

● 高等学校教材

高淑英 沈火明 主编



理论力学

LILUN LIXUE



版
社

高等学校教材

理 论 力 学

高淑英 沈火明 主编

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 4 年 • 北 京

内 容 简 介

本书是根据教育部“高等学校工科本科理论力学课程教学基本要求”和教育部工科力学教学指导委员会“面向二十一世纪工科力学课程教学改革的基本要求”编写而成的。全书共分三篇十三章,分别阐述了静力学、运动学、动力学的基本内容和理论,重点讲述揭示问题、分析问题、解决问题的思路和方法。本书适用课时数为 60~80 学时。

本书可作为高等院校工科各专业理论力学课程的教材,也可作为夜大、函授大学、职工大学相关专业的自学和函授教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/高淑英,沈火明主编. —北京:中国铁道出版社,2004.7

ISBN 7-113-05940-6

I. 理… II. ①高…②沈… III. 理论力学
IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 060418 号

书 名:理论力学

作 者:高淑英 沈火明 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:程东海

封面设计:蔡 涛

印 刷:北京市兴顺印刷厂

开 本:787×960 1/16 印张:13.5 字数:263 千

版 本:2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

书 号:ISBN 7-113-05940-6/O·144

定 价:19.80 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话(010)51873135 发行部电话(010)51873171

前 言

为了适应新世纪课程分级教学的需要和目前教学学时数的要求,我们在总结多年来教学实践的基础上,根据教育部“高等学校工科本科理论力学课程教学基本要求”和教育部工科力学教学指导委员会“面向二十一世纪工科力学课程教学改革的基本要求”,编写了这本理论力学中、少学时教材。本教材适用课时数为60~80学时。

在编写教材时编者力图在以下几个方面作一些改进:(1)提高起点,中学物理学中已讲述的内容,本书尽量不讲,以免重复。对基本概念的叙述力求简练和准确;(2)考虑到计算机应用的普及,注意使用矢量、矩阵等数学工具以适应计算机的使用要求;(3)针对工程中求解力学问题的实际要求,重视对运动过程的分析,而不仅限于分析特定瞬时或特定位置的运动;(4)注重联系工程实际,从不同的角度提出问题,揭示矛盾,培养读者发现问题、分析问题和解决问题的能力;(5)适当增加一些加深和扩展内容,作为本课程与现代科技的接口。

本书适用于高等工科院校四年制土建、机械、材料、航空航天、水利、动力等专业,也可供其他专业选用,或作为自学、函授教材。

本书由高淑英、沈火明主编。全书共分三篇十三章,引言由高淑英编写,第一、二、三、四、五、六、七、十三章由沈火明编写,第八、九、十、十一章由刘菲编写,第十二章由葛玉梅编写。全书由高淑英和沈火明统稿、定稿。

在本书编写过程中,西南交通大学一般力学教研室的教师给予了多方面的帮助,邱秉权教授对本书的编写提出了不少建议,张明教授对本书的大部分内容进行了审阅,提出了宝贵的意见。在此一并表示衷心感谢。

限于编者的水平和条件,缺点和错误在所难免,诚恳希望读者提出批评指正。

编 者

2004年7月

主要符号表

a	加速度	L_C	刚体对质心的动量矩
a_n	法向加速度	m	质量
a_t	切向加速度	M_z	对 z 轴的矩
a_a	绝对加速度	M	力偶矩, 主矩
a_r	相对加速度	$M_O(F)$	力 F 对点 O 的矩
a_e	牵连加速度	M_I	惯性力的主矩
a_C	科氏加速度	n	质点数目
A	面积	O	参考坐标系的原点
f	动摩擦因数	p	动量
f_s	静摩擦因数	P	重量, 功率
F	力	q	载荷集度, 广义坐标
F'_R	主矢	r	半径
F_s	静滑动摩擦力	r	矢径
F_N	法向约束力	r_O	点 O 的矢径
F_{le}	牵连惯性力	r_C	质心的矢径
F_{IC}	科氏惯性力	R	半径
F_I	惯性力	s	弧坐标
g	重力加速度	t	时间
h	高度	T	动能, 周期
i	x 轴的单位矢量	v	速度
I	冲量	v_a	绝对速度
j	y 轴的单位矢量	v_r	相对速度
J_z	刚体对 z 轴的转动惯量	v_e	牵连速度
J_{xy}	刚体对 x, y 轴的惯性积	v_C	质心速度
J_C	刚体对质心的转动惯量	V	势能, 体积
k	弹簧刚度系数	W	力的功
k	z 轴的单位矢量	x, y, z	直角坐标
l	长度	α	角加速度
L_O	刚体对点 O 的动量矩	β	角度坐标

