



工程力学

GONGCHENG LIXUE

冯志华 朱晓东 兰向军 编

 苏州大学出版社

工 程 力 学

冯志华 朱晓东 兰向军 编

苏州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/冯志华,朱晓东,兰向军主编. —苏州:
苏州大学出版社,2004.9
ISBN 7-81090-364-0

I. 工… II. ①冯…②朱…③兰… III. 工程力学 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 089138 号

工 程 力 学

冯志华 朱晓东 兰向军 编

责任编辑 薛华强

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市干将东路 200 号 邮编:215021)

如皋市永盛印刷有限公司印装

(地址:如皋市环城南路 56 号 邮编:226500)

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.75 字数 407 千

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-81090-364-0/TB·1(课) 定价:30.00 元

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换
苏州大学出版社营销部 电话:0512-67258835

内 容 提 要

本书是根据 21 世纪对人才培养的要求和教育部关于面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的指示精神,借鉴国内外一些优秀教材的特点,在多年的教学实践基础上编写而成的。

本书共分 18 章:第 1 章至第 4 章研究刚体的平衡规律,着重介绍静力分析、平衡条件及其在工程中的应用;第 5 章至第 8 章从几何观点研究物体(点、刚体)的运动规律,包括点的运动、刚体的基本运动和平面运动;第 9 章至第 11 章研究物体机械运动的一般规律、动能定理及动静法在工程中的应用;第 12 章至第 18 章研究变形固体在保证正常工作条件下的强度、刚度和稳定性;附录中列入了工程中常见的型钢表。

本书最大计划学时数为 120,根据各专业特点可进行部分选择,可作为高等院校有关的工科专业本科生的工程力学教材,也可供高等职业大学和成人教育学院师生及有关工程技术人员参考。

序

工程力学是一门与工程技术联系极为广泛的技术学科,其涉及的领域有机械、土木、水利、建筑、化工、纺织、冶金、交通运输、航空、航天、军事、能源、生物技术、材料、微电子制造等等,是工程技术的重要理论基础之一,也是将理论应用到工程实际中的一座重要桥梁。

本书是根据 21 世纪对人才培养的要求和教育部关于面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的指示精神,借鉴国内外一些优秀教材的特点,在多年的教学实践基础上编写而成的。本教材具有如下特点:(1)重组教学内容,优化课程体系,突出重点,加强前后内容的贯通与一致性;(2)在充分考虑施教对象的具体情况后,重点强调了该课程体系中的基本内容,以便于全面、准确地阐述相关的基本概念和基本定理;(3)理论推导严谨、文字表述简明;(4)结合教学心得,在关键问题上采用启发式陈述方式,以使学生在较短时间内掌握相关内容,继而培养他们独立思考问题的能力和创新能力;(5)以教学适用为目标,在例题、习题的编排上,力求数量充分、难易安排适当。

本书可作为高等院校相关工科专业的教材,也可供高等职业大学和成人教育学院师生及有关工程技术人员参考。

参加本教材编写工作的有:兰向军、朱晓东、冯志华。具体分工如下:第 1 章至第 6 章由兰向军编写;第 11 章至第 15 章由朱晓东编写;第 7 章至第 10 章,第 16 章至第 18 章,附录 A 由冯志华编写。统稿由冯志华教授完成。

本书在编写过程中,得到了苏州大学有关领导的关心、鼓励和大力支持,同时还得到了苏州大学机电工程学院许多教师的支持与帮助。苏州大学芮延年教授、傅戈雁教授在百忙之中认真审阅了书稿并提出了许多宝贵意见。苏州大学出版社的许周鹤、薛华强老师在本书的完成中给予了许多帮助与指导。在此一并表示感谢。

