



普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学

主 编 姜 艳
副主编 柳艳杰 安英浩 鄂丽华
主 审 安英浩



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

013024523

TB12
115-2



普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学

主 编 姜 艳

副主编 柳艳杰 安英浩 鄂丽华

主 审 安英浩



TB12

115-2



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



北航

C1631898

内 容 提 要

本书共分二十二章，主要讲述：工程力学基础知识，包括刚体静力学基础，平面力系，空间力系，运动学及动力学基本理论；杆件承载能力的计算，包括轴向拉压杆件的强度与变形，圆轴扭转的强度与变形，平面弯曲的强度和刚度计算，应力状态和强度理论，组合变形和压杆稳定；结构内力分析，包括结构的计算简图与平面体系的几何组成分析，静定结构的内力分析和位移计算，力法，位移法，力矩分配法，影响线等内容。

本书适用于应用型本科及多学时的高职高专的水利类专业及工业与民用建筑、道路桥涵等土建类专业工程力学课程的教学，亦可作为水利水电工程等建筑工程技术人员参考书。

图书在版编目（C I P）数据

工程力学 / 姜艳主编. — 北京：中国水利水电出版社，2013.2
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0639-8

I. ①工… II. ①姜… III. ①工程力学—高等学校—教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第026811号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 工程力学
作 者	主 编 姜 艳 副主编 柳艳杰 安英浩 鄂丽华 主 审 安英浩
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 23.5印张 602千字
版 次	2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前言

本书是在中国水利水电出版社出版的《工程力学》(2004)(高职高专适用)和总结多年教学经验的基础上,吸收同类教材的精华编写而成的。本书获得黑龙江大学“十二五”规划教材的立项。

本书是依照应用型本科水利水电工程、农业水利工程、水利工程施工、水文与水资源利用等水利类专业教学计划和相关课程的教学基本要求编制的,也适用于工业与民用建筑、道路桥涵等其他土建类专业。

本书针对应用型本科教育特点,结合教学改革的实践经验,在编写过程中,注重应用能力素质的培养,不过分强调理论的系统性,着重基本概念和结论的应用;例题典型并结合工程实际,重视对学生工程意识和力学素质的训练和培养。

本书由黑龙江大学水利电力学院姜艳编写第十六章、第十七章、第十九章、第二十章、第二十一章、附录Ⅲ,黑龙江大学建筑工程学院柳艳杰编写第八章至第十五章、附录Ⅰ和附录Ⅱ,黑龙江大学建筑工程学院安英浩编写第十八章、第二十二章,黑龙江大学水利电力学院鄂丽华编写第三章至第七章,黑龙江大学水利电力学院陈秀维编写第二章,中水东北勘测设计研究有限责任公司王中江编写第一章。全书由姜艳主编,柳艳杰、安英浩、鄂丽华任副主编,安英浩主审。

由于作者水平所限,错误和不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2012年10月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 工程力学的研究对象	1
第二节 工程力学的研究内容和任务	1
第三节 刚体、变形固体及其基本假设	2
第四节 荷载的分类	3
第二章 静力学公理和物体的受力分析	4
第一节 静力学公理	4
第二节 约束和约束反力	5
第三节 受力分析与受力图	7
小结	9
思考题	10
习题	10
第三章 平面汇交力系与平面力偶系	12
第一节 平面汇交力系简化与平衡的几何法	12
第二节 平面汇交力系简化与平衡的解析法	14
第三节 平面力矩与力偶的概念	15
第四节 平面力偶系的简化与平衡	17
小结	19
思考题	19
习题	20
第四章 平面任意力系	23
第一节 力的平移定理	23
第二节 平面任意力系向作用面内任一点的简化	24
第三节 平面任意力系的平衡方程	27
第四节 静定和超静定问题·物体系统的平衡	28
第五节 考虑摩擦时物体的平衡	31
小结	35
思考题	36
习题	37

