



面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century

结构力学(I)

王焕定 章梓茂 景 瑞 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

结构力学(I)

王焕定 章梓茂 景 瑞 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112 号

图书在版编目(CIP)数据

结构力学 (I)/王焕定等编著. —北京:高等教育出版社,
2000.2

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-04-007994-1

I. 结… II. 王… III. 结构力学-高等学校-教材 IV. 0
342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 64390 号

结构力学(I)

王焕定 章梓茂 景 瑞 编著

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010 64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 中国科学院印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 2000年2月第1版

印 张 16.75

印 次 2000年2月第1次印刷

字 数 280 000

定 价 27.90 元

如有缺页、倒页、脱页等
部门联系调换。

内 容 提 要

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是教育部面向 21 世纪课程教材和教育部工科力学“九五”规划教材。本书与同类教材相比,具有以下特色:注意与相关课程的贯通、融合与渗透,减少了不必要的相互重叠内容;对经典内容加以精选,使之更加简练,并富有新意;在保证基础的前提下,引进了一些反映近代科技成果的新内容,将经典的手算与计算机分析有机地结合起来;广泛涉及诸多工程概念,重组课程体系;注意启发式教学,为学生独立思维留出较大的空间。本书第(Ⅰ)册附有《结构力学教学实践和工程计算分析》软件光盘 1 张。

全书分(Ⅰ)、(Ⅱ)两册,第(Ⅰ)册为结构静力分析篇,共 7 章,含现有结构力学中的经典内容,第(Ⅱ)册为结构计算机分析篇和结构动力分析篇,共 10 章。本书为第(Ⅰ)册。

本书可作为高等学校土木、交通、水利和力学等各专业的教材,也可作为工程技术人员的参考书。本书第(Ⅰ)册还可作为非结构类专业和各层次有关土木类等专业的教材。

序

本书是教育部“面向 21 世纪力学系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目的研究成果之一,是项目课题组总负责人范钦珊教授结合土木类专业提出的模块式改革方案中的一个模块。本书成书之前,相关的教学讲义经过哈尔滨建筑大学和北方交通大学三年试用。

本书的特点是:加强了相关课程,即理论力学、材料力学和结构力学内容的贯通,消除了一些不必要的重叠。在保证结构力学基本概念、基本原理和基本方法的基础上,根据少而精和推陈出新的原则,删除了一些过于繁杂的手算内容,将经典内容与计算机数值分析方法有机地结合起来,力求实现在经典的基础上更新,在更新的前提下加深对经典内容的理解;注意启发式教学,为读者的独立思维留有较大空间,以利于创新能力的培养;为适应因材施教的需要,在保证结构力学现有教材基本理论系统性的基础上,增加了有限单元法、结构非线性动力响应分析、结构地震响应和结构振动控制等新概念、新理论、新内容和新方法,以供不同院校、不同层次的学生选教选学。本书附有《结构力学教学实践和工程计算分析软件》光盘 1 张。

全书分为(Ⅰ)、(Ⅱ)两册,第(Ⅰ)册为结构静力分析篇,包括结构力学经典的内容共 7 章;第(Ⅱ)册为结构计算机分析篇和结构动力分析篇,共 10 章。第(Ⅱ)册除经典内容外,还引入了一些现代计算机分析的内容。

本书可作土木类等多学时专业的教材,第(Ⅰ)册也可作非结构类专业和各层次有关土木类专业的结构力学教材。书中带*的章节可按专业的要求和学生的层次加以取舍。

参加本书编写工作的有王焕定(绪论,结构静力分析篇的引言,第 2、6、7 章,结构计算机分析篇的第 1 章和结构动力分析篇第 8 章的部分内容、第 10 章及所有章的结论与讨论)、章梓茂(结构动力分析篇的第 6、7 及第 8 章主要内容)、景瑞(结构静力分析篇的第 4 章)、张金生(结构静力分析篇的第 1、3、5 章)、王伟(结构计算机分析篇的第 2~5 章)、于桂兰(结构动力分析篇的第 9 章主要内容)。刘季编写了结构动力分析篇的改革试点讲义,并进行了一

14669/064

轮教学实践,该讲义是动力分析篇的基础。此外,耿淑伟参加了结构动力分析篇中单自由度非线性、子空间迭代和时程分析内容的编写和程序开发。本书插图由王璐绘画。全书由范钦珊和王焕定统稿。

本书承蒙西安建筑科技大学刘铮教授主审、东南大学单建教授和西安建筑科技大学吴敏哲教授审阅,三位教授提出了许多建设性意见和具体修改建议,为提高本书质量作出了重要贡献。

