

应用型本科院校**土木工程**专业系列教材

YINGYONGXING BENKE YUANXIAO

TUMU GONGCHENG ZHUANYE XILIE JIAOCAI



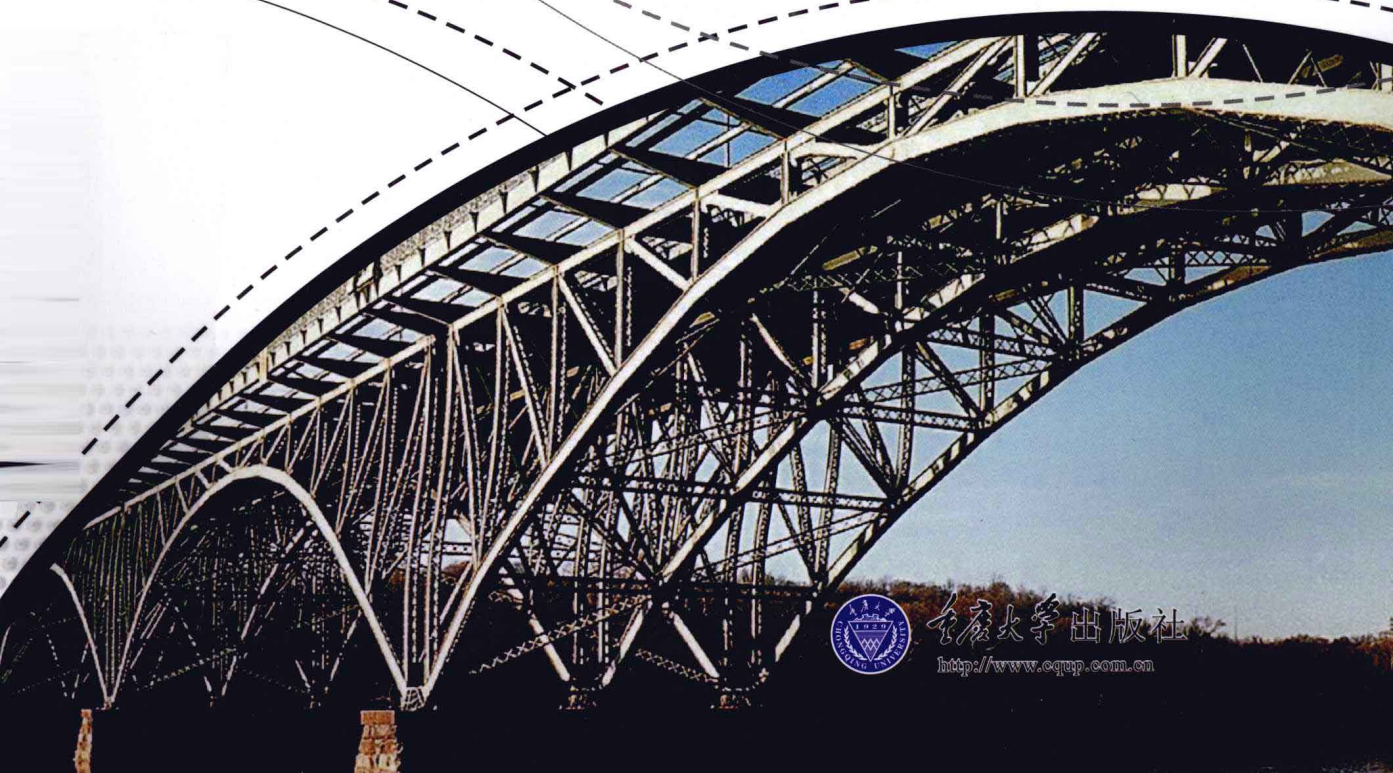
TUMU GONGCHENG

工程力学

陈孝坚 □ 主 编

何运祥 王青春 □ 副主编

朱渝春 □ 主 审



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

应用型本科院校**土木工程**专业系列教材

YINGYONGXING BENKE YUANXIAO
TUMU GONGCHENG ZHUANYE XILIE JIAOCAI



TUMU GONGCHENG

工程力学

主 编 ■ 陈孝坚

副主编 ■ 何运祥 王青春

参 编 ■ (以姓氏笔画为序)