限于编者水平,教材中难免存在诸多疏漏,敬请读者批评指正。

冯志华 朱晓东 兰向军
2004 年 6 月于苏州大学

主要符号表

a	加速度	$M_O(F)$	力 F 对点 O 的矩
a_n	法向加速度	n	安全系数
a_τ	切向加速度	n_{st}	稳定安全系数
a_a	绝对加速度	r	半径
a_r	相对加速度	r	矢径
a_e	牵连加速度	R	半径
a_c	科氏加速度	s	弧坐标
A	面积	S	静矩
C	质心	t	时间
e	偏心距	T	动能, 扭矩
E	弹性模量	v	速度
f	动摩擦因数	v_a	绝对速度
f_s	静摩擦因数	v_r	相对速度
F	力	v_e	牵连速度
F_{cr}	临界载荷	V	势能, 体积
F_g	惯性力	w	挠度
F_N	法向约束力	W	力的功, 弯曲截面系数
F_N	轴力	W_p	扭转截面系数
F_R	力系的主矢	x, y, z	直角坐标
F_S	剪力	α	角加速度
g	重力加速度	γ	切应变
G	切变模量	ϵ	正应变
h, H	高度	$\epsilon_\sigma, \epsilon_\tau$	尺寸系数
i	x 轴的单位矢量	θ	梁横截面转角, 单位长度扭转角
I	惯性矩	μ	长度系数, 泊松比
I_p	极惯性矩	ρ	密度, 曲率半径
j	y 轴的单位矢量	σ	正应力
J_C	刚体对过质心轴的转动惯量	σ_a	应力幅
k	弹簧刚度系数	σ_b	强度极限
k	z 轴的单位矢量	σ_m	平均应力
K_σ, K_τ	有效应力集中因数	σ_{bs}	挤压应力
m	质量, 扭矩矩集度	$[\sigma]$	许用应力
M	弯矩, 外力偶矩	σ_{cr}	临界应力
M	力偶矩, 主矩	σ_e	弹性极限

σ_p	比例极限	$[\tau]$	许用切应力
$\sigma_{0.2}$	条件屈服应力	φ	角度坐标, 扭转角, 摩擦角
σ_s	屈服应力	ω	角速度
τ	切应力		

目 录

第一章 静力学公理与物体受力分析

§ 1-1 刚体和力的概念	(1)
§ 1-2 静力学公理	(2)
§ 1-3 约束与约束反力	(4)
§ 1-4 物体受力分析及受力图	(7)
习题	(9)

第二章 平面汇交力系和平面力偶系

§ 2-1 平面汇交力系的合成	(13)
§ 2-2 平面汇交力系的平衡条件	(16)
§ 2-3 平面力偶系	(17)
习题	(21)

第三章 平面一般力系

§ 3-1 平面一般力系的简化	(25)
§ 3-2 平面一般力系的平衡	(29)
§ 3-3 物体系统的平衡	(31)
§ 3-4 考虑摩擦时的平衡问题	(34)
习题	(37)

第四章 空间力系

§ 4-1 力在空间直角坐标轴上的投影	(42)
§ 4-2 力对轴之矩	(43)
§ 4-3 空间一般力系的简化	(44)
§ 4-4 空间一般力系的平衡	(45)
§ 4-5 空间力系平衡问题举例	(46)
习题	(48)

第五章 点的运动学

§ 5-1 运动学基本概念	(51)
§ 5-2 矢量法	(51)
§ 5-3 直角坐标法	(53)
§ 5-4 自然法	(54)
习题	(58)

第六章 刚体的基本运动

§ 6-1 刚体的平行移动	(61)
§ 6-2 刚体的定轴转动	(62)
§ 6-3 转动刚体上各点的速度和加速度	(62)