第五章 空间力系	40
第一节 力的投影与力矩	40
第二节 空间任意力系的简化与平衡	42
第三节 重心与形心	47
小结	50
思考题	50
习题	51
第六章 点和刚体的运动学	53
第一节 点的运动学	53
第二节 刚体的基本运动	57
第三节 点的合成运动	60
第四节 刚体的平面运动	63
小结	68
思考题	69
习题	69
第七章 动力学	72
第一节 质点的动力学	72
第二节 动量定理	73
第三节 动量矩定理	76
第四节 动力学普遍方程	79
小结	82
思考题	84
习题	85
第八章 变形固体概述	87
第一节 杆件的基本变形形式	87
第二节 内力与应力的概念	88
第九章 轴向拉压杆的强度与变形	90
第一节 轴向拉压杆的轴力及轴力图	90
第二节 轴向拉压杆横截面上的应力及强度计算	92
第三节 轴向拉压杆的变形	95
第四节 材料在拉伸和压缩时的力学性质	97
第五节 连接件的强度计算	100
小结	105
思考题	105
习题	105
第十章 圆轴扭转的强度与变形	108
第一节 圆轴扭转的扭矩及扭矩图	108
第二节 圆轴扭转的应力及强度计算	110

第三节 圆轴扭转的变形及刚度计算	114
小结	115
思考题	116
习题	116
第十一章 梁的强度计算	118
第一节 平面弯曲的概念	118
第二节 梁的内力及内力图	120
第三节 梁的应力及强度计算	125
小结	135
思考题	135
习题	135
第十二章 梁的变形及刚度计算	140
第一节 挠度和转角	140
第二节 挠曲线的近似微分方程	140
第三节 积分法计算梁的位移	141
第四节 叠加法求梁的位移	142
第五节 梁的刚度计算	143
小结	145
思考题	145
习题	145
第十三章 应力状态和强度理论	147
第一节 应力状态的概念	147
第二节 平面应力状态分析	148
第三节 空间应力状态	155
第四节 复杂应力状态下的应力和应变之间的关系	157
第五节 强度理论	158
小结	162
思考题	163
习题	164
第十四章 组合变形	167
第一节 概述	167
第二节 斜弯曲	167
第三节 拉伸(压缩)与弯曲	171
第四节 截面核心	173
小结	176
思考题	176
习题	176

第十五章 压杆稳定	178
第一节 压杆稳定性的概念	178
第二节 细长中心受压直杆临界力的欧拉公式	179
第三节 临界应力、欧拉公式适用范围和临界应力总图	181
第四节 压杆稳定性条件及实用计算	184
第五节 提高压杆稳定性的措施	187
小结	188
思考题	188
习题	189
第十六章 结构的计算简图与平面体系的几何组成分析	191
第一节 结构的计算简图和分类	191
第二节 平面体系的几何组成分析	195
第三节 几何不变体系的简单组成规则	199
第四节 几何组成分析示例	201
第五节 静定结构与超静定结构	203
小结	204
思考题	204
习题	205
第十七章 静定结构的内力分析	207
第一节 多跨静定梁	207
第二节 静定平面刚架	209
第三节 三铰拱	215
第四节 静定平面桁架	220
第五节 组合结构	225
第六节 静定结构小结	227
思考题	229
习题	229
第十八章 静定结构的位移计算	233
第一节 概述	233
第二节 虚功原理	234
第三节 结构位移计算的一般公式	236
第四节 静定结构在荷载作用下的位移计算	237
第五节 图乘法	240
第六节 支座移动和温度改变对静定结构的影响	244
第七节 弹性结构的几个互等定理	247
小结	248
思考题	249
习题	250

第十九章 力法	254
第一节 超静定结构的概念	254
第二节 力法的基本原理	255
第三节 力法的基本结构和基本未知力	258
第四节 力法的典型方程	259
第五节 结构对称性利用	264
第六节 超静定结构的位移计算和最后内力图的校核	268
第七节 支座移动、温度改变时超静定结构的计算	269
小结	273
思考题	274
习题	275
第二十章 位移法	278
第一节 位移法的基本概念	278
第二节 位移法基本未知量的确定	279
第三节 等截面直杆的转角位移方程	280
第四节 用位移法计算超静定结构	282
第五节 位移法的典型方程	287
第六节 对称性的利用	290
小结	292
思考题	293
习题	293
第二十一章 力矩分配法	296
第一节 力矩分配法的基本概念	296
第二节 用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	302
第三节 无剪力分配法	307
第四节 超静定结构在支座移动和温度改变时的计算	310
小结	312
思考题	313
习题	314
第二十二章 影响线	316
第一节 影响线的概念	316
第二节 静力法作单跨静定梁的影响线	316
第三节 间接荷载作用下梁的影响线	319
第四节 机动法作静定梁的影响线	322
第五节 铁路和公路的标准荷载制	324
第六节 影响线的应用	325
第七节 简支梁的内力包络图和绝对最大弯矩	330
小结	332
思考题	333

