

高等院校“十二五”规划教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主编 陆夏美 周新伟 刘毅

主审 曲贵民

高等院校“十二五”规划教材

工程力学

主编 陆夏美 周新伟 刘毅
主审 曲贵民

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书是按照教育部力学基础课程教学指导分委员会最新制定的“工程力学课程基本要求”编写的,包括理论力学和材料力学两大篇,共 23 章。第 1 篇理论力学包括静力学、运动学和动力学三部分,主要研究物体的受力分析、力系的简化及平衡条件,分析物体的运动规律,研究物体产生运动的原因,建立物体的运动规律与作用在物体上的力的相互关系。第 2 篇材料力学以四种基本变形为基础,研究构件的强度、刚度和稳定性及其计算方法,主要研究物体在外力作用下的变形规律。本书概念清楚,简明易懂,是注重培养工程应用型人才、重视能力培养的新教材。

本书可作为高等学校工科金属材料、工业设计等专业中少学时的工程力学课程教材,也可供其他专业学生及相关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/陆夏美,周新伟,刘毅主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015. 6

ISBN 978-7-5603-5383-8

I. ①工… II. ①陆…②周…③刘… 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(2015)第 112387 号

策划编辑 杨秀华
责任编辑 杨秀华
封面设计 刘长友
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 23 字数 539 千字
版 次 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-5383-8
定 价 49.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

工程力学是高等工科院校普遍开设的一门重要的学科基础课,是研究物体机械运动和构件承载能力的一门学科,在专业课与基础课之间起衔接作用,为学习后续相关专业课程奠定基础。

为适应“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革”的需要,根据教育部力学基础课程教学指导分委员会最新制定的理工科非力学专业“工程力学课程教学基本要求”,并结合编者多年来以培养应用型人才为主所讲授的“工程力学课程”教学内容、课程体系等方面的改革实践和体会,编写了本书。在编写过程中,编者注意坚持理论严谨、逻辑清晰、由浅入深、易教易学的原则,强调联系工程实际、注重基本概念、注重后续课程中概念的渗透。本书具有较强的教学实用性,是注重培养工程应用型人才、重视能力培养的新教材。

全书分理论力学和材料力学两大篇,共 23 章,理论力学篇 13 章,包括静力学、运动学和动力学三部分;材料力学篇 10 章,包括构件的强度、刚度、稳定性的分析和计算。其中理论力学研究物体的受力分析、力系的简化及平衡条件,分析物体的运动规律,研究物体产生运动的原因,建立物体的运动规律与作用在物体上的力的相互关系。材料力学以四种基本变形为基础,研究构件的强度、刚度、稳定性及其计算方法,主要研究物体在外力作用下的变形规律。

本书重点面向培养应用型人才的高等院校。在编写中,考虑到目前工程力学课程讲授学时的普遍减少、应用型人才的培养目标等因素,在尽量减少内容难度,尽量通俗易懂地阐述问题等方面做了一些尝试和努力。

参加本书编写工作的有:哈尔滨理工大学陆夏美(第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 18 章)、周新伟(绪论、第 9 章、第 10 章、第 12 章、第 13 章、附录 I)、张举东(第 14 章、第 15 章、第 16 章、第 17 章)、成夙(第 19 章、第 20 章、第 23 章)、黑龙江大学孙凤云(第 6 章、第 7 章、第 8 章)、哈尔滨华德学院刘毅(第 5 章、第 11 章、第 21 章、第 22 章)。

全书由陆夏美、周新伟、刘毅主编,由哈尔滨理工大学曲贵民教授主审。

本书在编写过程中,参考了许多优秀的教材(见参考文献),吸取了这些教材的许多长处,在此向这些教材的编者们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中的疏漏和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 3 月

