

高等学校教材

工程力学

(静力学和材料力学)

G O N G C H E N G L I X U E

严圣平 主编

严圣平 巫静波 陈启东 钟卫平 沈晓明 编

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等

工程力学

(静力学和材料力学)

G O N G C H E N G L I X U E

严圣平 主编

严圣平 巫静波 陈启东 钟卫平 沈晓明 编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书根据教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会制定的《高等学校理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》编写而成,力求概念严谨、简明扼要、语言流畅易懂。与其他同类教材相比,本书的最大特点是通俗、易懂、实用。

本书内容分为两篇,共14章。第1篇为静力学,包括:静力学基本概念与物体受力分析、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、摩擦、空间力系。第2篇为材料力学,包括:材料力学概述、轴向拉伸与压缩、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析与强度理论、组合变形、压杆稳定。每章都配有思考题,以及覆盖面广、难易不等的习题。

本书可作为高等学校本科地矿、材料、安全、化工等专业工程力学课程的教材,也可作为成人高校相应专业的工程力学教材,还可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学. 静力学和材料力学 / 严圣平主编; 严圣平等编. --北京: 高等教育出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-04-039221-0

I. ①工… II. ①严… III. ①工程力学-高等学校-教材②静力学-高等学校-教材③材料力学-高等学校-教材 IV. ①TB12②O312③TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 317005 号

策划编辑 黄 强

责任编辑 黄 强

封面设计 李小璐

责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 潮河印业有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 20.75
字 数 370千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2013年12月第1版
印 次 2013年12月第1次印刷
定 价 31.40元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 39221-00

前 言

本书根据教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会制定的《高等学校理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》编写而成,适用于高等学校本科地矿、材料、安全、化工等专业中少学时的工程力学课程教学。所需课堂教学时数为60~70学时,另需实验教学时数6~10学时。

本书内容涵盖了理论力学的静力学部分以及材料力学的大部分,分为两篇共14章。第1篇为静力学,包括:静力学基本概念与物体受力分析、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、摩擦、空间力系5章。第2篇为材料力学,包括:材料力学概述、轴向拉伸与压缩、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析与强度理论、组合变形、压杆稳定9章。

为了便于学习,每章后都配有思考题,以及覆盖面广、难易不等的习题,书后给出了习题答案。

本书由严圣平任主编。巫静波负责静力学部分的统稿,严圣平负责材料力学部分的统稿。具体分工为:第1,2,3章由巫静波编写,第4章由陈启东编写,第5,8章由钟卫平编写,第6,7章由沈晓明编写,其余章节由严圣平编写。本书作者都是多年活跃在本科教学一线的教师。编写过程中力求概念严谨、简明扼要、语言流畅易懂。与其他同类教材相比,本书的最大特点是通俗、易懂、实用。

本书严格执行《量和单位》(GB 3100~3102-1993)系列国家标准及有关规定。书中所有插图均由严圣平精心绘制,力求清晰、规范、美观。

中国矿业大学董正筑教授仔细审阅了全稿,提出了许多精辟而中肯的意见。在本书的编写过程中还得到了其他许多同志的支持与帮助。在此一并表示感谢。本书还参考了国内外一些优秀教材,汲取了它们的许多长处,并选用了其中的部分例题和习题,在此对相关作者致谢。

限于作者水平,书中疏漏和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正,以便再版时改进和提高。

编 者

2013年11月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号
高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第 1 篇 静 力 学

第 1 章 静力学基本概念与物体受力分析	2
1.1 静力学基本概念	2
1.2 静力学公理	3
1.3 约束与约束力	5
1.4 物体的受力分析与受力图	9
思考题	14
习题	16
第 2 章 平面汇交力系与平面力偶系	18
2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	18
2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	20
2.3 平面力对点之矩的概念及计算	23
2.4 平面力偶	24
思考题	28
习题	29
第 3 章 平面任意力系	34
3.1 平面任意力系向作用面内一点的简化	34
3.2 平面任意力系的平衡条件与平衡方程	37
3.3 平面平行力系的平衡方程	41
3.4 物体系统的平衡·静定和超静定问题	43
3.5 平面静定桁架的内力分析	48
思考题	50
习题	52
第 4 章 摩擦	57
4.1 滑动摩擦	57
4.2 摩擦角与自锁现象	59
4.3 考虑摩擦时物体的平衡问题	61
4.4 滚动摩阻的概念	65
思考题	67