方秀珍 李 鹏 秦 欣 张大林

常州大学图书馆
藏书章

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书是应用型本科土木工程专业系列教材之一。全书共 17 章,包括静力学基础、平面力系的合成与简化、平面力系的平衡、空间力系的平衡、点的基本运动、点的复合运动、刚体的平面运动、动力学基本方程、动力学基本定理、达朗贝尔原理、构件的四种基本变形、组合变形、压杆稳定等。各章附有习题,在书末还设有附录部分作为教材的补充资料,以起到辅助和更深入学习的作用。

结合教材的附录部分,本教材特别适于应用型本科 120 学时左右的土木工程专业作教学用书;由于教材的基本内容和构成体系的特点,使其在作适当的删减(删减第 5~11 章后依然自成一体)后,可作为 60 学时左右的建筑类专业(城规、建筑学、工程管理、工程造价、设备安装等专业)的教学用书,还可供工程技术人员作参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/陈孝坚主编. —重庆:重庆大学出版社,2012.2

(应用型本科院校土木工程专业系列教材)

ISBN 978-7-5624-6312-2

I. ①工… II. ①陈… 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 162185 号

应用型本科院校土木工程专业系列教材

工程力学

主 编 陈孝坚

副主编 何运祥 王青春

主 审 朱渝春

责任编辑:林青山 版式设计:林青山

责任校对:陈 力 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617183 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:437 千

2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-6312-2 定价:29.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

本书根据国家教委关于高等院校应用型人才培养目标的要求编写,既注意吸收经典力学的理论及方法,关注力学理论及应用的最新发展,又注意实际工程的特性,有益于学习知识与应用知识和技能的有机结合。

本书有以下 4 个特点:

(1)表达方式的直观性:大量的图片取代文字叙述,对许多力学现象增加了定性分析。

(2)课程学习的阶段性:对一些比较特殊的知识点采用了“先述其然,后述其所以然”的作法。首先要求理解和掌握“是什么”“怎么做”,然后要求理解“为什么”,对于尚可进一步深入研究的专题、对于部分推理步骤太复杂的计算公式的推导过程,统置于书末的附录中,以利于分层次、分阶段学习。

(3)语言表述的通俗化:在语言文字表述中力求通俗易懂、深入浅出。

(4)构成体系的模块化:教材在构成体系上采用章下直接设置知识点的方式。原则上教材中的一节相当于一个知识点,分析一个小专题。

工程力学是高等教育建筑类有关专业(特别是土木工程专业)的专业基础课程。本书特意为以培养应用型人才为目标的专业基础教学而编写。教材的直观、形象和易懂的特点,降低了学习难度,从而也易于自学和函授教学,这也是教材的编写目的之一。

参加本书编写工作的有:重庆大学陈孝坚(第 1,6,7,8,9,10,17 章)、重庆三峡学院何运祥(第 2,3,4,5 章)、华北科技学院王青春(第 12,15,16 章)、华北科技学院方秀珍(第 13,14 章)、重庆大学李鹏和秦欣(附录部分)、江西大宇学院张大林(第 11 章)。

全书由教学经验、工程经验丰富的朱渝春教授审稿,他提出了许多宝贵的意见,在此致以诚挚的感谢和敬意!在资料的收集、图片的选用和绘制过程中,李奇副教授、冉春林副教授、张刚工程师和屈松老师做了许多工作,在此一并致以谢意!

书中不妥与疏漏之处在所难免,恳请各位同行和广大读者提出宝贵意见,以便进一步完善和提高。

编 者

2011 年 11 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 工程力学的研究对象与中心任务	1
1.2 工程力学的分析方法	3
2 静力学基础	5
2.1 有关力的基本概念和基本公理	5
2.2 工程常见约束	9
2.3 构件受力分析	11
习题2	13
3 平面力系的合成与简化	15
3.1 平面汇交力系的合成	15
3.2 平面力偶系的合成	20
3.3 平面任意力系的简化	24
习题3	26
4 平面力系的平衡	27
4.1 平面力系平衡分析	27
4.2 平面一般力系平衡方程	28
4.3 平面特殊力系平衡方程	31
4.4 物体系统的平衡	33
习题4	35

