院校、中等专业技术学校教学使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/张晓梅,潘庆丰主编.一二版.一北京:煤炭工业出版社,2009.1

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5020-3450-4

I.工... II.①张...②潘... III.工程力学-高等学校:技术学校-教材 IV.TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 004073 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址:www.cciph.com.cn
北京京科印刷有限公司 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 16
字数 390 千字 印数 1-8,000
2009 年 2 月第 2 版 2009 年 2 月第 1 次印刷
社内编号 6255 定价 30.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

全国煤炭高职高专矿山机械类“十一五”规划教材

编审委员会

主 任:冯海明

副 主 任:李克孝 丁原廉 何全茂

秘 书 长:谢光辉

委 员 (以下按姓氏笔画为序):

马立克	王寅仓	牛小铁	毋虎城
安淑女	朱江峰	刘 捷	刘立群
刘永清	劳 宇	杨玉璋	杨 桢
苏汉明	张小亮	张伟君	张明梅
何朝柱	何富贤	闵国林	林木生
武 熙	武维承	金建云	侯克清
康 力	韩治华		

前 言

本书由中国煤炭教育协会与中国矿业大学(北京)教材编审室共同组织编写,为全国煤炭高职高专矿山机械类“十一五”规划教材。

本书适用的教学时数为 60~80 学时。

本书依据教育部制定的“工程力学”教学基本要求编写而成。在编写过程中,充分吸取了近年来高职高专教学改革的经验,从高等职业教育培养应用型、技能型人才的目标出发,遵循“以应用为目的”、“以必需够用为度”、“以掌握概念、强化应用为原则”的要求,着重培养学生在工程力学方面分析问题、解决问题的能力。本书由具有多年教学经验的一线教师编写,在内容方面力求简化理论推导,加强实践应用,在例题和习题的选择方面力求简单易懂。

另外,我们还从专业要求出发,将运动学与动力学合为一体,分别从质点和刚体两个角度介绍了运动学与动力学的相关知识,同时增添了实验指导内容。

本书由张晓梅、潘庆丰任主编,刘爱云、任建国、裴保家任副主编。具体编写分工如下:裴保家(第一、二章)、刘爱云(第三章第一、二、三节)、张晓梅(第四、五章)、任建国(第六、十二章)、高伟平(第七、八章)、潘庆丰(第三章第四节、第九章)、郑文玉(第十、十一章)。

本书在编写过程中得到了山西煤炭职业技术学院、河南理工大学高等职业学院、辽宁工程技术大学职业技术学院、陕西能源职业技术学院、河南平顶山工业职业技术学院、甘肃煤炭工业学校、石家庄工程技术学校、江西工业工程职业技术学院、长治职业技术学院、山西煤炭管理干部学院、四川科技职工大学等院校的大力支持,以及许多专家的热情帮助,在此一并表示感谢。

对高等职业教育教材的编写,我们还在探索研究中,因水平有限,书中若有不妥和疏漏,敬请读者批评指正。

《工程力学》编写组

2008 年 12 月

主要符号表

F	力
F + 下标/分量	约束反力
F_R	主矢,合力
G	重力,剪切弹性模量
q	分布载荷集度
F_N	轴力,法向反力
F_Q	剪力
F_{cr}	临界力
M_e	外力偶矩
$M_O(F)$	力对点之矩
M	弯矩
M_T	扭矩
W_Z	抗弯截面模量
W_T	抗扭截面模量
P	功率
σ, τ	正应力,剪应力
$\sigma_s, \sigma_p, \sigma_e, \sigma_b$	屈服极限,比例极限,弹性极限,强度极限
τ_s, τ_b	剪切屈服极限,剪切强度极限
σ_0	危险应力
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
σ_t, σ_c	拉应力,压应力
σ_r	相当应力
σ_{cr}	临界应力
$[\sigma], [\tau]$	许用正应力,许用剪应力
ΔL	绝对变形
ϵ	线应变,角加速度
γ	剪应变
y	挠度
$\varphi, \theta, [\theta]$	扭转角,单位转角,单位长度的许可转角
φ_m	摩擦角
δ, ψ	延伸率,截面收缩率
v	速度
a	加速度
t	时间
ρ	曲率半径,物体密度

A	面积
b	宽度
h	高度
l	长度
C	重心,形心,质心
$d(D)$	直径
$r(R)$	半径
f	摩擦系数
J	转动惯量
m	质量
n, N	转速,转数
λ	压杆柔度
μ	压杆长度系数,泊松比
E	弹性模量
I_p	极惯性矩
I_x, I_y, I_z	对 x, y, z 轴的惯性矩
i	惯性半径
n_b, n_s, n_w	安全系数