习题	69
第5章 空间力系	73
5.1 空间汇交力系	73
5.2 力对点之矩与力对轴之矩	75
5.3 空间力偶理论	79
5.4 空间力系的简化	80
5.5 空间力系的平衡条件与平衡方程	81
5.6 重心	86
思考题	90
习题	91

第2篇 材料力学

第6章 材料力学概述	97
6.1 材料力学的研究对象、内容和方法	97
6.2 变形固体及其基本假设	100
6.3 外力与内力	101
6.4 应力的概念	104
6.5 应变的概念	104
思考题	105
习题	106
第7章 轴向拉伸与压缩	107
7.1 轴向拉伸与压缩的概念	107
7.2 轴向拉压杆横截面上的内力	108
7.3 轴向拉压杆的应力	109
7.4 材料在拉伸与压缩时的力学性能	112
7.5 失效、许用应力与强度条件	119
7.6 轴向拉压杆的变形	121
7.7 简单拉压超静定问题	123
7.8 应力集中的概念	129
7.9 连接件的强度计算	130
思考题	134
习题	135
第8章 扭转	143
8.1 扭转的概念和实例	143
8.2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图	144

8.3 纯剪切	147
8.4 圆轴扭转时的应力	149
8.5 圆轴扭转时的变形	154
8.6 非圆截面轴扭转简介	157
思考题	158
习题	158
第9章 弯曲内力	162
9.1 弯曲的概念和实例	162
9.2 梁的计算简图	163
9.3 剪力和弯矩	165
9.4 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	168
9.5 载荷集度、剪力和弯矩间的关系	172
思考题	177
习题	178
第10章 弯曲应力	182
10.1 平面图形的几何性质	182
10.2 纯弯曲时梁横截面上的正应力	189
10.3 横力弯曲时梁横截面上的正应力	194
10.4 横力弯曲时梁横截面上的切应力	198
10.5 提高梁弯曲强度的措施	200
思考题	204
习题	206
第11章 弯曲变形	211
11.1 弯曲变形实例	211
11.2 梁挠曲线的近似微分方程	212
11.3 用积分法求弯曲变形	213
11.4 用叠加法求弯曲变形	218
11.5 简单超静定梁	223
11.6 提高弯曲刚度的一些措施	226
思考题	227
习题	228
第12章 应力状态分析与强度理论	233
12.1 应力状态的概念	233
12.2 平面应力状态分析	236
12.3 特殊三向应力状态下的极值应力	242

12.4	广义胡克定律	243
12.5	强度理论	246
	思考题	250
	习题	251
第13章	组合变形	255
13.1	组合变形的概念	255
13.2	轴向拉伸或压缩与弯曲的组合	256
13.3	扭转与弯曲的组合	260
13.4	斜弯曲	264
	思考题	267
	习题	268
第14章	压杆稳定	273
14.1	压杆稳定的概念	273
14.2	两端铰支细长压杆的临界压力	276
14.3	其他杆端约束条件下细长压杆的临界压力	278
14.4	欧拉公式的适用范围 经验公式	281
14.5	压杆的稳定性计算	285
14.6	提高压杆稳定性的措施	287
	思考题	288
	习题	289
附录	型钢表	294
	习题答案	308
	参考文献	320

第1篇 静力学

静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的科学。物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动。这是人们在日常生活和生产实践中最常见的一种运动形式。所谓物体的平衡,是指物体相对于惯性参考系(通常选地面)保持静止或作匀速直线运动。

若物体处于平衡状态,那么作用于物体上的一群力(称为力系)必须满足一定的条件,这些条件称为力系的平衡条件。使物体处于平衡时的力系称为平衡力系。研究物体的平衡问题,实际上就是研究作用于物体上的力系的平衡条件,并应用这些条件解决工程实际问题。

在静力学中,我们将研究以下三个问题:

1. 物体的受力分析

分析某个物体受哪些力的作用,以及每个力的作用位置和方向。

2. 力系的等效替换(或简化)