5	空间力系的平衡	39
5.1	力在空间直角坐标轴上的投影	39
5.2	空间力对轴之矩	41
5.3	空间力系的平衡方程	42
5.4	空间力系平衡问题的应用	43
	习题 5	44
6	点的基本运动	47
6.1	点的直线运动	47
6.2	点的运动的矢量法	48
6.3	点的运动的直角坐标法	49
6.4	点的运动的自然坐标法	51
	习题 6	52
7	点的复合运动	54
7.1	绝对运动、相对运动和牵连运动	54
7.2	点的速度合成定理	55
7.3	点的加速度合成定理	57
	习题 7	58
8	刚体的平面运动	60
8.1	刚体的基本运动	60
8.2	刚体的平面运动	61
	习题 8	65
9	动力学基本方程	67
9.1	牛顿三大定律	67
9.2	质点运动微分方程	68
	习题 9	71
10	动力学基本定理	73
10.1	动量定理	73
10.2	动量矩定理	78
10.3	动能定理	83
	习题 10	88
11	达朗贝尔原理	92
11.1	质点的达朗贝尔原理	92
11.2	质点系的达朗贝尔原理	93
11.3	刚体惯性力的简化	95
	习题 11	97

12 轴向拉伸与压缩	98
12.1 轴向拉伸与压缩概述	98
12.2 拉压杆内力与轴力图	99
12.3 轴向拉压时横截面上的应力	103
12.4 轴向拉压时的变形	105
12.5 材料拉伸与压缩时的力学性能	108
12.6 拉压杆的强度条件	114
习题 12	116
13 剪切与连接的实用计算	119
13.1 剪切实用计算	119
13.2 挤压实用计算	122
习题 13	124
14 扭转变形	127
14.1 扭转变形概述	127
14.2 圆轴扭转时横截面上的内力	128
14.3 圆轴扭转时横截面上的切应力	131
14.4 圆轴扭转时的强度条件	133
14.5 圆轴扭转时的变形与刚度条件	134
习题 14	136
15 梁的弯曲问题	139
15.1 弯曲概述	139
15.2 梁的内力计算	143
15.3 内力方程法作内力图	145
15.4 叠加原理作内力图	149
15.5 微分关系法作内力图	150
15.6 梁横截面上的正应力计算	153
15.7 梁的正应力强度计算	157
15.8 梁横截面上的切应力及强度	159
15.9 提高梁强度的措施	162
15.10 梁的变形概念	166
15.11 梁的变形计算	168
15.12 梁的刚度问题	173
习题 15	174
16 组合变形	182
16.1 组合变形概述	182
16.2 斜弯曲	184
16.3 偏心拉压问题	187
16.4 截面核心	190

习题 16	192
17 压杆稳定	196
17.1 构件稳定性概述	196
17.2 压杆稳定的临界力计算	198
17.3 压杆稳定的临界应力	200
17.4 压杆稳定的实用计算	201
17.5 提高压杆稳定性的措施	205
习题 17	206
附录	209
附录 A 主要符号表	209
附录 B 空间力对点的矩矢量	210
附录 C 物体质量分布状况的几个物理量	212
附录 D 质点系的质心运动定理推导	218
附录 E 有关动量矩的疑难问题	219
附录 F 平面运动刚体的动能计算	221
附录 G 质点的动能定理推导	222
附录 H 拉(压)杆斜截面上的应力	222
附录 I 扭转圆轴的应力及变形公式推导	223
附录 J 弯矩、剪力、荷载集度间的关系	229
附录 K 梁的正应力与变形计算公式推导	230
附录 L 矩形截面梁的切应力计算公式推导	234
附录 M 平面图形的几何性质	237
附录 N 应力状态和强度理论	243
附录 O 细长压杆的临界力计算公式推导	254
附录 P 两个重要的力学现象	256
附录 Q 型钢规格表	258
参考文献	271

1

绪 论

1.1 工程力学的研究对象与中心任务

《工程力学》在构成体系上,依据传统的《理论力学》与《材料力学》两门基础学科的基础内容并结合实际工程的力学特性有机融合而成,属于应用性学科。

应用经典力学的基础知识并融合实际工程固有特征的专业力学知识而构成的工程力学,在机械工程、宇航工程、道桥工程和建筑工程等领域发挥了巨大的基础性作用并得到广泛的应用。对于建筑工程有关专业、特别是土木工程专业,工程力学主要应用于建筑结构设计,同时也在其中将其应用价值展现得淋漓尽致,并与建筑美学相呼应、相得益彰,共奏建筑设计的美妙乐章。由世界著名的美籍华裔建筑家贝聿铭设计的香港中银大厦(如图 1.1 所示),在建筑设计和结构设计上独具匠心、取得重大突破,是建筑美学与力学的结晶,成为世界著名建筑之一。