目 录

绪论	1
----	---

第 1 篇 理论力学

静力学

第 1 章 静力学基本知识和物体的受力分析	5
1.1 静力学基本概念	5
1.2 静力学公理	5
1.3 约束和约束反力	7
1.4 物体的受力分析和受力图	10
习题	13
第 2 章 平面力系	16
2.1 平面汇交力系	16
2.2 平面力对点之矩的概念与计算	20
2.3 平面力偶系	21
2.4 平面任意力系的简化	23
2.5 平面任意力系的平衡条件	26
2.6 物体系统的平衡静定和静不定问题的概念	28
习题	32
第 3 章 摩擦	38
3.1 摩擦的概念	38
3.2 考虑摩擦的平衡问题	41
习题	44
第 4 章 空间力系	47
4.1 空间汇交力系	47
4.2 空间力对点之矩与力对轴之矩	49
4.3 空间力偶理论	51
4.4 空间任意力系向一点的简化主矢和主矩	52
4.5 空间任意力系的平衡条件	55

4.6 平行力系的中心与物体的重心·····	56
习题·····	59

运动学

第 5 章 点的运动学 ·····	67
5.1 点的运动方程·····	67
5.2 点的速度和加速度的矢量表示法·····	68
5.3 点的速度和加速度的直角坐标表示法·····	70
5.4 点的速度和加速度的自然坐标表示法·····	70
习题·····	74
第 6 章 刚体的基本运动 ·····	78
6.1 刚体的平行移动·····	78
6.2 刚体的定轴转动·····	79
6.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度·····	80
6.4 定轴轮系的传动比·····	83
习题·····	85
第 7 章 点的合成运动 ·····	88
7.1 点的合成运动的基本概念·····	88
7.2 点的速度合成定理·····	90
7.3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理·····	92
习题·····	95
第 8 章 刚体的平面运动 ·····	100
8.1 刚体平面运动的概念和运动分解·····	100
8.2 用基点法和投影法求平面图形内各点速度·····	102
8.3 用瞬心法求平面图形内各点速度·····	104
8.4 用基点法求平面图形内各点的加速度·····	107
8.5 运动学综合应用·····	109
习题·····	110

动力学

第 9 章 动力学基本定律 ·····	119
9.1 动力学基本定律·····	119
9.2 质点运动的微分方程·····	120
习题·····	124
第 10 章 动量定理 ·····	127
10.1 质点的动量定理·····	127

10.2	质点系的动量定理	130
10.3	质心运动定理	133
	习题	137
第 11 章	动量矩定理	140
11.1	质点的动量矩定理	140
11.2	质点系的动量矩定理	142
11.3	刚体绕定轴的转动微分方程	146
11.4	刚体对轴的转动惯量	148
	习题	153
第 12 章	动能定理	158
12.1	力的功	158
12.2	质点的动能定理	162
12.3	质点系的动能定理	163
12.4	功率 功率方程 机械效率	167
12.5	动力学普遍定理的综合应用	169
	习题	171
第 13 章	达朗贝尔原理(动静法)	175
13.1	惯性力的概念	175
13.2	达朗贝尔原理	176
13.3	刚体惯性力系的简化	178
13.4	刚体定轴转动时轴承的动约束力	183
	习题	185

第 2 篇 材料力学

第 14 章	材料力学的基本概念	191
14.1	材料力学的任务	191
14.2	变形固体的基本假设	192
14.3	杆件变形的基本形式	193
14.4	外力 内力 截面法	194
14.5	应力 应变 胡克定律	196
	习题	199
第 15 章	轴向拉伸与压缩	201
15.1	轴向拉伸与压缩的概念	201
15.2	轴向拉压时横截面上的内力与应力	201
15.3	轴向拉压时斜截面上的应力	204
15.4	轴向拉压时的强度计算	205

