

高职高专机械类专业系列丛书

工 程 力 学

主编 程宜康 主审 缪协兴

丛书主编 姜 左

东南大学出版社

高职高专机械类专业系列丛书

工 程 力 学

主 编	程宜康
副主编	李天珍
主 审	缪协兴

东南大学出版社

·南京·

内 容 提 要

本书是高职高专机械类专业系列丛书之一,内容分为三大部分:Ⅰ.静力学,包括静力学基础知识、平面力系、空间力系与重心;Ⅱ.运动学与动力学,包括点的运动、刚体运动学、机构运动学专题、动力学基础、动静法、动能定理;Ⅲ.材料力学,包括材料力学基础知识、轴向拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲、组合变形、压杆稳定、动载荷与交变应力。最后还介绍了计算机辅助工程分析(CAE)方法和实例解析。

本书是高等职业院校机械类专业的教材,同时也可作为工程专科、职工大学、业余大学机械类专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/程宜康主编. —南京:东南大学出版社,
2001.6

(高职高专机械类专业系列丛书)

ISBN 7-81050-672-2

Ⅰ.工... Ⅱ.程... 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(2001)第 040345 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 南京邮电学院印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:16.25 字数:406 千字

2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

印数:1~3000 册 本册定价:32.00 元

(全套总定价:276.00 元)

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话:025-3792327)

高职高专机械类专业系列丛书(第一辑)

编审委员会

主任委员 林萍华 易 红

副主任委员 (按姓氏笔划为序)

郑志祥 缪协兴

委 员 (按姓氏笔划为序)

王培羲 孙序泉 余瑞芬 严苏砬

陈家瑾 郑志祥 林萍华 袁雪枚

韩玉启 缪协兴

责任编辑 李 玉 朱经邦

编写委员会

主 编 姜 左

副主编 (按姓氏笔划为序)

丁加军 吕慧瑛 李江蛟 林朝平

程宜康

委 员 (按姓氏笔划为序)

丁加军 王伟麟 吕慧瑛 沈中城

李江蛟 吴永祥 陈雪芳 林朝平

姜 左 徐冉丹 陶亦亦 程宜康

魏宣燕

出版说明

科教兴国,教育先行。当前,高等教育正处在深化改革阶段,高等职业教育也迎来了新的迅猛发展时期。高等职业教育是在具有高中文化水平的基础上,为生产、建设、管理、服务等第一线培养高级实用型技术人才和管理人才的专门教育。根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》,各高职高专学校都对本校的教学计划、课程体系、教学内容作了相应的调整。根据突出应用性、实践性的原则重组了课程结构,教学内容上突出了基础理论教学以应用为目的,以必须、够用为度;专业课教学加强了针对性和实用性。因为高职教育的人才培养目标和规格不同于普通高等教育,因而其教材应具有高职教育的基本特点。目前高等职业教育的教材建设已经成为一个亟待解决的共性问题。在东南大学出版社的支持下,苏州职业大学、常熟高等专科学校、常州工学院、南京工业职业技术学院等学校中的一批有扎实理论基础和丰富实践经验的教师,怀着强烈的责任感和极大的热情编写了一批相应的配套教材,他们具有较强的教学改革意识,决心为高职高专事业的发展作出一些贡献。

本丛书由东南大学博士生导师林萍华教授、博士生导师易红教授担任主审。

这批教材将分期分批出版,第一辑出版的教材有:

- 机械工程基础
- 机械制造技术
- 机械设计
- 现代质量管理概论
- 现代制造技术
- 机械设备控制技术
 - (1)机械设备液压气动控制技术
 - (2)数控技术
- 测试技术
- 工程力学
- 工程数学
- 机械制图

限于水平和经验,加之时间匆促,这批教材还会有不足之处,诚望使用本教材的教师和学生能积极提出批评和建议,以便再版时改进。

高职高专机械类专业系列丛书 编委会

2000年8月

前 言

本教材是高职高专机械类专业系列教材之一。本书编写的指导思想是以培养现代机械制造业中高等技术应用性人才为基本目的,努力使教材体现着重培养学生应用力学理论、力学方法,解决工程实际问题能力的教学要求,并使工程力学这一传统课程反映现代制造业中以计算机技术为基础的力学新方法。

