



普通高等教育工程力学类“十二五”规划教材

FOUNDATION OF ENGINEERING MECHANICS

工程力学基础

孙保苍 主 编
丁建波 副主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书是作者根据多年从事工程力学教学的经验,在充分调研各类工程技术专业类学生培养计划的基础上,本着抽象问题具体化、复杂问题简单化、语言上力争通俗易懂、讲解问题上力争深入浅出的原则编写的。

全书分静力学和材料力学两部分。静力学部分主要包括力系的简化和平衡条件、刚体和刚体系统的受力分析与平衡条件及其应用等。材料力学部分主要介绍材料力学的基本内容,包括拉伸、压缩与剪切、扭转、弯曲、应力状态与强度理论、组合变形、压杆稳定等。

本书是按 80 学时的教学要求编写的,可作为理工科院校材料、冶金、环境、电气工程、化工、轻工等专业的工程力学教材。由于本书通俗易懂,充分照顾了培养应用型人才的需要,因此,也可作为独立学院、高职高专类院校相近专业的工程力学教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学基础/孙保苍主编. --北京:国防工业出版社,2011.12
普通高等教育工程力学类“十二五”规划教材
ISBN 978-7-118-07821-3

I. ①工… II. ①孙… 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(2011)第 257062 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

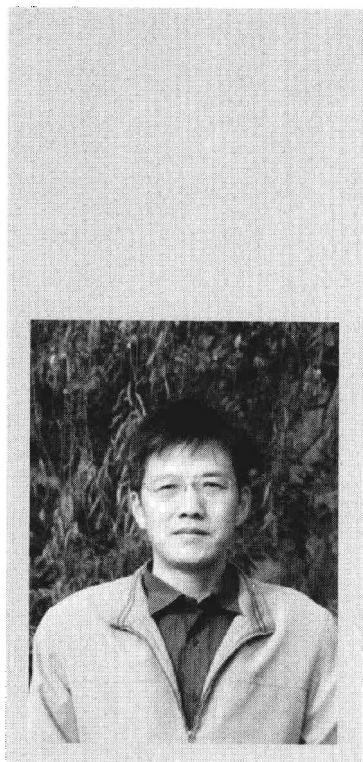
开本 710×960 1/16 印张 17½ 字数 319 千字

2011 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 31.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717



作者简介

孙保苍 男,1965 年 5 月生,山东东明人,南京航空航天大学博士,江苏大学土木工程与力学学院教授、副院长,江苏大学工程力学课程(江苏省精品课程)负责人。目前从事的研究方向为旋转机械动力学、振动及控制、工程中的关键力学问题。近几年参加或主持国家自然科学基金、国防基础研究项目、教育厅基金等纵向课题多项,发表科研及教学论文 30 多篇。

前 言

工程力学类课程是机械、土木、动力、材料、航空航天等工程技术类专业的重要专业基础课,是工程技术科学的理论基础之一,是连接基础课与专业课的桥梁。它既是一门理论系统完整、理论和实践并重、理论密切联系实际学科,又是工科学生接触工程问题的第一门课程。工程力学课程除了要教给学生力学的基本理论之外,还应该培养学生的工程技术观点和处理工程问题的方法,因此本课程在高等工科教育中具有重要的地位和作用。随着高等教育改革的不断深入,对工程力学课程的改革也提出了新的更高的要求。近 20 年来,工程力学课程的改革取得了一系列成果,很多教学研究的课题组编写了相应的教材。本书是在充分调查工程技术类专业的培养计划与要求的基础上,结合作者参与教学改革的体会,总结作者多年来教学工作的经验,针对材料、环境、化工等工程技术类专业的特点与学生培养的要求编写的。编写过程中同时参照了教育部基础力学教学指导委员会针对机械、动力等类专业制定的理论力学和材料力学的教学基本要求的征求意见稿。编写本书的基本思想是既考虑课程的系统性和完整性,又要充分考虑相关专业学生培养的需要,重在知识点的讲授和学生对基本概念的理解。既考虑到学生创新能力的培养,更注重培养学生规范化做事的良好习惯。

