



普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等院校工科力学系列教材

理论力学 (第二版)

马连生 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等院校工科力学系列教材

理论力学

(第二版)

马连生 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

为满足目前课程学时压缩,教学第一线迫切需要相应学时的小篇幅教材,本书依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,于2008年制定的“理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求(试行)”编写而成。全书内容包括基本部分和专题部分,共17章,系统地介绍了静力学、运动学、动力学普遍定理、达朗贝尔原理、虚位移原理和拉格朗日方程的基本概念、基本理论、基本方法以及工程应用问题。注重叙述分析问题、解决问题的思路及方法;书中例题类型多,每章后附有习题。

本书可作为高等工科院校理论力学课程教材,也可供工程技术人员和自学人员参考。

图书在版编目 CIP 数据

理论力学 /马连生主编. —2版. —北京:科学出版社,2015.6

普通高等教育“十二五”规划教材·普通高等院校工科力学系列教材

ISBN 978-7-03-044177-5

I. ①理… II. ①马… III. ①理论力学-高等学校-教材 IV. ①031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 086612 号

责任编辑:朱晓颖 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年6月第 二 版 印张:19 1/4

2015年6月第三次印刷 字数:499 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

随着科学技术的发展和教育的深入,为更好地适应当前的教学要求,编者根据近年来使用本书的师生反馈,在广泛征集理论力学教师意见的基础上,编者对第一版进行修订。在秉承“理论严谨、逻辑清晰、由浅入深”、维持原书特色的原则基础上,修订内容主要包括:修订了第一版编排上不尽合理、文字叙述不太准确的地方;对各章的内容、例题作了增删和修订。

第二版修订的指导思想和修订大纲由马连生确定。具体的修订工作分配如下:绪论、第1~5章由宋曦、付小华负责修订,第6~9章由杨静宁、韩明君负责修订,第10~13章由赵永刚、雷芳明负责修订,第14~17章由马连生负责修订。马连生担任主编并负责全书的统稿工作。

限于编者水平,本书虽经修订,疏漏之处仍在所难免,希望广大读者能继续提出宝贵意见和建议,批评指正。

编者

2015年1月

第一版前言

理论力学是高等院校工科专业的一门技术基础课,具有理论严谨,逻辑性强,贴近工程等特点,也是后续力学课程和工科专业的基础。

本书是为满足目前课程学时压缩,教学第一线迫切需要相应学时的小篇幅教材,并依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,于2008年制定的“理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求(试行)”,在总结多年教学经验的基础上编写而成的。本书秉承了国内同类教材“理论严谨,逻辑清晰、由浅入深”的原则,针对高等工科院校的教师授课及学生学习特点,注重对分析问题、解决问题的思路及方法的总结;例题多、习题类型广,难度分布适当;力求“贴近现代工程实际,宜于教学”的编写风格,真正使之成为教师的“备课笔记”,学生的“学习指导书”。

本书内容包括基本部分(绪论、第1~15章)和专题部分(第16和第17章),由兰州理工大学宋曦(绪论、第1~3、5章)、杨静宁(第6~9章)、赵永刚(第10~13章)、马连生(第14~16章)和天津工业大学邢静忠(第4、17章)编写。全书由兰州理工大学李世荣主审。

本书是工科力学系列教材之一,在编写和出版过程中得到了兰州理工大学教务处以及工程力学系全体教师的支持。为使本书顺利出版,科学出版社的同志们付出了辛勤的劳动,做了大量的工作,在此一并表示衷心的感谢!

本书在编写过程中,参考了国内外一些优秀教材,并选用了其中的部分例题和习题,在此也向这些教材的编者致谢!