δ	滚阻系数	ψ	角度坐标
δ	变分符号	ω	角速度
ρ	密度, 曲率半径	ω_a	绝对角速度
φ	角度坐标	ω_r	相对角速度
φ_i	摩擦角	ω_e	牵连角速度

目 录

引 言.....	1
----------	---

第一篇 静 力 学

第一章 静力学基本概念与物体的受力分析.....	2
第一节 静力学基本概念.....	2
第二节 静力学的公理体系.....	3
第三节 约束和约束反力.....	6
第四节 物体的受力分析和受力图.....	9
习 题	12
第二章 平面力系	15
第一节 平面汇交力系合成与平衡的几何法	15
第二节 平面汇交力系合成与平衡的解析法	16
第三节 力对点之矩的概念及计算	19
第四节 力偶及平面力偶系	20
第五节 平面任意力系向一点简化	22
第六节 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	25
习 题	29
第三章 平面力系平衡方程的应用	34
第一节 物体系统的平衡问题	34
第二节 平面简单桁架的内力计算	39
第三节 摩擦与考虑摩擦时的平衡问题	42
习 题	47
第四章 空间力系	52
第一节 空间汇交力系	52
第二节 力对点之矩和力对轴之矩	55
第三节 空间力偶理论	57
第四节 空间任意力系的简化	59
第五节 空间任意力系的平衡问题	62

第六节 重心·平行力系中心	66
习 题	72

第二篇 运 动 学

第五章 运动学基础	77
第一节 运动学基本概念	77
第二节 点的运动学	77
第三节 刚体的基本运动	87
习 题	94
第六章 点的合成运动	98
第一节 点的合成运动的概念	98
第二节 点的速度合成定理	99
第三节 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	103
习 题	105
第七章 刚体的平面运动	109
第一节 刚体平面运动的概念	109
第二节 平面图形内各点速度的求解	111
第三节 平面图形内各点加速度的求解	117
第四节 运动学综合应用	119
习 题	122

第三篇 动 力 学

第八章 质点的运动微分方程	127
第一节 质点动力学的基本方程	127
第二节 质点运动微分方程	128
第三节 质点动力学两类问题	129
习 题	132
第九章 动量定理	135
第一节 动量与冲量	135
第二节 动量定理	137
第三节 质心运动定理	142
习 题	145
第十章 动量矩定理	148

第一节	动量矩	148
第二节	动量矩定理	150
第三节	刚体绕定轴的转动微分方程	154
第四节	刚体对轴的转动惯量	155
第五节	质点系相对于质心的动量矩定理·刚体平面运动微分方程	161
习 题		162
第十一章	动能定理	165
第一节	力的功	165
第二节	动能的计算	168
第三节	动能定理	170
第四节	动力学普遍定理的综合应用	173
习 题		177
第十二章	达朗贝尔原理(动静法)	180
第一节	质点的达朗贝尔原理	180
第二节	质点系的达朗贝尔原理	181
第三节	刚体惯性力系的简化及达朗贝尔原理的应用	182
习 题		186
第十三章	虚位移原理	189
第一节	基本概念	189
第二节	虚位移原理及其应用	192
习 题		196
附录	英文索引	199
参考文献		203