习题	(65)
第七章 点的合成运动	
§ 7-1 相对运动、绝对运动和牵连运动	(67)
§ 7-2 速度合成定理	(68)
§ 7-3 牵连运动为平动时的加速度合成定理	(72)
习题	(75)
第八章 刚体的平面运动	
§ 8-1 平面运动的基本概念	(79)
§ 8-2 平面运动分解为平动和转动	(80)
§ 8-3 平面图形内各点的速度 基点法及速度投影定理	(81)
§ 8-4 平面图形的瞬时速度中心 速度瞬心法	(82)
§ 8-5 用基点法确定平面图形内各点的加速度	(86)
习题	(90)
第九章 动力学基本定律	
§ 9-1 动力学基本定律	(94)
§ 9-2 质点运动的微分方程	(95)
习题	(99)
第十章 动能定理	
§ 10-1 概述与基本概念	(102)
§ 10-2 力的功	(106)
§ 10-3 动能及其表达式	(109)
§ 10-4 质点的动能定理	(111)
§ 10-5 质点系的动能定理	(112)
习题	(115)
第十一章 达朗伯原理	
§ 11-1 惯性力 质点的达朗伯原理	(118)
§ 11-2 质点系的达朗伯原理	(119)
§ 11-3 刚体惯性力系的简化	(120)
§ 11-4 静平衡与动平衡的概念	(124)
习题	(126)
第十二章 轴向拉伸和压缩	
§ 12-1 概述	(130)
§ 12-2 轴向拉伸和压缩的概念	(131)
§ 12-3 内力 截面法 轴力及轴力图	(132)
§ 12-4 应力 拉(压)杆内的应力	(134)
§ 12-5 拉(压)杆的变形 胡克定律	(138)
§ 12-6 材料在拉伸和压缩时的力学性能	(142)
§ 12-7 强度条件 安全系数 许用应力	(147)
§ 12-8 应力集中的概念	(151)

§ 12-9 连接部分的强度计算	(152)
习题	(156)
第十三章 扭转	
§ 13-1 概述	(160)
§ 13-2 薄壁圆筒的扭转	(160)
§ 13-3 传动轴的外力偶矩 扭矩及扭矩图	(162)
§ 13-4 圆轴扭转时的应力与强度条件	(165)
§ 13-5 圆轴扭转时的变形与刚度条件	(168)
习题	(171)
第十四章 梁的弯曲	
§ 14-1 对称弯曲的概念和实例	(174)
§ 14-2 梁的内力——剪力和弯矩	(175)
§ 14-3 剪力图和弯矩图	(177)
§ 14-4 弯曲时的正应力	(180)
§ 14-5 截面的惯性矩 平行轴定理	(183)
§ 14-6 梁的强度条件	(185)
§ 14-7 弯曲时的切应力及其强度条件简介	(187)
§ 14-8 提高弯曲强度的主要措施	(189)
§ 14-9 弯曲变形	(190)
§ 14-10 用积分法计算梁的变形	(192)
§ 14-11 用叠加法计算梁的变形	(193)
§ 14-12 梁的刚度条件与提高弯曲刚度的措施	(195)
习题	(197)
第十五章 应力状态和强度理论	
§ 15-1 应力状态的概念	(202)
§ 15-2 平面应力状态	(203)
§ 15-3 空间应力状态	(208)
§ 15-4 强度理论	(210)
习题	(215)
第十六章 组合变形	
§ 16-1 组合变形和叠加原理	(219)
§ 16-2 拉伸(压缩)与弯曲组合变形	(219)
§ 16-3 斜弯曲	(222)
§ 16-4 弯曲与扭转组合变形	(223)
习题	(227)
第十七章 压杆稳定	
§ 17-1 压杆稳定与临界载荷的概念	(231)
§ 17-2 细长压杆的临界压力	(232)
§ 17-3 欧拉公式的适用范围 经验公式	(235)

§ 17-4 压杆的稳定条件与合理设计	(237)
习题	(239)
第十八章 疲劳与断裂	
§ 18-1 交变应力与疲劳失效	(242)
§ 18-2 交变应力的循环特征	(243)
§ 18-3 疲劳极限	(244)
§ 18-4 对称循环下构件的疲劳强度计算	(247)
习题	(249)
主要参考文献	(250)
习题参考答案	(251)
附录 型钢表	(260)