15.5	轴向拉(压)时材料的力学性能	208
15.6	轴向拉(压)时的变形	212
15.7	应力集中的概念	214
	习题	215
第 16 章	剪 切	219
16.1	剪切的概念	219
16.2	剪切和挤压的实用计算	220
	习题	225
第 17 章	扭 转	228
17.1	扭转的概念	228
17.2	外力偶矩与扭矩的计算 扭矩图	228
17.3	圆轴扭转时的应力和强度计算	230
17.4	圆轴扭转时的变形和刚度计算	235
17.5	圆轴扭转时的破坏现象分析	237
	习题	238
第 18 章	弯曲内力	243
18.1	平面弯曲的概念	243
18.2	梁的弯曲内力 剪力图和弯矩图	244
18.3	外力与剪力和弯矩间的微分关系	249
	习题	253
第 19 章	弯曲强度	258
19.1	纯弯曲时梁横截面上的正应力	258
19.2	横力弯曲时梁横截面上的正应力及强度计算	261
19.3	横力弯曲时梁横截面上的切应力及强度计算	264
19.4	提高梁弯曲强度的措施	268
	习题	270
第 20 章	弯曲变形	276
20.1	弯曲变形的概念	276
20.2	挠曲线的近似微分方程	277
20.3	梁弯曲变形计算的积分法	278
20.4	梁弯曲变形计算的叠加法	281
	习题	284
第 21 章	应力和应变状态分析 强度理论	288
21.1	应力状态的概念	288
21.2	平面一般应力状态分析的解析法	290
21.3	空间应力状态简介	293

21.4	广义胡克定律	295
21.5	复杂应力状态下的应变比能	298
21.6	强度理论的概念	299
21.7	经典强度理论	299
	习题	303
第 22 章	组合变形	310
22.1	组合变形的概念	310
22.2	拉伸或压缩与弯曲的组合变形的强度计算	310
22.3	弯曲与扭转组合变形的强度计算	313
	习题	317
第 23 章	压杆稳定	322
23.1	压杆稳定性的概念	322
23.2	细长压杆的临界力	323
23.3	欧拉公式的应用范围 临界应力总图	325
23.4	压杆稳定性计算	328
23.5	提高压杆稳定性的措施	330
	习题	331
附录 I	平面图形的几何性质	335
附 I.1	静矩和形心	335
附 I.2	惯性矩 极惯性矩 惯性积 惯性半径	336
附 I.3	平行移轴公式	338
附 I.4	转轴公式 主惯性轴 形心主惯性轴	340
	习题	341
附录 II	型钢表	345
	参考文献	356

绪 论

工程力学课程由理论力学和材料力学组合而成。理论力学部分主要分析物体的受力情况、研究物体机械运动的基本规律；材料力学部分主要分析物体在力的作用下所产生的变形及材料本身抵抗外力作用的能力，如强度、刚度、稳定性等。

物体在空间的位置随时间的变化称为机械运动。它是物体多种运动形式中最简单的一种，也是人们在生活和生产实践中最常见的一种运动。例如：车辆的行驶、机器的运动、水的流动、建筑物的振动以及人造地球卫星的运行，等等，都是机械运动。物体的平衡是机械运动的特殊情况。在本书中，我们也研究物体的平衡问题。

理论力学所研究的内容是以伽利略和牛顿所建立的基本定律为基础的，属于古典力学的范畴，研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动。至于速度接近光速的物体和微观基本粒子的运动，则必须用相对论和量子力学的观点才能予以说明。这说明古典力学的应用范围是有局限的。但是，一般工程中所遇到的大量的力学问题，用古典力学来解决，不仅方便，而且能够保证足够的精确性。因此，我们学习本课程具有实际意义。

组成结构与机器的构件在承受载荷时均会变形，但这些变形一般都极小，对研究物体的平衡问题和运动规律无太大影响，为简化研究可忽略不计从而假设被研究的物体是完全刚性体。所以理论力学的研究对象是刚体力学范围，可分为静力学、运动学和动力学。

在研究结构对破坏的抵抗能力时，受力构件的变形就非常重要，不能忽略，这是材料力学的研究对象，属于变形体力学范围。

材料力学研究固体材料受不同形式载荷时所发生的力学行为，它是固体力学的一个分支。本书所讨论的是受轴向载荷的杆件、受剪切与挤压的连接件、受扭转的圆轴、受平面弯曲的梁等。分析的目的是确定和计算其内力、应力、应变以及由荷载所产生的变形。完整地材料的这些力学性能，以确定结构对破坏的抵抗能力，才能保证对构件的安全设计。因此材料力学是许多工程领域的基础科目。