在本书的编写过程中得到教育部“面向 21 世纪力学系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目课题组总负责人范钦珊教授以及清华大学、哈尔滨建筑大学、北方交通大学和高等教育出版社的大力支持。

藉本书出版之际,编者谨向审阅书稿的三位教授、支持本书编写和出版的人们致以衷心的感谢。

由于编者水平的局限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

1999 年教师节

主要符号表

A	面积	M^F	固端弯矩
c	支座广义位移	M_u	极限弯矩
d	节间距离	M_e	弹性极限弯矩
E	弹性模量	q	均布荷载集度
E_p	结构总势能	R	广义反力、半径
E_p^*	荷载势能	r	单位位移引起的广义反力、半径
f	矢高、工程频率	S	转动刚度、影响线量值
F_p	荷载	u	水平位移
P	结构荷载向量	v	竖向位移、挠度
F_H	水平推力	V_e	应变能
F_{Ax}, F_{Ay}	A 处铰支座(约束)的分反力	W	功、平面体系计算自由度、 弯曲截面系数
F_N	轴力	X	广义未知力
F_Q	剪力	y	位移
F_Q^L, F_Q^R	截面左、右的剪力	Z	广义未知位移
F_{cr}	临界荷载	α	线膨胀系数
F_{Pu}	极限荷载	Δ	结构广义位移
F_p^+	可破坏荷载	Δ	结构位移向量
F_p^-	可接受荷载	δ	虚位移、广义位移
G	切变模量	ϵ	线应变
i	线刚度	σ	应力
I	单位矩阵	σ_s	屈服应力
k	刚度系数、剪力分布不均匀系数	σ_u	极限应力
M	力矩、力偶矩、弯矩		

本书符号表说明

为了深入贯彻国家技术监督局发布的国家标准(GB 3100~3102—93)《量和单位》,本书对结构力学符号和单位的传统用法作了调整,既保证了对国家标准的认真实施,又考虑了教师和学生使用上的习惯与方便。

在实施国家标准的过程中,为保证国家标准和现有惯例的衔接,本书作了认真的考虑,现作如下说明,请读者注意。

1. 国家标准规范的物理量和名称和符号,按国家标准使用,注重量的物理属性。如,旧称剪应变(剪切角) γ ,现改称切应变;又如,各种力(包括荷载、反力和内力)都用 F 作为主符号,而将其特性以下标(上标)表示;等等。

2. 对于在结构力学中广泛使用的广义力(包括力与力偶矩、力矩)和广义位移(包括线位移与角位移),为了体现其广义性(有时还有未知性),考虑到全书叙述的统一和表达的简洁、完整,本书仍沿用 X (多余力未知力)、 R 和 r (约束反力)、 Δ 和 δ (位移)、 c (支座位移)等广义物理量。至于它们在具体问题中对应的量和相应单位,则视具体问题而定。

3. 在结构力学力法和位移法、位移和影响线计算中普遍应用的单位力 $\bar{X}=1$ 和 $F_p=1$ 等以及单位位移 $\bar{Z}=1$ 和 $\Delta=1$ 等,均应理解为“广义量的系数”,是广义量自身相比的比值。为了书写方便且考虑到习惯用法,均简记为 $\bar{X}=1$ 和 $F_p=1$ 等以及 $\bar{Z}=1$ 和 $\Delta=1$ 等,其余的单位量与此类同。

目 录

结构力学总论

§ 1 结构力学的研究对象和研究内容	1
1-1 研究对象	1
1-2 课程所涉及的内容	1
1-3 结构力学与其他课程和结构设计的关系	2
§ 2 一些工程结构实例与计算简图	3

结构静力分析篇

第 1 章 杆系结构的组成分析	13
§ 1-1 基本概念	13
1-1-1 自由度	13
1-1-2 约束	14
1-1-3 约束的分类	15
1-1-4 计算自由度	16
1-1-5 体系的分类	17
§ 1-2 静定结构的组成规则	18
1-2-1 静定结构组成规则	18
1-2-2 组成分析举例	20
§ 1-3 结论与讨论	22
1-3-1 本章结论	22
1-3-2 几点讨论	23
习题	23
第 2 章 静定结构受力分析	26
§ 2-1 弹性杆内力分析回顾和补充	26
2-1-1 材料力学内容回顾	26
2-1-2 曲杆平衡方程	27