全书分静力学和材料力学两部分,共计 15 章。其中静力学部分 5 章,材料力学部分 10 章。在讲授过程中,作者力求做到抽象问题具体化、复杂问题简单化。语言上力争通俗易懂,讲解问题深入浅出。在例题的编排上,通常是要求学生先通过一个简单的例题掌握基本的理论与方法,然后通过若干个有一定难度的例题加深对基本概念、基本方法的理解与掌握。在例题与习题的编排上考虑了基本概念、方法和工程实际应用三种类型的合理搭配。

全书由孙保苍教授主编。参加编写的还有丁建波副教授(第 5 章、第 12 章)。在编写工程中,笔者从与陈忠安教授、陈章耀副教授的讨论中得到了很多有益的启

发,在此表示诚挚的谢意。

本书承蒙陈忠安教授、陈章耀和张晓芳副教授审阅,他们在百忙之中提出了许多宝贵意见,在此表示深深的感谢。

本书的编写参考了部分同类教材,在此向这些教材的编写者表示真诚的谢意。

限于编者水平,书中定有不足之处,殷切希望广大师生和读者指正,不胜感激。

编者

2011年8月

目 录

第一篇 静力学

引 言	1	方程	36
第 1 章 静力学公理与物体受力分析	2	3.3 静定与超静定问题、 物体系统的平衡	39
1.1 力的基本概念	2	3.4 平面平行力系	43
1.2 静力学基本公理	3	思考题	44
1.3 约束及分类	5	习题	45
1.4 物体的受力分析	8	第 4 章 摩擦	50
思考题	11	4.1 滑动摩擦	50
习题	12	4.2 考虑摩擦时物体的 平衡	53
第 2 章 平面简单力系	14	4.3 滚动摩擦简介	56
2.1 平面汇交力系分析的几 何法	14	思考题	58
2.2 平面汇交力系分析的解 析法	16	习题	59
2.3 力对点的矩	20	第 5 章 空间力系简介	63
2.4 力偶与平面力偶系	22	5.1 空间汇交力系	63
思考题	26	5.2 力对点的矩与力对轴 的矩	65
习题	27	5.3 空间一般力系的平衡	66
第 3 章 平面一般力系	30	5.4 平行力系的中心、 重心	69
3.1 平面一般力系的简化	31	思考题	76
3.2 平面一般力系的平衡		习题	76