总之，材料力学是大多数工程科学的基础，并且是工程科学所不可缺少的先修科目。它不像某些工程科学那样单纯依赖经验与观察，而是具有严密系统且强调逻辑推理的特性。

通过工程力学课程的学习，我们要掌握其中的基本概念、基本定理、基本计算方法，初步学会运用工程力学基本知识结合其他有关的课程，解决工程技术中的简单力学问题；另一方面是为学习一系列后续课程，如机械原理、机械零件、材料学等有关的后续课程提供重要的理论基础。学习工程力学，有助于学习其他的基础理论，掌握新科技，也有助于培养辩证唯物主义的世界观，树立正确的思维方法和提高分析问题与解决问题的能力。从而为今后解决生产实际问题、从事科学研究打下坚实的基础。

本书内容分为两篇：

第1篇理论力学，包括：

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,而不考虑物体运动的物理原因。

动力学 研究物体的机械运动变化与其所受的力之间的关系,是理论力学最主要的组成部分。

第2篇 材料力学

以分析轴向拉压、剪切、扭转、弯曲四种基本变形为基础,研究构件的强度、刚度和稳定性的分析与计算。

第 1 篇 理论力学

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。

所谓力系,是指作用在物体上的一群力。

平衡是指物体相对于惯性参考系(如地面)保持静止或匀速直线运动状态,即物体的运动状态保持不变。如果作用于物体上的力系使物体保持平衡,则该力系称为平衡力系,此时力系所满足的条件称为平衡条件。

静力学所研究的基本问题包括以下三方面的内容:

1. 受力分析

分析物体(包括物体系统)受哪些力,每个力的作用位置和方向,并画出物体的受力图。

2. 力系的等效替换

将作用于物体上的一个力系用与之等效的另一个力系来代替的过程,称为力系的等效替换;将一个复杂力系用一个简单力系等效替换的过程,称为力系的简化。如果一个力系可与一个力等效替换,则称该力为此力系的合力,力系中各力叫作该力的分力。相应的,将一个力系等效替换为一个力叫作力的合成,将一个力等效替换为一个力系叫作力的分解。

3. 建立力系平衡条件

即研究作用在物体上的各种力系所需满足的平衡条件。

第 1 章 静力学基本知识和物体的受力分析

1.1 静力学基本概念

1.1.1 刚体的概念

所谓刚体,是指在力的作用下,其内部任意两点间的距离始终保持不变的物体,即受力而不变形的物体。事实上,任何物体在力的作用下都会产生不同程度的变形,因此刚体并不是实际存在的实体,而是抽象简化的理想化力学模型。

静力学研究的力学模型都是刚体和刚体系统,故又称为刚体静力学。

1.1.2 力的概念

力是物体间相互的机械作用。这种作用的效果是使物体的运动状态发生变化,同时使物体的形状发生改变。

物体形状的改变,我们称之为物体的变形。

力使物体运动状态发生变化的效果,称为力的外效应,或者称为力的运动效应;力使物体发生变形的效果,称为力的内效应,或者称为力的变形效应。

力有三要素,即大小、方向和作用点。因此力是矢量,且是定位矢量。

力的大小的单位,在国际单位制中是牛顿(Newton),以 N 来表示。工程中也常用“千牛顿”作单位,记作 kN。

通过力的作用点,沿力的方向的直线称为力的作用线。

工程中常见的力系,按其作用线的分布,可分为平面力系和空间力系,按其作用线的关系,又可分为汇交力系、平行力系和任意力系。

1.2 静力学公理

公理是人们在长期社会生产实践中总结出来的正确地反映自然界事物基本规律的定律。

公理 1 二力平衡公理

作用在同一个刚体上的两个力,使刚体处于平衡状态的充分必要条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

公理 1 只适用于刚体,而对变形体,上面的条件只是必要的,但不是充分的。

只受两个力的作用而处于平衡状态的构件或杆件称为二力构件或二力杆。

公理 2 加减平衡力系公理

在已知力系上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。

公理 2 也只适用于刚体。

根据上述公理有如下推论:

推论 1 力的可传性原理

作用于刚体上的力,可沿其作用线移动到刚体上的任一点,而不改变该力对刚体的作用效果。

证明 设有力 F 作用在刚体上的点 A ,如图 1.1(a) 所示。根据加减平衡力系公理,可在力的作用线上任取一点 B ,并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = F_2 = -F_1$,如图 1.1(b) 所示,由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系,故可除去,这样只剩一个力 F_2 ,如图 1.1(c) 所示,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

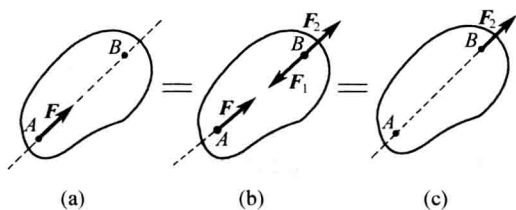


图 1.1

可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效果的要素,而是被作用线所代替。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。

作用于刚体上的力矢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

作用在物体上同一点的两个力可以合成为一个合力,合力的作用点仍然在该点,合力的大小和方向由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来确定。

公理 3 本质上是说明力的合成符合矢量运算法则,合力矢量等于这两个力矢量的几何和,即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

亦可用三角形法则来求合力矢,如图 1.2(b) 和 1.2(c) 所示。但要注意的是,三角形法则并未如实地反映出每个力的三要素,只是一种求解合力矢的方法。

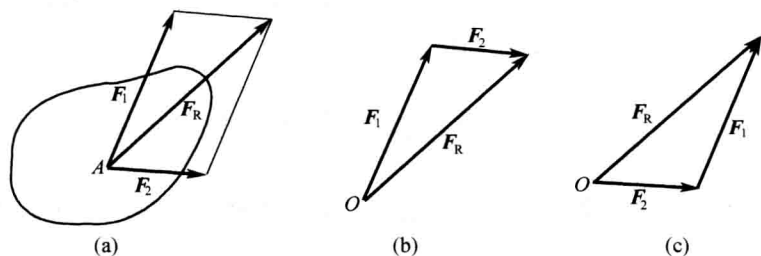


图 1.2

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上的三个相互平衡的力,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通过汇交点。

证明 如图 1.3 所示,在刚体的 A, B, C 三点分别作用三个相互平衡的力 F_1, F_2, F_3 。先根据力的可传性原理,将 F_1, F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形法则得到

合力 F_{12} , 则力 F_3 与合力 F_{12} 应平衡。由二力平衡公理, F_3 与 F_{12} 共线, 故 F_3 必与 F_1 和 F_2 共面, 且通过 F_1 与 F_2 的汇交点。定理得证。

公理4 作用与反作用定律

两物体间的作用力和反作用力总是同时存在、大小相等、方向相反、作用线相同, 且分别作用在这两个物体上。

公理4概括了物体间相互作用的关系, 表明作用力和反作用力总是成对出现的。由于作用力与反作用力分别作用在两个物体上, 因此不能视为平衡力系。

公理5 刚化原理

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

这个公理提供了把变形体抽象成刚体模型的条件。如图1.4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, 则平衡状态保持不变。而绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下则不能平衡, 这时绳索就不能刚化为刚体。

公理5建立了刚体力学与变形体力学的联系, 扩大了刚体静力学的应用范围。当在变形体力学中直接应用静力学的结论和分析方法时, 其理论依据就是刚化原理。

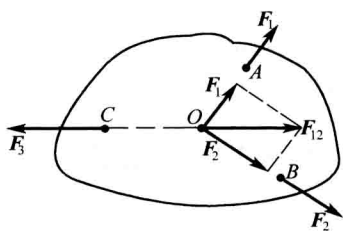


图 1.3

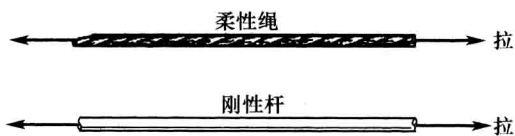


图 1.4

1.3 约束和约束反力

1.3.1 自由体和非自由体

有些物体, 如飞行的飞机、投掷出去的石块等, 在空间的位移不受任何限制。位移不受限制的物体称为自由体。相反, 位移受到限制而不能作任意运动的物体称为非自由体, 如放置于讲台的粉笔盒, 受到讲台的限制而不能下落, 再如火车受到铁轨的限制, 只能沿轨道运动而不能侧向运动脱离轨道。