引 言

力学是研究物体机械运动规律的一门学科,机械运动是指物体空间位形(固体的位移、转动、变形、气体和流体的流动等)随时间的变化。机械运动是物质运动中最简单的一种运动,但在物质的复杂运动或高级运动形式中,如物理变化、化学变化,甚至人类的思维活动等,也皆包含着机械运动的有关内容。

理论力学主要研究机械运动的最一般的和最基本的规律。平衡是机械运动的特殊形式,因此理论力学也研究物体的平衡规律。本书中一般不涉及机械运动中所指的固体的变形、气体和流体的流动的形态,这些问题将在材料力学、弹性力学、流体力学等学科中研究。

力学的发展是与人类的科学实践与生产实践密切相关。在前人长期研究的基础上,1687年,牛顿发表了《自然哲学的数学原理》,奠定了经典力学的科学基础。牛顿全面地总结与发展了前人长期研究成果,在该书中总结出了三大运动定理及万有引力定律。18世纪,由于机械工业的发展、数学分析工具的不断完善,和日益复杂的机械运动与受力分析,要求人们能提出新的力学方法。1788年,拉格朗日发表了名著《分析力学》,建立了约束系统动力学的理论与方法。20世纪中叶以后,由于机器人等复杂机械系统的应用、航空航天技术的发展、运动生物力学的出现以及计算机技术的发展,经典力学领域又出现了许多新的学科分支,如多体系统动力学、计算动力学等。为此经典力学并未失去其生命力,它在解决现代科技问题中仍起着十分重要的作用。

理论力学是现代工程技术的基础理论,它广泛应用于工程中。各种机械、设备和结构的设计,机器和结构振动的研究,航空航天技术等,都要以理论力学的理论为基础。理论力学课程对许多专业而言是一门基础性课程,它是认识自然的基础,解决工程实际问题的基础,也是一系列相关后续课程的基础。深入掌握理论力学的基本概念、理论及方法对提高未来的科技人员的素质具有十分重要的意义。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课,对逻辑思维的训练颇有益处,同时通过练习形式多样、变化多端的习题,可以培养灵活应用的能力。理论力学所研究的机械运动广泛存在于日常生活和工程实际中,故应善于联系实际,特别是作定性分析。

本书分三篇进行叙述,即静力学、运动学和动力学。静力学研究物体在力系作用下的平衡规律,同时也研究力系的等效和简化;运动学研究物体机械运动的几何性质,而不涉及引起物体运动的物理原因;动力学则研究物体机械运动与所受的力之间的关系。

第一篇 静力学

第一章 静力学基本概念 与物体的受力分析

静力学的基本概念、公理及物体的受力分析是研究静力学的基础。本章将阐述静力学中的一些基本概念和静力学公理,并介绍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画受力图的方法。

第一节 静力学基本概念

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(外效应)或使物体发生变形(内效应)。

力的作用效果取决于力的三要素,即大小、方向和作用点,一般用矢量 F 表示,如图 1-1 所示。在国际单位制中,力的单位为 N 或 kN。

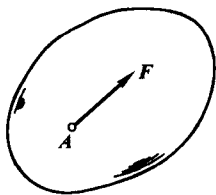


图 1-1

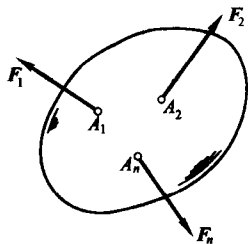


图 1-2

静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律的科学。力系的简化和力系的平衡条件及其应用是静力学中将要解决的两个基本问题。这里的物体是指抽象化的刚体,力系是指作用在物体上的一组力,如图 1-2 所示,一般情况下力系记为 $(F_1, F_2, \dots, F_n)$ 。静力学中物体的平衡是指运动的一种特殊状态,通常理解为物体相对惯性参考系保持静止或作匀速直线运动状态。作用于物体上正好使之保持平衡的力系称为平衡力系。

