



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

结构力学(II)

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(II)

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(Ⅱ)/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 7-04-007995-X

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 64391 号

结构力学(Ⅱ)

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 17.5

印 次 2000年 2 月第 1 次印刷

字 数 300 000

定 价 18.60 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

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》软件光盘一张。

全书共(Ⅰ)、(Ⅱ)两册,第(Ⅰ)册为结构静力分析篇,共 7 章,含现有各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(Ⅱ)册。

本书可作为高等学校土木、交通、水利和力学等专业的教材,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专业专业的教材。

主要符号表

A	振幅、面积	I	单位矩阵
B	应变矩阵、形变矩阵	I_p	截面抗扭极惯性矩
c	支座广义位移、粘阻系数	k	刚度系数
c_{cr}	临界粘阻系数	k^e	整体坐标系下的单元刚度矩阵
d	位移向量、位移矩阵	K	结构刚度矩阵
D	弹性矩阵	K_i^*	广义刚度、折算刚度
E	弹性模量	m	质量
E_p	结构总势能	M	力矩、力偶矩、弯矩
E_p^*	荷载势能	M	质量矩阵
f	工程频率	M^F	固端弯矩
F_b	体积力矩阵	M_u	极限弯矩
F_p	荷载	M_e	弹性极限弯矩
F_N	轴力	M_i^*	广义质量、折算质量
F_Q	剪力	N	形函数矩阵
F_{cr}	临界荷载	P_E	等效结点荷载向量
F_{Pu}	极限荷载	P_d	结构直接结点荷载矩阵
F_I	惯性力	P	综合结点荷载向量
F_D	阻尼力	q	均布荷载集度
F_S	恢复力	R	广义反力、半径
F^e	整体坐标系下的单元杆端力矩阵	r	单位位移引起的广义反力、半径
F^{Fe}	整体坐标系下的单元固端力矩阵	S	应力矩阵
F_E^e	整体坐标单元等效结点荷载矩阵	t	时间
F_S	表面力矩阵	T	周期、动能
G	切变模量	T	坐标转换矩阵
		u	水平位移

v	竖向位移、挠度	δ^e	整体坐标下单元杆端位移矩阵
V_e	应变能	ε	线应变
W	功、平面体系计算自由度、重量	μ	动力放大系数
X	广义多余未知力	ξ	阻尼比、自然坐标
y	位移	θ	干扰力频率
α	线膨胀系数、相位角	φ	初相角
$\alpha_{\max}$	地震影响系数最大值	Φ	振型矩阵
Δ	结构广义位移	σ	正应力
Δ	结构位移向量	τ	切应力
δ	虚位移、广义位移、厚度	ω	圆频率
δ	柔度矩阵		

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的名称和符号,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)、 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 $\overline{X}=1$ 和 $F_p=1$ 等,以及单位位移 $\overline{Z}=1$ 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 $\overline{X}=1$ 和 $F_p=1$ 等,以及 $\overline{Z}=1$ 和 $\Delta=1$ 等,其余的单位量与此类同。



作者简介

王焕定 1964年毕业于西安冶金建筑学院应用力学专业,现为哈尔滨建筑大学建筑工程系教授、博士生导师,国家教育部工科力学结构力学课程教学指导小组委员,工程抗震理论与计算机软件专业委员会主任。

自工作至今主要从事理论力学、材料力学、结构力学和有限单元法的教学工作,已出版本科和研究生教材三本。所从事的主要研究方向为:结构力学与工程振动、计算力学和计算机辅助教学,已发表科研论文约 60 篇。

曾获建设部和国家科技进步奖两项,省和国家优秀教学成果奖、优秀教材奖、优秀软件奖等共七次。还曾荣获省教育系统劳动模范、全国优秀教师光荣称号。享受国务院政府津贴。

目 录

结构计算机分析篇

第 1 章	虚位移原理、势能原理及其应用	5
§ 1-1	弹性力学的基本方程及其矩阵表示	5
1-1-1	平衡(运动)微分方程	6
1-1-2	小变形的几何方程(位移-应变关系)	7
1-1-3	边界条件(边界处平衡和协调条件)	8
1-1-4	线弹性体的物理方程(本构关系)	9
1-1-5	物理量的矩阵表示	10
1-1-6	弹性力学基本方程的矩阵表示	11
* § 1-2	外力总虚功的计算	11
1-2-1	内部微元体上外力总虚功	11
1-2-2	边界微元体上外力总虚功	13
1-2-3	虚位移时变形体的外力总虚功	13
§ 1-3	变形体虚位移原理表述和证明	14
1-3-1	变形体虚功原理回顾	14
1-3-2	变形体虚位移原理的表述	14
* 1-3-3	变形体虚位移原理必要性证明	14
* 1-3-4	变形体虚位移原理充分性证明	15
1-3-5	几点说明	16
§ 1-4	势能原理	17
1-4-1	预备知识	17
1-4-2	最小势能原理	17
1-4-3	几点说明	18
* § 1-5	势能原理与位移法	18
1-5-1	由势能原理导出位移法方程	18
1-5-2	能量法求解举例	20
§ 1-6	里兹法	20

