



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程力学

第2版

陈景秋 张培源



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工 程 力 学

(第2版)

陈景秋 张培源

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 陈景秋, 张培源. —2 版. —北京: 高等教育出版社, 2009. 7

ISBN 978-7-04-026476-0

I. 工… II. ①陈…②张… III. 工程力学-高等学校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 065195 号

策划编辑 黄毅 责任编辑 张玉海 封面设计 王 雎 责任绘图 吴文信
版式设计 范晓红 责任校对 王 雨 责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 化学工业出版社印刷厂

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 13
字 数 230 000

版 次 2004 年 11 月第 1 版
2009 年 7 月第 2 版
印 次 2009 年 7 月第 1 次印刷
定 价 15.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 26476-00

第1版前言

高等学校少学时的工程力学课程,要在60学时左右的时间里,讲授涵盖通常理论力学、材料力学和流体力学几门课程的最基础的内容,选择教材内容是一项相当困难的任务。根据当前科学技术发展(特别是工程技术发展)的趋势对于人才培养的要求,基于我们的教学实践,参考国内外一些优秀教材,我们尝试写了这本简明的教科书。我们假设使用本书的学生,已经修完少学时的大学物理、高等数学和线性代数等先行课程。

本书把讲述的重点放在工程力学课程的基本框架和工程中力学问题的建模方法和分析方法,努力使学生对近代力学学科的全貌有一个最简要的了解。

本书可作为高等院校少学时工程力学课程教材,也可作为教师的参考书。第1~7章需要40~44学时,第8章需要6~10学时。用星号(*)标明的章节内容对最少学时可不讲授。

教育部重点科技项目(编号02058)和重庆大学的资助,使作者得以在繁忙的教学和科研任务下有暇完成这本书。

北京理工大学的梅凤翔教授,北京航空航天大学谢传锋教授、王琪教授,华中科技大学陈传尧教授,复旦大学丁光宏教授和重庆大学徐铭陶教授认真地审阅了本书原稿,提出了宝贵的修改意见和建议。作者在此一并致以衷心的感谢。

我们希望本书能有一些个性。但囿于作者的水平,本书不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

陈景秋 张培源

于嘉陵江畔

2004年7月

第2版前言

本书在第1版的基础上修订而成,主要修订内容如下:

第2章增加了虚功原理,第8章增加了流体的粘性和湍流的概念性知识;对一些章节的叙述方式作了少许调整,习题增加了32道,全书篇幅增加约10%。这些改动,保持了第1版的理论体系、涵盖面、数学表达方式和简明扼要的风格,同时在适用范围和课外作业选择两方面提供了较大的空间。

编写本书得到了重庆大学教材建设基金资助。

本书承北京理工大学梅凤翔教授审阅,提出了不少宝贵的修改意见和建议。重庆大学张晓敏副教授验算了全部习题解答。谨此一并致谢。

囿于作者的水平,不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

陈景秋 张培源
于嘉陵江畔
2008年10月

本书常用符号

$Oxyz$

$\boldsymbol{e}_x, \boldsymbol{e}_y, \boldsymbol{e}_z$

x, y, z

$\boldsymbol{R} = (x \ y \ z)^T$

$\boldsymbol{R}_{CA}$

$\boldsymbol{u} = u_x \boldsymbol{e}_x + u_y \boldsymbol{e}_y + u_z \boldsymbol{e}_z$