工程力学的研究对象为杆状构件。在建筑物或构筑物中起骨架(承受和传递荷载)作用的主要部分称为建筑结构,组成建筑结构的基本单元称为构件。如图 1.2 所示工业厂房剖面图,其中的屋架、行车、牛腿边柱均为

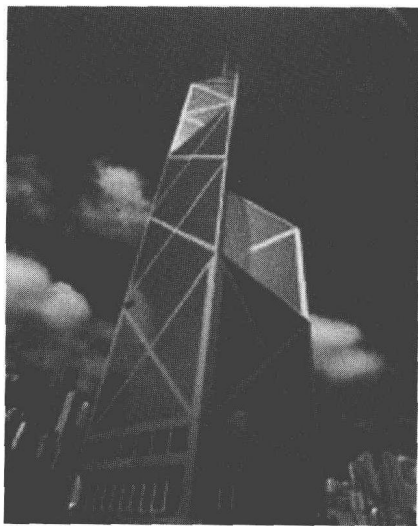


图 1.1 香港中银大厦

杆件结构。对于非杆件形式的其他结构,例如薄壁结构、实体结构等,则有相应的力学课程如板壳理论、弹性力学等对其基本理论和计算方法进行分析和研究。当然,对于非规则构件或实际工程中较复杂的结构体系,通常是不太可能应用经典力学理论而得到精确解,此时常常采用数值解法,例如结构有限元法、并结合电算而得到近似解。

工程力学的主要任务是研究杆状构件在荷载及其他因素作用下的安全工作状况。

古罗马时期,建筑家维特鲁威,在《建筑十章》的建筑学巨著中首次系统地提出了“坚固”、“适用”、“美观”的建筑设计原则,经历二千年的历史沉淀、又经现代科学和艺术的洗礼而日趋成熟与完善。古希腊、古罗马(见图 1.3)、埃及的许多古老建筑,历经多个世纪的风雨沧桑而能再现昔日的风采,便是其“坚固”性原则的体现。

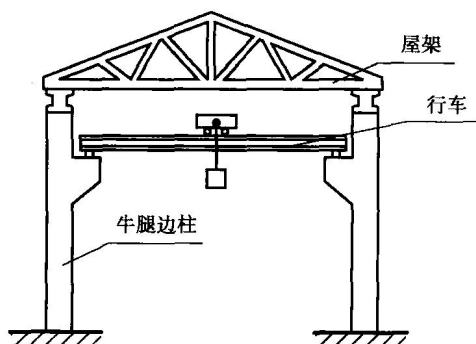


图 1.2 工业厂房剖面



图 1.3 古罗马竞技场

维特鲁威的建筑三要素理念直接促成了建筑业三大专业的形成,即建筑学专业、结构工程专业和建筑设备专业,而建筑结构工程则是最直接、最充分地展现了建筑物的“力之美”,其核心是构件或结构的力学问题。

构件或结构安全工作,必须满足 3 个最基本条件:

强度:构件(或结构)抵抗破坏的能力。

刚度:构件(或结构)抵抗变形的能力。

稳定性:构件(或结构)保持原有平衡形态的能力。



图 1.4 地震中破坏的房屋

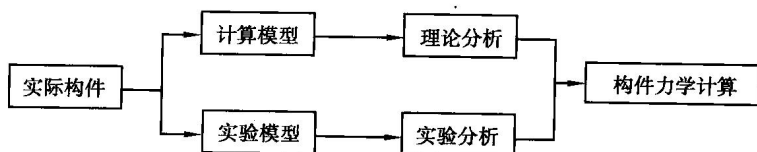
图 1.4 所示为地震中某砖混结构在地震荷载作用下的破坏状况:大面积墙体、屋面、地基等因地震作用而发生强度破坏现象;墙体、圈梁和地基基础等出现塑性变形,早已超出其刚度许可条件;同时,结构的整体稳定性出现极大危机,而濒临“失稳”的边缘。