物体受力一般是通过物体直接或间接进行的。多数情况下接触处不是一个点,而是具有一定尺寸的面积,故无论是施力体还是受力体,其接触处所受的力都是作用在接

触面积上的分布力(或称为分布载荷)。分布力有线分布力、面分布力和体分布力 3 种, 它们的集度 q 的单位分别为 N/m 、 N/m^2 和 N/m^3 。集度为常数的分布力称为**匀布载荷**, 如图 1-3(a) 所示。集度不为常数的分布力称为**非匀布载荷**, 如图 1-3(b) 所示。当分布力作用面积很小时, 可以将分布力简化为作用于一点的合力, 称为**集中力**。如图 1-1 所示为作用于 A 点的一个集中力 F 。又例如, 在桥上静止的汽车, 轮胎与桥面接触面积较小时, 其轮胎作用在桥面上的力, 即可视为集中力; 而桥面施加在桥梁上的力则为分布力。

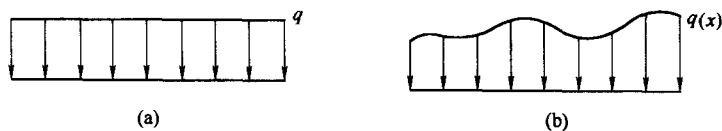


图 1-3

当所研究物体的运动范围远远超过它本身的几何尺度时, 它的形状对运动的影响极其微小, 可以将物体简化为只有质量, 而没有体积的几何点, 称为**质点**。一般情况下任何物体都可以看作是由许多质点组成的系统, 称为**质点系**。对于那些在运动中变形极小, 或虽有变形但不影响其整体运动的物体, 可以不考虑其变形而认为组成物体的各个质点之间的距离不变, 这种不变形的特殊质点系称为**刚体**。由许多刚体组成的系统称为**刚体系**。理论力学的研究对象仅限于离散的质点、质点系、刚体和刚体系。实际物体是多种多样的, 还可以抽象成其他物理模型, 如弹性体、液体、气体和变质量系统等, 但静力学的研究对象主要是刚体。

第二节 静力学的公理体系

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结, 又经过实践反复检验, 被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。静力学公理是人们关于力的基本性质的概括和总结, 是静力学全部理论的基础。

公理 1 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力, 使刚体处于平衡状态的充分与必要条件是: 这两个力大小相等, 方向相反, 且作用在同一直线上。如图 1-4 所示, 图中 F_1 和 F_2 有

$$F_1 = -F_2 \quad (1-1)$$

只受两个力作用而处于平衡的物体称为**二力体**。机械及建筑结构中的二力体又常称为**二力构件**。其受力特点是: 两个力的方向必在二力作用点的连线上。如图 1-5 所示三

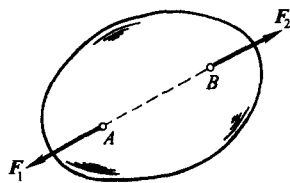


图 1-4

铰拱中的 BCD 部分, 当车辆不在 BCD 上且不计自重时, 它只可能通过 B 、 C 两点受力, 是一个二力构件。

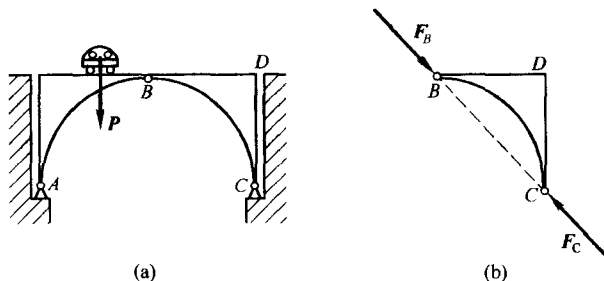


图 1-5

公理 2 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的已知力系中, 加上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。

公理 3 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 1 个合力, 合力仍作用在该点上, 合力的大小和方向以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示。而该两个力称为合力的分力。如图 1-6 所示, 用矢量可以表示为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-2)$$