$\boldsymbol{u}(A), \boldsymbol{u}_A$

$\boldsymbol{u} = (u_x \ u_y \ u_z)^T$

$\boldsymbol{F}_i, (F_{ix}, F_{iy}, F_{iz})$

$\boldsymbol{M}_i, (M_{ix}, M_{iy}, M_{iz})$

$\boldsymbol{F}_e, (F_{ex}, F_{ey}, F_{ez})$

$\boldsymbol{M}_e, (M_{ex}, M_{ey}, M_{ez})$

m

$I_{\zeta\zeta}$

J_ζ

$\boldsymbol{v}, (v_x, v_y, v_z), \boldsymbol{v} = (v_x \ v_y \ v_z)^T$

$\boldsymbol{a}, (a_x, a_y, a_z), \boldsymbol{a} = (a_x \ a_y \ a_z)^T$

$\boldsymbol{q}, (q_x, q_y, q_z)$

$\boldsymbol{m}, (m_x, m_y, m_z)$

$\boldsymbol{f}, (f_x, f_y, f_z)$

$\boldsymbol{p}$

右手直角坐标系, 空间坐标系

右手直角坐标系 $Oxyz$ 的基本单位矢量

空间坐标

以 (x, y, z) 为空间坐标的点的位矢 $\boldsymbol{R}$ 的坐标矩阵列向量

以点 C 为起点、点 A 为终点的矢量 $\boldsymbol{R}_{CA}$ 或称点 A 相对点 C 的位矢

矢量 $\boldsymbol{u}$ 在 $Oxyz$ 的坐标分解记法

点 A 处的约束矢量 $\boldsymbol{u}$

矢量 $\boldsymbol{u}$ 的坐标列矩阵

杆的内力及其分量

杆的内力矩及其分量

杆的外力及其分量

杆的外力矩及其分量

质量

关于轴 $A\zeta$ 和 $A\xi$ 的惯性积

关于轴 $A\zeta$ 的转动惯量

速度及其分量、坐标矩阵列向量

加速度及其分量、坐标矩阵列向量

杆的分布外力及其分量

杆的分布外力矩及其分量

体力及其分量

面力的面密度, 应力矢量; 动量

$\boldsymbol{M}_c[\boldsymbol{u}(A)]$	约束矢量 $\boldsymbol{u}(A)$ 对点 $C(x_c, y_c, z_c)$ 的矩
p	液体的压力
$\boldsymbol{L}$	动量矩

目 录

本书常用符号	1
第 1 章 引言	1
§ 1.1 工程力学课程的内容和研究方法简介	1
§ 1.2 工程力学研究对象的主要模型	2
§ 1.3 关于数学记号的说明	3
第 2 章 力系的简化和平衡	4
§ 2.1 力的基本概念	4
2.1.1 力的概念	4
2.1.2 力的单位和分类	6
§ 2.2 力系的主矢	8
2.2.1 力的直角坐标分量	8
2.2.2 力系的主矢	9
§ 2.3 力系的主矩	10
2.3.1 力矩	10
2.3.2 力系的主矩	12
2.3.3 力偶和力偶矩	12
2.3.4 力的平移	13
§ 2.4 力系向一点的简化	14
§ 2.5 等效力系和平衡力系	14
2.5.1 等效力系	14
2.5.2 平衡力系和平衡方程	15
§ 2.6 受力分析、约束模型和受力图	17
2.6.1 受力分析	17
2.6.2 约束模型	18
2.6.3 受力图	20
2.6.4 静定问题和静不定问题	20
§ 2.7 平行力系和重心	21
2.7.1 平行力系	21
2.7.2 重心	21

§ 2.8 虚功原理	25
习题	27
第 3 章 静力分析	31
§ 3.1 杆的外力与内力	31
3.1.1 杆的几何要素与载荷	31
3.1.2 杆件的内力	32
3.1.3 受拉压直杆的轴力	33
3.1.4 轴的扭矩	33
3.1.5 梁的弯矩和剪力	35
§ 3.2 平面弯曲梁的内力图	35
3.2.1 梁的平面变形和支承模型	35
3.2.2 弯矩图和剪力图	37
3.2.3 梁元素的平衡	39
3.2.4 弯矩图和剪力图的间断条件	40
§ 3.3 静定平面桁架的内力	40
3.3.1 桁架	40
3.3.2 节点法	41
§ 3.4 索的内力	42
3.4.1 索及其简化模型	42
* 3.4.2 悬链线	43
* 3.4.3 索上悬挂重物	44
习题	44
第 4 章 弹性静力学	48
§ 4.1 引论	48
4.1.1 固体力学与连续介质	48
4.1.2 几点基本的假设	48
4.1.3 几何元素的描写	48
§ 4.2 应力张量	49
4.2.1 应力矢量与应力原理	49
4.2.2 应力张量	50
4.2.3 斜截面上应力矢量	52
4.2.4 坐标系变换	53
4.2.5 主应力	56
4.2.6 典型的应力张量	58
§ 4.3 应变张量与位移	59
4.3.1 位移与应变	59
4.3.2 应变张量	60