限于水平,书中的缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2008年11月

目 录

第二版前言	
第一版前言	
绪论	1

第一篇 静 力 学

引言	4
第 1 章 静力学基础	6
1.1 静力学公理及其推论	6
1.2 常见的约束类型及其约束力	8
1.3 物体的受力分析	11
小结	14
习题	15
第 2 章 简单力系	18
2.1 平面汇交力系	18
2.2 平面力对点之矩	24
2.3 平面力偶系	25
小结	28
习题	29
第 3 章 平面任意力系	33
3.1 平面任意力系向一点的简化	33
3.2 平面任意力系的平衡	38
3.3 物体系统的平衡	40
3.4 平面桁架的内力计算	46
小结	50
习题	51
第 4 章 空间力系	56
4.1 空间汇交力系	56
4.2 空间力偶系	59
4.3 空间力对点的矩和力对轴的矩	60
4.4 空间任意力系的简化和平衡	63
4.5 重心	68
小结	72
习题	73

第5章 摩擦	76
5.1 滑动摩擦定律	76
5.2 摩擦角和自锁现象	78
5.3 考虑摩擦时的平衡问题	79
5.4 滚动摩阻	82
小结	84
习题	85

第二篇 运 动 学

引言	88
第6章 点的运动学	89
6.1 点的运动方程、速度和加速度	89
6.2 点的速度和加速度在直角坐标轴上的投影	92
6.3 点的速度和加速度在自然轴上的投影	94
小结	99
习题	100
第7章 刚体的基本运动	103
7.1 刚体的平行移动	103
7.2 刚体的定轴转动	104
7.3 定轴转动刚体内各点运动量与整体运动量的关系	105
7.4 定轴转动刚体运动量的矢量表示法	107
7.5 轮系的传动比	108
小结	111
习题	112
第8章 点的合成运动	115
8.1 几个基本概念	115
8.2 点的速度合成定理	117
8.3 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	119
8.4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	122
小结	129
习题	130
第9章 刚体的平面运动	133
9.1 刚体的平面运动方程	133
9.2 平面图形内各点的速度	135
9.3 平面图形内各点的加速度	143
9.4 运动学综合应用举例	149
小结	154
习题	155

第三篇 动力学

引言	160
第 10 章 质点动力学基础	161
10.1 动力学基本定律	161
10.2 质点的运动微分方程	162
10.3 两类动力学基本问题	163
小结	166
习题	167
第 11 章 动量定理	170
11.1 动量与冲量的概念及其计算	170
11.2 动量定理	172
11.3 质心运动定理及其应用	175
小结	178
习题	179
第 12 章 动量矩定理	183
12.1 动量矩的概念及其计算	183
12.2 动量矩定理	185
12.3 刚体绕定轴转动的微分方程	188
12.4 刚体转动惯量的计算	191
12.5 相对于质心的动量矩定理	196
12.6 刚体的平面运动微分方程	198
小结	201
习题	202
第 13 章 动能定理	208
13.1 几种常见力的功	208
13.2 动能的概念及其计算	213
13.3 动能定理	215
13.4 功率方程	218
13.5 势力场 势能 机械能守恒定律	221
13.6 动力学普遍定理的综合应用	225
小结	229
习题	231
综合问题习题	235
第 14 章 达朗贝尔原理	239
14.1 质点的达朗贝尔原理	239
14.2 质点系的达朗贝尔原理	240
14.3 刚体惯性力系的主矢和主矩	242
小结	247

习题	248
第 15 章 虚位移原理	251
15.1 约束和虚位移	251
15.2 虚位移原理	256
小结	260
习题	261
第 16 章 拉格朗日方程	264
16.1 自由度与广义坐标的概念	264
16.2 广义力表示的质点系平衡条件	266
16.3 动力学普遍方程	269
16.4 拉格朗日方程	271
小结	276
习题	277
第 17 章 碰撞问题	279
17.1 碰撞的基本特征与分类	279
17.2 碰撞过程中的基本定理	280
17.3 质点对固定面的碰撞	281
17.4 定轴转动刚体的碰撞问题	284
小结	285
习题	286
参考文献	289
习题答案	290

