



“十一五”规划教材

工程力学

主编 冯立富 陈 平
岳成章 贾坤荣



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



“十一五”规划教材

工程力学

主编 冯立富 陈 平
岳成章 贾坤荣



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书将理论力学和材料力学的基本内容有机地融合为一个整体,主要内容分为刚体静力学、变形固体静力学、运动学、动力学四篇,结构合理、叙述简明。适合由于学时偏少,因而不宜将理论力学和材料力学单独设课的工科本科各类相关专业使用,也可供专科的各类相关专业选用,还可供广大力学教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/冯立富等主编. —西安:西安交通大学出版社,2008.8
ISBN 978-7-5605-2802-1

I.工… II.冯… III.工程力学 IV.TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 073772 号

书 名 工程力学
主 编 冯立富 陈 平 岳成章 贾坤荣
责任编辑 吴 杰

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 西安新视点印务有限责任公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 28 字数 520 千字
版次印次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-2802-1/TB·47
定 价 39.80 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy31@126.com

版权所有 侵权必究



本书是为了适应我国科学技术和生产建设发展的需要,根据教育部关于深化教学改革、提高教学质量的要求编写的,主要适合于由于学时偏少,因而理论力学和材料力学不宜单独设课的工科本科各类相关专业使用,同时也可供专科的各类相关专业选用,还可供广大力学教师 and 有关的工程技术人员参考。

本书将理论力学和材料力学的基本内容有机地融合为一个整体,同时增加了工程结构组成分析的基础知识。全书分为刚体静力学、变形固体静力学、运动学和动力学四篇,结构合理,内容精炼。在本书的编写过程中,我们注意尽量利用学生已有的高等数学和普通物理学基础,适当提高了起点;尽量联系工程实际,培养学生分析和解决工程实际中力学问题的能力。

本书中的部分内容加了“*”号,这些内容供各校不同专业选用。

参加本书编写工作的有:解放军理工大学陈平、于世海,西安工程大学贾坤荣、王玲,西北农林科技大学闫宁霞、杨创创、刘洪萍,西安思源学院岳成章、张雪敏、樊志新,陕西理工学院王谨、张宝中、张烈霞,海军航空工程学院徐新琦、张继平、姜爱民,徐州空军学院张海波、张伟、李洁、庄惠平、谢永亮、李艳丽、谢卫红,南京金陵科技学院陈敏,空军工程大学冯立富、李颖、陈兮。由冯立富、陈平、岳成章、贾坤荣担任主编,王谨、张海波、闫宁霞、徐新琦、杨创创担任副主编。

由于我们水平所限,书中会有不少缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编者

2008年3月

绪论	(1)
----	-----

第一篇 刚体静力学

引言	(5)
第1章 静力学基础	(6)
1.1 静力学公理	(6)
1.2 力矩	(12)
1.3 力偶理论	(15)
思考题	(19)
习题	(20)
第2章 力系的简化	(23)
2.1 力的平移定理	(23)
2.2 力系向一点的简化	(24)
2.3 平行力系中心和重心	(30)
思考题	(36)
习题	(36)
第3章 物体的受力分析	(39)
3.1 约束和约束力	(39)
3.2 物体的受力分析和受力图	(44)
思考题	(46)
习题	(47)
第4章 力系的平衡	(49)
4.1 空间力系的平衡方程	(49)
4.2 平面力系的平衡方程	(52)
4.3 物系平衡问题	(56)
4.4 简单结构组成分析	(60)

4.5* 摩擦	(65)
思考题	(73)
习题	(74)

第二篇 变形固体静力学

引言	(82)
第5章 杆件的内力	(86)
5.1 杆件在轴向拉伸或压缩时横截面上的内力	(86)
5.2 杆件在扭转时横截面上的内力	(87)
5.3 杆件在弯曲时横截面上的内力	(89)
5.4 平面桁架的内力计算	(93)
思考题	(96)
习题	(97)
第6章 拉(压)杆的强度和变形	(100)
6.1 横截面和斜截面上的应力	(100)
6.2 拉(压)杆的变形	(105)
6.3 材料在拉伸和压缩时的力学性能	(108)
6.4 拉(压)杆的强度计算	(113)
6.5 应力集中的概念	(117)
6.6 联接件的强度	(118)
思考题	(124)
习题	(125)
第7章 圆轴扭转时的强度和刚度	(131)
7.1 切应力互等定理和剪切胡克定律	(131)
7.2 圆轴扭转时的应力和强度条件	(132)
7.3 圆轴扭转时的变形和刚度条件	(139)
思考题	(143)