4.3.3	坐标系变换和主应变	60
4.3.4	典型的应变张量	61
§ 4.4	材料的力学行为和拉伸试验	62
4.4.1	材料的力学行为和拉伸试验	62
4.4.2	拉伸图描写的材料特征	63
§ 4.5	本构方程	64
4.5.1	线弹性本构方程	64
4.5.2	胡克介质的本构方程	65
4.5.3	其他形式的本构方程	65
§ 4.6	直杆拉压的应力和变形	66
4.6.1	平截面假设与变形和应力的分布	66
4.6.2	位移表示平衡方程	67
4.6.3	热应力	68
§ 4.7	圆轴扭转的应力和变形	68
4.7.1	变形模式与应力分布	69
4.7.2	扭率与扭矩的关系	70
4.7.3	扭转角的控制方程	72
§ 4.8	直梁弯曲的应力和变形	73
4.8.1	变形和应力	73
4.8.2	轴力和弯矩的等效本构方程	74
4.8.3	应力分布	75
4.8.4	切力和切应力	76
§ 4.9	挠曲线的微分方程	77
4.9.1	挠曲线的微分方程	77
4.9.2	常用静定梁的挠曲线参数	78
* § 4.10	简单静不定问题	81
习题		82
第 5 章	强度失效与强度准则	87
§ 5.1	强度失效和强度评价	87
§ 5.2	许用载荷法、许用应力法及强度条件	88
5.2.1	许用载荷法	88
5.2.2	许用应力法	88
§ 5.3	强度理论	90
5.3.1	最大正应力理论(第一强度理论)	90
5.3.2	最大正应变理论(第二强度理论)	90
5.3.3	最大切应力理论(第三强度理论)	91
5.3.4	应变能密度理论(第四强度理论)	91

5.3.5	四个强度理论的适用范围	92
5.3.6	剪切强度	93
§ 5.4	组合变形杆的强度条件	93
5.4.1	主应力和应力主方向	93
5.4.2	圆截面杆拉压、弯曲与扭转组合变形的强度条件	94
§ 5.5	刚度条件	96
5.5.1	梁的刚度条件	97
5.5.2	折杆的强度和刚度评价	97
习题		98
第 6 章	运动学	101
§ 6.1	质点的运动描写	101
6.1.1	质点的坐标与运动描写	101
6.1.2	运动的约束	102
6.1.3	速度	103
6.1.4	加速度	104
§ 6.2	质点系和连续体的运动描写	105
6.2.1	质点系的运动描写	105
6.2.2	物质坐标和连续体的运动描写	105
6.2.3	刚体的运动描写的物质坐标方法	106
§ 6.3	刚体的定点转动	107
6.3.1	速度和角速度	107
6.3.2	加速度分布和角加速度	108
6.3.3	定轴转动	109
6.3.4	欧拉角	110
§ 6.4	刚体的一般运动和平面运动	111
6.4.1	平移	111
6.4.2	刚体的一般运动	112
6.4.3	刚体的平面运动	113
6.4.4	速度瞬心	115
习题		116
第 7 章	动力学	119
§ 7.1	牛顿运动定律和质点运动的微分方程	119
7.1.1	牛顿运动定律和惯性坐标系	119
7.1.2	质点运动的微分方程	120
7.1.3	达朗贝尔原理	121
7.1.4	动力学问题的提法	121
§ 7.2	动力学定理	122

7.2.1	动量定理	122
7.2.2	动量矩定理	124
7.2.3	动能定理	126
§ 7.3	质点系和刚体的动量与动量矩定理	127
7.3.1	质点系的动量定理	128
7.3.2	质心运动定理	128
7.3.3	质点系的动量矩定理	129
§ 7.4	刚体的平面运动	131
7.4.1	平面运动刚体的动量和动量矩	131
7.4.2	转动惯量与惯性积的物质描写	134
§ 7.5	刚体平面运动的微分方程	135
7.5.1	刚体的定轴转动	135
7.5.2	刚体平面运动的一般情况	138
习题		139
第 8 章	流体力学基础	143
§ 8.1	流体静力学	143
8.1.1	流体的物理性质	143
8.1.2	平衡方程	144
8.1.3	重力场中流体内的压力	145
§ 8.2	静流体对物体的作用力	147
8.2.1	任意壁面上的流体静压力	147
8.2.2	平面壁上的液体静压力	148
8.2.3	潜体的受力	149
8.2.4	浮体的受力	149
§ 8.3	流场的描写	150
8.3.1	流场的空间描写	150
8.3.2	流线和流管	151
§ 8.4	连续性方程	153
8.4.1	系统和控制体的概念	153
8.4.2	连续性方程	153
8.4.3	流管的连续性方程	154
§ 8.5	动量方程和动量矩方程	155
8.5.1	动量方程的微分形式	155
8.5.2	动量方程和动量矩方程的积分形式	156
§ 8.6	伯努利方程	157
§ 8.7	流体的粘性	160
8.7.1	牛顿流体	160