目 录

绪论	(1)
第一章 静力学基础	(3)
第一节 静力学公理	(3)
第二节 约束和约束反力	(6)
第三节 物体的受力分析	(9)
本章小结	(15)
思考题	(16)
习题	(19)
第二章 平面特殊力系	(21)
第一节 平面汇交力系	(21)
第二节 平面力偶系	(28)
第三节 平面平行力系	(34)
本章小结	(37)
思考题	(37)
习题	(39)
第三章 平面一般力系	(42)
第一节 平面一般力系的简化	(42)
第二节 平面一般力系的平衡方程及其应用	(46)
第三节 物体系统的平衡	(50)
第四节 摩擦简介	(54)
本章小结	(62)
思考题	(63)
习题	(65)
第四章 空间力系	(70)
第一节 力在空间直角坐标轴上的投影	(70)
第二节 力对轴之矩	(72)
第三节 空间力系的平衡方程及其应用	(75)
本章小结	(79)
思考题	(80)
习题	(80)
第五章 运动力学	(82)
第一节 质点运动的表示方法	(82)
第二节 点的合成运动	(87)

第三节 刚体的基本运动	(90)
第四节 刚体动力学基础	(94)
本章小结	(100)
思考题	(101)
习题	(102)
第六章 轴向拉伸和压缩	(106)
第一节 轴向拉伸和压缩时横截面上的内力	(106)
第二节 轴向拉伸和压缩时截面上的应力	(109)
第三节 拉(压)杆的变形与虎克定律	(112)
第四节 拉伸和压缩时材料的机械性质	(114)
第五节 拉伸和压缩时的强度计算	(118)
本章小结	(121)
思考题	(122)
习题	(123)
第七章 剪切与挤压	(125)
第一节 剪切的实用计算	(125)
第二节 挤压的实用计算	(126)
本章小结	(130)
思考题	(131)
习题	(131)
第八章 圆轴扭转	(133)
第一节 圆轴扭转时横截面上的内力	(133)
第二节 圆轴扭转时横截面上的应力	(135)
第三节 圆轴扭转时的变形	(137)
第四节 圆轴扭转时的强度和刚度计算	(137)
本章小结	(141)
思考题	(141)
习题	(142)
第九章 平面弯曲	(144)
第一节 平面弯曲的概念及梁的计算简图	(144)
第二节 梁横截面上的内力——剪力和弯矩	(146)
第三节 剪力图和弯矩图	(149)
第四节 利用载荷、剪力和弯矩的关系画内力图	(153)
第五节 平面弯曲时横截面上的正应力	(159)
第六节 弯曲正应力强度条件	(163)
第七节 弯曲剪应力简介	(166)
第八节 梁的变形	(167)
第九节 提高梁承载能力的措施	(171)
本章小结	(174)

思考题	(175)
习题	(176)
第十章 组合变形的强度计算	(181)
第一节 强度理论	(181)
第二节 拉(压)弯组合变形时的强度计算	(184)
第三节 弯扭组合变形时的强度计算	(190)
本章小结	(195)
思考题	(195)
习题	(196)
第十一章 压杆稳定	(199)
第一节 压杆稳定的概念	(199)
第二节 压杆的临界力和临界应力	(200)
第三节 压杆的稳定性计算	(204)
第四节 提高压杆稳定性的措施	(206)
本章小结	(207)
思考题	(208)
习题	(208)
第十二章 实验指导	(210)
第一节 轴向拉伸和压缩实验	(210)
第二节 圆轴扭转实验	(216)
第三节 弯曲实验	(222)
附录 型钢规格表	(237)
习题参考答案	(237)
主要参考文献	(243)

绪 论

一、工程力学的内容和任务

物体的移动、转动和变形都属于机械运动,机械运动是最简单的一种运动形式。工程力学是研究物体机械运动的一般规律和工程构件的强度、刚度、稳定性的计算原理及方法的科学。它包含了理论力学和材料力学两门学科中的有关内容,是一门理论性和实践性都比较强的课程。

在力的作用下,物体会产生两种作用效果:使物体运动状态发生改变,称为力对物体作用的外效应;物体形状发生改变(变形),称为力对物体作用的内效应。一般条件下,这两种效应是同时存在的,理论力学和材料力学分别研究物体在力的作用下产生的外效应和内效应。