第二篇 材料力学

第6章 材料力学的基本概念 80

6.1 材料力学的任务 80

6.2 材料力学的基本假设 81

6.3 外力、内力及截面法 82

6.4 应力、应变及变形 84

6.5 杆件变形的基本形式 86

思考题 87

第7章 拉伸、压缩与剪切 88

7.1 轴向拉伸与压缩的概念 88

7.2 轴向拉(压)时横截面上的内力 89

7.3 轴向拉(压)时横截面及斜截面上的应力 91

7.4 许用应力、拉(压)杆的强度条件 95

7.5 轴向拉(压)杆的变形 97

7.6 材料在拉伸和压缩时的力学性质 100

7.7 简单拉(压)超静定问题 106

7.8 应力集中概念 109

7.9 连接件的强度计算 110

习题 114

第8章 平面图形的几何性质 123

8.1 形心与静矩 123

8.2 惯性矩、极惯性矩、惯性积 125

8.3 组合图形的惯性矩、平行

移轴公式 128

思考题 129

习题 129

第9章 扭转 131

9.1 扭转的概念 131

9.2 外力偶矩、扭矩 131

9.3 圆轴扭转时的应力 134

9.4 圆轴扭转时的变形 140

思考题 142

习题 142

第10章 弯曲内力 147

10.1 平面弯曲的概念 147

10.2 梁的计算简图 148

10.3 剪力与弯矩 150

10.4 剪力方程和弯矩方程、剪力图和弯矩图 151

10.5 微分关系 155

思考题 157

习题 158

第11章 弯曲应力 161

11.1 引言 161

11.2 纯弯曲时横截面上的正应力 162

11.3 弯曲正应力强度条件 165

11.4 弯曲切应力 169

11.5 提高梁抗弯强度的

措施	173
思考题	175
习题	176
第 12 章 弯曲变形	181
12.1 概述	181
12.2 挠曲线近似微分 方程	181
12.3 计算梁的位移的积 分法	183
12.4 计算梁的位移的叠 加法	187
12.5 简单超静定梁	191
12.6 提高梁刚度的主要 措施	193
思考题	194
习题	195
第 13 章 应力状态与强度理论	198
13.1 应力状态的概念	198
13.2 二向应力状态分析	199
13.3 极值应力、主应力	201
13.4 三向应力状态中的最 大应力	203
13.5 广义胡克定律	204
13.6 复杂应力状态下的弹 性变形能	207
13.7 强度理论概述	208
13.8 几种常用的强度	

理论	210
思考题	215
习题	215
第 14 章 组合变形	220
14.1 组合变形的概念	220
14.2 拉伸(压缩)与弯曲的 组合变形	220
14.3 偏心拉伸和压缩	224
14.4 弯扭组合变形	225
习题	229
第 15 章 压杆稳定	233
15.1 压杆稳定的概念	233
15.2 细长压杆临界力计算 的欧拉公式	235
15.3 临界应力、压杆的 分类	238
15.4 压杆的稳定计算	243
15.5 提高压杆稳定性的 措施	245
思考题	246
习题	246
附录一 型钢规格表	250
附录二 部分习题参考答案	262
参考文献	269

第一篇 静 力 学

引 言

静力学的主要任务是研究物体在力系作用下的平衡。

静力学的研究对象是刚体。刚体是一个抽象的、理想化的力学模型。它是这样一种物体：在力的作用下，物体内任意两点之间的距离始终保持不变。或者说刚体是在力的作用下不变形的物体。

平衡是指物体相对于惯性坐标系保持静止或匀速直线运动的状态，是物体机械运动的一种特殊形式。在一般的工程问题中，通常把固结于地球的参考系当作惯性参考系。

静力学主要研究以下两个问题。

1. 力系的简化

力系是指作用在物体上的一群力。若两个不同的力系对物体的作用效果相同，则该两力系为等效力系。用一个简单力系代替一个复杂的力系称为力系的简化。对力系进行简化的目的是为进一步分析研究物体的平衡与运动提供方便。

2. 力系的平衡条件

力系的平衡条件是指物体处于平衡状态时，作用在物体上的力系所应满足的条件。平衡是相对的，是物体运动的特殊形式。当物体在某力系作用下处于平衡状态时，则该力系称为平衡力系。

第 1 章 静力学公理与物体受力分析

1.1 力的基本概念

1. 力的定义

力是人们在长期的生产和生活实践中总结出来的一个科学概念,是力学的一个基本概念。人们对于力的认识最初是与推、举、投掷时肌肉的紧张与疲劳等主观感觉联系起来的。后来,人们在日常生产和生活中经过反复的观察、实验、分析逐步认识到,不论物体机械运动状态的改变是变形还是破坏,都是物体间相互作用的结果,如物体运动时的减速和加速、工程结构中构件的变形等。经过长期的总结和科学抽象,人们给出了力的定义:力是物体间的相互作用,这种作用的结果是使物体的运动状态发生改变,或使物体变形。

力对物体的作用效果可分为外效应和内效应。外效应是指物体在力的作用下机械运动状态的改变,也称为运动效应,如人们推动自行车的运动;内效应指物体在力的作用下物体形状的改变,也称为变形效应,如拉力器的变形、桥梁的变形等。理论力学只研究力的外效应,而力对物体的内效应则由材料力学部分研究。

2. 力的三要素

实践表明,力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点,此三者称为力的三要素。

力的三要素可用一有向线段表示,如图 1.1 所示。线段的长度表示力的大小,力的大小是指力对物体作用的强弱。力的法定标准计量单位是牛,符号为 N ,有时也用千牛,符号为 kN ;线段的方位和箭头的指向表示力的方向;线段的起始点(或终点)表示力的作用点。实际上力总是作用在一定的面积上的,当力的作用面积与被作用物体的面积相比很小时,可以忽略作用面积的大小,近似看成作用在一个点上。作用于一点的力称为集中力;如果力的作用面积与被作用物体的面积相比较,则称这种力为分布力。通过力的作用点沿力的方位的线,称为力的作用线。