8.7.2 Hagen-Poiseuille 定律	162
§ 8.8 湍流	163
习题	164
附录 矩阵和矢量	167
参考文献	173
部分习题参考解答	174
名词索引	185
作者简介	191

第1章 引言

§ 1.1 工程力学课程的内容和研究方法简介

力学是研究物质宏观机械运动的学科。机械运动是指空间位置的变化,例如固体的运动、变形和流体的流动。涉及机械运动的最基本的概念之一就是力。力学基于时间、空间、力、能量和物质等物理概念之上的,是研究物理学、化学、生物学等以及工程技术必需的基础。在科学和工程问题中研究力所引起的运动、变形以及流动等因素的重要性是显然的。由此产生的力学至今已经发展得相当完善,对质点模型、质点系模型和连续体模型的力、运动、变形和流动问题的数学描写和解析处理有了一整套完整的方法和成熟的结果。在科学技术问题中,这些方法和结果已被广泛地应用并作为研究工具。

在传统的工程问题中,尤其是在制造业和土木工程的历史进程中,工程力学始终是最基本和最有力的工具之一。在今天,日新月异发展的高新技术依然是工程力学得到广泛应用并促进工程力学自身迅速发展的领域,例如:大跨度结构必须解决一系列非线性力学问题;高层建筑的风致振动;微型机械在复杂的工作环境中的强度、刚度、振动和平衡稳定性;与水坝设计、施工到在役监测的相关的有限元分析与力学模型实验;作为船体强度设计依据的全船体的有限元分析;航空与航天工程与高速气动力学、计算流体力学、复合材料力学等力学分支的相互推动,等等。即使在生物医学工程这样的领域,在血液动力学、人造肢体和人造器官的力学分析等方面也有令人鼓舞的进展。工程力学在工程技术中的重要应用内容是非常丰富的。

而作为我国高等院校工程类专业的一门课程的工程力学,只能介绍工程力学中最基础的内容。近年来国内外已有不少优秀的工程力学教材问世。本书是为少学时类的工程力学课程而编写的,包括了通常理论力学、材料力学和工程流体力学的最基础的内容。

解决工程技术中力学问题通常从建立研究对象的力学模型开始,进一步则应用力学定律或定理建立数学模型,随后求解数学模型得出问题的答案,最后用

实验检验答案的适用性。

对工程系统的力学问题有理论解法、数值解法和实验方法。在计算技术和数值解法高度发展的今天,数值模拟是非常有效而方便的手段。在我们这门课程里,将讨论一些基础的实验和一些基本的概念和理论解法。学习当中应当特别注意怎样建立数学模型。

§ 1.2 工程力学研究对象的主要模型

将研究对象统称为物体。依研究的不同目的,可以把复杂的研究对象抽象化、简单化为质点模型、质点系模型或连续体模型。连续体又可以分为刚体模型和可变形体模型。可变形体又进一步分为可变形固体模型和流体模型。这两种模型还可以进一步分类。

质点是具有质量的几何点,忽略其形状和尺寸大小。例如,讨论人造地球卫星的周期和轨道时,可将人造地球卫星视为质点。**质点系**是有限或无限个彼此离散的质点组成的体系。例如,太阳系或其他星系,在一定条件下,均可看作质点系。 N 个天体组成所谓 N 体模型的质点系。

连续介质直观上可以理解为组成物体的物质连续地占满物体所在的空间区域,严格地则意味着数学上可以建立物体与三维欧氏空间一个区域的同构。连续介质有可变形与不可变形之分,分别称为**刚体**和**变形体**。

刚体、变形体在确定时刻都有确定的几何形状及尺寸、空间区域和质量分布。但是刚体不变形,变形体可变形。所谓不变形,是指物体内任意两点之间的距离不变。当然质点、刚体等都是简化了的理想的模型,现实世界中不存在只有质量的几何点或受力后不变形的物体。