理论力学主要研究平衡问题,进而计算出物体之间的相互作用力;材料力学主要研究构件在外力作用下产生的内力和应力,通过对构件的强度、刚度和稳定性的设计和计算,进而解决工程实际中安全与经济的问题。

本书以静力学和材料力学为主,简单介绍了运动力学中的有关内容,另外还增加了材料力学实训指导的内容。

二、工程力学的研究方法

工程力学是一门专业基础课程,是为工程计算和工程设计服务的。它们的基本研究方法都是从实践出发,通过抽象、概括,提出基本假设,再用数学演绎推理或实验论证形成理论和计算方法,解决工程实际问题。经过无数次“实践——理论——实践”的循环反复过程,逐步总结和归纳出科学的规律和方法。材料力学还是一门实践性的课程,在学习过程中还要培养学生通过实验解决实际问题的能力。

在理论力学中需要建立质点和刚体的概念。当物体的形状和大小与研究的问题无关或影响很小的情况下,为了掌握它的基本运动规律,我们可以将其忽略。这样,研究问题时,只考虑物体的质量,而不计物体的形状和几何尺寸,从而将物体视为一个点,这就是质点。当物体的变形对物体平衡的影响很小从而可以忽略时,物体在任何情况下都不会改变其形状和大小,这就是刚体。

在材料力学中需要建立变形固体的基本假设,这时的研究对象不再是刚体,而是可变形体。变形固体要求构件的材料是均质连续、各向同性的,并且受外力作用后引起的变形与原尺寸比较非常微小。

同一物体在不同的情形下,可看作质点,可看作刚体,也可看成变形体。例如,当研究地球绕太阳公转时,地球可以看作质点;当研究地球自转时,要将地球看作刚体;而当研究地震时,则把地球看作变形体。当研究飞机在空中的飞行轨迹时,我们可以把飞机视为质点;当研究飞机在空中的平衡问题时,我们把飞机视为刚体;而在研究飞机飞行中的震动问题时,飞机在我们的眼中又成为变形体。

三、工程力学的学习方法

工程力学是工程技术人员必须具备的基础知识,是为学习后续课程和专业课程服务的,要求学生在学好理论知识的同时,还要培养自己的相关技能,培养解决实际问题的能力。在学习、做题和实验的过程中,要培养自己的观察能力、分析能力和创新能力,每解一道习题、画一个小图、做一个实验,都要持以科学、严谨、认真的态度。

第一章 静力学基础

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学。平衡是相对的,是指物体相对于周围物体处于静止或匀速直线运动的状态。例如,房屋相对于地面的静止,匀速直线运动的列车,等等。物体处于平衡状态时,作用于该物体上的力系称为平衡力系。当物体平衡时,作用于物体上的力必须满足一定的条件,这些条件称为力系的平衡条件。静力学的主要内容之一就是建立力系的平衡条件。因此,静力学研究的主要问题是:物体的受力分析方法,力系的简化,力系的平衡。

力是物体之间的相互机械作用,其作用形式多种多样,有的是接触作用,如物体之间的摩擦力、压力、机车牵引车箱的力等;有的是通过“场”对物体的作用,如地球引力场对物体的引力、电场对电荷的引力或斥力等。

力对物体的作用效果取决于三个因素:① 力的大小,② 力的方向,③ 力的作用点。这三个因素称为力的三要素。三要素中改变任一要素,力的作用效果也随之改变。

力是矢量,具有大小和方向,可以用一条带箭头的线段来表示力的三要素,如图 1-1 所示。线段的长度按一定的比例表示力的大小,线段的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。通过力的作用点沿力方向的直线称为力的作用线。用 $\boldsymbol{F}$ 表示矢量, F 代表力的大小,手写时通常用 $\vec{F}$ 表示矢量。

