

1



普通高等教育“十五”国家级规划教材

结构力学

第2版 II

王焕定 章梓茂 景瑞 编著

王焕定 张金生 张永山 王伟 修订



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

结构力学

王焕定 章梓茂 景瑞 编著
王焕定 张金生 张永山 王伟 修订

高等教育出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,第1版是面向21世纪课程教材。本书是在第1版的基础上修订而成,并保留了原有的体系和特色。

全书分I, II两册。第I册为结构静力分析篇,共7章,为本学科的经典内容;第II册为结构计算机分析篇和结构动力分析篇,共10章。

本书附有《结构力学教学实践和工程计算分析软件》光盘1张,内容包括思考题答案、附加例题、计算机应用方面的内容、习题所对应的计算数据文件、电子教案、结构力学练习及测试系统、课外读物等。

本书可作为高等学校土木工程、交通工程、水利水电工程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土木类相关专业的教材。

本书配有《结构力学网络课程》(已出版)。

需要本教材全部习题解答的教师请登录高等教育出版社高等理工教学资源网(www.hep_st.com.cn)

图书在版编目(CIP)数据

结构力学. II / 王焕定, 章梓茂, 景瑞编著. —2版.
北京: 高等教育出版社, 2004. 11
ISBN 7-04-014481-6

I. 结... II. ①王... ②章... ③景... III. 结构力学
- 高等学校 - 教材 IV. O342

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第086186号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所	版 次	2000年2月第1版
印 刷	北京东光印刷厂		2004年12月第2版
开 本	787×960 1/16	印 次	2004年12月第1次印刷
印 张	19.5	定 价	22.60元
字 数	360 000		

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:14481-00

主要符号表

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

α	线膨胀系数、相位角	μ	动力放大系数
α_{\max}	地震影响系数最大值	ξ	阻尼比、自然坐标
Δ	结构广义位移	θ	干扰力频率
Δ	结构位移向量	φ	初相角
δ	虚位移、广义位移、厚度	Φ	振型矩阵
δ	柔度矩阵	σ	正应力
δ^e	整体坐标下单元杆端位移矩阵	τ	切应力
ε	线应变	ω	圆频率

主要符号表说明

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 $\bar{X}=1$ 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。

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

策划编辑	黄 毅
责任编辑	张玉海
封面设计	李卫清
责任绘图	朱 静
版式设计	胡志萍
责任校对	张 颖
责任印制	孔 源

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	3
§ 1-1	弹性力学的基本方程及其矩阵表示	3
1-1-1	平衡(运动)微分方程	4
1-1-2	小变形的几何方程(位移-应变关系)	5
1-1-3	边界条件(边界处平衡和协调条件)	6
1-1-4	线弹性体的物理方程(本构关系)	7
1-1-5	物理量的矩阵表示	9
1-1-6	弹性力学基本方程的矩阵表示	10
* § 1-2	外力总虚功的计算	10
1-2-1	内部微元体上的外力总虚功	10
1-2-2	边界微元体上的外力总虚功	12
1-2-3	虚位移时变形体的外力虚功	13
§ 1-3	变形体虚位移原理的表述和证明	13
1-3-1	变形体虚功原理有关内容的回顾	13
1-3-2	变形体虚位移原理的表述	13
* 1-3-3	变形体虚位移原理必要性的证明	14
* 1-3-4	变形体虚位移原理充分性的证明	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	19
1-5-1	由势能原理导出位移法方程	19
1-5-2	能量法应用举例	20
§ 1-6	里兹法	23
1-6-1	用虚位移原理求解	24
1-6-2	用势能原理求解	25

* § 1-7 结论与讨论	27
1-7-1 结论	27
1-7-2 讨论	27
思考题	28
习 题	28
第 2 章 杆系结构单元分析	30
§ 2-1 引言	30
2-1-1 杆系结构虚位移原理虚功方程	30
2-1-2 杆系结构总势能表达式	32
2-1-3 几点说明	33
§ 2-2 平面杆系结构单元分析	34
2-2-1 拉(压)杆单元	34
2-2-2 扭转杆单元	37
2-2-3 只计弯曲的杆单元	39
2-2-4 考虑轴向变形的弯曲单元——平面自由式单元	42
2-2-5 有约束的单元	44
2-2-6 考虑剪切时的自由式单元	45
2-2-7 有刚域单元	48
* § 2-3 空间杆系结构单元分析	50
2-3-1 交叉梁单元	51
2-3-2 空间桁架单元	52
2-3-3 空间刚架单元	53
* § 2-4 杆系结构单元刚度矩阵子程序	54
2-4-1 一些公共的自定义部分	55
2-4-2 单元刚度矩阵子程序(局部坐标系)源程序	55
§ 2-5 结论与讨论	58
2-5-1 一些结论	58
2-5-2 几点讨论	59
思考题	60
习 题	61
第 3 章 杆系结构的整体分析	64
§ 3-1 结构整体刚度方程	64
3-1-1 用势能原理进行结构整体分析	65
* 3-1-2 直接刚度法集装规则的推证	67
§ 3-2 整体分析的物理实质	69
§ 3-3 边界条件处理的补充	70