工程力学的任务又可进一步表述为:研究构件的强度、刚度和稳定性,并从该角度,在保证构件安全可靠的前提下又达到经济节约的目的、即优化设计,为构件设计计算提供基本的理论和计算方法。

1.2 工程力学的分析方法

► 1.2.1 工程力学的分析方法

宏观上,工程力学通过两个渠道(或者合二为一),对构件的内力与变形,进而也是对其强度、刚度和稳定性进行了综合分析。分析流程如下:



在定量分析和计算上,静力平衡方程的应用起到核心、关键作用;在构成体系上,以杆件4种基本变形形式为基本体系;在应用条件方面,提出了3个基本前提假设。

杆件的4种基本变形形式是:

①轴向拉伸与压缩:在杆的轴线上作用一对平衡外力,将引起杆沿轴线方向伸长或缩短的变形。如图1.5所示杆的轴向拉伸变形。

②剪切变形:杆件受到垂直于杆轴线且方向相反、作用线互相平行且相距很近的横向外力作用时,将引起其横截面沿力的方向发生相对错动的变形称为剪切变形。如图1.6所示。



图 1.5 轴向拉伸变形

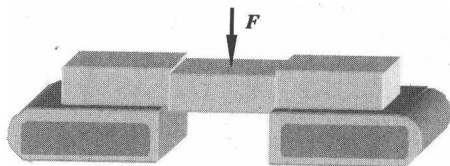


图 1.6 剪切变形

③扭转变形:杆件受一对力偶(或力偶系)的作用,且力偶作用面垂直于杆轴线,则杆的各横截面绕轴线发生相对转动,称为扭转变形,如图1.7所示。

④弯曲变形:在杆的横向方向上作用外力(集中力、集中力偶、分布力等),杆的轴线由原来的直线变形为曲线,如图1.8所示。

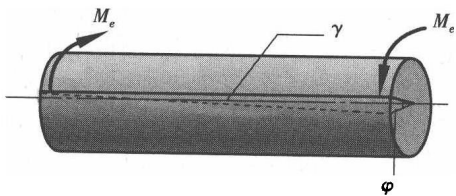


图 1.7 扭转变形

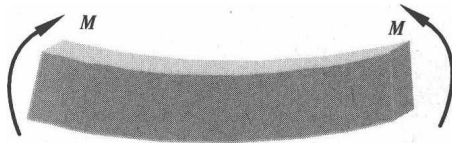


图 1.8 弯曲变形

基本假设包括:

假设一(均匀、连续性假设):认为物体在其整个体积内无空隙地充满了物质,且物体内部物质的力学性质各处相同。

假设二(各向同性假设):认为材料沿不同方向具有相同的力学性质。

假设三(小变形假设):认为构件的变形是微小的或其变形量相对构件原几何尺寸是微小的。

上述基本假设基于实际工程结构与结构理论计算之间客观存在的差异,以达到既能对结构进行简化并进行抽象的、数值化的分析和计算,又不偏离实际结构的本质特性的目的。

► 1.2.2 课程的学习方法

根据工程力学的内容特性和教材的特点,在学习过程中应侧重以下几个方面:

①紧扣教材的核心内容。工程力学最核心的部分就是物体平衡方程的应用,它贯穿并体现于教材内容始终,无论是计算构件受到的外力还是计算构件内部的受力。

②明确知识体系的框架结构。深谙构件变形分类是梳理知识体系的要点。

③理论与实际相结合。将理论学习与课程中的实验部分及工程实际结合起来,以便于直观理解和实际应用。

④充分利用教材特点,降低学习难度。教材实质上是以知识点为单元、并在附录的有机辅助下构成,降低了因前后逻辑关系过强而带来的负面影响。可将课程学习分为两步:首先将重点置于理解和应用其分析结论上,而后将部分烦琐的推导过程和需要深入探讨的内容在结合教材后面附录的基础上,再加以提高,以益于分层次学习。

逐行翻阅《工程力学》“力之画卷”,犹如雾霭自秀丽的山谷冉冉升腾之际、追寻艾萨克·牛顿之足迹,但愿你能潜心思忖、挥洒自如,重塑埃菲尔铁塔所展示的“力之俊美”(见图1.9)、感受三峡大坝之磅礴气势(见图1.10)、赞叹苏通大桥之精湛技艺(见图1.11)、体味悉尼歌剧院的艺术风采(见图1.12)!