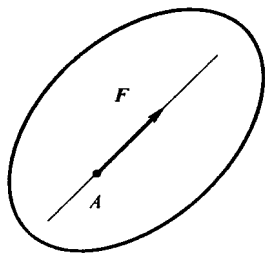


图 1.1

1.2 静力学基本公理

在生产和生活实践中,人们对物体的受力进行了长期的观察、试验和分析,对力的基本性质进行了概括和总结,得出了一些大家公认的、且经过实践检验是正确的、毋须证明的正确的结论,这就是静力学公理。静力学理论就是建立在这些公理基础之上的。

公理一(二力平衡公理) 作用在同一刚体上的两个力使物体保持平衡的充分必要条件是:这两个力大小相等、方向相反、作用在同一条直线上,或者说这两力等值、反向、共线。

此公理阐明了静力学中最简单力系(二力构成的力系)的平衡条件,是研究其它力系的基础。必须指出的是,此公理只适用于刚体。对于变形体,平衡条件是必要的,而不是充分的。如一不计自重的刚性杆受一对大小相等、方向相反、作用在同一条直线上的力作用,无论这一对力是拉(图 1.2(a))还是压(图 1.2(b)),该刚性杆均可保持平衡。如若将刚性杆换成柔索,那么在拉力作用下柔索可以保持平衡,而在压力作用下,平衡不能保持。

在不考虑自重的条件下,工程中有很多构件只受两个力的作用而处于平衡,这样的构件称为二力构件,如图 1.3 所示。如果二力构件是杆件,称为二力杆。对于二力构件,其所受两个力的作用线必然沿两力作用点的连线。二力杆可以是直杆,也可以是曲杆。

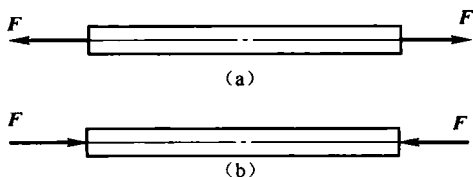


图 1.2

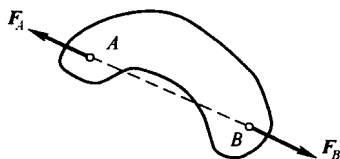


图 1.3

公理二(加减平衡力系公理) 在作用于物体上的力系中,加上或减去任意一个平衡力系,并不改变原力系对物体的作用效应。

该公理的正确性是显而易见的。这是因为平衡力系对物体的平衡或运动状态没有任何影响。此公理对力系的简化起重要的作用。由该公理还可得出以下两个推论。

推论一(力的可传性原理) 作用在物体上的力可沿力的作用线任意移动而不改变力对物体的作用效应。

证明:设力 F 作用于刚体上的 A 点,如图 1.4(a)所示。今在力作用线上的一点 B 加一平衡力系 F_1 、 F_2 ,使得 $F_1 = -F_2 = F$,如图 1.4(b)示。由加减平衡力系

公理可知,这样做不改变力 F 对刚体的作用效应。可见,力 F 、 F_2 也构成一平衡力系,故可减去。于是就只剩下一个力 F_1 ,如图 1.4(c) 示。这就等于把力 F 沿其作用线从 A 移动到了 B ,力 F 对物体的作用效应并没有改变。推论一得证。