习题	333
附录 I 截面图形的几何性质	335
附录 II 简单荷载作用下梁的挠度和转角	342
附录 III 型钢规格表	345
习题参考答案	356
参考文献	366

第一章 绪 论

第一节 工程力学的研究对象

建筑物中承受荷载而起骨架作用的部分称为结构。结构是由若干构件按一定方式组合而成的。组成结构的各单独部分称为构件。例如：支承渡槽槽身的排架是由立柱和横梁组成的刚架结构，如图 1-1 (a) 所示；单层厂房结构由屋顶、楼板和吊车梁、柱等构件组成，如图 1-1 (b) 所示。结构受荷载作用时，如不考虑建筑材料的变形，其几何形状和位置不会发生改变。

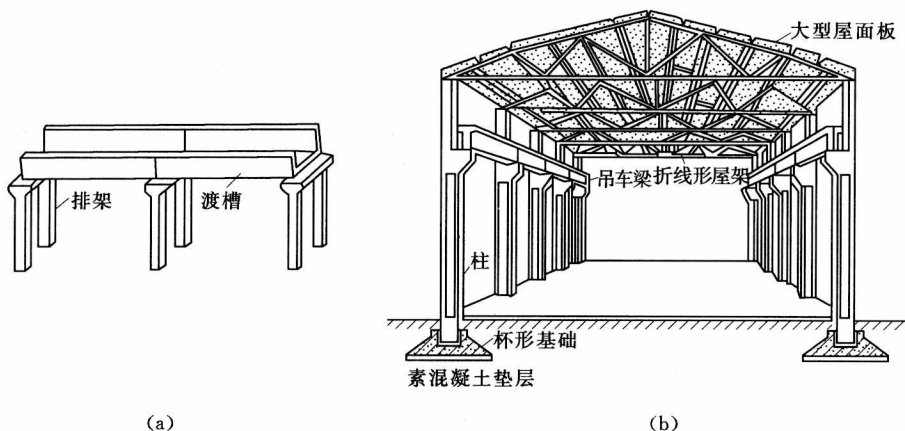


图 1-1

结构按其几何特征分为三种类型：

- (1) 杆系结构：由杆件组成的结构。杆件的几何特征是其长度远远大于横截面的宽度和高度。
 - (2) 薄壁结构：由薄板或薄壳组成。薄板或薄壳的几何特征是其厚度远远小于另两个方向的尺寸。
 - (3) 实体结构：由块体构成。其几何特征是三个方向的尺寸基本为同一数量级。
- 工程力学的研究对象主要是杆系结构。

第二节 工程力学的研究内容和任务

工程力学的任务是研究结构的几何组成规律，以及在荷载的作用下结构和构件的强度、刚度和稳定性问题。研究平面杆系结构的计算原理和方法，为结构设计合理的形式，其目的是保证结构按设计要求正常工作，并充分发挥材料的性能，使设计的结构既安全可靠又经济合理。