2-1-3 结构力学与材料力学规定的异同	27
2-1-4 区段叠加法作弯矩图	28
§ 2-2 静定结构的内力分析方法	29
2-2-1 静定结构内力分析方法	29
2-2-2 受弯结构作内力图的顺序	30
§ 2-3 桁架结构内力分析	32
2-3-1 桁架结构	32
2-3-2 结点法	34
2-3-3 截面法	36
2-3-4 联合法	38
§ 2-4 三铰拱受力分析	39
2-4-1 拱反力计算	40
2-4-2 竖向荷载作用下等高拱指定截面内力计算公式	41
2-4-3 拱的内力图	42
2-4-4 合理拱轴线	43
§ 2-5 受弯结构受力分析	44
2-5-1 多跨静定梁	44
2-5-2 静定刚架	46
2-5-3 静力学中的反分析	51
2-5-4 组合结构	53
§ 2-6 各类结构的受力特点	53
§ 2-7 静定结构性质	55
2-7-1 静定结构解答唯一性	55
2-7-2 导出的性质	55
§ 2-8 结论与讨论	56
2-8-1 本章结论	56
2-8-2 几点讨论	57
习题	58
第3章 结构位移计算	65
§ 3-1 弹性杆件的变形与应变能密度计算	65
§ 3-2 变形体虚功原理	66
3-2-1 变形体虚功原理的表述和说明	66
3-2-2 杆系结构的虚功方程	67
§ 3-3 单位荷载法	69
3-3-1 结构位移	69
3-3-2 单位荷载法	69
3-3-3 各种外因下的位移计算公式	71

§ 3-4 图乘法	75
3-4-1 图乘法原理	75
3-4-2 图乘法求位移时需注意的问题	76
§ 3-5 各种外因引起的位移计算	76
§ 3-6 互等定理	86
3-6-1 功的互等定理	86
3-6-2 位移互等定理	87
3-6-3 反力互等定理	88
* 3-6-4 位移-反力互等定理	88
§ 3-7 结论与讨论	89
3-7-1 本章结论	89
3-7-2 几点讨论	90
习题	91
第4章 超静定结构解法	97
§ 4-1 求解超静定结构的一般方法	97
§ 4-2 力法	99
4-2-1 力法思路	99
4-2-2 超静定次数的确定	101
4-2-3 力法的解题步骤	102
4-2-4 力法解超静定结构举例	103
§ 4-3 力法计算的简化	114
4-3-1 无弯矩状态的判别	115
4-3-2 对称性利用	116
* 4-3-3 其他简化措施	118
§ 4-4 位移法	120
4-4-1 位移法的准备工作	120
4-4-2 位移法思路	126
4-4-3 位移法基本未知量及基本结构	128
4-4-4 典型方程位移法解题步骤	129
4-4-5 位移法解超静定结构举例	131
* § 4-5 混合法	141
§ 4-6 超静定结构特性	142
§ 4-7 结论与讨论	143
4-7-1 本章结论	143
4-7-2 几点讨论	144
习题	145
第5章 移动荷载作用下的结构分析	151

§ 5-1 移动荷载及影响线概念	151
5-1-1 活荷载	151
5-1-2 影响线	151
§ 5-2 静力法作影响线	152
5-2-1 简支梁影响线	152
5-2-2 经结点传荷的主梁影响线	154
5-2-3 静定桁架影响线	155
5-2-4 三铰拱影响线	156
5-2-5 超静定结构影响线	158
§ 5-3 虚功法作影响线	159
5-3-1 虚功法(机动法)基本原理	159
5-3-2 虚功法作影响线举例	160
§ 5-4 影响线的应用	164
5-4-1 利用影响线求固定荷载作用的量值	164
5-4-2 利用影响线确定定位荷载最不利荷载分布	165
5-4-3 利用影响线确定移动荷载最不利位置	166
5-4-4 简支梁的绝对最大弯矩	170
5-4-5 内力包络图	172
§ 5-5 结论与讨论	173
5-5-1 本章结论	173
5-5-2 几点讨论	174
习题	175
第 6 章 矩阵位移法	179
§ 6-1 概述	179
§ 6-2 单元刚度方程	182
6-2-1 平面桁架单元刚度方程	182
6-2-2 连续梁单元刚度方程	183
6-2-3 不考虑轴向变形的平面弯曲单元刚度方程	183
6-2-4 平面弯曲自由式单元刚度方程	184
6-2-5 单元刚度矩阵的性质	185
6-2-6 单元分析举例	185
§ 6-3 坐标转换问题	187
6-3-1 平面自由式单元位移、力的坐标转换	187
6-3-2 平面自由式单元刚度方程的坐标转换	188
6-3-3 平面桁架单元的坐标转换	189
6-3-4 坐标转换举例	190
§ 6-4 整体分析	192