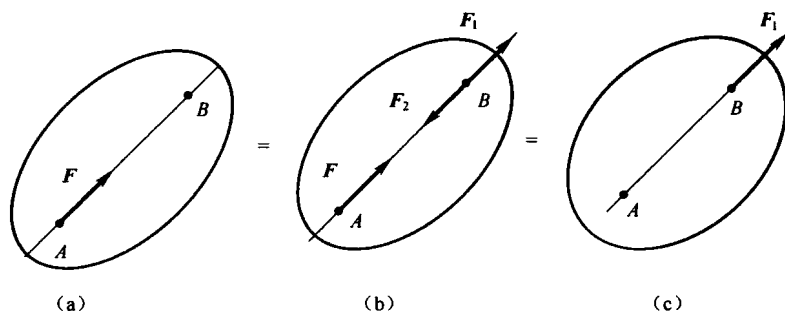


图 1.4

由力的可传性原理可知,对于刚体而言,力的三要素可改为大小、方向、作用线。

必须说明的是,力的可传性原理只适用于刚体。如果是变形体,力沿其作用线的任何移动都可能改变力对物体的作用效应。

公理三(力的平行四边形法则) 作用于刚体上一点的两个力可以合成为一个力,合力的大小与方向可以由两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示,如图 1.5(a)所示。用矢量表示为

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

此公理在应用时,可由任一点起,另作一三角形,如图 1.5(b)所示。三角形的两边分别表示两个力,第三边表示合力。这一求两力合力的方法称为力的三角形法则。

推论二 三力平衡汇交定理

刚体受三个力作用而处于平衡时,若其中的两个力的作用线汇交于一点,则第三个力的作用线必在同一平面内,且通过前两力的汇交点。

证明:如图 1.6 所示,设在刚体 A 、 B 、 C 三点分别作用三个互不平行的平衡力 F_1 、 F_2 和 F_3 。将力 F_1 、 F_2 的作用线延长汇交于点 O ,并用力的平行四边形法则求出该两力的合力 F_{12} 。由本定理的条件知,在力 F_{12} 与 F_3 的共同作用下,刚体仍然处于平衡状态。由二力平衡公理, F_{12} 与 F_3 必须等值、反向、共线,所以力 F_3 必通过 F_1 和 F_2 的汇交点 O 。定理得证。

此定理的逆定理不成立。

公理四 作用与反作用定律

两个物体间的相互作用力,即作用力与反作用力总是同时存在,它们大小相等、方向相反、作用线重合,并分别作用在两个不同的物体上。这一定律概括了两物体间相互作用的关系,不论物体是处于静止还是运动状态,该定律普遍适用。

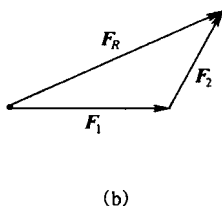
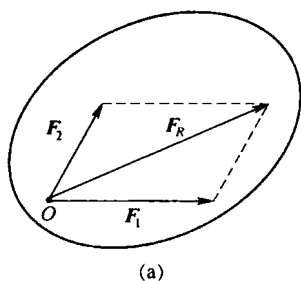


图 1.5

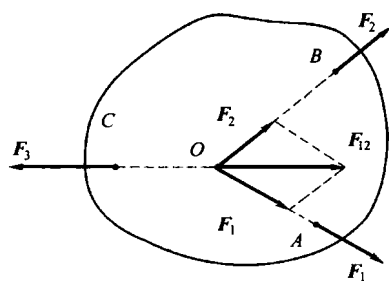


图 1.6

必须注意的是,与二力平衡公理不同,作用力和反作用力是作用在两个不同物体上的。因此,尽管二力大小相等、方向相反、沿同一作用线,但不能相互平衡。

公理五 刚化公理

变形体在某一力系作用下处于平衡,如假想将其刚化为刚体,则其平衡状态保持不变。

此公理给出了把变形体看做刚体的条件。应该指出,刚体的平衡条件对变形体来说,只是平衡的必要条件,而不是充分条件。以一绳索为例,它在大小相等、方向相反、作用在同一条直线上的两个拉力作用下处于平衡。此时将其刚化,平衡状态不变。如将两拉力改为压力,该绳索将不能平衡,因而就不能将其刚化为刚体。