编写本书时,编者参考了原国家教委制定的《高职高专工程力学教育基本要求》,并结合编者近年来在机械专业教学改革实践中对工程力学课程的教学经验,对传统工程力学教材的结构体系和内容体系进行了调整和增减。本书的主要特点有:

(1) 突出对机械专业学生力学能力的训练,注重力学方法的工程实践能力培养,包括对机械工程实际问题的力学建模能力实例训练;机械装置的静力学、运动学,材料强度设计的实例解析训练等。实例训练的形式可以采用学生个别完成或小组完成,使学生学会全面考虑问题和与他人合作。

(2) 紧密结合机械专业的后续课程和实践环节(机械原理、机械零件、课程设计、毕业设计等)对力学方法、力学计算能力的要求。

(3) 参考发达国家同类高等教育中机械专业课程体系与教学要求,增加现代制造业中计算机辅助工程分析(CAE)的力学新方法。教学要求以方法的应用为主,使学生在进行机械设计中具备使用计算机程序对简单力学问题进行计算与分析的初步能力。

本书由苏州职业大学程宜康任主编,负责编写第1、2、3、4、5、6、7、8、9、18章,彭城职业大学李天珍任副主编,编写第10、11、12、13、14、15、16、17章,朱彤老师为第18章提供了有限元计算实例,吴倩老师为第2、3章提供了部分习题,并提供了力学能力训练的实例。

本书的教学时数为90~100学时,使用者可根据教学要求作适当调整。

限于编者水平,书中有错误与不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2001年5月

目 录

I 静力学

1 静力学基础知识	2
1.1 静力学基本概念	2
1.2 静力学公理	2
1.3 约束与约束反力	5
1.4 受力分析与受力图	8
1.5 力在坐标轴上的投影、合力投影定理	10
1.6 力对点之矩、合力矩定理	11
1.7 力偶及其性质	13
1.8 力作用线平移定理	14
小结	15
习题	16
静力学建模实例训练(平面)	18
2 平面力系	19
2.1 平面任意力系的简化	19
2.2 平面任意力系的平衡	21
2.3 物体系统的平衡问题	27
2.4 具有摩擦的平衡问题	29
2.5 静定与静不定的概念	32
小结	33
习题	34
3 空间力系 重心	40
3.1 空间力沿坐标轴的分解与投影	40
3.2 力对轴之矩	41
3.3 空间力系的平衡	42
3.4 物体重心	46
小结	48
习题	49
静力学建模与静力学计算实例训练(平面与空间)	51

II 运动学与动力学

4 点的运动	53
4.1 点的直线运动	53
4.2 点的平面曲线运动	55
4.3 矢径法	60
小结	61
习题	62
5 刚体运动学	64
5.1 引言	64
5.2 刚体的平行移动	65
5.3 刚体的定轴转动	66
5.4 刚体平面运动	70
小结	77
习题	78
6 机构运动学专题	82
6.1 引言	82
6.2 点的合成运动	83
6.3 行星轮系	89
小结	90
习题	91
机械装置(机构)实例训练(力学建模与运动学计算)	94
7 动力学基础	95
7.1 质点运动微分方程	95
7.2 刚体定轴转动动力学基本方程	97
7.3 转动惯量	100
小结	102
习题	103
8 动静法	105
8.1 惯性力与动静法	105
8.2 刚体惯性力系及动静法应用	107
小结	110
习题	110
9 动能定理	113
9.1 力的功	113