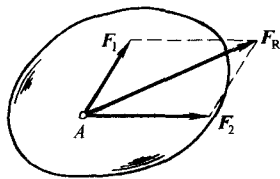


图 1-6

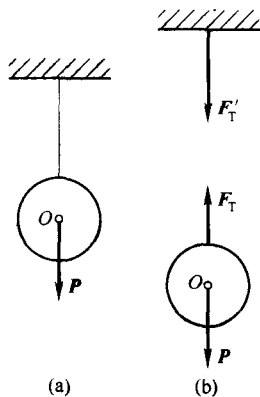


图 1-7

公理 4 作用与反作用定律

两物体间相互作用的力总是等值、反向、共线且分别作用在这两个物体上。如图 1-7 所示, $\mathbf{F}_T$ 和 $\mathbf{F}'_T$ 是作用力与反作用力, 且 $\mathbf{F}_T = -\mathbf{F}'_T$ 。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡, 如将此变形体置换为刚体, 则平衡状态仍保持

不变。

该原理提供了把变形体抽象为刚体模型的条件。例如,变形体绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡时,可将绳索刚化为刚体,其平衡状态仍保持不变,如图 1-8 所示。

要注意的是:刚体上力系的平衡条件是变形体的必要条件,而非充分条件。

上述公理反映了静力学中最基本的规律,如公理 1 是最简单的力系平衡条件,公理 2 是力系简化的重要理论依据,公理 3

是二力合成的方法,也是最简单力系的简化方法。从这些公理出发,通过数学演绎的方法,可以推导出许多新的结论。

推理 1 力的可传性

作用于刚体上的力,其作用点可以沿作用线移动而不改变它对该刚体的作用效应。

证明 如图 1-9(a)所示,设力 F 作用在 A 点,由公理 2 可在此力的作用线上任取一点 B ,并加上一个平衡力系(F_1, F_2),且使 $F = -F_1 = F_2$,如图 1-9(b)所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系,由公理 2 也可除去该力系,现剩下一个力 F_2 ,如图 1-9(c)所示,于是原来的力 F 可视为沿其作用线移至 B 点。

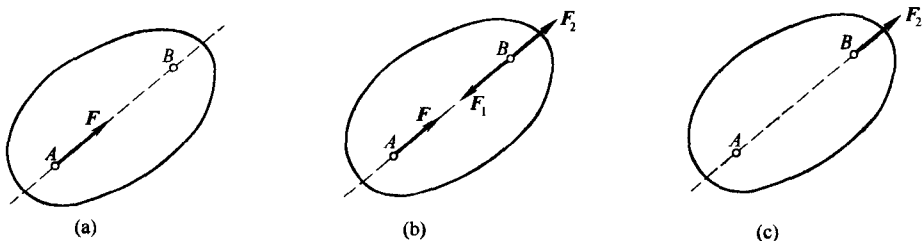


图 1-9

这个推论表明:作用于刚体上的力的三要素可改为大小、方向、作用线。沿作用线可任意滑动的矢量称为滑动矢量。因此,作用于刚体上的力是滑动矢量。

推理 2 三力平衡汇交定理

若刚体受 3 个力作用而处于平衡,且其中两个力的作用线汇交于一点,则第 3 个力的作用线也必定汇交于同一点,且共面。

证明 如图 1-10 所示,在刚体的 A, B, C 三点上分别作用 3 个相互平衡的力 F_1, F_2, F_3 。由力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,并有 $F'_1 = F_1, F'_2 = F_2$ 。再根据力的平行四边形法则,求得合力 F_{12} 。

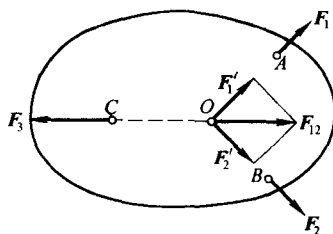


图 1-10

则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线, 故力 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 。用式子可以表示为

$$(F_1, F_2, F_3) = (F'_1, F'_2, F_3) = (F_{12}, F_3) = (0) \quad (1-3)$$

式中, (0) 表示力系平衡。

当刚体受不汇交的三力作用处于平衡时, 常利用这个关系来确定未知力的作用线方位。

第三节 约束和约束反力

可以在空间作任意运动的物体, 也即位移不受限制的物体, 称为自由体。例如, 飞行的飞机、火箭、航天飞机等都是自由体。但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, 在钢轨上行驶的火车、安装在轴承中的转轴等都是非自由体。凡是限制某一物体运动的周围物体被称为约束。例如钢轨对火车, 轴承对转轴等, 都是约束。