1.3 约束及分类

1. 自由体和非自由体

位移不受任何限制的物体称为自由体,如空中飞行的飞机、人造卫星等。位移受到限制的物体称为非自由体,如工程结构中的桥梁、水坝,机械系统中的齿轮轴等工程构件。

2. 约束与约束力

对非自由体的某些位移起限制作用的物体称为约束。如放在桌面上的计算机受到桌面的限制,桌面就是计算机受到的约束;机械系统中的轴类零件受到轴承的限制,轴承就是轴受到的约束等。约束之所以限制了被约束物体某个方向的位移,是因为在该方向上对物体施加了力。约束作用在被约束物体上的力称为约束反力,简称约束力或支反力。

3. 主动力和被动力

主动力是指引起物体运动或使物体产生运动趋势的力,如物体的重力、水的压力、风载荷、冲击力等。物体所受的主动力一般是已知的,物体受到主动力的作用后才产生约束反力,因此约束反力也称被动力。

下面介绍几种常见的约束,说明这些约束的约束反力(也称约束力)的特征。

(1) 柔索约束。工程中属于这类约束的有绳索、链条及传动胶带等。由于柔索本身只能承受拉力, 因此柔索的约束反力通过柔索与物体的连接点, 方向沿着柔索背离物体, 如图 1.7 所示。

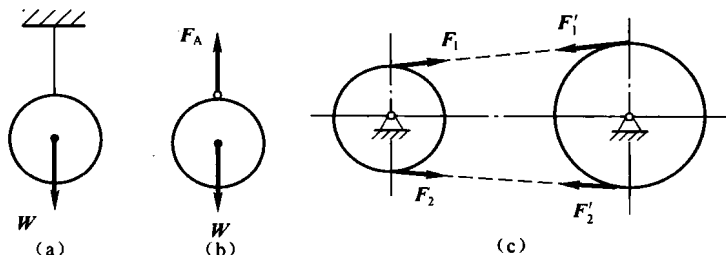


图 1.7

(2) 光滑面约束。当两物体接触时, 若物体间摩擦力很小, 可以忽略不计时, 这样的约束称为光滑面约束。当物体受光滑面约束时, 物体可沿着接触面移动或离开接触面, 但不能沿着接触面的公法线朝向运动。因此, 光滑面约束的约束反力通过接触点, 沿接触点的公法线指向物体。图 1.8 为两个光滑面约束的实例。

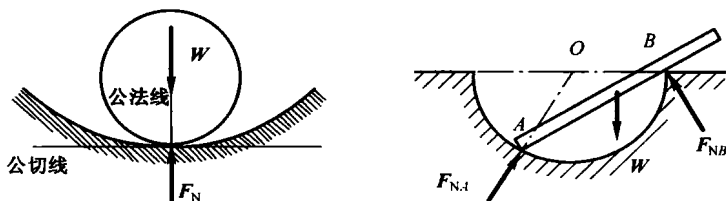


图 1.8

(3) 光滑圆柱铰链约束

光滑圆柱铰链约束, 即通常说的铰链约束。是指将销钉插入两构件的圆孔, 把两构件连接起来的一种连接结构, 其中销钉和圆孔都是光滑的 (或摩擦力非常小, 可以忽略不计), 如图 1.9 所示。光滑铰链约束限制了两构件在垂直于销钉轴线平面内的相对移动, 但不能限制两构件绕销钉的相对转动。图 1.9 为一光滑圆柱铰链约束的实例。

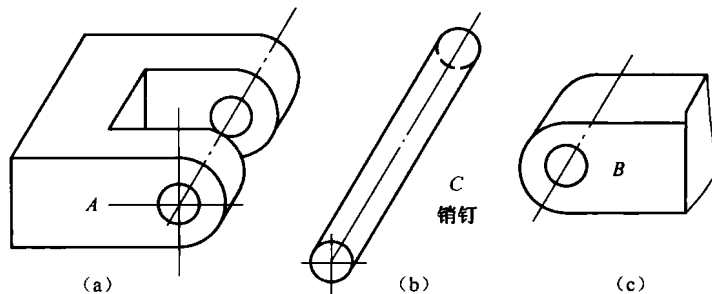


图 1.9

铰链约束中销钉和圆孔本质上属于光滑面约束,因此它们之间的约束反力是沿着接触面的公法线的,如图 1.10(a)所示。但由于接触点的位置随载荷方向的改变而改变,一般无法预先确定,通常用通过圆孔中心的两个正交分力来表示铰链约束的约束力,如图 1.10(b)、(c)所示。