进行结构设计时,要求在受力分析基础上,进行结构的几何组成分析,使各构件按一定的规律组成结构,以确保在荷载的作用下结构几何形状不发生改变。

结构正常工作必须满足强度、刚度和稳定性的要求。

强度是指抵抗破坏的能力。满足强度要求就是要求结构的构件在正常工作时不发生破坏。

刚度是指抵抗变形的能力。满足刚度要求就是要求结构的构件在正常工作时产生的变形不超过允许范围。

稳定性是指结构或构件保持原有的平衡状态的能力。满足稳定性要求就是要求结构的构件在正常工作时不突然改变原有平衡状态,以免因变形过大而破坏。

按教学要求,工程力学主要研究以下几个部分的内容。

(1) 静力学基础。这是工程力学的重要基础理论,包括物体的受力分析、力系的简化与平衡等刚体静力学基础理论。

(2) 杆件的承载能力计算。这部分是计算结构承载能力计算的实质,包括基本变形杆件的內力分析和强度、刚度计算,压杆稳定和组合变形杆件的强度、刚度计算。

(3) 静定结构的內力计算。这部分是静定结构承载能力计算和超静定结构计算的基础,包括研究结构的组成规律、静定结构的內力分析和位移计算等。

(4) 超静定结构的內力分析。这是超静定结构的强度和刚度问题的基础,包括力法、位移法、力矩分配法和矩阵位移法等求解超静定结构內力的基本方法。

第三节 刚体、变形固体及其基本假设

工程力学中将物体抽象化为两种计算模型:刚体和理想变形固体。

刚体是在外力作用下形状和尺寸都不改变的物体。实际上,任何物体受力的作用后都发生一定的变形,但在一些力学问题中,物体变形这一因素与所研究的问题无关或对其影响甚微,这时可将物体视为刚体,从而使研究的问题得到简化。

理想变形固体是对实际变形固体的材料理想化,作出以下假设。

(1) 连续性假设。认为物体的材料结构是密实的,物体內材料是无空隙的连续分布。

(2) 均匀性假设。认为材料的力学性质是均匀的,从物体上任取或大或小一部分,材料的力学性质均相同。

(3) 向同性假设。认为材料的力学性质是各向同性的,材料沿不同方向具有相同的力学性质,而各方向力学性质不同的材料称为各向异性材料。本教材中仅研究各向同性材料。

按照上述假设理想化的一般变形固体称为理想变形固体。刚体和变形固体都是工程力学中必不可少的理想化的力学模型。

变形固体受荷载作用时将产生变形。当荷载撤去后,可完全消失的变形称为弹性变形;不能恢复的变形称为塑性变形或残余变形。在多数工程问题中,要求构件只发生弹性变形。工程中,大多数构件在荷载的作用下产生的变形量若与其原始尺寸相比很微小,称为小变形。小变形构件的计算,可采取变形前的原始尺寸并可略去某些高阶无穷小量,可大大简化计算。

综上所述,工程力学把所研究的结构和构件看作是连续、均匀、各向同性的理想变形固体,在弹性范围内和小变形情况下研究其承载能力。

第四节 荷载的分类

结构工作时所承受的主动外力称为荷载。荷载可分为不同的类型。

(1) 按作用性质可分为静荷载和动荷载。由零逐渐缓慢增加到结构上的荷载称为静荷载，静荷载作用下不产生明显的加速度。大小方向随时间而改变的荷载称为动荷载，地震力、冲击力、惯性力等都为动荷载。

(2) 按作用时间的长短可分为恒荷载和活荷载。永久作用在结构上大小、方向不变的荷载称为恒荷载，结构、固定设备的自重等都为恒荷载。暂时作用在结构上的荷载称为活荷载，风、雪荷载等都是活荷载。

(3) 按作用范围可分为集中荷载和分布荷载。若荷载的作用范围与结构的尺寸相比很小时，可认为荷载集中作用于一点，称为集中荷载。分布作用在体积、面积和线段上的荷载称为分布荷载。结构的自重、风、雪等荷载都是分布荷载。当以刚体为研究对象时，作用在结构上的分布荷载可用其合力（集中荷载）代替；但以变形体为研究对象时，作用在结构上的分布荷载不能用其合力代替。

第二章 静力学公理和物体的受力分析

第一节 静力学公理

静力学公理是人类在长期的生产和生活实践中，经过反复观察和实验总结出来的客观规律，是研究力学的理论基础。

公理一 二力平衡公理

作用于同一刚体上的两个力使其保持平衡的必要与充分条件是：力的大小相等、方向相反，且作用在同一直线。如图 2-1 所示。

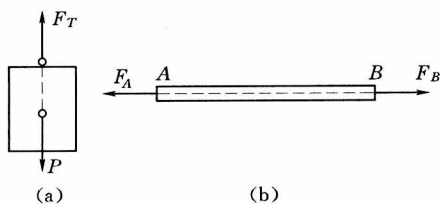


图 2-1

这个公理揭示了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。对于刚体这个条件是既必要又充分；但对于变形体，则是必要条件。