在国际单位制(SI 制)中,力的单位为牛顿(N)或千牛顿(kN)。

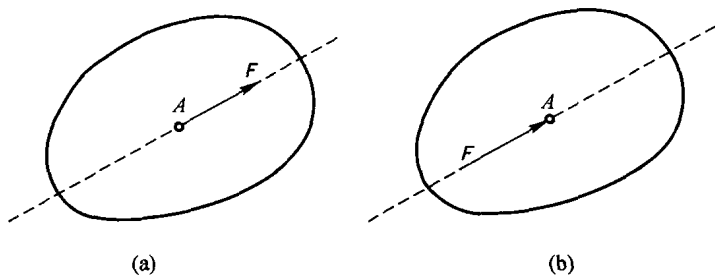


图 1-1

第一节 静力学公理

静力学公理是人类在长期的生活实践和生产活动中积累的关于力的基本性质的概括和经验总结,经过实践反复检验,证明是符合客观实际的普遍规律,故称为静力学公理。

一、公理 1 力的平行四边形公理

作用于物体上同一点的两个力,可以合成为仍然作用于该点的一个合力,合力的大小和

方向由这两个力为邻边所作的平行四边形的对角线确定,如图 1-2(a)所示。此方法称为力的平行四边形法则。其矢量表达式为

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

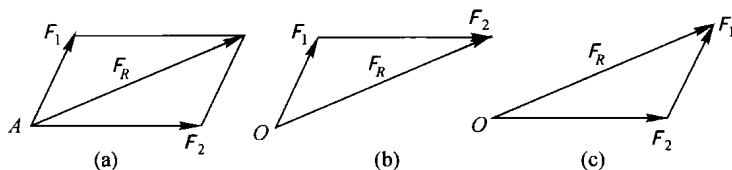


图 1-2

为了简便起见,可以用平行四边形的一半来表示这一合成过程,即依次将 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 首尾相接,连接起点与终点得到一力三角形,第三边为合力 $\mathbf{F}_R$,这就是力的三角形法则。如图 1-2(b)、(c)所示。用力的三角形法则求合力与绘制 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 的先后次序无关,力三角形只表示各力的大小和方向,并不表示其作用线的位置。因此,力三角形只是一种矢量运算方法,不完全表示力系的真实作用情况。

二、公理 2 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力,使刚体处于平衡的必要和充分条件是:两个力大小相等,方向相反,并且作用在同一直线上(即这两个力等值、反向、共线),即 $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$ 。如图 1-3(a)、(b)所示。

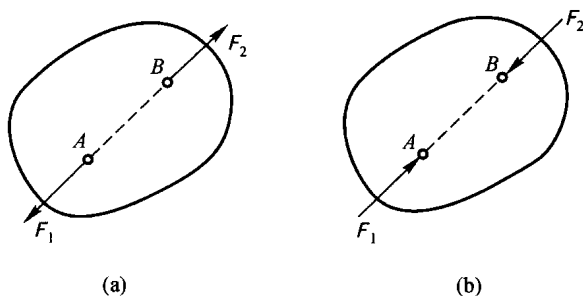


图 1-3

这一公理总结了作用于刚体上的最简单的力系平衡时必须满足的条件。需要指出的是,此公理只适用于刚体,对于变形体而言这个条件是不充分的。例如,一根绳子受两个等值、反向的拉力作用可以平衡,见图 1-4(a),但受两个等值、反向的压力作用就不能平衡了,如图 1-4(b)所示。

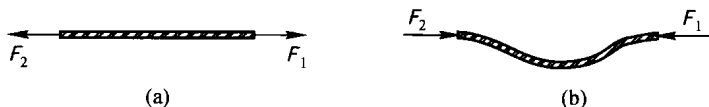


图 1-4

仅受两个力作用且处于平衡状态的构件称为二力构件,它所受的两个力满足二力平衡条件,即两力作用线必定沿两个力作用点的连线,且等值、反向。如图 1-5(a)中所示构件 BC 为二力构件,受力情况如图 1-5(b)所示。

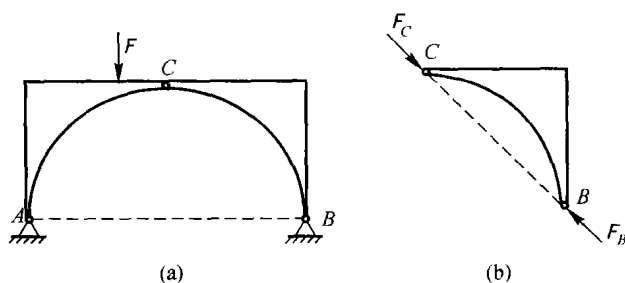


图 1-5

三、公理 3 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的任何一个已知力系上加上或减去一个平衡力系,不改变原力系对刚体的作用效果。这个公理是研究力系等效变换和力系简化的理论依据。