将作用于物体上的一个力系用另一个与它等效的力系来代替,这两个力系互为等效力系。如果用一个简单力系等效地替换一个复杂力系,则称为力系的简化。如果某力系与一个力等效,则此力称为该力系的合力,而该力系的各力称为此力的分力。

3. 建立各种力系的平衡条件

研究作用在物体上的各种力系所需满足的平衡条件。

工程中常见的力系,按其作用线是否共面,可以分为平面力系和空间力系两大类;又可以按其作用线的相互关系,分为共线力系、平行力系、汇交力系和任意力系。

力系的平衡条件在工程中有着十分重要的意义,是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。因此,静力学在工程中有着广泛的应用。

第 1 章 静力学基本概念与物体受力分析

本章将介绍静力学中的一些基本概念和几个公理,这些概念和公理是静力学的基础。最后介绍物体的受力分析和受力图。

1.1 静力学基本概念

1. 刚体的概念

所谓刚体,即在任何情况下永远不变形的物体。这一特征表现为刚体内任意两点之间的距离始终保持不变。

刚体是一种理想的力学模型。一个物体能否视为刚体,不仅取决于变形的大小,而且和问题本身的要求有关。

2. 力的概念

力的概念是人们在长期的生活和生产实践中从感性到理性逐步形成的。所谓力,是物体间的相互机械作用,这种作用使物体的运动状态和形状发生变化。

力使物体的运动状态发生变化的效应,叫做力的外效应,也叫运动效应。而力使物体发生变形的效应叫内效应,也叫变形效应。静力学只研究力的外效应,而材料力学将研究力的内效应。

实践表明,力对于物体的作用效应,取决于力的大小、方向和作用点,通常称为力的三要素。当这三个要素中任何一个改变时,力的作用效应也就改变。

既然一个力可由三个要素即大小、方向和作用点来表示,因此力具有矢量所具备的条件,可见力是矢量,且为定位矢量,可用一具有方向的线段来表示,如图 1.1 所示。线段的长度按一定比例尺表示力的大小,线段的方位和箭头的指向表示力的方向,线段的起点(或终点)表示力的作用点,而与线段重合的直线表示力的作用线。本书中,力的矢量用黑斜体字母例如 \boldsymbol{F} 表示,而力的大小则用普通斜体字母 F 表示。

力的量纲为 LMT^{-2} ,其中 L, M, T 分别表示基本物理量长度、质量和时间的量纲。力的常用单位为 N 或 kN 。

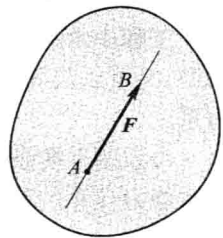


图 1.1

1.2 静力学公理

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,它们是静力学理论的基础。

公理1 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等、方向相反且作用于同一直线上(图1.2)。

这个公理揭示了作用于物体上最简单的力系平衡时,所必须满足的条件。对于刚体来说,这个条件是必要和充分的,但是对于变形体,仅为平衡的必要条件。

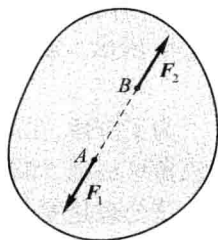


图 1.2

公理2 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系上加上或减去任何平衡力系,都不改变原力系对刚体的作用效应。

推理1 力的可传性原理

作用于刚体上的力可沿其作用线移至刚体内任意一点,并不改变它对于刚体的作用效应。

证明:在刚体上的点 A 作用力 F ,如图 1.3a 所示。根据加减平衡力系公理,可在力的作用线上任一点 B 加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = F_1 = -F_2$,如图 1.3b 所示。由于力 F 和 F_2 也是一个平衡力系,故可除去;这样就只剩下一个力 F_1 ,如图 1.3c 所示,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

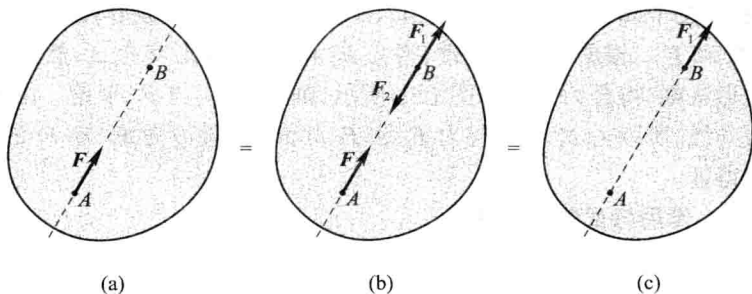


图 1.3

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,它已被作用线所代替。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。