应当注意连续介质假设适用的范围,例如,当考虑原子尺度的数量级的体积时,定义连续介质流体密度是没有意义的。一个模型的简化正确与否,最终要由实验来判断。

同一对象因为讨论的目的不同,使用的模型可以不同,也可以交替地使用不同的模型。例如,对人造卫星在不同问题中提出的不同模型。当考虑绕地运行轨道时,可将人造卫星简化为质点;当讨论其姿态控制时,常用多刚体模型,卫星主体和伸展开的太阳能电池板等附件,均分别作为刚体,在一定的条件下可以不考虑它们的变形。但在讨论卫星各构件的强度可靠性时,则需要用可变形体模型。

§ 1.3 关于数学记号的说明

同任何精确科学一样,准确地描述力学问题就需要将那些通常语言陈述的概念和问题用数学语言表达,并且进一步列出数学表达式。矢量分析和张量分析是力学的数学语言。本书假设读者已经具有大学物理和矩阵的基本知识,并将有关基本内容放在附录中。为了读者阅读方便,这里对于矢量、矩阵和张量记号作一个简要地说明。

除非另有说明,在本书中做以下约定:

(1) 用 $\overrightarrow{AB}$ 、 $\overrightarrow{MN}$ 或用斜体的黑体英文字母 $\boldsymbol{a}$ 、 $\boldsymbol{u}$ 、 $\boldsymbol{n}$ 、 $\boldsymbol{F}$ 、 $\boldsymbol{M}$ 等表示矢量及相应的列矩阵;用大写的斜体黑体字母记二阶张量及其相应的矩阵表示,例如 $\boldsymbol{A}$ 、 $\boldsymbol{\Lambda}$ 等。特别地,用黑体的希腊字母 $\boldsymbol{\sigma}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 分别表示应力矩阵(张量)和应变矩阵(张量)。

(2) 记号 $\boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{n}$ 和 $\boldsymbol{F} \times \boldsymbol{n}$ 分别表示两矢量的点积和叉积;记号 $\boldsymbol{F}\boldsymbol{n}$ 则表示两矩阵相乘。

(3) 如果需要明确力 $\boldsymbol{F}$ 的施力点为 A ,则用记号 $\boldsymbol{F}(A)$,解读为其作用点为 A 的力 $\boldsymbol{F}$ 。

(4) 一般用记号 $\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{M}$ 分别表示力和力矩。为了区别地表示外力(载荷)和杆的内力,将这些记号右下角第一角标分别用字母 e 和 i 标出。相应的分量也作同样的处理。例如, F_{ex} 、 F_{ey} 、 F_{ez} 为载荷 $\boldsymbol{F}_e$ 的坐标分量。

第2章 力系的简化和平衡

本章叙述力学的基础知识:静力学公理,力的分类和力系的运算,力的等效原理,力的平衡方程,隔离体受力分析方法以及虚功方程。

§ 2.1 力的基本概念

2.1.1 力的概念

力的概念来源于经验,如抬起重物、拉压弹簧、开动机床或发射火箭都需要有力的作用。牛顿力学所说的力指的是物体间这样的相互作用:其效果是使物体的运动状态发生变化,即力产生运动效应,或者使物体产生变形,即力产生变形效应。静止状态或匀速直线运动状态都称为平衡状态。

经验表明,一个力用三个要素完全确定。力的三个要素是大小、方向和作用点。通常数学称谓的矢量只含大小和方向两个要素。因此,描写力的矢量还要增加作用点这一要素。

基于人类关于力对于物体运动或保持平衡状态的影响的经验,可以归纳出以下5条静力学公理,其中有几条读者在中学物理课中已经很熟悉了。

(1) **平行四边形法则**:作用于同一点的两个力可以合成为作用于同一点的一个合力,其方向和大小由这两力为邻边的平行四边形的、两力所夹的对角线决定的矢量来决定(图2.1.1)。

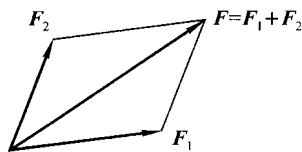


图 2.1.1 平行四边形法则

(2) **二力平衡公理**:作用在同一刚体上的两个力平衡的充分必要条件是,这两个力大小相等、方向相反且作用在同一条直线上。

(3) **加减平衡力系原理**:在给定的作用于刚体的力系上增加或减去任意的平衡力系不改变原力系对刚体的作用。