在两个力作用下处于平衡的物体称为二力体，若物体是构件，就称为二力构件。若构件为杆件，则称为二力杆。

公理二 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，并不改变原力系对刚体的作用效应。就是说，如果两个力系只相差一个或几个平衡力系，则它们对刚体的作用是相同的。因此可以等效替换。

推论一 力的可传性原理

作用于刚体上的力可以沿其作用线移至刚体内任意一点，而不改变其对刚体的作用效应。

证明 设力 F 作用于刚体上的点 A ，如图 2-2 (a) 所示。在力 F 作用线上任选一点 B ，在点 B 加一对平衡力 F_1 和 F_2 ，使 $F = -F_1 = F_2$ ，如图 2-2 (b) 所示。则 F_1 、 F_2 、 F 构成的力系与 F 等效。将平衡力系 F_1 、 F_2 减去，则 F_2 与 F 等效，如图 2-2 (c) 所示，此时只剩下一个力，即力 F 已由点 A 沿作用线移到了点 B 。

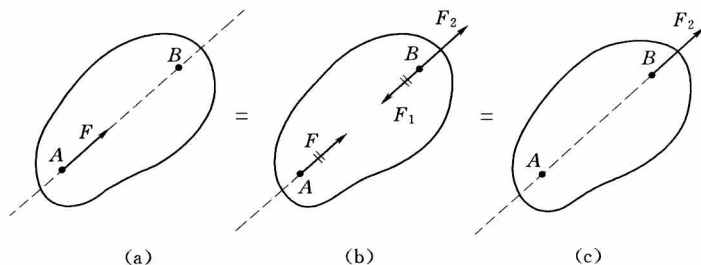


图 2-2

由力的可传性可知，作用于刚体上的力是滑动矢量，因此对刚体来说，力的三要素为力的大小、方向和作用线。

必须注意，公理二及其推论只适用于刚体。

公理三 力的平行四边形公理

作用于物体上同一点的两个力，可以合成为仍作用于该点的一个合力，合力的大小和方向由此二力为邻边所构成的平行四边形的对角线矢量来表示。

如图 2-3 (a) 所示，合力矢 F_R 等于两个力矢 F_1 、 F_2 的矢量和，即

$$F_R = F_1 + F_2$$

力的平行四边形也可以作成力三角形，如图 2-3 (b)、(c) 所示。

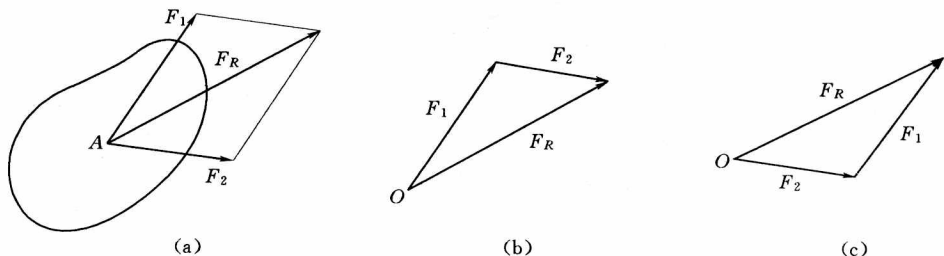


图 2-3

推论二 三力平衡汇交定理

作用于刚体上同一平面内互不平行的三个力使其平衡的必要条件是：三个力的作用线汇交于同一点。

证明 设在一刚体的点 A、B、C 处分别作用有互不平行的三个力 F_1 、 F_2 、 F_3 成平衡，如图 2-4 所示。根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 移至汇交点 O，然后根据力的平行四边形公理，得合力 F_{12} ，则力 F_3 与 F_{12} 平衡，由公理一可知， F_3 与 F_{12} 必共线，所以力 F_3 的作用线必过点 O，定理得证。

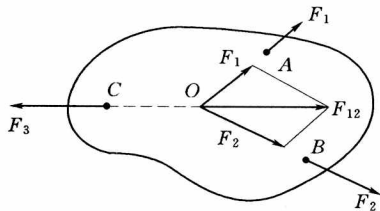


图 2-4

公理四 作用与反作用公理

两物体间的作用力与反作用力总是等值、反向、共线，且同时分别作用在这两个物体上。

物体间的作用都是相互的，因此作用力与反作用力总是同时出现，同时消失，分别作用在彼此相互作用的两个物体上。该公理对刚体或变形体，不管其处于平衡状态还是非平衡状态都适用。