6-4-1 连续梁的结构刚度方程	193
6-4-2 平面刚架的结构刚度方程	195
6-4-3 结构刚度方程集成举例	200
§6-5 结构刚度和综合荷载元素速算法及单元内力计算	202
6-5-1 结构刚度矩阵元素速算确定方法	202
6-5-2 综合结点荷载元素的速算确定方法	205
6-5-3 单元内力的计算	208
§6-6 计算程序的主程序框图及算例	209
6-6-1 主程序框图	209
6-6-2 程序计算算例	209
§6-7 结论与讨论	213
6-7-1 本章结论	213
6-7-2 几点讨论	214
习题	215
第7章 结构稳定及极限荷载计算的基本知识	218
§7-1 两类稳定问题概述	218
7-1-1 工程结构稳定验算问题	218
7-1-2 稳定问题分类	219
§7-2 两类稳定问题分析简例	221
7-2-1 完善体系分支点失稳分析简例	221
7-2-2 非完善体系极值点失稳分析简例	225
§7-3 结构的极限荷载	227
7-3-1 基本假定	228
7-3-2 基本概念	228
§7-4 极限平衡法及比例加载时极限荷载的一些定理	230
7-4-1 极限平衡法	230
7-4-2 比例加载时判定极限荷载的若干定理	232
§7-5 结论与讨论	234
7-5-1 本章结论	234
7-5-2 几点讨论	235
习题	236
附录 A 习题答案	238
附录 B 结构力学教学实践和工程计算分析软件使用说明	244
附录 C 索引	247
主要参考书目	250
作者简介	251

结构力学总论

什么是结构力学,其研究对象、研究内容以及研究方法是什么,结构力学与理论力学和材料力学、结构力学与后续课程、结构力学与结构工程有何关系,等等,即为本书绪论的主要内容。

§ 1 结构力学的研究对象和研究内容

1-1 研究对象

结构力学作为力学学科的一个分支,其研究对象涉及较广,根据所涉及范围,通常将结构力学分为“狭义结构力学”、“广义结构力学”和“现代结构力学”。

● **狭义结构力学。**其研究对象为由杆件所组成的体系,即**结构**(structure)。这种体系能承担外界荷载作用,并起传力骨架作用。这又称为经典结构力学。

● **广义结构力学。**其研究的对象为可变形的物体。除可变形杆件组成的体系外,还包括可变形的连续体(平板、块体、壳体等)。

● **现代结构力学。**将工程项目从论证到设计,从施工到使用期内维护的整个过程作为大系统,研究大系统中的各种各样力学问题。显然其研究对象范围更广。

根据本课程的特点以及结构工程对人才的需要,本书将以狭义结构力学为主,适当涉及广义结构力学。

1-2 课程所涉及的内容

当今结构力学的研究内容包括以下三方面:

● **分析。**在已知结构和荷载的前提下,根据强度、刚度和稳定性等方

面的要求,通过分析计算,使所设计的结构既经济合理,又安全可靠。这内容是属于经典内容。

● **识别。**与传统的分析不同,很多问题往往需要在已知系统外部作用结果的情形下,根据结构信息反过来确定外界的作用信息,或者根据外界的作用信息,确定系统的有关信息。如果将外界作用下系统的反应(结果)分析称为正问题,则在已知反应情形下,确定外界作用或系统的信息则称为反问题。确定外界作用信息的反问题称为**荷载识别**(load identification),而确定结构信息的反问题称为**系统识别**(system identification)。

● **控制。**控制理论和控制在结构(建筑结构、桥梁结构和水工结构,等等)工程方面,直到20世纪70年代才被提出,它是人们在抵御外界作用方面往智能化结构方向迈出的可喜一步。因此,立即引起广大学者和工程技术人员的关注,从而得到了迅速发展。这是结构工程领域的高科技课题之一。

本书将以最基本的分析为主,介绍结构在实际工程常见各种可能外界作用下的受力、变形和稳定性分析的基本概念、基本原理和基本方法。同时,也考虑发展的需要,适当介绍一些识别和控制的基本概念。

本书所涉及的内容大致可分成以下三部分:

● **结构静力分析。**研究结构的组成规律、静力荷载作用下的受力变形分析及其稳定性的概念、原理和方法,以及移动荷载下的结构设计特点和方法等。

● **结构计算机分析。**简单介绍应用计算机进行结构分析的基本原理和计算方法,以杆系结构为基础,也将包含连续体(平面问题)的分析方法和程序。

● **结构动力分析。**主要研究结构的动力特性,以及在动荷载作用下的分析原理和方法。同时,还将简单介绍地震反应分析和结构振动控制的基本概念等。

1-3 结构力学与其他课程和结构设计的关系

理论力学、材料力学、高等数学和计算机基础知识都是结构力学的基础,特别是理论力学中关于力系的平衡、约束的性质、质点系及刚体虚位移原理、运动及动力分析;材料力学中的内力分析、强度、刚度和稳定性分析等重要内容,不仅作为结构力学的基础,而且在结构力学中将得到扩展和延伸。读者学习本课程时应当与理论力学和材料力学贯通起来,形成总体概念。

结构力学与理论力学和材料力学不同的是,结构力学与工程结构联系更为紧密,其基本概念、基本理论和基本方法将作为钢筋混凝土结构、钢结

构、地基基础和结构抗震设计等工程结构课程的基础;结构力学的分析结果又是各类结构的设计依据。当前的计算机辅助设计软件,其核心计算部分的基本理论和方法也都以结构力学作为基础。

§ 2 一些工程结构实例与计算简图

实际工程是很复杂的,例如图 1 到图 7 所示的高层建筑、大型水利工程、桥梁结构、大跨结构、高耸结构、核电站结构和体育馆建筑,等等,如果不作任何简化,分析计算将十分困难。

分析实际结构,需利用力学知识、结构知识和工程实践经验,经过科学的抽象,并根据实际受力、变形规律等主要因素,对结构进行合理的简化。这一过程称为**力学建模**,经简化后可以用于分析计算的模型,称为**结构的计算简图**。

确定计算简图的原则是:

- 尽可能符合实际——计算简图应尽可能反映实际结构的受力、变形等特性。

- 尽可能简单——忽略次要因素,尽量使分析过程简单。

理论力学中已经引入了支座和结点的计算简图,现归纳、补充如下:

支座是将结构和基础联系起来的装置。其作用是将结构固定在基础上,并将结构上的荷载传递到基础和地基。支座对结构的约束力称为**支座反力**(reactions at support),支座反力总是沿着它所限制的位移方向。

本书中所用的支座计算简图及相应的支座反力如图 8 所示,有以下形式:

- **固定铰支座**。限制各方向位移,但不限制转动。其反力可用沿坐标的分量表示,如图 8a、b 所示。

- **可动铰支座**。限制某些方向位移,但不限制转动。其反力沿所限制的位移方向,如图 8c 所示。

- **固定端(固定支座)**。限制全部位移(移动和转动),其反力用沿坐

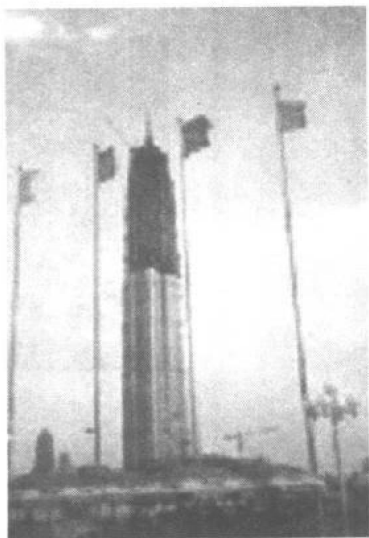


图 1 上海金茂大厦

标的分量和力偶来表示,如图 8d、e 所示。

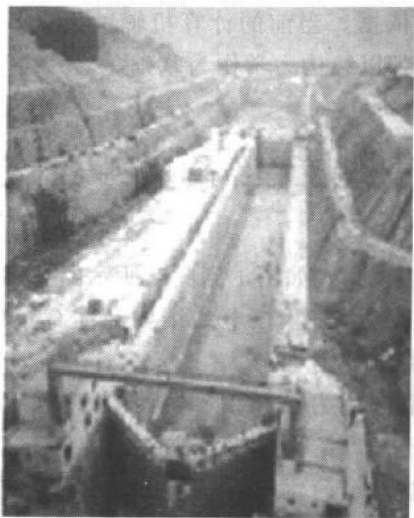


图 2 施工中的长江三峡五级船闸



图 3 长江西陵大桥



图 4 哈尔滨梦幻乐园网架屋盖