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,可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点,合力的大小和方向,由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定。如图 1.4a 所示。或者说,合力为原两力的矢量和,即

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

为了方便,在用矢量加法求合力时,往往不必画出整个平行四边形,而采用力三角形法则,如图 1.4b,c 所示。

该公理是复杂力系简化的基础。

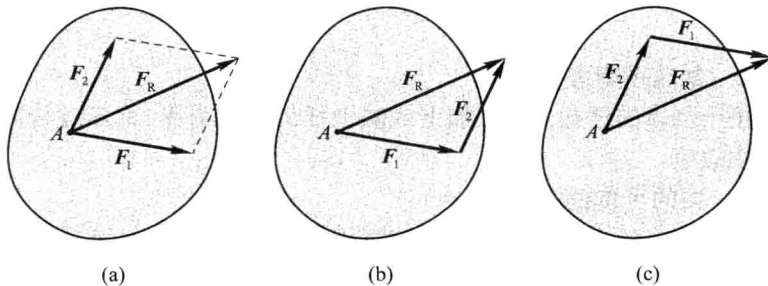


图 1.4

推理2 三力平衡汇交定理

当刚体受三个力作用而平衡时,若其中两个力的作用线相交于一点,则第三力的作用线必通过此交点,且三个力的作用线在同一平面内。

证明:如图 1.5a 所示,在刚体的 A_1, A_2, A_3 三点上,分别作用三个相互平衡的力 F_1, F_2 和 F_3 。根据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 A ,然后根据力的平行四边形法则,得合力 F_{12} ,如图 1.5b 所示,则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线,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 A ,于是定理得证。

公理4 作用与反作用定律

两物体间的相互作用力总是同时存在,且大小相等、方向相反、沿同一直线,分别作用在两个相互作用的物体上。若用 F 表示作用力, F' 表示反作用力,则

$$\mathbf{F} = -\mathbf{F}'$$

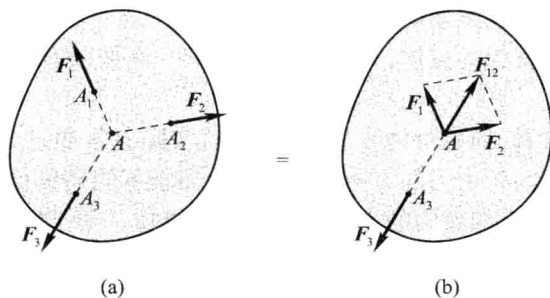


图 1.5

公理 4 是由牛顿提出的(牛顿第三定律),这个公理概括了自然界中物体间相互作用力的关系,表明一切力总是成对地出现的。根据这个公理,已知作用力则可知反作用力,它是分析物体受力时必须遵循的原则,为研究由一个物体过渡到多个物体组成的物体系统问题提供了基础。

公理 5 刚化原理

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

这个公理提供了把变形体看作刚体模型的条件。如图 1.6a 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化为刚体(图 1.6b),其平衡状态保持不变。反之就不一定成立。如刚体在两个等值反向的压力作用下平衡,若将它换成绳索就不能平衡了。

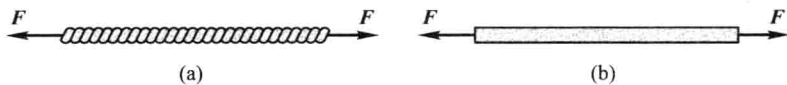


图 1.6

此公理说明,刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。在刚体静力学的基础上,考虑变形体的特性,可进一步研究变形体的平衡问题。

1.3 约束与约束力

有些物体,例如:放飞的气球、飞行的飞机、炮弹等,它们在空间的位移不受限制。位移不受限制的物体称为自由体。相反,有些物体在空间的位移却要受到一定的限制。如机车受铁轨的限制,只能沿轨道运动;重物由钢索吊住,不能