习题	(144)
第8章 梁的强度和刚度	(147)
8.1 梁的弯曲正应力和正应力强度条件	(147)
8.2 梁的切应力和切应力强度条件	(159)
8.3 梁的弯曲变形和刚度条件	(165)
8.4 提高梁的强度和刚度的措施	(176)
思考题	(180)
习题	(180)
第9章 应力状态和强度理论	(184)
9.1 点的应力状态的概念	(184)
9.2 应力状态分析	(185)
9.3 广义胡克定律	(193)
9.4 强度理论	(196)
思考题	(201)
习题	(201)
第10章 组合变形杆件的强度计算	(204)
10.1 组合变形问题的基本分析方法	(204)
10.2 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	(205)
10.3 扭转与弯曲的组合变形	(211)
思考题	(215)
习题	(216)
第11章 压杆稳定	(219)
11.1 压杆稳定性的概念	(219)
11.2 细长压杆的临界力	(221)
11.3 欧拉公式的适用范围·经验公式	(223)
11.4 压杆稳定性计算	(227)
11.5 提高压杆稳定性的措施	(231)

思考题	(233)
习题	(234)
第12章 简单超静定问题	(238)
12.1 拉伸和压缩超静定问题	(238)
12.2 温度应力与装配应力	(240)
12.3 扭转超静定问题	(241)
12.4 弯曲超静定问题	(242)
思考题	(244)
习题	(245)

第三篇 运动学

引言	(247)
第13章 运动学基础	(248)
13.1 点的运动学	(248)
13.2 刚体的基本运动	(255)
思考题	(260)
习题	(261)
第14章 点的合成运动	(265)
14.1 点的绝对运动、相对运动和牵连运动	(265)
14.2 速度合成定理	(267)
14.3 加速度合成定理	(270)
思考题	(275)
习题	(275)
第15章 刚体的平面运动	(280)
15.1 刚体平面运动的简化和分解	(280)
15.2 平面图形上各点的速度分析	(283)

15.3 平面图形上各点加速度分析的基点法	(290)
思考题	(294)
习题	(295)

第四篇 动力学

引言	(300)
----	-------

第16章 动力学普遍定理	(302)
--------------	-------

16.1 动量定理	(302)
16.2 质心运动定理	(307)
16.3 动量矩定理	(311)
16.4 刚体定轴转动微分方程	(319)
16.5 动能定理	(325)
16.6 动力学普遍定理的综合应用	(334)
思考题	(338)
习题	(339)

第17章 动静法	(352)
----------	-------

17.1 惯性力的概念	(352)
17.2 动静法	(355)
17.3* 定轴转动刚体对轴承的动约束力	(363)
思考题	(365)
习题	(366)

第18章 能量原理	(370)
-----------	-------

18.1 虚位移原理	(370)
18.2* 卡氏定理	(377)
思考题	(390)
习题	(391)

第19章 冲击与交变载荷问题	(394)
19.1 冲击载荷问题	(394)
19.2 交变载荷问题	(401)
思考题	(408)
习题	(409)
附录一 型钢规格表	(413)
附录二 习题参考答案	(424)
参考文献	(437)

绪 论

力学是研究物体机械运动规律的科学。

所谓机械运动,即力学运动,是指物体在空间的位置随时间的变化。它是物质的运动形式中最简单的一种。为方便计,本书中一般都把机械运动简称为运动。

所谓力,是指物体相互之间的机械作用,这种作用的效应是使物体改变运动状态,或者产生变形。其中,前一种效应称为力的外效应(或运动效应),而后一种效应称为力的内效应(或变形效应)。

作用于同一物体的一群力称为力系。若二力系分别作用于同一物体而效应相同,则称此二力系互为等效力系。若一个力和一个力系等效,则称该力为此力系的合力,而此力系中的每一个力都是合力的分力。

实践证明,力对物体的作用效应取决于三个要素:(1)力的大小;(2)力的方向;(3)力的作用点。力的大小反映了物体间相互机械作用的强度。为了度量力的大小,必须选定力的单位。本书采用国际单位制(SI)。在国际单位制中,力的单位是N(牛顿)或kN(千牛)。

力的三要素可以用一带箭头的线段表示(图0-1)。线段的长度按照一定的比例表示力的大小;线段的方位和箭头的指向表示力的方向;线段的始端或末端表示力的作用点。线段所在的直线称为力的作用线。在1.1节中将说明,作用在物体上同一点的两个力的合成服从平行四边形公理。根据定义,任何一个具有大小、方向并服从平行四边形公理的物理量都是矢量。因此,力是矢量。由于力的作用点是力的三要素之一,所以力还是固定矢量。矢量常用黑斜体字母或带箭头的斜体字母表示。本书中除第二篇变形固体静力学以外,一般采用黑斜体字母来表示矢量(如图0-1中的力 F)。仅表示力的大小和方向的矢量称为力矢。力矢的要素中不含作用点,也没有作用线的问题,它是一种自由矢量。