第一章 静力学公理与物体受力分析

静力学是研究物体或物体系统在力系作用下平衡规律的科学。所谓力系是指作用于同一物体或物体系统的一群力。所谓物体的平衡是指物体相对于惯性参考系处于静止或匀速直线运动的状态。通常可以将地球近似地看作为惯性参考体,物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态,这就是静力学中物体平衡的概念。本章将介绍刚体与力的概念及静力学公理,并阐述工程中常见的约束和约束反力的分析。最后介绍物体的受力分析及受力图,它是解决力学问题的重要环节。

§ 1-1 刚体和力的概念

1. 刚体的概念

所谓刚体是指这样的物体,在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变。这是一个理想化的力学模型。实际物体在力的作用下,都会产生程度不同的变形。但是,如果这些微小的变形,对研究物体的平衡问题不起主要作用,可以略去不计,这样可使问题的研究大为简化。

物体受到力作用后产生的效应表现在两个方面:物体的运动状态发生变化、物体产生变形。前者称为运动效应或外效应,后者称为变形效应或内效应。事实上,任何物体受力总要产生变形,但工程技术中的绝大多数零件和构件的变形一般是很微小的。这样,通过对实际物体进行抽象简化成为刚体模型。工程力学的前面章节中,静力学研究的物体只限于刚体,故又称刚体静力学,它是研究后面章节所涉及的变形体力学的基础。

2. 力的概念

(1) 力 物理学中已经建立的力的概念:力是物体间相互的机械作用,这种作用使物体的运动状态发生变化。

按照力的相互作用的范围来分,力可以分为集中力与分布力两类。集中力是指作用于物体某一点上的力。这是一个抽象出来的概念,任何两物体之间的相互作用不可能局限于无面积大小的一个点上,只不过当这种作用面积与物体尺寸相比很小时,可以近似认为作用在一个点上。分布力是指作用在构件整个或部分长度或面积上的力。沿长度分布的力其大小用符号 q 表示, q 叫做分布力的集度,如果力的分布是均匀的,那就叫做均布力。

实践表明,力对物体的效应取决于三个要素:力的大小、力的方向及力的作用点。我们可以用一个矢量来表示

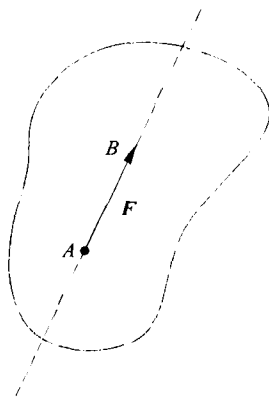


图 1-1

力的三个要素,如图 1-1 所示。在本书中,用黑体大写字母 F 表示力矢量,用普通字母 F 表示力的大小,在书写中,通常在大写字母上加箭头作为力的矢量符号,如 $\vec{F}$ 。在国际单位制中,力的单位用牛顿,简写牛(N);或千牛顿,简写千牛(kN)。

(2) 力系 作用在物体上的一组力,称为力系。一个力是一种最简单的力系。在保持对刚体作用效果不变的前提下,用一个简单力系代替一个复杂力系,称为力系的简化。如果一个力与一个力系等效,则称此力为该力系的合力。求合力的过程称为力系的合成;该力系中各力称为其合力的分力或分量。

力系按照作用线在空间分布的不同形式可以分为下列几种:

汇交力系,即所有力的作用线汇交于同一点;

平行力系,即所有力的作用线都相互平行;

一般力系,即所有力的作用线既不汇交于同一点,又不相互平行。

按照各力作用线是否位于同一平面内,上述三种力系可再分为平面和空间两类,如平面一般力系、空间一般力系。

空间一般力系是力系中最复杂、最普遍、最一般的形式,其他各种力系都可看成是它的一种特殊情况。

§ 1-2 静力学公理

公理是人们在生活与生产中长期观察与实践所总结出的结论,可以认为它是真理而不需要证明,在一定范围内它正确反映了事物最基本、最普遍的客观规律。静力学的公理如下:

公理 1 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力可以合成一个合力,合力的作用点也在该点,大小和方向由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定,即合力矢等于两分力矢的矢量和。如图 1-2(a)所示。