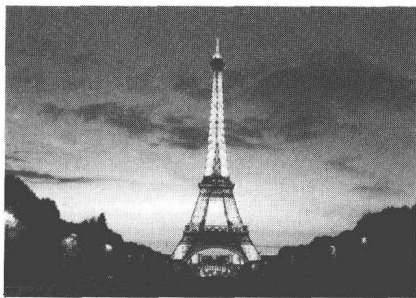


图 1.9 埃菲尔铁塔

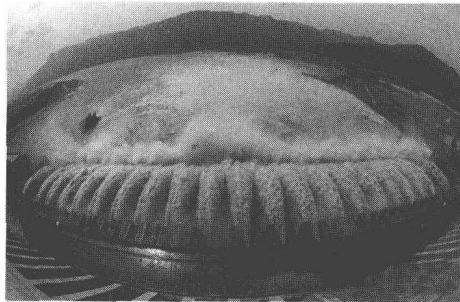


图 1.10 三峡大坝泻洪闸



图 1.11 苏通大桥

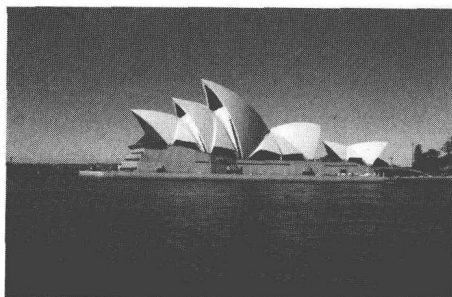


图 1.12 悉尼歌剧院

2

静力学基础

2.1 有关力的基本概念和基本公理

► 2.1.1 有关力的基本概念

1) 力的基本概念

(1) 力的定义

力的概念是人们在长期的生产实践中从感性到理性逐步形成的。当人们用手握、拉、掷、举物体时,由于肌肉紧张而感受到力的作用,这种作用广泛地存在于人与物及物与物之间。例如奔腾的水流会推动水轮机旋转,锤子的敲打会使烧红的铁块变形,等等。人们逐步形成了对力的感性认识。随着生产的发展和科技的进步,人们又认识到若物体被其他物体施加力以后,将导致该物体的机械运动状态发生变化或者发生形状的变化。

两物体间力的作用可以是相互接触的,如吊车起吊重物、放在梁上的设备使梁弯曲等;两物体间力的作用也可以是不相互接触的,如地球引力、电场对电荷的引力和斥力等。尽管力的来源和物理本质不同,但在研究物体的受力时,可以撇开这些非本质的因素,将它们抽象和概括为“力”的概念。

力是物体相互间的机械作用,这种作用会使物体的机械运动状态发生变化或使物体产生变形。前者称为力的外效应或运动效应,后者称为力的内效应或变形效应。

(2) 力的三要素

实践证明,力对物体的作用效应,由力的大小、方向和作用点的位置所决定,这三个因素称为力的三要素。显然,当三要素中的任何一个要素发生改变,力的作用效应将随之发生变化。

(3) 力的表示方法

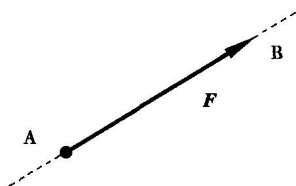


图 2.1 力的表示

力是一个具有大小和方向的矢量。如图 2.1 所示,常用一个带箭头的线段表示力,线段长度 AB 按一定的比例表示力的大小,线段的方位和箭头表示力的方向,其始点或终点表示力的作用点。与矢量线段 AB 所重合的虚直线,称为力的作用线。文字符号用黑体字如 $\boldsymbol{F}$ 代表力矢量,并以同一字母非黑体字如 F 代表力的大小。书写时可在表示力的字母上加一带箭头的横线,如 $\vec{F}$ 表示力矢量。

(4) 力的单位

在国际单位制中,力的单位用牛顿(N)或千牛顿(kN)表示,且 $1 \text{ kN} = 1\,000 \text{ N}$ 。工程中常用到千克力(kgf),其换算关系为 $\text{kgf} = 9.8 \text{ N}$ 。