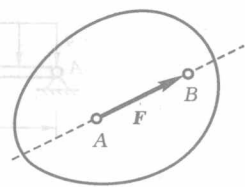


图0-1

如果力集中作用在物体上的某一个点(作用点),则这种力称为集中力。实际上力的作用位置不可能是一个点,而是物体上的某一部分面积(面力)或体积

(体力)。例如,飞机在飞行中机翼上承受的空气动力是分布在物体的整个机翼表面上的;物体受到的重力是分布在物体的整个体积上的。这种力称为分布力。仅当力的作用面积或作用体积不大时,才可以近似地看成集中力。

分布力的表示和处理,要用微积分的概念和方法。以面力为例,在力的作用面上任取一微面,设其面积为 ΔA ,其上作用的分布力为 ΔF 。一般地说,若所取面积 ΔA 的大小不同,则 ΔF 的大小和方向也不同。令微面收缩到面中的一点 P ,取极限 $S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$ 。 S 表示面力在 P 点的强度和方向。一般情形下,在力作用面上的不同的点, S 的大小和方向是不同的。 S 的大小 S 称为面分布力的集度(或强度),常记为 q ,其单位为 N/m^2 。类似地,可用 $B = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta V}$ 表示体力在某

一点的强度和方向,这里的 ΔV 为所取微体的体积。 B 的大小 B 称为体分布力的集度,单位为 N/m^3 。用 S 或 B 给定的分布力,可以近似地看成是由许多集中力 $S \cdot \Delta A$ 或 $B \cdot \Delta V$ 组成的力系,有时也将它们合成为一个合力。例如,将机翼表面上各小部分承受的空气动力合成为一个作用在压力中心上的总空气动力;将物体各小部分受到的重力合成为一个作用在重心上的总重力。

在工程实际中,常遇到沿着某一狭长面积分布的力,这种力可以看作是沿着一条线段分布的,称为线分布力或线分布载荷。表示力的分布情况的图形称为载荷图。线分布力合力的大小等于载荷图的面积,作用线通过载荷图的形心。如图 0-2(a)所示,作用在水平梁 AB 上的载荷是均匀分布的,集度为 q ,其合力的大小 $F = ql$,方向与均布载荷相同,作用在梁的中点 C 上(图 0-2(b))。

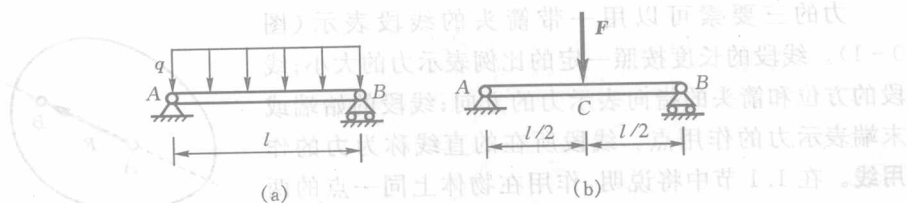


图 0-2

如图 0-3(a)所示,作用在水平梁 AB 上的载荷是线性分布的,其中右端的集度为零,左端的集度为 q ,则其合力的大小 $F = \frac{1}{2}ql$,方向也与分布载荷相同,作用在梁上的 D 点,如图 0-3(b)所示。

力学是最早产生并获得发展的科学之一。人类开始研究力学理论,大约可以追溯到 2500 年以前。记述我国古代伟大学者墨翟(约公元前 5 世纪上半叶至前 4 世纪初)学说的《墨经》中,在力学方面就有关于力、重心、秤的原理以及材料