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

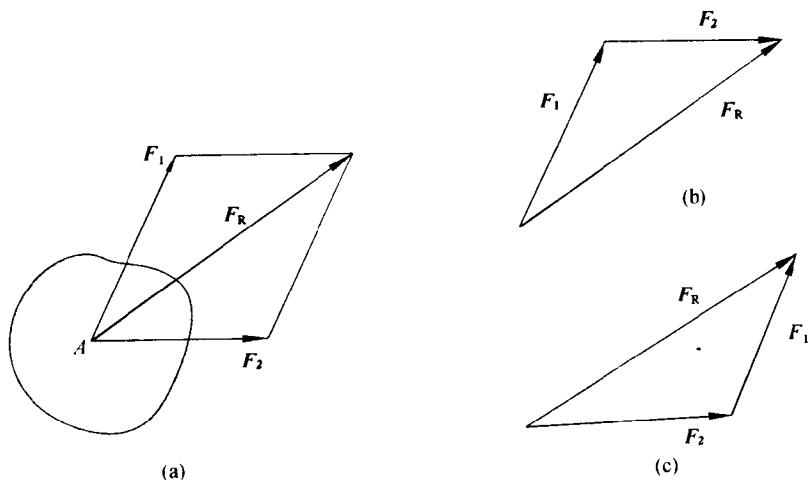


图 1-2

此性质称为力的平行四边形法则,它表明力的合成符合矢量求和规则。另外,为了简单,可以用力平行四边形的一半来表示这一合成过程,如图 1-2(b)、(c)所示,即依次将 F_1 和 F_2 首尾相接,最后,三角形的封闭边即为此二力的合力 F_R 。这称为力的三角形法则。力三角形法则与绘制此二力的次序无关。注意这里的各力均应按比例画出。

力的平行四边形法则是研究力系简化的重要依据。

公理 2 两力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力,使刚体保持平衡状态的充要条件是:这两个力的大小相等,方向相反,且作用在同一直线上,简称等值、反向、共线。

只受两个力作用并处于平衡的物体称为二力体(或二力杆),这是工程实际中常见的基本构件之一。根据二力平衡条件,能立即确定:这两个力的方位必定沿着两力作用点的连线,如图 1-3 所示。

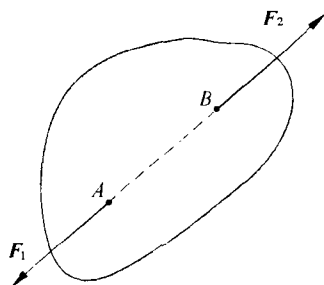


图 1-3

公理 3 加减平衡力系公理

在给定力系上增加或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。这个公理是研究力系等效变换的重要依据。

根据上述公理可以导出下列推论:

推论 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用效应。如图 1-4 所示。

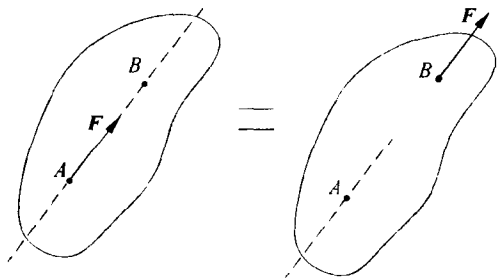


图 1-4

由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效应的要素,它已为作用线所代替。因此,作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。但此结论不适用于变形体。对于变形体,力的作用效果与作用点密切相关。

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力必在同

一平面内,且第三个力的作用线必通过汇交点。

证明:如图 1-5 所示,在刚体的 A 、 B 、 C 三点上,分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形法则,得合力 F 。则力 F_3 应与 F 平衡。由于两个力平衡必需共线,所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面,且通过力 F_1 与 F_2 的交点 O 。