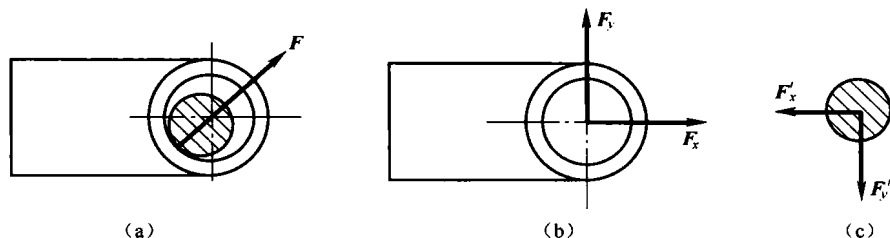


图 1.10

根据这种结构的特点,平面铰链约束可分为下列三种。

(1)中间铰链约束。这种约束连接了工程结构中两个具体的构件,图 1.11 所示为其简图及其约束反力的表示法。

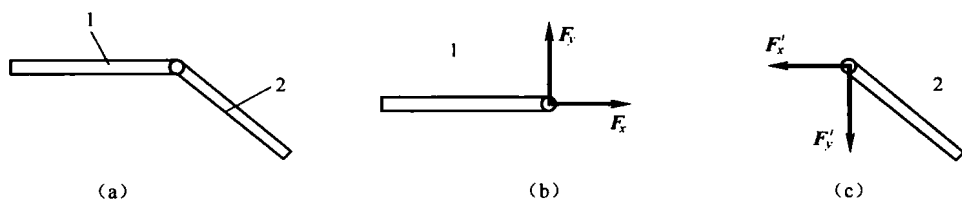


图 1.11

(2)固定铰链约束。在铰链约束中若其中的一个构件是固定支座,则这种约束称为固定铰链约束,简称固定铰支座,图 1.12 为其简图及其约束反力的表示法。

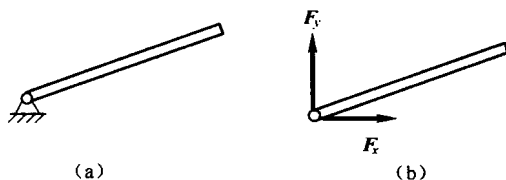


图 1.12

(3)可动铰链约束。可动铰链约束是在固定支座和支承面之间安装若干辊轴而构成的结构,如图 1.13(a)所示。这种约束不阻碍结构沿支承面的位移,但阻止结构沿支承面法线方向的移动。因此,可动铰链约束的约束反力垂直于支承面,并通过圆孔中心,方向可任意假定。这种结构的一般简图如图 1.13(b)所示,约束反力画法如图 1.13(c)所示。

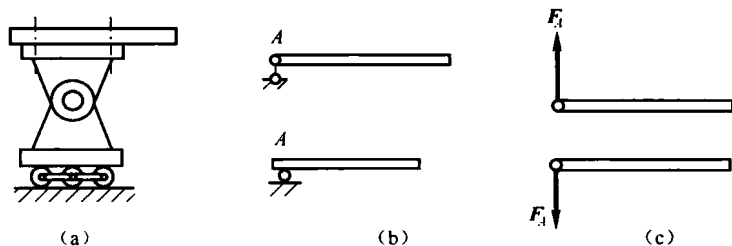


图 1.13

1.4 物体的受力分析

研究物体的平衡和运动规律时,首先要分析物体的受力情况,然后根据问题的性质建立必要的方程来求解未知量,这是解决力学问题的一般方法。

为了弄清楚物体的受力情况,必须把要研究的物体从与其联系的周围物体中分离出来,单独画出它的轮廓简图,这一过程称为取分离体。在分离体上画出作用于其上的主动力,并根据周围约束的性质画出全部约束力,这种表示物体受力的简明图形,称为受力图。

恰当地选取分离体,并准确画出物体的受力图是解决力学问题的基础。画受力分析图的一般步骤如下:

(1)取分离体。根据题意和已知条件选取研究对象,解除研究对象所受的全部约束,用尽可能简单的轮廓线将它单独画出,这就是取分离体。研究对象可以是一个物体,也可以是几个物体组成的物体系统(简称物系)。

(2)画主动力。在分离体上画出其所受的全部主动力。不能遗漏,也不能把作用在这个研究对象上的主动力画到其它物体(物系)上。主动力的方向和作用线不能随意改动。

(3)画约束反力。在解除约束的地方,根据约束的性质,画出它们对研究对象的约束反力。画约束反力时切不可凭主观臆断,随意画出。

当研究对象是由若干个物体组成的物体系统(简称物系)时,物体除受到外部的约束外,组成物系的各物体之间还有一定的联系。系统与其它物体的联系构成外约束,而系统内各物体之间的联系称为内约束。此时进行受力分析时,还必须注意以下两点。

(1)画整体受力图时只画外力,不画内力。

(2)画物系中单个物体的受力图时,要注意作用力与反作用力的方向要协调,主动力和外约束反力的方向与整体分析时的方向要一致。

下面举例说明受力图的画法。

例 1.1 用重为 W 的滚子碾平路障,如图 1.14(a)所示,画出滚子的受力分析图。

解: (1)取滚子为研究对象。

(2)画出作用在滚子上的主动力重力 W 和牵引力 F 。

(3)两处的约束均为光滑面约束,根据约束的性质画出约束反力,得滚子的受力分析,如图 1.14(b)所示。

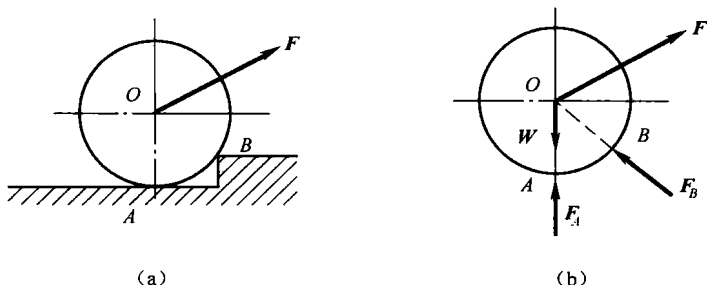


图 1.14

例 1.2 不计重量的梁如图 1.15(a)所示。A 端为固定铰支座, B 端为可动铰支座,梁上作用有均布载荷 q 和集中力 F 。画出梁的受力图。

解: (1)取分离体。

(2)画出作用于梁上的均布载荷 q 和集中力 F 。

(3)根据 A、B 段约束的性质画出约束反力,得梁的受力分析,如图 1.15(b)所示。

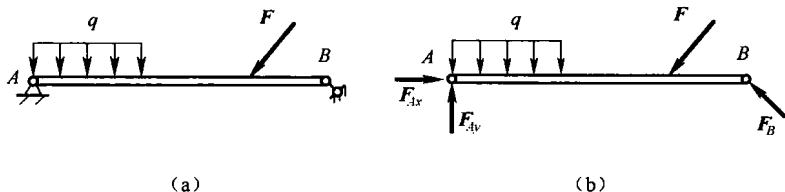


图 1.15

例 1.3 三铰拱由左、右两拱通过铰链 C 铰接而成,如图 1.16(a)所示, A、B 处为固定铰支座。不计自重,画出三铰拱的整体受力图和 AC、BC 两拱的受力图。

解: (1)先分析整体受力情况。由于不计自重, BC 拱为二力杆,所以 B 支座约束反力沿 B、C 连线方向。又 A 为固定铰支座,约束反力为 F_{Ax} 、 F_{Ay} ,所以,整体受力如图 1.16(b)所示。

(2)由于 BC 拱为二力杆,结合整体分析,并按照外约束反力不变的原则画上 B 处约束力, BC 拱其受力分析如图 1.16(c)所示。

(3)对于 AC 拱,受到主动力 F ; C 处受到 CB 拱给它的约束反力,与 F_C 是作用