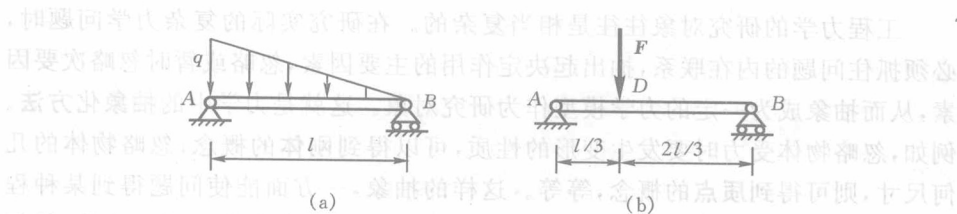


图 0-3

的性质、运动的分类等论述,但力学真正成为一门科学,则要从牛顿在 1687 年发表其《自然哲学的数学原理》这篇名著时算起。

力学,在英语中叫 mechanics,起源于希腊语 $\mu\eta\chi\alpha\nu\eta$,有机械、工具之意。西方的 mechanics 于明末清初传入我国,当时译为“重学”或“力艺”,直到 1903 年才正式译为力学。我们汉语中的力学,在字面上的涵义是力的科学,与 $\mu\eta\chi\alpha\nu\eta$ 不尽一致。

从历史上看,力学原是物理学的一个分支,而物理科学的建立则是从力学开始的。后来由于数学理论和工程技术的推进,以研究宏观机械运动为主的力学逐渐从物理学中独立出来,而物理学中仍保留的有关基础部分被称为“经典力学”,以区别于其它分支如热力学、电动力学、量子力学等,后面这些带有“力学”名称的分支属于物理学而不属于力学。

力学与数学和物理学等学科一样,是一门基础科学,它所阐明的规律带有普遍的性质;力学同时又是一门技术科学,它是众多应用科学特别是工程技术的基础,是人类认识自然、改造自然的重要学科。追溯 20 世纪前,经典力学的发展曾推动了影响整个人类文明进程的第一次工业革命。进入 20 世纪后,高新技术硕果累累,但无论是导弹、飞机、海底隧道、高层建筑、远洋巨轮、海洋平台、精密机械、高速列车、人造卫星、机器人等等,都无不是在现代力学成就的指导下实现的。甚至在表面看来似乎与力学关系不大的电子工业、生命科学、医学、农学等领域中,哪里有力与运动,哪里就有力学问题需要去解决。马克思说过,力学“是大工业的真正科学的基础”。钱学森说:“不能设想,不要现代力学就能实现现代化”。一部航空航天工业的发展史已经证明,正是由于一个个力学问题的相继突破,因而促进了航空航天工业的腾飞与繁荣。

工程力学是研究物体机械运动的一般规律和构件的承载能力的科学。它与工程技术的联系极为广泛,是现代工程技术的重要理论基础之一。工程力学是工科各类专业的一门技术基础课。它以高等数学和普通物理学为基础,又为结构力学、机械原理和机械零件,以及弹性力学、断裂力学、流体力学、岩土力学等后继课程提供必要的基础知识。

工程力学的研究对象往往是相当复杂的。在研究实际的复杂力学问题时,必须抓住问题的内在联系,抽出起决定作用的主要因素,忽略或暂时忽略次要因素,从而抽象成为一定的力学模型作为研究对象。这就是力学中的**抽象化方法**。例如,忽略物体受力时要发生变形的性质,可以得到**刚体**的概念;忽略物体的几何尺寸,则可得到**质点**的概念,等等。这样的抽象,一方面能使问题得到某种程度的简化,另一方面也能更深刻、更正确、更完全地反映事物的本质。当然,任何抽象化的模型都是有条件的、相对的。例如,在研究地球绕太阳的公转时,可以不考虑地球上各点运动的差异,把它抽象为一个质点;但在研究地球的自转或弹丸的弹道时,就不能再把地球视为一个质点了。

由许多相互之间有一定联系的质点组成的系统称为**质点系**。刚体是任意两个质点之间的距离始终保持不变的质点系,也称为**不变质点系**。**变形固体**也是一种质点系。工程力学的研究对象是质点和质点系,主要是刚体和变形固体。

与研究其它自然科学问题一样,研究工程力学问题一般遵循实验、观察分析、综合归纳、假设推理、检验等步骤。因此,在工程力学中理论和实验之间不仅有着紧密的联系,而且二者具有同等重要的地位。

工程力学的主要内容分为刚体静力学、变形固体静力学、运动学和动力学四部分。

刚体静力学研究物体受力分析的基本方法,以及力系的简化和平衡的规律,重点是力系的平衡问题。

变形固体静力学研究构件在外力的作用下产生变形和破坏的规律,主要是构件的强度、刚度和稳定性问题。

运动学仅以几何观点研究物体的运动,而不涉及运动产生的物理原因。

动力学则研究物体的运动与其受力和物体本身的物理性质之间的关系,它比静力学和运动学问题更广泛、更深入。

第①章

静力学基础

1.1 静力学公理

人们在长期的生活和生产实践中,对力的基本性质进行了概括和归纳,得出了一些显而易见的、能更深刻地反映力的本质的一般规律。这些规律的正确性为实践反复证明,从而被人们所公认,我们称之为静力学公理。静力学的所有其余内容,都可以由这些公理推论得到。所以,静力学公理是整个静力学的理论基础。