(5) 力系与合力

作用于一个物体上的若干个力称为力系。如果两个力系对物体的作用效应完全相同,则这两个力系互为等效力系。如果一个力与一个力系等效,则该力称为这个力系的合力,而力系中的各力称为合力的分力。如果物体在一个力系的作用下处于平衡状态,则称该力系为平衡力系。所谓物体的平衡,是指物体相对于参照物保持静止或作匀速直线运动的状态。使一个力系成为平衡力系的条件,称为力系的平衡条件。

2) 工程力学的力学模型

(1) 刚体

所谓刚体,就是在任何情况下永远不变形的物体。即为在力的作用下刚体内任意两点的距离始终保持不变。永远不变形的物体是不存在的,刚体只是一个为了研究问题方便,而把实际物体抽象化后得到的力学模型。

物体在受力后都会发生变形,但在多数实际工程问题中这种变形是极其微小的。当分析物体的平衡和运动规律时,这种变形的影响很小,完全可以忽略不计,认为物体不发生变形。实践证明,引入刚体力学模型在许多情况下得到的结果是足够精确的。

(2) 质点与质点系

所谓质点,是指具有一定质量而其形状和大小可以忽略不计的物体。所谓质点系,是指由多个质点组成的系统。质点和质点系也是把实际物体抽象化后得到的力学模型。

把物体视为刚体、质点或质点系,要视研究的问题而定。在力学中被视为质点的物体,大小是相对的。刚体是由无限个质点组成的几何上不变的质点系,但当刚体的尺寸对问题的研究作用可以忽略不计时,即可抽象化为质点。由若干个刚体组成的系统也是一种质点系,即物体系统,简称物系。

► 2.1.2 有关力的基本原理

静力学基本原理是人们经过长期观察和经验积累而得到的结论,是经过实践反复验证的

客观规律,也是研究力系简化和平衡条件等问题的最基本的力学规律。

1) 二力平衡原理

作用于刚体上的两个力,使刚体保持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。如图 2.2 所示,即: $F_1 = -F_2$ 。

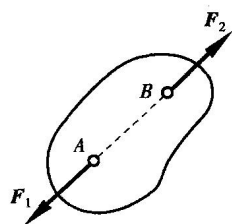


图 2.2 二力平衡

二力平衡原理揭示了作用于物体上最简单的力系平衡时所必需满足的条件。对于刚体,这个条件是必要而充分的,若是变形体,仅为必要条件。工程上常遇到只受两个力作用而平衡的构件,在工程力学中将该构件称为二力构件或二力杆,如图 2.3(a)所示三铰刚架的 BC 块为二力构件,如图 2.3(b)所示。图 2.4(a)所示三铰支架的 BC 杆是二力杆,如图 2.4(b)所示。