推论 1 力的可传性原理

作用于刚体上某点的力,可沿其作用线移至该刚体上任意一点而不改变该力对刚体的作用效果。

证明 设力 F 作用于刚体上 B 点,如图 1-6(a)所示。根据加减平衡力系公理,可在力 F 的作用线上任取一点 A ,并在 A 点加一对等值、反向、共线的平衡力 F_1 和 F_2 ,使 $F = F_1 = -F_2$,如图 1-6(b)所示,由于力 F_2 和 F 也是一个平衡力系,由公理 3 可去掉这两个力,这样只剩下作用于 A 点的力 F_1 ,相当于把力 F 由 B 点沿其作用线移到了 A 点,如图 1-6(c)所示。力的这一性质称为力的可传性原理。由此可见,对刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效果的要素,它已被作用线所代替。因此,作用于刚体上的力的三要素可以表示为:力的大小、方向和作用线。

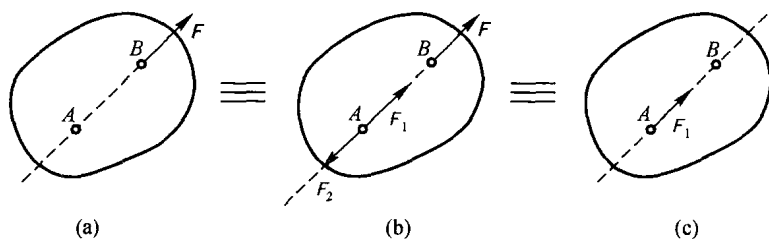


图 1-6

推论 2 三力平衡汇交定理

当刚体受同一平面内互不平行的三个力作用而平衡时,这三个力的作用线必定汇交于同一点。

证明 如图 1-7 所示,设 F_1 、 F_2 、 F_3 三力分别作用在刚体上 A 、 B 、 C 三点,使刚体处于平衡状态。根据力的可传性原理,将 F_1 、 F_2 移至汇交点 O ,根据力平行四边形法则得到合力 F_R ,则合力 F_R 应与 F_3 平衡,由二力平衡公理知 F_3 必与 F_R 共线。所以 F_3 的作用线必然通过 F_1 、 F_2 的交点 O ,即三个力作用线汇交于一点。

四、公理 4 作用与反作用公理

两物体间的作用力与反作用力总是大小相等、方向相反、分别作用在两个相互作用的物体上。

该公理反映了物体之间相互作用力的关系,表明作用力和反作用力总是成对出现的,同时存在,同时消失。

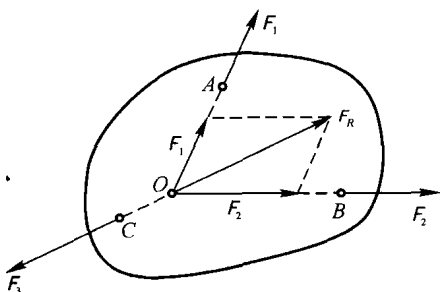


图 1-7

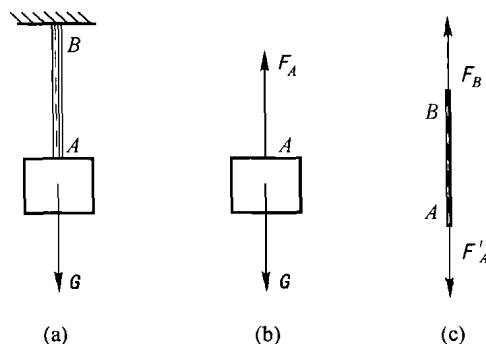


图 1-8

图 1-8(a)所示的绳索,悬挂一重为 G 的物体,绳索质量略去不计,分析重物和绳索所受的力。重物受重力 G 和绳索向上的拉力 F_A 的作用,如图 1-8(b)所示。绳索在 A 端受重物给予的向下的拉力 F'_A 和天花板给予的向上的拉力 F_B ,如图 1-8(c)所示。 G 和 F_A 作用在重物上,是一对平衡力。同理, F'_A 和 F_B 是作用在绳索上的一对平衡力,而 F_A 和 F'_A 是分别作用在两个物体上的作用力与反作用力。一定要注意,虽然作用力与反作用力大小相等,方向相反,沿着同一条直线,但分别作用在两个物体上,不能与二力平衡中的一对作用于同一个物体上的力相混淆。