公理一 力的平行四边形公理

作用在物体上同一点的两个力,可以合成为一个也作用于该点的合力。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表示。

图 1-1(a) 中,力 F_R 为两共点力 F_1 、 F_2 的合力,力 F_1 、 F_2 为 F_R 的分力,它们之间的关系可写成矢量等式

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

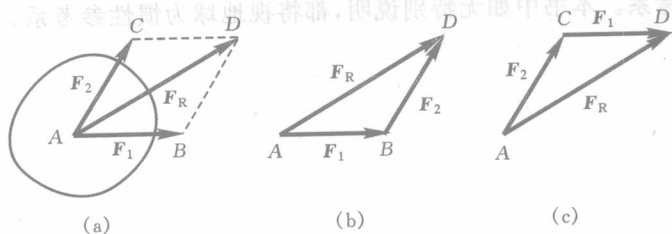


图 1-1

式中的“+”号表示按矢量相加,即按平行四边形法则相加。因此,力的平行四边形公理也可以叙述为:两个共点力的合力矢等于两分力矢的矢量和(几何和)。这种通过作力的平行四边形来求合力的几何方法称为力的平行四边形法则。

由图 1-1(b)可见,在求合力矢 F_R 时,实际上不必作出整个平行四边形,只要以力矢 F_1 的末端 B 作为力矢 F_2 的始端画出 F_2 ,即两分力矢首尾相接,则矢量 $\vec{AD}$ 就代表合力矢 F_R 。如果先画 F_2 ,后画 F_1 (图 1-1(c)),也能得到相同的结

果。这样画成的三角形 ABD 或 ACD 称为力三角形。这种通过作力三角形来求合力矢的几何方法称为力三角形法则。

如图 1-2(a) 所示, 设物体上作用有共点力 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 。为了求该力系的合力矢, 可连续应用力三角形法则, 把各力两两顺次合成。如图 1-2(b) 所示, 先从任意点 a 起, 画出 F_1 和 F_2 的力三角形 abc , 求出它们合力矢 F_{R1} ; 再画出 F_{R1} 和 F_3 的力三角形 acd , 求出它们的合力矢 F_{R2} 。显然 F_{R2} 也就是 F_1 、 F_2 和 F_3 这三个力的合力矢。继续采用这种方法, 可以求得共点力系的合力矢 F_R 。

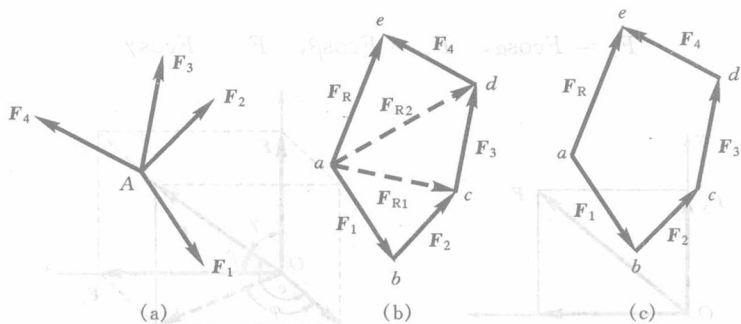


图 1-2

由图 1-2(b) 可以看出, 为了求合力矢 F_R , 作图过程中的力矢 F_{R1} 和 F_{R2} 可不必画出。只须将力系中各力矢按首尾相接的原则顺次画出, 连接第一个力矢的始端与最后一个力矢的末端的矢量, 就是合力矢 F_R , 如图 1-2(c) 所示。这样画出的多边形 $abcde$ 称为力多边形。合力矢为力多边形的封闭边。用力多边形求合力矢的几何方法称为力多边形法则。

具有公共作用点的力系称为共点力系。上述方法容易推广到由 n 个力 F_1 , $F_2, \dots, F_n$ 组成的共点力系的情形。结论如下: 共点力系可以合成为一个合力, 合力的作用点与各分力相同, 合力的大小和方向由力多边形的封闭边表示。写成矢量等式, 则有

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i$$

或简写为

$$\mathbf{F}_R = \sum \mathbf{F}^{\text{①}} \quad (1-1)$$

不难看出, 在一般情况下, 力多边形是空间折线。仅对各力的作用线在同一平面内的平面共点力系, 力多边形才是平面折线。

① 为了简便, 以下都用“ $\sum$ ”代替“ $\sum_{i=1}^n$ ”。