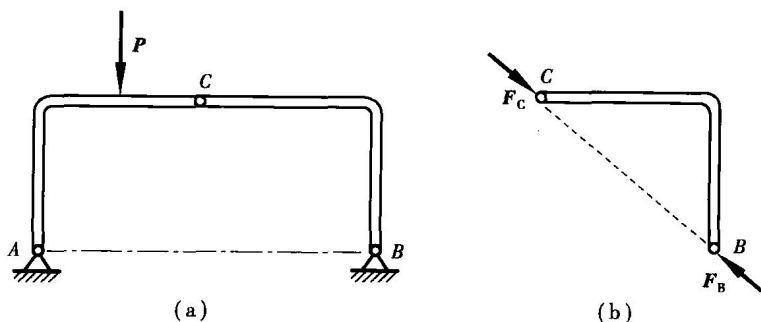


图 2.3 三铰刚架

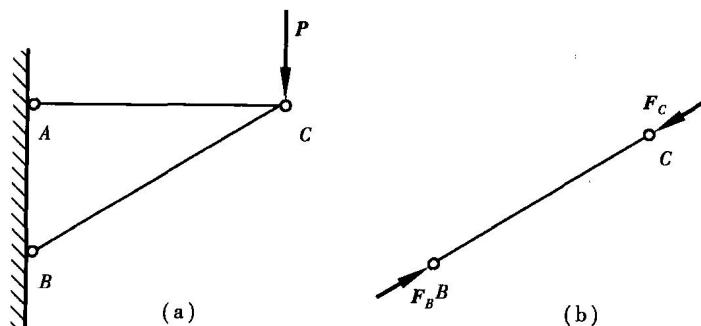


图 2.4 三铰支架

2) 加减平衡力系原理

(1) 加减平衡力系原理

在作用于刚体的任意力系中加上或减去任意平衡力系,不改变原力系对刚体的作用效应。即平衡力系可变大也可变小,这有利于力系的简化,是研究力系等效替换的重要依据。

(2) 力的可传性

作用于刚体上某点的力,可沿其作用线移动到该刚体上任一点,而不改变该力对刚体的作用效应。

力的可传性的证明如下。

设力 F 作用于刚体上的 A 点,如图 2.5(a)所示。在其作用线上任选一点 B ,根据加减平衡力系公理,在 B 点加上一对平衡力 F_1 和 F_2 ,使 $F_1 = -F_2 = -F$,如图 2.5(b)所示。由于 F 和 F_1 构成一对平衡力,故可去掉。这样刚体上仅剩下力 F_2 作用于 B 点,如图 2.5(c)所示,显然它与原来作用于 A 点的力等效,即原来的力 F 从刚体上的 A 点沿着它的作用线移到 B 点。

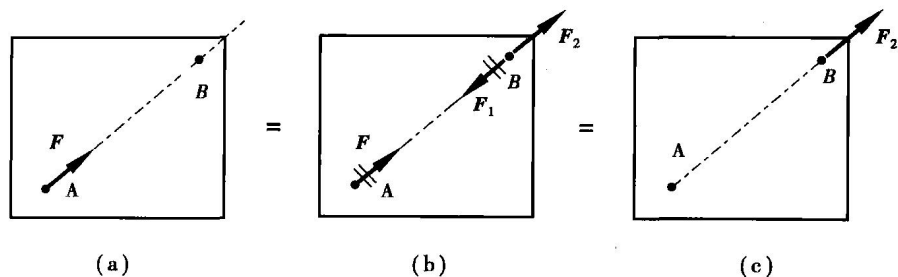


图 2.5 力的可传性

加减平衡力系原理和力的可传性是力系简化的重要依据,但它们只适用于刚体。

3) 力的平行四边形法则

(1) 力的平行四边形法则

作用于物体某点的两个力的合力,也作用于同一点上,其大小和方向由这两个力所组成的平行四边形的对角线来表示。

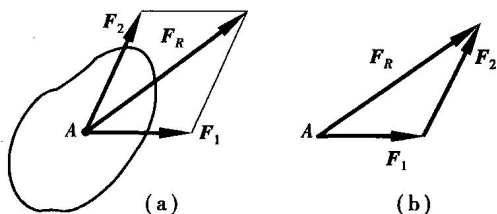


图 2.6 力的平行四边形法则

力的平行四边形法则表明,力矢量可按平行四边形法则进行合成与分解,如图 2.6(a)所示。合力矢量与分力矢量的关系符合矢量运算规律,即 $F_R = F_1 + F_2$ 。力的平行四边形也可简化为三角形,如图 2.6(b)所示。将力 F_2 平行移到力 F_1 的末端,再从 F_1 的始端向 F_2 的末端作一矢量,即得合力 F_R 。这种方法称为力的三角形法则。

(2) 三力平衡汇交定理

作用于刚体上 3 个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此 3 个力必在同一平面内,且第 3 个力的作用线通过汇交点。

三力平衡汇交定理证明如下。如图 2.7(a)所示,在刚体的 A 、 B 、 C 3 点上作用有平衡力系 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据力的可传性原理,将力 F_1 、 F_2 移到汇交点为 O 处,如图 2.7(b)所示,然后根据力的平行四边形法则,求得 F_1 和 F_2 的合力 F_R 。由二力平衡原理可知,力 F_3 必与合力 F_R 共线,所以力 F_3 必与力 F_1 、 F_2 共面,且其作用线通过汇交点 O 。

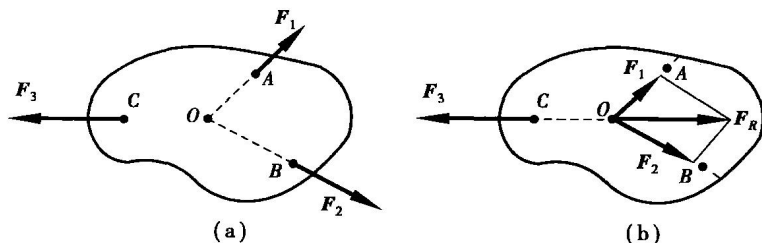


图 2.7 三力汇交