公理五 刚化原理

当变形体在已知力系作用下处于平衡时，若将变形后的变形体换成刚体，则其平衡状态保持不变。

注意，刚化要在变形体发生变形后平衡时进行。刚化后把变形也保留下来。例如，一根螺旋弹簧两端作用有等值、反向拉力时，要在变形后才能平衡。根据公理五，把这根变形后的弹簧换成相同形状的刚体，不会破坏平衡。

第二节 约束和约束反力

一、自由体和非自由体

力是物体间相互的机械作用，当分析某物体上的各个力时，需要了解该物体与周围其他物体相互作用的形式和连接方法。我们按照是否与其他物体直接接触把物体分为两类。一类

称为**自由体**，即它们的运动在空间不受任何限制。例如，在空气中飞行的炮弹、飞机或人造卫星等。另一类为**非自由体**，即它们的运动受到了某些预先给定条件的限制。例如，用绳索悬挂的重物，因绳索的限制不能下落；机车受轨道的限制，只能沿轨道运动；屋架受到左右支座的限制而固定不动等等。总之，工程结构中及实际生活中的大多数物体都是非自由体。

二、约束、约束反力和主动力

工程中物体的运动大都受到某些限制。阻碍物体运动的限制物称为**约束**。例如，绳索是重物的约束，轨道是机车的约束，支座是屋架的约束等等。既然约束限制了物体的运动，也就改变了物体的运动状态，约束对物体的作用实质上就是力的作用，约束作用在物体上的力称为**约束反力**，简称**反力**。约束反力的作用点就是约束与物体的接触点。约束反力的方向总是与约束所能限制的物体运动或产生运动趋势的方向相反。这是确定约束反力方向的准则。

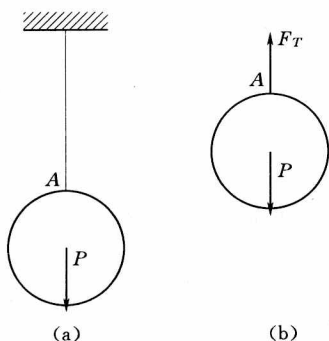


图 2-5

与约束反力相对应。有些力主动地使物体运动或使物体有运动的趋势，这种力称为**主动力**。如重力，风力，水压力等等。主动力在工程中也称为**荷载**。在一般情况下，约束反力是由主动力引起的，主动力一般是已知的，而约束反力的大小则是未知的，需要根据物体的平衡条件或动力学方程来确定。

三、工程中常见的约束和约束反力的确定

1. 柔性约束

由绳索、链条、胶带等柔软的物体构成的约束称为**柔性约束**，如图 2-5 (a) 所示。柔性约束只能承受一定的拉力，而不能承受压力和弯曲，只能限制物体沿柔性体伸长方向的运动。所以，柔性约束的约束反力方向总是沿着柔性体的轴线或对称中心线，并且只能是拉力，如图 2-5 (b) 所示。符号通常用 F 或 F_T 表示。

2. 光滑接触面约束

在所研究的问题中，当物体接触面之间的摩擦力远小于物体所受的其他力时，摩擦力略去不计而认为接触面是光滑的。若两物体间的接触面是光滑的，则物体可以自由地沿接触面滑动，或沿接触面在接触点的公法线方向脱离接触，但不能沿公法线方向压入接触面。所以光滑面约束反力方向总是沿着接触面的公法线，指向被约束物体，并且只能是压力。如图 2-6 和图 2-7 所示。

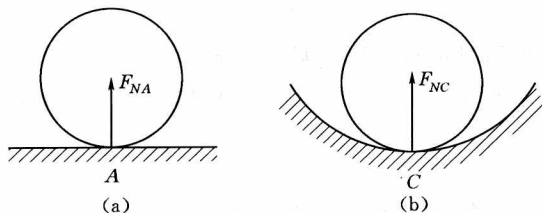


图 2-6

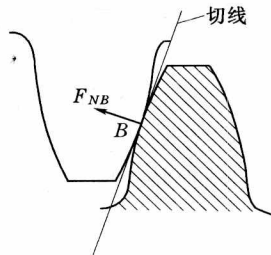


图 2-7

3. 铰链和铰链支座

两个物体上被钻有同样大小的孔，并用销钉连起来构成的约束称为**铰链约束**，简称**铰约束**，其结构如图 2-8 (a)、(b) 所示。常用图 2-8 (c) 所示的简图表示。销钉只限制两物