9.2 质点的动能定理	115
9.3 质点系动能定理	117
9.4 功率、功率方程、机械效率	119
小结	120
习题	120

III 材料力学

10 材料力学基础知识	124
10.1 变形固体及基本假设	124
10.2 外力和截面法、内力和应力的概念	125
10.3 杆件变形的基本形式	127
小结	129
习题	129
11 轴向拉伸与压缩	130
11.1 轴向拉伸和压缩时横截面上的内力和应力	130
11.2 轴向拉伸和压缩时斜截面上的应力	132
11.3 拉(压)杆的变形及虎克定律	133
11.4 拉伸和压缩时材料的力学性能	135
11.5 许用应力和安全系数	139
11.6 拉伸和压缩时的强度计算	140
11.7 拉压静不定问题	142
11.8 应力集中概念	145
11.9 变形能概念	145
小结	146
习题	147
12 剪切	150
12.1 剪切的概念和实用计算	150
12.2 挤压的概念和实用计算	152
12.3 剪切的应力-应变关系	154
小结	155
习题	156
13 扭转	157
13.1 扭转的概念	157
13.2 扭转时的内力——扭矩、扭矩图	157
13.3 圆轴扭转时横截面上的应力及强度计算	159

13.4	圆轴扭转时的变形及刚度计算	162
13.5	扭转静不定问题	164
13.6	截面图形几何性质	165
	小结	168
	习题	169
14	弯曲	172
14.1	工程中的弯曲问题与梁弯曲力学模型建立	172
14.2	梁的内力——剪力 F_Q 和弯矩 M 及微分关系	174
14.3	内力方程、内力图	176
14.4	纯弯曲时梁横截面上的正应力及强度计算	180
14.5	梁弯曲时的剪应力及强度计算	185
14.6	提高梁抗弯强度的途径	187
14.7	梁的弯曲变形	189
	小结	196
	习题	197
15	组合变形	201
15.1	强度理论简介	201
15.2	组合变形的概念	207
15.3	拉(压)弯组合变形	207
15.4	弯扭组合变形	209
	小结	211
	习题	212
	机械零构件设计的力学计算实例训练	214
16	压杆稳定	216
16.1	压杆稳定的概念	216
16.2	细长杆的临界压力、欧拉公式	216
16.3	欧拉公式的适用范围、临界应力总图	219
16.4	压杆的稳定校核	221
16.5	提高压杆稳定性的措施	222
	小结	223
	习题	224
17	动载荷与交变应力	226
17.1	动载荷	226
17.2	交变应力	228
	小结	233

习题	233
18 计算机辅助工程分析(CAE)	236
18.1 工程分析的有限元法基础	236
18.2 有限元计算过程	240
18.3 机械 CAD/CAM/CAE 集成系统软件 UG 简介和有限元实例	242
有限元静力分析实例训练	247
参考文献	248

I 静力学

人们在长期的生活和工程实践中发现,物体在力的作用下,既要发生机械运动状态的变化(即物体在空间的几何位置随时间的改变),又要产生形状的改变,前者称为力作用的外效应,后者称为力作用的内效应。

平衡是机械运动的一种特殊形式,是指物体相对于地球处于静止或匀速直线运动状态。平衡总是相对的,工程意义上的平衡则是指相对地面或相对固结于地面的其它物体。受力作用而平衡的物体,必须满足一定的条件,即作用于物体上的所有力(称为力系)应满足平衡条件。

静力学主要研究物体在力作用下的平衡问题。

工程实际问题中,物体的受力情况通常比较复杂,必须把复杂的力系进行简化,要将实际物体简化成可以计算的力学模型,由此建立相应的平衡条件。因此,静力学要研究两个问题:

- (1) 力系的简化和力学模型的建立;
- (2) 力系的平衡条件及其应用。

静力学理论在工程上有着广泛的应用。在机械工程中许多机器零件、物件在工作时处于平衡状态或近似看作平衡状态,要合理设计机械零件和物件的形状、尺寸,需首先运用静力学知识对零、物件进行受力分析,并根据平衡条件求出这些力,再根据材料力学知识进行相应的设计。静力学知识在建筑、水利工程中应用极其广泛。如移动式吊车起吊重物时,需根据平衡条件确定起吊重量(即质量)、平衡重及几何尺寸的相互关系,以确保不致翻倒;设计屋架时,要将所受重力、风雪压力等加以简化,再根据平衡条件求屋架各杆的受力,确定其尺寸。可以说,工程中只要有受力分析,就一定会用到静力学知识。