1-6-1 用虚位移原理求解	21
1-6-2 用势能原理求解	23
§1-7 结论与讨论	24
1-7-1 本章结论	24
1-7-2 几点讨论	25
习题	25
第2章 杆系结构单元分析	27
§2-1 引言	27
2-1-1 杆系结构虚位移原理虚功方程	27
2-1-2 杆系结构总势能表达式	29
2-1-3 几点说明	30
§2-2 平面杆系结构单元分析	31
2-2-1 拉(压)杆单元	31
2-2-2 扭转杆单元	34
2-2-3 弯曲杆单元	35
2-2-4 考虑轴向变形的弯曲单元——平面自由式单元	38
2-2-5 有约束的单元	40
2-2-6 考虑剪切时的自由式单元	41
2-2-7 有刚域单元	42
§2-3 空间杆系结构单元分析	45
2-3-1 交叉梁单元	45
2-3-2 空间桁架单元	46
2-3-3 空间刚架单元	47
§2-4 杆系结构单元刚度矩阵子程序	48
2-4-1 一些公共的自定义部分	48
2-4-2 单元刚度矩阵(局部坐标系)子程序的源程序	49
§2-5 结论与讨论	52
2-5-1 本章结论	52
2-5-2 几点讨论	53
习题	54
第3章 杆系结构的整体分析	56
§3-1 结构整体刚度方程	57
3-1-1 用势能原理进行结构整体分析	57
3-1-2 直接刚度法集装规则的推证	59
§3-2 整体分析的物理实质	61
§3-3 边界条件处理的补充——斜支座问题	62

3-3-1	对单元进行处理,用先处理法集成整体刚度矩阵	63
3-3-2	对整体刚度矩阵进行处理	64
§ 3-4	杆系结构静力分析程序简要说明	65
§ 3-5	结论与讨论	66
3-5-1	本章结论	66
3-5-2	几点讨论	66
习题		67
第4章	分支点稳定及极限荷载有限元分析简介	69
§ 4-1	平面刚架分支点稳定有限元分析	69
4-1-1	压杆单元的刚度方程	69
4-1-2	刚架分支点稳定计算	71
4-1-3	一种特征值问题解法——幂法	72
4-1-4	分支点稳定算例	73
§ 4-2	刚架极限荷载分析	74
4-2-1	增量变刚度法	74
4-2-2	单元刚度矩阵的修正	74
4-2-3	增量变刚度法确定刚架极限荷载的计算过程及算例	76
§ 4-3	结论与讨论	81
习题		81
第5章	平面问题有限元分析	83
§ 5-1	引言	83
5-1-1	结构离散化	83
5-1-2	平面问题的总势能表达式	84
§ 5-2	常应变三角形单元	85
5-2-1	单元结点位移和结点力	85
5-2-2	用面积坐标建立单元位移场	86
5-2-3	基于势能原理的单元分析	89
5-2-4	计算实例	93
5-2-5	收敛准则	93
§ 5-3	矩形双线性单元	94
5-3-1	用正则坐标建立单元位移场	95
5-3-2	应变和应力矩阵;	96
5-3-3	单元刚度矩阵和单元等效荷载列阵	97
5-3-4	计算结果整理	97
5-3-5	计算实例	98
§ 5-4	平面问题计算程序 PSTE 的简要说明	99

§ 5-5 平面等参数单元	100
5-5-1 基本概念	100
5-5-2 几种常用单元描述和位移模式	104
5-5-3 等参元单元特性分析	107
5-5-4 数值积分	110
5-5-5 作等参元分析时的注意事项	112
5-5-6 计算实例	113
5-5-7 二维(和三维)弹性分析计算程序简要说明	114
§ 5-6 结论与讨论	114
5-6-1 本章结论	114
5-6-2 几点讨论	115
习题	115

结构动力分析篇

第6章 结构动力学概述	122
§ 6-1 动荷载及其分类	122
6-1-1 动荷载的定义	122
6-1-2 动荷载的分类	123
§ 6-2 结构动力学的任务和研究内容	124
6-2-1 结构动力学与结构静力学的对比	124
6-2-2 结构动力学的任务	125
6-2-3 结构动力学的研究内容	125
§ 6-3 结构动力分析中体系的自由度	125
6-3-1 动力分析中体系的自由度	126
6-3-2 体系自由度的简化	126
6-3-3 体系自由度的确定	128
§ 6-4 结构的动力特性	128
6-4-1 结构的自振频率	128
6-4-2 结构的振型	129
6-4-3 结构的阻尼	129
§ 6-5 建立结构体系运动方程的一般方法	130
§ 6-6 体系运动方程的建立	131
6-6-1 单自由度体系运动方程举例	131
6-6-2 两个自由度体系运动方程举例	135
§ 6-7 多自由度体系运动方程的一般形式	139