体的相对移动，而不限制两物体的相对转动。

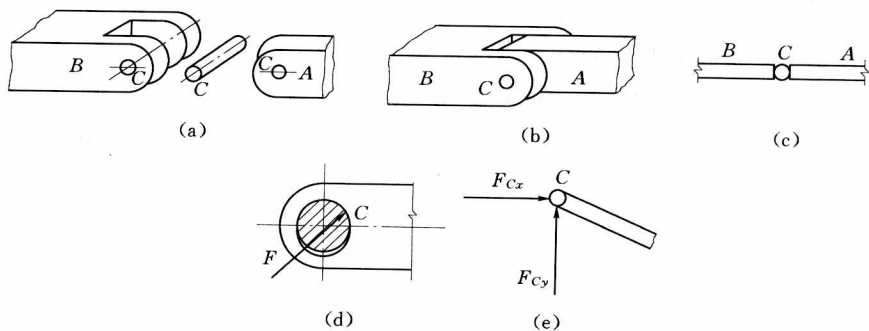


图 2-8

由图 2-8 (d) 可见，略去摩擦时，销钉与物体间是以两个光滑圆柱面接触，因此，其约束反力可能作用在圆孔与销轴接触的任一条母线上的一点 D ，垂直于销钉轴线，且过圆孔的中心 C ，指向物体，如图 2-8 (d) 中的力 F_C 。但由于可能在圆周上任一点发生接触，点 D 一般不能预先确定，所以力 F_C 的方向也不能确定。因此，铰链的约束反力通常用两个相互垂直于销轴轴线且过圆孔中心的分力 F_{Cx} 、 F_{Cy} 来表示，如图 2-8 (e) 所示。两分力的指向可假设。

将铰链连接的两个物体中的一个固连于地面（或机架）上，就构成了铰链支座或固定铰支座。结构如图 2-9 (a) 所示。固定铰支座的约束与铰链约束完全相同。图 2-9 (b)、(c) 为固定铰支座的简化符号，其约束反力如图 2-9 (d) 所示。

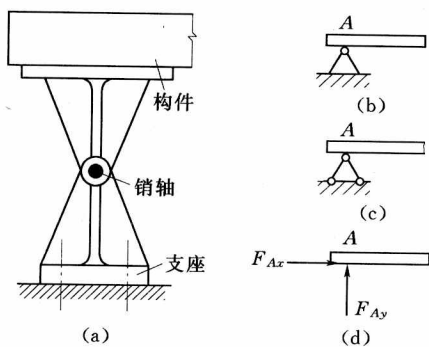


图 2-9

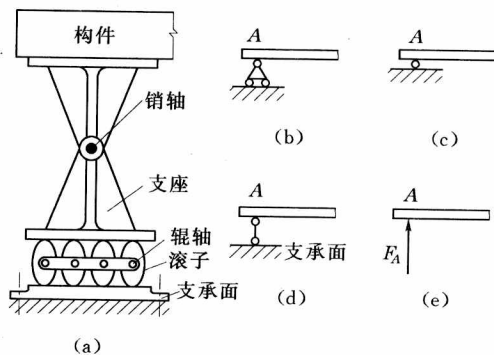


图 2-10

若在支座和支承面之间装有辊轴，就构成活动铰支座，或称辊轴支座。结构如图 2-10 (a) 所示。该支座不能阻碍物体沿支承面移动和相对于销钉的轴线转动，只能阻碍物体沿支承面法线方向移动。所以，其约束反力垂直于支承面，过圆孔中心，指向可假设。图 2-10 (b)、(c)、(d) 是活动铰支座的简化符号，其约束反力如图 2-10 (e) 所示。

以上介绍了三种简单约束，平面约束中还有一种常见约束类型——固定端约束，将在第四章中介绍。空间约束将在第五章中介绍。

第三节 受力分析与受力图

工程实际中，物体的受力情况往往比较复杂，为了求解未知的约束反力，必须先分析物