绪 论

一、力学与工程

力学是历史悠久而又充满活力不断发展的学科。力学也是与数、理、化、天、地、生并列的七大基础学科之一。力学几乎交叉和渗透到生活及工程技术各个领域,它的生命力在于应用,应用过程又大大丰富和发展了力学学科本身。20 世纪以前,经典力学经过不断积累、应用和完善,形成了较为完善严密的理论体系,促进了人类文明的进步。进入 20 世纪以来,随着机械系统的复杂化、材料科学、航空航天等工业的发展,产生了诸多高新技术。如高层建筑、大跨度桥梁(图 0-1)、海洋平台、航空航天器(图 0-2)、高速列车以及我国近年来重大的工程项目——三峡工程、青藏铁路、国家体育场(鸟巢)、国家游泳馆(水立方)等都包含着许多力学因素,这些都离不开相关的力学知识。一些表面上与力学毫无关系的高新技术,也总会碰到难以解决的力学难题,如越来越小的计算机芯片内存储器数以百万计,往往会由于电流生热而导致芯片的损坏,这就是关于热应力的问题。近 20 年来,众多关系到人类生存和生活质量的宏观现象,如全球的气候问题、环境问题、海洋问题、自然灾害(台风、沙尘暴、山体滑坡)问题等,也不断提出新的力学问题。力学面临着新的机遇和挑战,这将孕育着理论体系的重大突破。

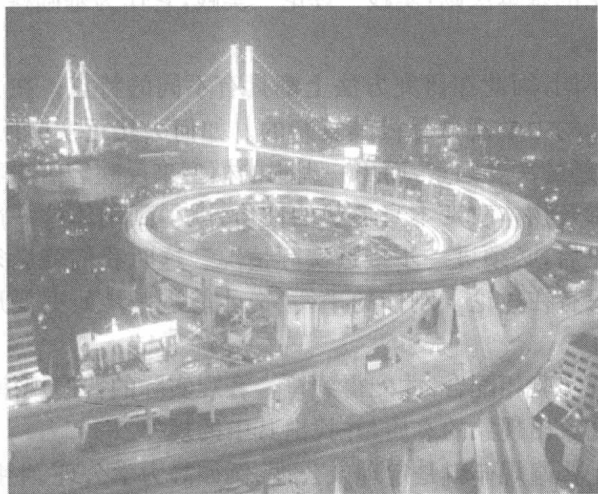


图 0-1 上海南浦大桥

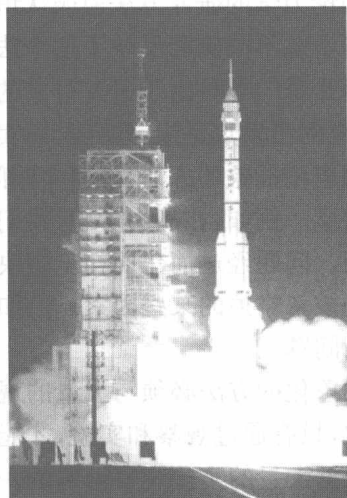


图 0-2 神舟七号发射

随着现代科学技术的发展,力学的研究内容已渗入到其他科学领域,力学在工程技术方面的应用结果,已逐渐形成应用力学的各种学科分支,诸如土力学、岩石力学、爆炸力学、复合材料力学、工业空气动力学、环境空气动力学等。力学和其他基础科学的结合也产生一些分支,最早的是与天文学结合产生的天体力学。20 世纪特别是 60 年代以来,出现更多的这类交叉分支,其中有物理力学、物理—化学流体动力学、等离子体动力学、电

流体动力学、磁流体力学、热弹性力学、生物力学、生物流变学等,这些新兴学科的建立都是以坚实的理论力学知识为基础的。

二、理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

机械运动是指物体在空间的位置随时间的改变。机械运动是最常见、最普遍的一种运动。固体的移动和变形,气体和液体的流动都属于机械运动。大到宇宙,小至基本粒子,无处不存在这种机械运动。对各种不同形态的机械运动的研究产生了不同的力学分支,理论力学属于以牛顿定律为基础的经典力学的范畴,它的研究对象是运动速度远远小于光速的宏观物体;原子、电子等微观粒子的运动属于量子力学的研究对象;而速度接近光速的物体的运动则是相对论力学的研究对象。虽然理论力学的研究范围有一定的局限性,但在解决现代工程技术中的宏观、低速物体的力学问题仍具有重要的实用价值。

理论力学的研究内容通常分为以下三部分:

静力学——主要研究物体的受力分析,力系的简化以及物体在力系作用下的平衡规律。

运动学——只从几何学的角度来研究物体的运动(如轨迹、速度和加速度等),而不研究引起物体运动的物理原因。

动力学——研究物体的运动与作用力之间的关系。

三、理论力学的研究方法

理论力学的研究方法遵循认识论的基本法则:实践—理论—实践,它作为基础科学和技术科学从不同侧面反映了这个法则。

但是每门学科由于研究对象的不同,因此在研究方法上都具有不同的特点。在力学中,研究的出发点是生产实践,而实际的力学现象是极其复杂的。如何去接近实际问题,则必须应用抽象的方法,忽略实际问题的次要因素,而用一理想的模型来反映客观事物的主要性质。例如,在静力学中,我们撇开物体改变本身形状的性质,就得到刚体这一简化的模型。问题经过简化而初步解决之后,必须进一步接近实际情况。这时我们就必须考虑那些被忽略掉的某些因素。例如只有在讨论了刚体的平衡后,才能进一步研究变形体的平衡问题。

抽象化的方法必须与大量的观察实验相配合,才能得到符合客观实际的普遍规律,也就是说,只有通过观察和实验,才能抽象出现象的本质,并找出其中的规律。

根据大量的实验观察得到的一些普遍规律就是定理或公理,例如静力学公理、牛顿定律等。这些公理和定律,反映了物体机械运动的一些最基本的规律,人们根据这些基本规律,再通过演绎推理的方法,考虑问题的具体条件,从而得出各种形式的定理和结论。

数学与力学有着极其密切的关系,数学不仅是推理的工具,同时还是计算的工具,力学现象之间的关系总是通过数量表示的。因此,计算技术对力学的应用有巨大的作用。

必须指出,应用数学的方法所得出的结论是否正确,还必须在实践中验证,因此理论必须靠实践来检验。从实践得到理论,再由理论回到实践。理论只有符合客观实践,才是正确的;也只有这样的理论,才有指导实践的作用。

四、学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课,也是许多工科专业后续课的基础。如材料力学、结构力学、流体力学、弹性力学、机械动力学、机械原理等课程都是以理论力学揭示的力学基本概念和基本规律为基础的。因此,理论力学也成为高等院校工科类专业的主干课程之一。学好理论力学是掌握各个工科专业所需知识的一个重要组成部分。

理论力学的分析和研究方法具有一定的典型性。学生在学习过程中,逐步形成正确的逻辑思维以及对实际问题具有抽象、简化和正确进行理论分析的能力,因此,学习理论力学有助于培养学生辩证唯物主义世界观以及分析问题和解决问题的能力。

有些工程实际问题可以直接应用理论力学的基本理论去解决,有些则需要用理论力学与其他专业知识共同解决,因此,学习理论力学是为解决工程实际问题打下一定的基础。

第一篇 静力学

引言

一、几个基本概念

静力学研究物体在力系作用下的平衡规律。

力是物体间相互的机械作用,这种作用使物体发生运动状态变化和形状变化。前者称为力的运动效应或力的外效应,后者称为力的变形效应或力的内效应。理论力学主要研究力的运动效应。力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点三个要素,故力应以矢量表示,本书中用黑体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量,而用普通字母 F 表示力的大小。在国际单位制中,力的单位是 N 或 kN。

力系是指作用在物体上的若干个力。工程中常见的力系,按其作用线所在的位置,可以分为平面力系和空间力系;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。

平衡是指物体相对于惯性参考系保持静止或匀速直线运动。它是机械运动的特殊形式。平衡是相对的,在工程实际中通常把固连于地球的参考系作为惯性参考系来研究物体相对于地球的平衡问题,其分析计算的结果具有足够的精确度,也能较好地与实际情况相吻合。

刚体是指在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体。这是一个理想化的力学模型。事实上,任何物体受力后或多或少都会发生变形,并不存在绝对的刚体。但是,对那些在运动中变形极小,或虽有变形但对其整体运动影响较小的物体,忽略其变形,对问题的研究结果不仅没有显著影响,而且可以使问题得以简化,这时,该物体可抽象为刚体。将物体抽象为刚体是有条件的,这与所研究的问题的性质有关,当物体的变形(即使很小)成为所研究问题的主要方面而不能忽略时,则不能抽象成为刚体,而应按变形体处理。理论力学的研究对象是刚体。