约束施加于被约束物体上的力称为约束反力, 简称约束力或反力。约束反力的方向总是与约束所能阻止的物体运动的方向相反。约束反力以外的力均称为主动力, 例如重力、风力、水压力、电磁力等均属于主动力。在一般情况下, 约束反力是由主动力引起的, 所以它是一种被动力。

工程中的约束类型很多, 现介绍几种常见的约束类型, 并分析其约束反力的特点。

1. 柔 索

工程上常用的绳索、胶带和链条等所形成的约束, 称为柔索。这类约束的特点是只能承受拉力, 而不能抵抗压力和弯曲。当物体受到柔索时, 柔索只能限制物体沿柔索伸长方向的运动。因此, 柔索的约束反力的方向一定沿着柔索, 且只能是拉力。图 1-11 所示为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力是沿绳索的拉力 F_A 、 F_B 。同理, 可以确定在机械的带传动中胶带绕过轮子并拉紧时, 其直线段作用于带轮的力只能沿轮缘的切线方向且背离切点, 如图 1-12 所示。

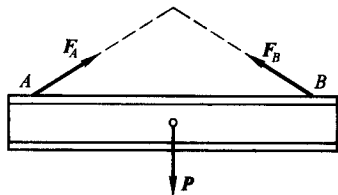


图 1-11

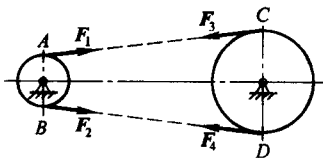


图 1-12

2. 光滑面约束

如图 1-13、图 1-14 所示为光滑面约束的几个例子。图 1-13 为支持物体的固

定面,图 1-14 为啮合齿轮的齿面。它们均不考虑摩擦。

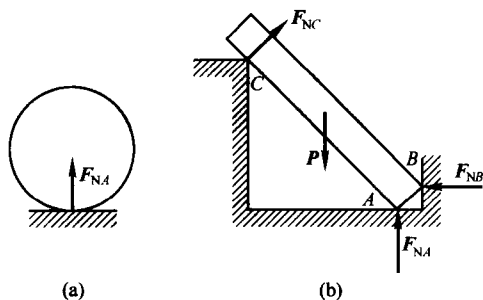


图 1-13

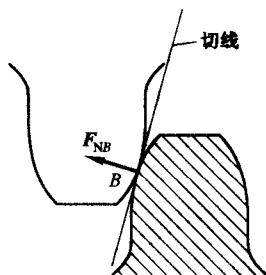


图 1-14

这类约束对被约束物体在接触点切面内任一方向的运动不加阻碍,接触面也不限制物体沿接触点的公法线方向脱离接触,但不允许物体沿该方向进入接触面。因而,光滑面的约束反力必通过接触点,方向沿着接触面在该点的公法线,指向被约束物体。在工程实践中,物体接触面之间总存在着或大或小的摩擦力。但若摩擦力远小于物体所受其它各力而可以略去时,就可以将接触面简化为光滑面,故这是一种理想模型。这种约束反力通常用 F_N 来表示,如图 1-13 中的 F_{NA} 、 F_{NB} 、 F_{NC} 和图 1-14 中的 F_{NB} 等。

3. 光滑的圆柱形铰链

如图 1-15(a) 所示,物体 A 上的圆柱形孔套在属于另一物体 B 的圆柱形销子 C 上,物体 A 的运动受到了销子的限制,就构成了圆柱形铰链约束。若略去摩擦力,则物体 A 与销子 C 实际上是两光滑圆柱面相接触。按照光滑面约束的特点,销子 C 作用于物体 A 的反力 F_N 应沿圆柱面在接触点的公法线,即反力 F_N 在垂直于销子轴线的横截面内,沿着通过 K 点的半径方向。但单从约束的构造无法预先确定接触点 K 的位置,因而反力 F_N 的方向也不能预先确定。因此,在受力分析时,圆柱形铰链的反力通常表示为两个正交分力 F_x 、 F_y ,如图 1-15(b) 所示。