第二节 约束和约束反力

一、约束和约束反力的概念

有些物体可以在空间自由运动,其位移不受任何限制。例如,天空中飞行的飞机、火箭以及炮弹等,这些位移不受限制的物体称为自由体。有些物体在空间的位移受到一定的限制,例如,放在光滑桌面上的物体,桌面就限制了该物体沿铅垂方向的向下运动;龙门刨床工作台受床身导轨的限制,只能沿导轨的方向移动;在铁轨上运行的列车受铁轨的限制,使其只能沿铁轨运行;天花板上悬挂的日光灯受绳索的限制,不会下落;等等。位移受到某些限制的物体称为非自由体或受约束体。所谓约束,就是对非自由体(受约束体)的某些位移起限制作用的周围物体。例如,铁轨是列车的约束;桌面是物体的约束;绳索是日光灯的约束;龙门刨床床身导轨是工作台的约束。

既然约束阻碍着物体的运动,那么当物体沿着约束能阻碍的运动方向有运动趋势时,约束对它就有改变运动状态的作用,这种作用称为约束反力,简称反力或约束力。因此,约束反力的方向总是和约束所阻碍的运动方向相反。因为约束是物体间的相互接触引起的,因此约束力的作用位置一定在两物体的接触处。

物体所受的力分为两类,一类是使物体产生运动或使物体有运动趋势的力,称为主动动力,一般为已知力,如重力、弹簧力、压力、电磁力等;另一类就是约束力,一般为未知力。

二、几种常见的约束类型

1. 柔体约束

柔体约束,就是由柔软的绳索、胶带、链条等理想化的不可伸长的物体所形成的约束,它限制物体沿绳索伸长方向的运动,因而只能承受拉力而不能承受压力,如图 1-9(b)所示。因此绳索对物体的约束反力,作用点在接触点 A ,方向沿绳索而背离物体,如图 1-9(c)所示。

链条或皮带也都只能承受拉力,对轮子的约束反力沿轮缘的切线方向,如图 1-10 所示。

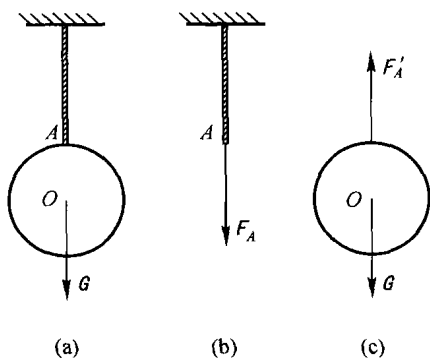


图 1-9

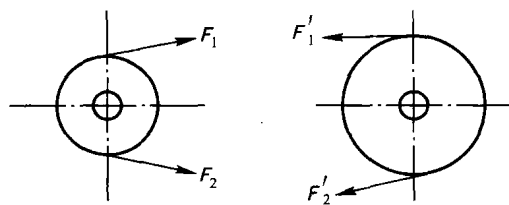


图 1-10

2. 光滑接触面约束

当两物体直接接触,并忽略接触处的摩擦时所形成的约束称为光滑接触面约束。这类约束限制物体在接触点沿接触面的公法线指向接触面的运动。因此,光滑支承面对物体的约束反力,作用点在接触点,方向沿接触处的公法线指向被约束物体。

两个刚性物体相接触的形式,有下列几种情况,其约束反力如图 1-11 所示。

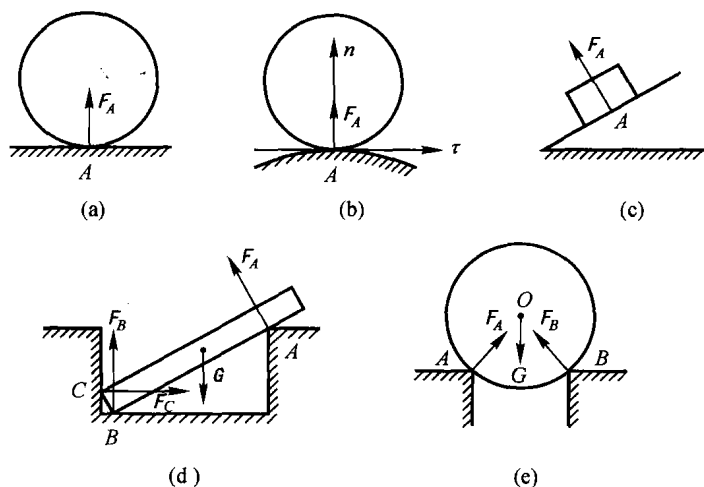


图 1-11

(1) 曲面与平面接触,如图 1-11(a)所示,接触面即为公切面,将接触面的中心 A 点视为接触点,约束反力为 F_A 。