本章将介绍静力学的一些基本概念和公理,物体的受力和受力图;同时还将介绍力的投影计算、力矩计算和力偶的概念。

1.1 静力学基本概念

1.1.1 力的概念

力是物体之间相互的机械作用。力是具体的,也是抽象的,一个物体原有的机械运动状态发生变化,是因为它受到了其它物体的机械作用,这种作用被抽象为力。

力的大小、方向、作用点,通常被称作力的三要素,见图 1-1。其中任一要素改变时,都将改变力的作用效应。

力是矢量,几何上用一有向线段表示,如图 1-1。有向线段的方位角和指向表示力的方向;线段的长(按比例)表示力的大小,反映物体间机械作用的强度;有向线段的起点或终点表示力的作用点;与力矢重合的直线称力的作用线。

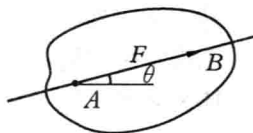


图 1-1

力的单位采用国际单位制,以牛[顿](N)或千牛[顿](kN)表示,1 千牛 = 1000 牛。

力的书写在印刷体中用黑体字母,如 F ,手写时可用带上标箭头的非黑体字母,如 $\vec{F}$ 。力的大小(亦称模)用非黑体字母表示。

作用在物体上的一群力称作力系,如果一个力系作用于物体而不改变物体的原有运动状态,则称该力系为平衡力系。如果两个力系对物体的作用效应完全相同,这两个力系互为等效力系。当一个力系与一个力的作用效应完全相同时,这一个力称作该力系的合力,而该力系中的每一个力称作合力的分力。

1.1.2 刚体的概念

任何物体受力作用后,会产生动态改变的外效应,以及形态改变的内效应。物体受力作用可以不改变外效应(即处于平衡状态),但是,内效应(变形)一定存在,而无论这种效应是多么的小。我们在研究物体平衡规律时,可以忽略物体的变形,也就是说可以认为受力不变形。我们把受力不变形的物体抽象成为刚体,这是理想化了的力学模型。如果研究的问题必须考虑变形,那将是本课程中材料力学部分所研究的问题。

1.2 静力学公理

公理是人类在长期实践中被验证为正确的结论,它无需任何其它原理证明,已为大家所公认。静力学的全部理论,都是建立在下面的五个静力学公理之上的。

1) 二力平衡公理

当一个刚体受两个力作用而平衡时,其充分且必要的条件是:这两个力大小相等,方向相反,作用线共线。

如图 1-2 所示,刚体上的 A 、 B 两点受力 F_1 、 F_2 作用,如果刚体平衡的话,则 F_1 、 F_2 的作用线一定过 AB 两点连线,并指向相反。数学上可以表达为

$$F_1 = -F_2$$

工程上将只受两个力作用而平衡的物体称作二力构件,如果物体是一不计自重的直杆,则称为二力杆。

2) 加减平衡力系公理

在刚体的原有力系上,加上或除去任何平衡力系,不会改变原力系对刚体的作用效应。

这一公理是非常显见的,因为一个平衡力系是不会改变刚体的原有状态的。依据这一公理,可以得出以下重要推论 1:

推论 1(力的可传性原理):作用于刚体的力可以沿其作用线移至本刚体内任一点,而不改变原力对刚体的作用效应。此原理可以用加减平衡力系公理证明,请读者自己试证。

上述原理是显而易见的,例如,人在小车后面的 A 点推车,与在小车的前面 B 点拉车,两者的效果是一样的,如图 1-3 所示。

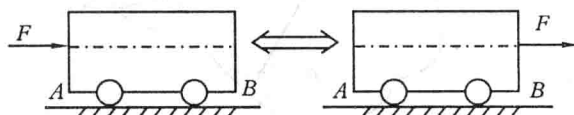


图 1-3

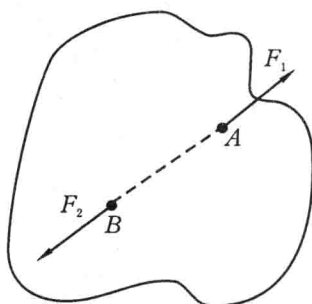


图 1-2

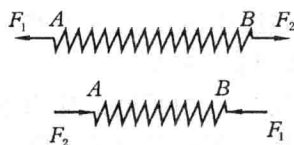


图 1-4

需要指出的是,力的可传性原理对变形体不适用。例如,在弹簧的两端作用两个大小相等、共线但指向背离的力时,弹簧受拉而伸长;如果将两力沿作用线分别移至另一力的作用点时,虽然弹簧仍处于平衡,但是弹簧却是受压而缩短。如图 1-4 所示。

3) 力的平行四边形公理

作用于刚体上同一点的两力的合力,其作用线、大小、指向,由这两个力的“矢”为边所组成的平行四边形的对角线唯一确定。

力的平行四边形公理是求两共点力合力(两力矢的和)的基本运算法则(图 1-5a),也是求其它矢量(速度、加速度)和的基本法则。求共点力 F_1 与 F_2 的和 R (合力)的数学表达式为

$$R = F_1 + F_2$$

求合力还可以通过画力三角形来求出(图 1-5b)。只要将两个被求和的力,大小按一定比例,方向不变地首尾相连,合力就是从第一个画的力的起点指向第二个画的力的终点的“矢”。合力大小为矢长(矢量的模),可按同一比例算得。当然,在作力三角形时, F_1 和 F_2 可不分先后,无论先画哪个力,都不会改变合力大小和方向(图 1-5c)。但是,力三角形中

每一力矢只具有大小、方向意义,而不表示力作用点和力作用线位置。

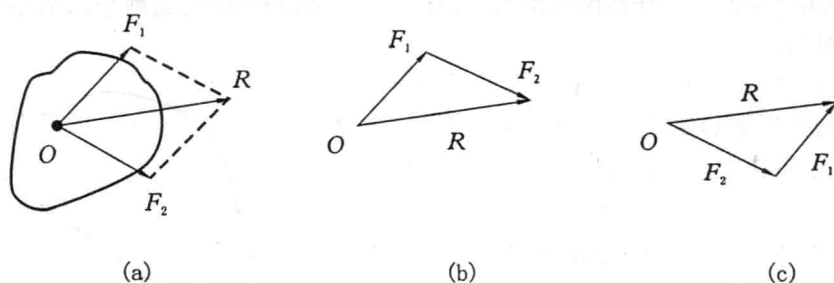


图 1-5

当平面内有汇交于一点的几个力时,我们可以通过两两合成的办法(图 1-6)得到与上式相同的求合力的数学表达式:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \sum \mathbf{F} \quad (1-1)$$

上式表示共点力系的合力等于力系中各力的矢量和。

依照力平行四边形公理,我们可以将一个力分解成作用于同一点的两个分力。由于对角线一定的平行四边形为无穷多,因此,力的分解不是唯一的。工程上常将力作正交分解,当两正交方向一定时,力的正交分解就是唯一的。

通过简单推导,还可以得到另一条重要推论,读者可自己推证:

推论 2(三力平衡汇交原理):刚体受三个力作用而平衡时,三力的作用线必汇交于一点,且处于同一平面内。

4) 作用与反作用公理

两物体间相互作用的力称为作用力和反作用力,并分别作用在两个物体上,它们大小相等,方向相反,作用线共线。

如图 1-7 所示,车床的车刀在加工工件时,车刀施加在工件上一个切削力 $\mathbf{P}$,同时工件必然会反作用于车刀一个反作用力 $\mathbf{P}'$, $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{P}'$ 一定是等值、反向、作用线共线。