下落等。这种位移受到限制的物体称为非自由体。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束体,有时也称为约束。例如,铁轨对于机车,钢索对于重物,都是约束。

从力学角度来看,约束对物体位移的限制,实际上是通过力来实现的,这种力称为约束力,因此,约束力的方向必与该约束所能够阻碍的位移方向相反。应用这个准则,可以确定约束力的方向或作用线的方位。至于约束力的大小,在静力学中将由平衡条件求出。

下面将工程中常见的约束理想化,归纳为几种基本类型,并根据各种约束的特性分别说明其约束力的表示方法。

1. 柔性体约束

属于这类约束的有绳索、胶带、链条等,忽略刚性,不计重量,视为绝对柔软。这类约束的特点是只能承受拉力(图 1.7),限制物体沿着柔性体伸长方向的运动,而不能限制其他方向的运动。因此,柔性体对物体的约束力,作用在接触点,方向沿着柔性体的中心线,背离物体。通常用 F 或 F_T 表示这类约束力。

链条或胶带也都只能承受拉力。当其绕在轮子上,对轮子的约束力沿轮缘的切线方向(图 1.8)。

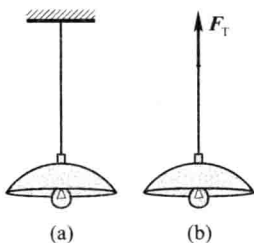


图 1.7

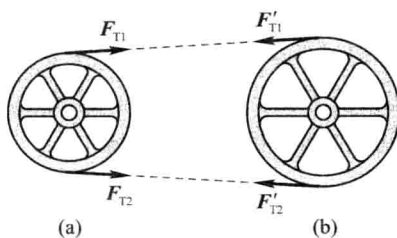


图 1.8

2. 光滑接触面约束

这类约束忽略摩擦,接触表面视为理想光滑,其特点是不论支承接触表面的形状如何,都不能限制物体沿接触表面切线方向运动,而只能限制物体沿两接触表面在接触处的公法线而趋向支承接触面的运动。因此,光滑接触面的约束力只能是压力,作用在接触点处,方向沿着接触表面的接触处的公法线而指向被约束物体,常用 F_N 表示,如图 1.9 所示,这种约束力也称为法向约束力。

3. 光滑圆柱形铰链约束

铰链是工程中常见的一种约束。铰链约束的典型构造是将构件和固定支座在连接处钻上圆孔,再用圆柱形销子(又称销钉)串联起来,使构件只能绕销钉

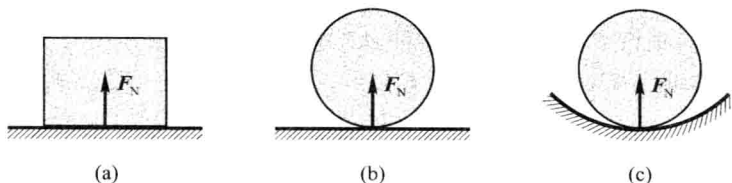


图 1.9

的轴线转动。这种约束称为固定铰链约束,或称固定铰支座,如图 1.10a 所示。设接触面的摩擦可略去不计,则销钉与构件圆孔间的接触是两个光滑圆柱面的接触。按照光滑面约束力的性质,可知销钉给构件的约束力应沿圆柱面在接触点处公法线方向,垂直于轴线并通过轴心,是压力,如图 1.10b 所示。

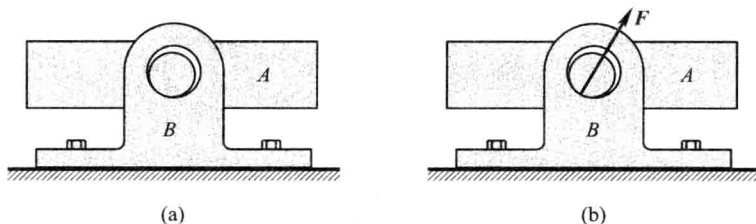


图 1.10

图 1.11a, b 是常用的固定铰支座的简化表示法。但实际上由于接触点不能事先确定,因而约束力 F 的方向也不能预先确定(图 1.12a),通常用两个正交未知分力 F_x 和 F_y 表示,如图 1.12b 所示,