二、静力学研究的三类问题

1. 物体的受力分析

分析物体或物体系共受几个力,以及每个力的作用位置和方向。

2. 力系的等效替换或简化

作用于物体上的力系可以用另一个与它作用效果相同的力系来代替,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。如果一个力系与一个力等效,则此力称为该力系的合力,而该力系的各个力称为此力的分力。

3. 力系的平衡条件及其应用

研究物体处于平衡时,作用于物体上的力系所应满足的条件。

物体的受力分析是解决力学问题的关键,研究力系等效替换是便于了解力系对物体作用的总效应,并为导出各种力系的平衡条件作准备,也为动力学奠定了基础。利用平衡条件求解物体或物体系的平衡问题,则是静力学的核心问题。

静力学在工程实际中有着广泛的应用,利用平衡条件求解平衡问题所得的结果是设计结构、机械零件的计算依据。静力学中物体的受力分析方法和力系的简化理论也将直接应用于动力学中。



第 1 章 静力学基础

本章将介绍静力学公理,并阐述工程中常见的约束和约束力的分析,重点是物体的受力分析和受力图的绘制。

1.1 静力学公理及其推论

公理 1 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。合力的作用点也在该点,合力的大小和方向,由这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线确定。如图 1-1(a)所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的矢量和,即

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

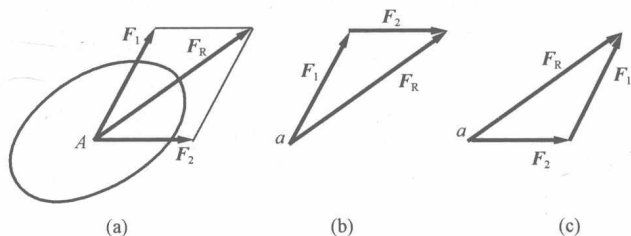


图 1-1

为简便起见,求合力的大小和方向时,也可以用力的平行四边形的一半来表示合成的过程。即由任意一点 a 起,作出一力三角形,如图 1-1(b)或(c)所示,力三角形的两个边分别为 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$,第三边 $\mathbf{F}_R$ 即代表合力矢量,这种求合力的方法称为力的三角形法则。应注意,力三角形只表示力的大小和方向,而不表示力的作用点或作用线,合力作用点仍在原来的汇交点 A 。

力的平行四边形法则与力的三角形法则表明了最简单的力系简化的规律,是复杂力系简化的依据。

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力(如 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$),使刚体保持平衡的必要与充分条件是:这两力的大小相等,方向相反,且作用在同一直线上,如图 1-2 所示。即

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

此公理揭示了作用于刚体上最简单力系平衡时所必须满足的条件。

在工程实际中,我们把只受两个力作用而处于平衡的物体,称为二力构件(或简称二

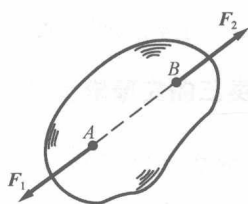


图 1-2

力杆),如图 1-3(a)、(b)所示。根据二力平衡条件可知,二力构件不论形状如何,其所受的两个力的作用线,必沿两力作用点的连线。这一性质在对物体进行受力分析时极为重要。

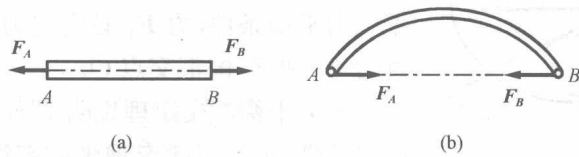


图 1-3

公理 3 加减平衡力系原理

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。

这个公理是研究力系的等效替换与简化的重要依据。但必须注意,此公理只适用于刚体而不适用于变形体。

由上述公理可以导出如下推论:

推论 1 力的可传性

作用在刚体上某点的力,可沿着它的作用线移到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用。

证明: 如图 1-4(a)所示的刚体,在 A 点受力 F 作用,若在力 F 的作用线上任一点 B 加上一平衡力系 F_1 、 F_2 ,且使 $F = F_2 = -F_1$,如图 1-4(b)所示,则 F 与 F_1 又构成一平衡力系。根据公理 3 将此力系去掉,得到作用于 B 点的力 F_2 ,如图 1-4(c)所示。于是,原来的力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 及力 F_2 等效,即原作用于 A 点的力 F 沿其作用线移到了 B 点。

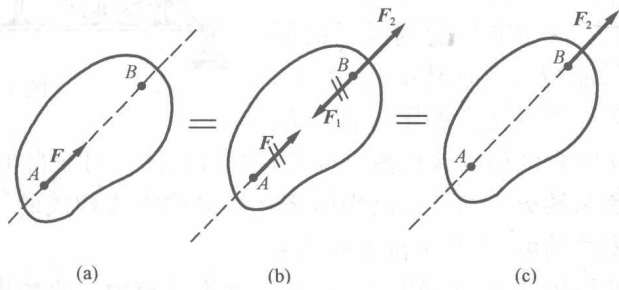


图 1-4

根据力的可传性,力对刚体的效应与力的作用点在其作用线上的位置无关。因此,对于刚体来说,力的三要素之一的作用点可代之以作用线。在这种情况下,力矢量可沿其作用线任意滑动,这种矢量称为滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

刚体在三个力作用下处于平衡,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: 设刚体在三个力 F_1 、 F_2 、 F_3 作用下平衡,其作用点分别为 A、B、C 三个点,如

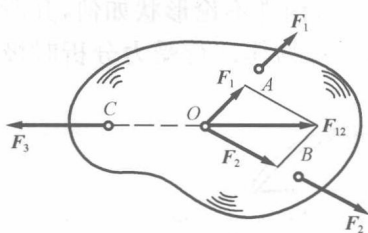


图 1-5

图 1-5 所示。已知 F_1 和 F_2 的作用线交于 O 点, 根据力的可传性, 将 F_1 和 F_2 移到汇交点 O , 并用力的平行四边形法则, 求得其合力 F_{12} 。则 F_3 应与 F_{12} 平衡。根据二力平衡条件, 力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面, 且通过力 F_1 和 F_2 的汇交点 O 。

三力平衡汇交定理说明了不平行的三个力平衡的必要条件, 可利用此定理来确定第三个力的作用线的方位。

公理 4 作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在, 两力的大小相等, 方向相反, 沿着同一直线, 分别作用在两个相互作用的物体上。若用 F 表示作用力, 用 F' 表示反作用力, 则

$$F = -F' \quad (1-3)$$

这一公理概括了物体间相互作用力的关系, 表明作用力和反作用力总是成对出现的。由于作用力和反作用力分别作用在两个物体上, 不能视为平衡力系。这是物体受力分析时必须遵循的原则。

1.2 常见的约束类型及其约束力

一、约束

在力学中通常把物体分为两类: 一类称为自由体, 它们在空间的位移不受任何限制。例如在空中飞行的飞机、炮弹和火箭等; 另一类称为非自由体, 它们在空间的位移受到一定的限制。例如, 悬挂在屋顶的电灯受到绳子的限制不能下落; 门、窗只能绕合页轴转动; 如图 1-6 所示的桥梁, 由于受到左右支座的限制而不能任意移动等。工程实际中的构件或机械零件都是非自由体。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束。约束是以物体相互接触的方式构成的。例如, 绳子是电灯的约束; 合页是门、窗的约束; 支座是桥梁的约束。



图 1-6

约束对于物体的作用, 实际上就是力, 这种力称为约束力。除约束力以外, 作用于物体上的重力、水压力、土压力、风力、电磁力等, 这些力一般是给定的, 它不取决于物体上其他的力, 称为主动力。

通常约束力是未知的, 约束力的大小和方向不能预先确定, 只能由约束的性质和主动力状况来决定, 因此确定约束力就成为力学分析的重要任务之一。确定约束力方向的准则是约束力的方向总是与该约束所能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位置。至于约束力的大小, 在静力学问题中, 约束力和物体受到的其他主动力组成平衡力系, 因此可用平衡条件求出约束力。而在动力学问题中, 约束力可由动力学方程确定。