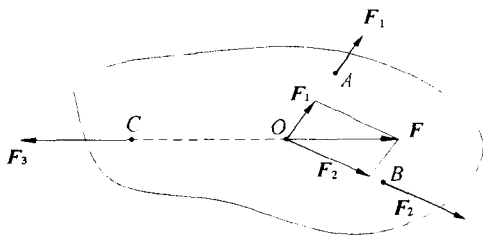


图 1-5

公理 4 作用和反作用公理

两物体间存在作用力与反作用力,两力的大小相等、方向相反,分别作用在两个物体上。此公理是研究两个或两个以上物体系统平衡的基础。

注意:作用与反作用力虽等值、反向、共线,但并不构成平衡,因为此二力分别作用在两个物体上。这是与二力平衡公理的本质区别之处。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡,如将此变形体刚化为刚体,则其平衡状态不变。

刚化原理建立了刚体与变形体平衡条件的联系,提供了用刚体模型研究变形体平衡的依据。

上述公理中,公理 2、3 只适用于刚体。公理 5 则有如下特点:如绳子是变形体,若在一对拉力作用下处于平衡,则将绳子刚化为刚性杆时,它仍然是平衡的。就是说,能使变形体平衡的力系也必然能使刚体平衡;反之则不然,即一对压力作用可使刚性杆平衡,但却不能使绳子平衡。由此可知,刚体上力系的平衡条件只是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。

§ 1-3 约束与约束反力

如果物体在空间的位置不受任何限制,则称为自由体。例如飞行的飞机、炮弹和火箭等。工程中的大多数物体,往往受到一定限制而使其某些运动不能实现,这样的物体称为非自由体。例如钢轨上行驶的火车、安装在轴承中的转轴等等,都是非自由体。限制物体自由运动的条件称为约束。这些限制条件总是由被约束物体周围的其他物体构成的。为了方便起见,构成约束的物体也统称为约束。在上述例子中,钢轨是对火车的约束,轴承是对转轴的约束。约束对非自由体的作用力就称为约束反作用力,简称约束反力或反力,亦称约束力。由约束反力的性质可知,约束反力阻碍物体的运动,其方向必与物体的运动方向相反。

与约束反力相对应,凡能主动引起物体运动或使物体有运动趋势的力,称为主动力。例如结构的自重、风载等。在工程中,主动力有时又称为载荷。通常主动力是已知的,约束反力是未知的。

非自由体所受的力可分为两类:约束反力及主动力。对受约束的非自由体进行受力分析时,主要的工作多是分析约束反力。实际工程中的约束多种多样,甚至十分复杂,但经过简化,均可抽象成一些理想的约束模型。

下面介绍常见的约束和约束反力的性质。

1. 柔性体约束

将柔软的、不可伸长的约束物体称为柔性体约束,如绳索、链条、皮带等。如无特别说明,这类约束物的横截面尺寸及其重量一律不计。柔性体只能承受拉力,而不能抵抗压力和弯曲。当物体受到柔性体的约束时,柔性体只能限制物体沿柔性体伸长方向的运动。因此,柔性体对物体的约束反力,作用在接触点,方向沿着柔性体背离物体。如图 1-6 所示。

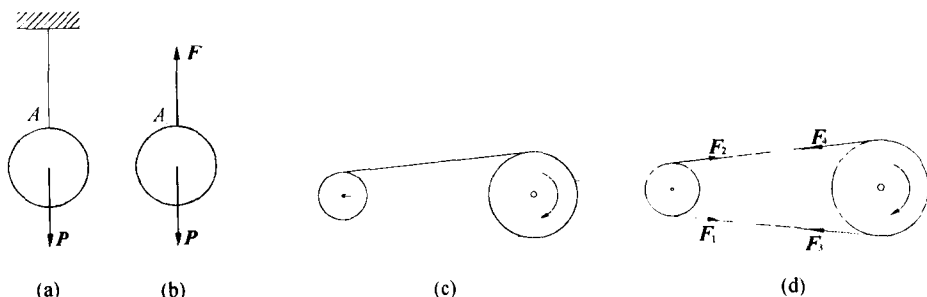


图 1-6

2. 光滑面约束

当两物体的接触表面为可忽略摩擦阻力的光滑平面或曲面时,一物体对另一物体的约束就是光滑面约束。这类约束只能限制被约束物体沿接触处的公法线并指向约束物体方向的相对运动,故其约束反力作用在接触点处,方向沿接触处的公法线并指向被约束的物体,这种约束反力称为法向反力。当接触面为平面或直线时,约束反力为均匀或非均匀分布的同向平行力系,常用其合力表示,如图 1-7 所示。