1.3.2 约束、约束反力和主动力

对非自由体的某些位移起限制作用的物体称为约束, 如限制粉笔盒下落的讲台和限制火车侧向运动的铁轨。

约束对于物体的作用, 实际上就是力, 这种力称为约束反力, 简称约束力或反力。因此, 约束反力的方向必然与该约束能够阻碍的运动方向相反。应用这个准则, 可以确定约束反力的方向或作用线的位置, 而约束反力的大小则往往是未知的。

除约束力外,非自由体上所受到的所有促使物体运动或产生运动趋势的力,统称为主动动力。

在静力学中,物体所受到的全部的主动动力和全部的约束反力组成平衡力系,因此可以用平衡条件来求解未知的约束反力。

1.3.3 约束的基本类型和约束反力方向的确定

下面介绍几种在工程实际中经常遇到的简单的约束类型和确定约束反力的方法。

1. 柔性体约束

柔性体约束即为由柔软的绳索、链条或皮带等构成的约束,如图 1.5 所示。由于柔软的绳索本身只能承受拉力,所以它给物体的约束反力也只能是拉力。因此,绳索对物体的约束反力,作用在接触点,方向沿着绳索背离物体。通常用 F_T 来表示这类约束力。

2. 具有光滑接触表面的约束

例如支持物体的固定平面,如图 1.6 所示,当表面非常光滑,摩擦可以忽略不计,属于这类约束。

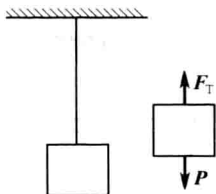


图 1.5

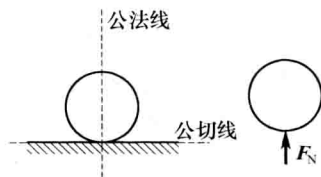


图 1.6

这类约束不能限制物体沿约束表面切线方向的位移,只能阻碍物体沿接触表面法线并向约束内部的位移。因此,光滑支承面对物体的约束反力,作用在接触点处,方向沿接触表面的公法线,并指向受力物体。这种约束反力称为法向反力,通常用 F_N 表示。

3. 光滑铰链约束

(1) 圆柱铰链和固定铰链支座

图 1.7(a) 所示的拱形桥,由左右两拱通过圆柱铰链 C 以及固定铰链支座 A 和 B 连接而成。

圆柱铰链简称铰链,由销钉 C 将两个钻有同样大小孔的构件连接在一起而成。如图 1.8 所示,约束反力过销中心,大小和方向不能确定,通常用正交的两个分力表示。

如果两个构件中有一个固定在地面或者机架上,则这种约束就称为固定铰链支座,简称固定铰支。如图 1.9 所示,其约束反力与圆柱铰链性质相同,反力过销中心,大小和方

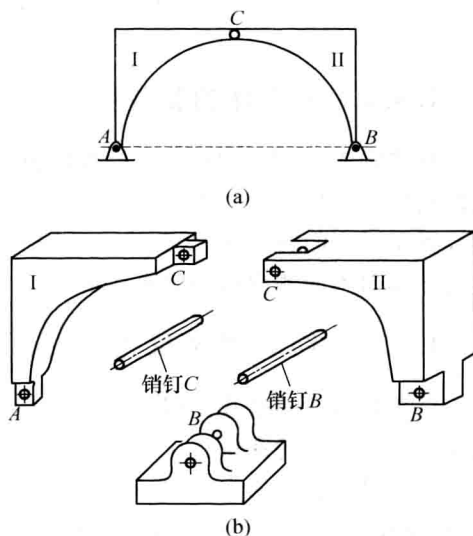


图 1.7