作用力与反作用力没有平衡的概念,因为它们分别作用在两个物体上,它们同时产生、同时消失。这与二力平衡公理是完全不同的概念,二力平衡公理是指一个物体受两力作用而平衡的充要条件,有平衡概念。

5) 刚化公理

变形体在已知力系作用下平衡,如果将此变形体看作刚体,则其平衡状态不变。

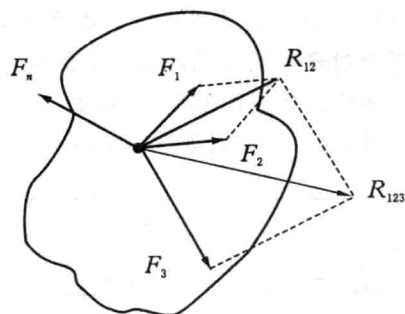


图 1-6

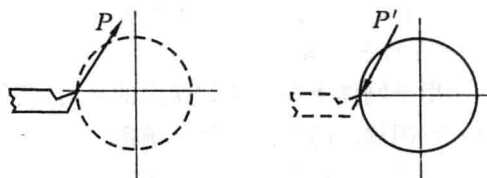


图 1-7

这一公理指出,可以利用刚体平衡条件来处理变形体的平衡问题。在材料力学中就是依据刚化公理,先按刚体处理平衡问题,再按变形体处理变形问题的。

1.3 约束与约束反力

在工程实际问题中,正确地分析物体的受力情况,合理地抽象成可以应用平衡条件求解的力学模型,是解决工程问题的关键。

分析物体的受力情况,也就是分析对物体有机械作用的其它物体。一类是使物体产生某种形式的运动或运动趋势的其它物体,它们对物体的作用力称作主动力。另一类是限制物体某种形式的运动或运动趋势的其它物体,这类物体称作约束,它们对物体的作用力称约束反力,简称约束力。比如,桥梁所受重力和车辆的作用力是主动力,而桥墩就是约束,它对桥梁的支承力就是约束反力;吊灯所受重力是主动力,吊绳则是约束,绳的张力就是约束力;转门的约束是铰链,等等。一般地,物体的约束是与其有接触作用的其它物体,判断某物体是否成为约束,主要看它是否有限制另一物体运动(或运动趋势)的作用。因此,分析主动力和约束力应从使物体产生运动和限制物体运动这两个角度来分析。

约束反力形式的确定取决于约束的性质,即约束所限制的运动形式。约束力的作用点在物体之间的接触点;约束力的方向总是与物体被限制的运动方向相反,约束力的大小则由平衡条件求出。

约束在实际情况中是复杂的,但是从约束是对物体运动的限制这一点出发,我们可以将工程中常见的约束归类,并且理想化。每种约束类型都有明确的特征,同时决定了相应的约束反力特征。下面是几种常见的约束类型。

1) 柔索约束

构成柔索约束的物体有不计自重的绳索、链条、传动皮带等。这一类物体的特点是只能受拉伸,不能受压缩和弯曲。柔索约束的约束特点是限制物体沿柔索伸长方向的运动,相应的约束反力则是沿柔索背离物体,作用在与物体的连接点或柔索的假想截割处。柔索约束反力常用符号 T 表示(图 1-8)。

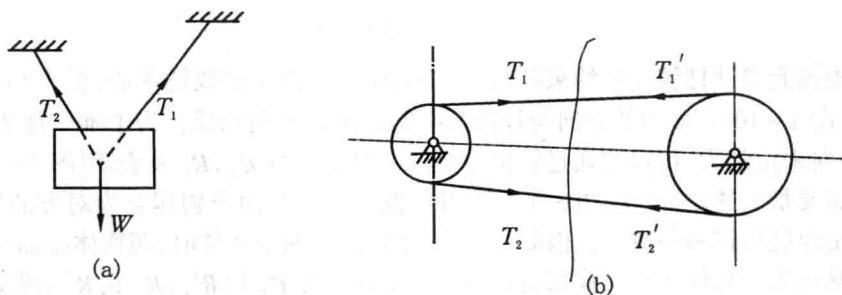


图 1-8

2) 光滑接触面约束

光滑接触面是指物体与约束之间的接触面是理想光滑的,这类约束的特点是不论接触表面形状怎样,只能承受法向压力,而不能限制被约束体离开接触表面。因此,光滑接触面约束的约束反力必定是在接触处的公法线上并指向物体。如图 1-9a 所示,斜面上一球靠