6-7-1 运动方程一般形式	139
6-7-2 用刚度法和柔度法建立体系运动方程的具体步骤	140
§6-8 结论与讨论	141
6-8-1 本章结论	141
6-8-2 几点讨论	142
习题	143
第7章 单自由度体系的振动分析	147
§7-1 单自由度体系自由振动分析的回顾和扩展	147
7-1-1 自由振动的主要内容回顾	147
7-1-2 确定体系阻尼比的一种方法	149
§7-2 单自由度体系的受迫振动	150
7-2-1 单自由度体系受迫振动的一般解	150
7-2-2 几种常见荷载作用下的动力响应分析	152
§7-3 单自由度非线性体系的响应分析	160
7-3-1 非线性运动的增量方程	160
7-3-2 线加速度法解非线性问题	161
7-3-3 程序计算结果举例	162
§7-4 结论与讨论	163
7-4-1 本章结论	163
7-4-2 几点讨论	164
习题	165
第8章 多自由度体系的振动分析	167
§8-1 无阻尼多自由度体系的自由振动	167
8-1-1 多自由度体系的振型和频率方程	168
8-1-2 多自由度体系的频率和振型	169
8-1-3 多自由度体系自由振动的通解	172
8-1-4 多自由度体系频率和振型计算举例	173
§8-2 多自由度体系振型的正交性	175
8-2-1 正交的概念	175
8-2-2 振型向量的正交性	176
8-2-3 关于振型正交性的物理解释	176
8-2-4 正交性的利用	177
8-2-5 多自由度体系振型正交性应用举例	179
§8-3 多自由度体系的受迫振动	180
8-3-1 简谐荷载作用下的无阻尼受迫振动分析	181
8-3-2 无阻尼体系在任意荷载作用下的受迫振动分析	183

8-3-3 无阻尼结构的动内力计算	185
8-3-4 有阻尼受迫振动分析	187
8-3-5 有关阻尼矩阵的补充说明	188
* §8-4 杆系结构有限元动力分析	189
8-4-1 基本原理	189
8-4-2 杆件单元运动方程及结构运动方程的建立	190
* §8-5 多自由度体系的逐步积分方法	193
8-5-1 线加速度法	194
8-5-2 Wilson- θ 法	194
8-5-3 Newmark- β 法	196
§8-6 结论与讨论	197
8-6-1 本章结论	197
8-6-2 几点讨论	198
习题	200

第9章 频率和振型的实用计算方法

§9-1 能量法	202
9-1-1 单自由度体系	202
9-1-2 多自由度体系	203
* 9-1-3 无限自由度体系	206
* 9-1-4 瑞利比	208
§9-2 迭代法求振型和频率	209
9-2-1 计算第一振型和频率	209
9-2-2 迭代法求高阶振型和频率	211
9-2-3 迭代法算例	212
* §9-3 瑞利-里兹法	213
9-3-1 瑞利比的特性	213
9-3-2 瑞利-里兹法	214
9-3-3 瑞利-里兹法的步骤	215
* §9-4 子空间迭代法	216
9-4-1 子空间迭代法基本思路	216
9-4-2 多自由度瑞利-里兹法的矩阵表达式	216
9-4-3 子空间迭代法	218
9-4-4 子空间迭代法算例	220
§9-5 本章结论	222
习题	223

第 10 章	结构地震响应分析及振动控制概述	224
§ 10-1	地震作用与地震作用理论概述	224
10-1-1	地震作用	224
10-1-2	地震作用理论	225
§ 10-2	单自由度体系的地震作用分析	226
10-2-1	地震作用下结构的运动方程	227
10-2-2	地震作用反应谱理论的基本假定	227
10-2-3	单自由度体系的地震作用分析	228
§ 10-3	地震反应谱	229
10-3-1	相对位移、相对速度和绝对加速度反应谱	230
10-3-2	三种反应谱的关系	231
10-3-3	地震反应谱的标准化	232
10-3-4	抗震设计反应谱	234
§ 10-4	多自由度线性体系地震响应分析	235
10-4-1	振型分解法解多自由度体系地震响应	235
10-4-2	线性多自由度体系的地震作用——振型分解 反应谱法	237
10-4-3	关于振型组合问题	238
§ 10-5	结构对策的发展和结构振动控制的概念	240
10-5-1	结构对策的发展	240
10-5-2	结构振动控制的概念	241
§ 10-6	结构被动控制概述	242
10-6-1	基底隔震	242
10-6-2	耗能装置	244
10-6-3	利用吸振原理设计的减震装置	246
§ 10-7	结构主动控制概述	249
10-7-1	主动控制系统的构成和分类	249
10-7-2	AMD 受控系统运动方程与状态方程	249
10-7-3	主动控制常用控制算法简要说明	250
10-7-4	主动控制试验	251
§ 10-8	几点结论	252
附录 A	习题答案	254
附录 B	索引	261
	主要参考书目	264
	作者简介	265

结构计算机分析篇

- 第 1 章 虚位移原理、势能原理及其应用
- 第 2 章 杆系结构单元分析
- 第 3 章 杆系结构的整体分析
- 第 4 章 分支点稳定及极限荷载有限元分析简介
- 第 5 章 平面问题有限元分析