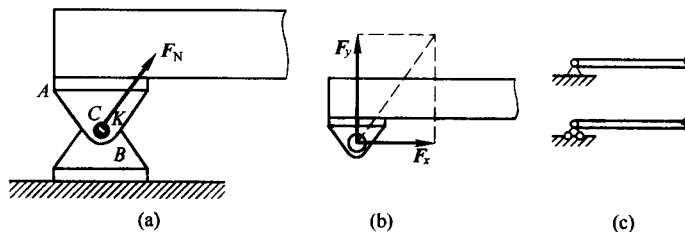


图 1-15

如果利用铰链将物体与另一固定部分(如梁与桥墩)相连接,如图 1-15 所示,则构成固定铰链支座,图 1-15(c) 为其简图的两种形式。曲柄滑块机构的曲柄 OA 用圆柱

销钉 O 与机座相连接, O 处成为固定铰链支座, 如图 1-16 所示。如果用铰链将两个物体连接起来, 通常称为铰链连接, 这种铰链称为中间铰链。图 1-16 中 A 和 B 处都是铰链连接。

机械中常见的向心轴承实际上也构成圆柱形铰链约束, 如图 1-17 所示。可以断定轴承作用于轴颈的反力 F_N 在垂直于轴线的横截面内, 但不能预先确定其方向, 可以用正交分力 F_x 、 F_y 来表示轴承反力。

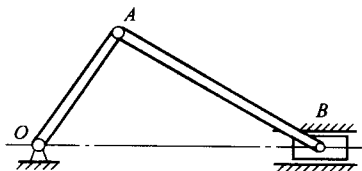


图 1-16

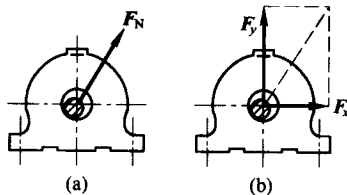


图 1-17

4. 光滑的球形铰链

物体 A 的球形部分嵌入物体 B 的球形窝内, 就构成了球形铰链约束, 如图 1-18 (a) 所示。汽车变速箱的操纵杆就是用球形铰链支承的。若略去摩擦, 按照光滑面约束反力的特点, 物体 A 受到的约束反力 F_N 必通过球心, 但它在空间的方位不能预先确定。通常, 球形铰链的反力可表示为正交的 3 个分力 F_x 、 F_y 、 F_z , 如图 1-18 (b) 所示。

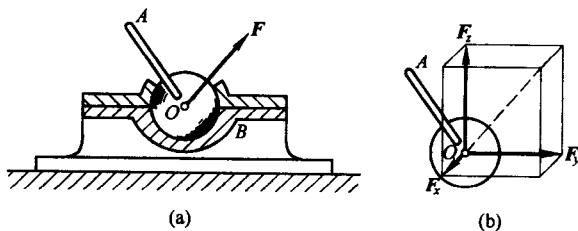


图 1-18

从上述可见, 这类约束只限制物体在受约束处的移动, 而不限制物体绕铰链的转动。

5. 辊轴铰链支座

在铰链支座与支承面之间装上辊轴, 就成为辊轴铰链支座 (或称滑动铰链支座、可动铰链支座, 简称滑动支座), 如图 1-19 (a) 所示。如略去摩擦, 这种支座不限制物体沿支承面的运动, 而只阻止垂直于支承面方向的运动。因此, 辊轴铰链支座的反力 F_N 必垂直于支承面。图 1-19 (b) 和 (c) 是这种支座的简化表示法和支座反力 F_N 的表示。

6. 固定端约束

工程中还有一种常见的基本类型的约束, 称为固定端 (或插入端) 约束。如阳台的挑梁、房屋的雨篷和管道的支架等, 其端部的约束便是固定端约束。固定端约束的简图