在光滑斜面上,并用一绳系住,斜面的约束反力 N 沿球与斜面接触公法线并指向球。确定光滑接触面约束反力的关键是确定约束体与被约束体接触点的公法线(图 1-9b),光滑接触面反力一般用字母 N 表示。

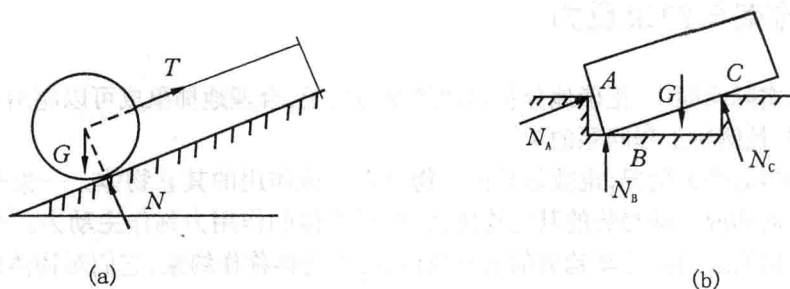


图 1-9

3) 光滑圆柱形铰链约束

工程中的光滑圆柱形铰链可以简化为如下模型,将两物体钻有同一直径的圆孔,再用圆柱形销钉插上(图 1-10a),销钉与物体上孔的接触认为是光滑的,不阻碍相对转动和沿销钉轴线的移动,但是限制两物体离开销钉的任一方向的移动,即两物体的相对移动。这种使物体只能相对绕销钉轴线转动而不能相对移动的约束称光滑圆柱形铰链约束,简称铰链约束(图 1-10b)。

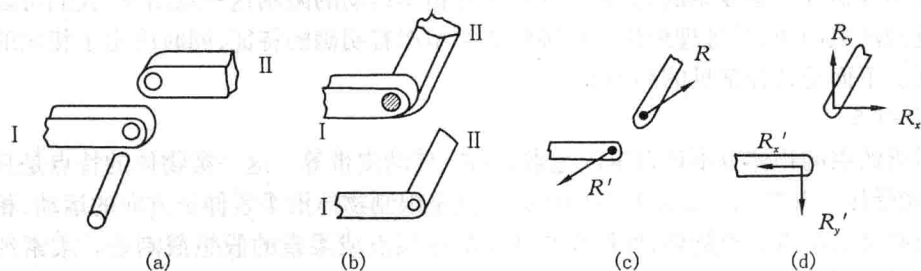


图 1-10

根据光滑圆柱铰链的约束特点,其约束反力应该是过铰链中心,但大小、方向未定的一个力(图 1-10c),该力的方向与铰链所限制的运动方向相反。为了唯一地表示这样一个大小、方向未定的力,可以用通过铰链中心的一对正交力 R_x 、 R_y 来表示(图 1-10d)。

需要指出的是,图 1-10a 所示光滑铰链约束中的两个物体互为对方的约束,这种相互约束是通过销钉来完成的。因此,当一个销钉连接两个物体时,两物体施加给对方的约束反力也就互为一对作用与反作用力,如图 1-10d 中的 R_x 和 R'_x , R_y 和 R'_y ,或 R 和 R' 。

光滑铰链约束在工程中是普遍存在的约束类型。如转动式门窗的铰链(合页),发动机的曲柄活塞机构(图 1-11)。

如果将铰链约束中的一个物体固定在支承物上,就构成了固定铰链支座(图 1-12a)。约束特点是物体可以绕支座转动,而不能发生垂直于铰链轴的任何方向的移动,约束反力是一个方向未定的力,可以用一对正交反力表示。如图 1-12b、c 所示。