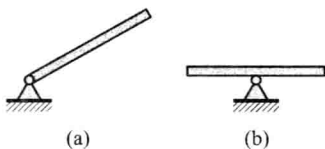


图 1.11

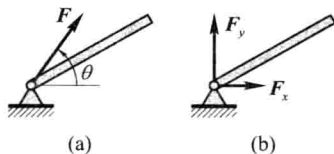


图 1.12

如果两个构件用圆柱形光滑销钉连接,则称中间铰,如图 1.13a 中销钉 B 和销钉 C ,中间铰的销钉对构件的约束,与固定铰支座的销钉对构件的约束相同,其约束力通常也表示为两个正交分力。

图 1.13a 中,构件 AB 和 BC 实际上并没有发生直接的相互作用,它们都是和销钉 B 发生直接的作用。图 1.13b 中, B 处约束力 F_{B1x} 和 F_{B1y} 是销钉 B 对构件

AB 的约束力。同理,图 1.13d 中 B 处约束力 F_{B2x} 和 F_{B2y} 是销钉 B 对构件 BC 的约束力。这时,销钉 B 将同时受到构件 AB 和 BC 对它的反作用力,销钉 B 所受到的约束力如图 1.13c 所示。其中 $F_{B1x} = -F'_{B1x}$, $F_{B1y} = -F'_{B1y}$; $F_{B2x} = -F'_{B2x}$, $F_{B2y} = -F'_{B2y}$ 。

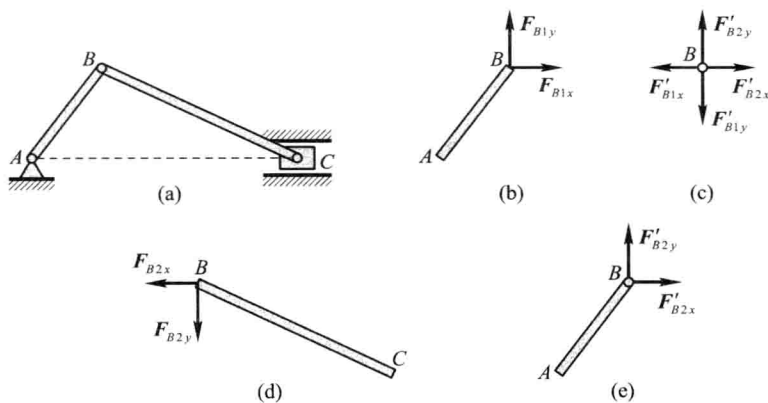


图 1.13

为了简便起见,通常把销钉 B 固连在其中任意一个构件上,如将销钉 B 固连于构件 AB ,则 F_{B1x} 与 F'_{B1x} , F_{B1y} 与 F'_{B1y} 为作用在同一刚体上的成对的平衡力,可以消去不画。这样构件 AB 和构件 BC 互为约束,构件 AB 对构件 BC 作用力为 F_{B2x} 和 F_{B2y} ,构件 BC 对构件 AB 的反作用力为 F'_{B2x} 和 F'_{B2y} ,如图 1.13d, e 所示。

4. 辊轴支座(可动铰链支座或活动铰链支座)

将构件的铰链支座用几个辊轴支承在光滑的支承面上,就成为辊轴支座,如图 1.14a 所示,也称可动铰支座或活动铰支座,其简图如图 1.14b 所示。这种支座约束的特点是只能限制物体与圆柱铰连接处沿垂直于支承面的方向运动,而不能阻止物体沿光滑支承面的运动或绕销钉的转动。因此,辊轴支座的约束力应垂直于支承面,通过销钉中心,通常用 F_N 表示,如图 1.14c 所示。

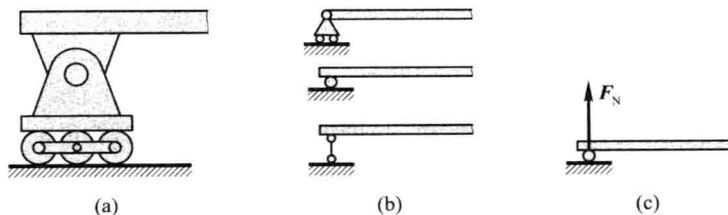


图 1.14