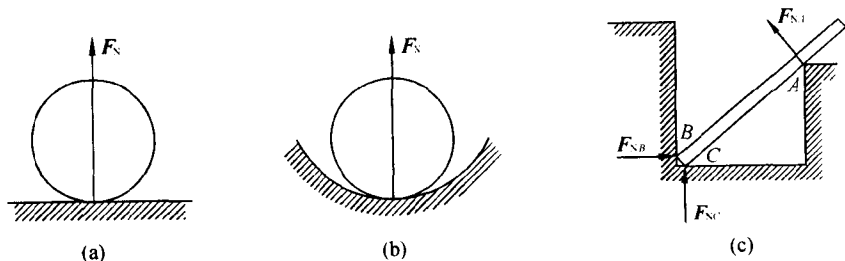


图 1-7

3. 光滑铰链约束

如果在所讨论的两个物体上各开一圆孔,中间穿过一圆柱形零件,则构成铰链约束,连接两个构件的圆柱形零件,称为销钉,如图 1-8 所示。这类约束只限制物体在受约束处的移动,而不限制物体绕该处的转动。物体在不同的主动力作用下,销钉可以和圆孔的任一位置接触。如果忽略摩擦,则铰链对物体的约束反力必通过铰链中心,但方向不确定,它取决于主动力的状态。通常将铰链的约束反力用两个正交分量表示,如图 1-9。这种使物体只能在垂直于铰链中心轴的平面内转动的铰链称为平面铰链,工程上大量使用的向心轴承即可简化为平面铰链。另一类铰链是物体的球形端部在碗状支座中转动,如图 1-10(a)所示,这时物体作空间运动,铰链称为球铰链。汽车变速箱的操纵杆就是用球形铰链支承的。球铰链的约束反力通过球链中心,方向不定,通常用三个正交分量表示,如图 1-10(b)所示。

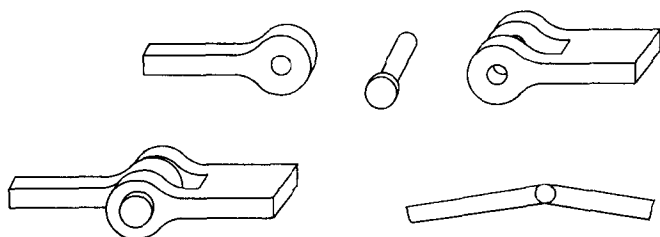


图 1-8



图 1-9

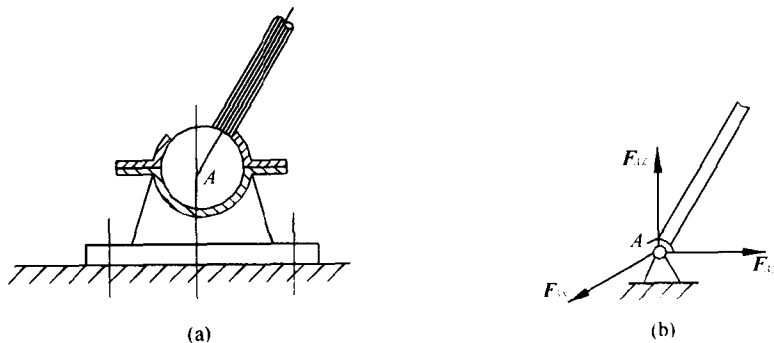


图 1-10

如果将上述用中间铰链相连的两构件之一固定在支承物上,则这种约束称为固定铰链支座,简称固定铰支,如图 1-11 所示,其约束反力一般也以同样方法画出。