	3-3-1 对单元进行处理,用先处理法集成整体刚度方程	71
	3-3-2 对整体刚度矩阵进行处理	72
§3-4	杆系结构静力分析程序简要说明	74
§3-5	结论和讨论	75
	3-5-1 一些结论	75
	3-5-2 几点讨论	75
	思考题	76
	习题	76
第4章	分支点稳定及极限荷载有限元分析简介	78
§4-1	平面刚架分支点稳定有限元分析	78
	4-1-1 压杆单元的刚度方程	78
	4-1-2 刚架分支点稳定计算	81
	4-1-3 一种特征值问题解法——幂法	81
	4-1-4 刚架分支点稳定算例	82
§4-2	刚架极限荷载有限单元分析	83
	4-2-1 增量变刚度法	84
	4-2-2 单元刚度矩阵的修正	84
	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	86
§4-3	结论与讨论	92
	思考题	92
	习题	92
第5章	平面问题有限元分析	94
§5-1	引言	94
	5-1-1 结构离散化	94
	5-1-2 平面问题的总势能表达式	95
§5-2	常应变三角形单元	95
	5-2-1 单元结点位移和结点力	96
	5-2-2 用面积坐标建立单元位移场	96
	5-2-3 基于势能原理的单元分析	100
	5-2-4 几点结论	103
	5-2-5 计算实例	104
	5-2-6 收敛准则	105
§5-3	矩形双线性单元	105
	5-3-1 用正则坐标建立单元位移场	106
	5-3-2 应变和应力矩阵	108
	5-3-3 单元刚度矩阵和单元等效荷载列阵	108

5-3-4	计算结果整理	109
5-3-5	计算实例	110
§5-4	平面问题计算程序 PSTE 的简要说明	111
§5-5	平面等参数单元	114
5-5-1	基本概念	114
5-5-2	几种常用单元描述和位移模式	118
5-5-3	等参元单元特性分析	122
5-5-4	数值积分	126
5-5-5	作等参元分析时的注意事项	129
5-5-6	计算实例	130
5-5-7	二维和三维弹性分析计算程序简要说明	130
* §5-6	Wilson 非协调元	131
5-6-1	双线性单元计算纯弯曲问题的误差	131
5-6-2	Wilson 非协调元	131
5-6-3	Wilson 非协调元的收敛性	133
§5-7	结论与讨论	133
5-7-1	几点结论	133
5-7-2	几点讨论	134
思考题	134
习题	135

结构动力分析篇

第 6 章	概 述	138
§6-1	动荷载及其分类	138
6-1-1	动荷载的定义	138
6-1-2	动荷载的分类	138
§6-2	结构动力学的任务和研究内容	140
6-2-1	结构动力学与结构静力学的对比	140
6-2-2	结构动力学的任务	141
6-2-3	结构动力学的研究内容	141
§6-3	结构动力分析中体系的自由度	142
6-3-1	动力分析中体系的自由度	142
6-3-2	体系自由度的简化	142
6-3-3	体系自由度的确定	144
§6-4	结构的动力特性	144
6-4-1	结构的自振频率	145
6-4-2	结构的振型	145

	6-4-3 结构的阻尼	146
§ 6-5	建立结构体系运动方程的一般方法	146
§ 6-6	体系运动方程建立举例	147
	6-6-1 单自由度体系运动方程举例	148
	6-6-2 两个自由度体系运动方程举例	153
§ 6-7	多自由度体系运动方程的一般形式	160
	6-7-1 运动方程一般形式	160
	6-7-2 用刚度法和柔度法建立体系运动方程的具体步骤	161
	6-7-3 多自由度体系运动方程举例	162
§ 6-8	结论与讨论	164
	6-8-1 结论	164
	6-8-2 几点讨论	165
	思考题	166
	习 题	166
第 7 章	单自由度体系的振动分析	170
§ 7-1	单自由度体系自由振动分析的回顾和扩展	170
	7-1-1 自由振动分析主要内容的回顾	170
	7-1-2 确定体系阻尼比的一种方法	172
§ 7-2	单自由度体系的受迫振动	173
	7-2-1 单自由度体系受迫振动的一般解	173
	7-2-2 几种常见荷载作用下的动力响应分析	175
· § 7-3	单自由度非线性体系的响应分析	184
	7-3-1 非线性运动的增量方程	184
	7-3-2 线加速度法解非线性问题	185
	7-3-3 程序计算结果举例	187
§ 7-4	结论与讨论	188
	7-4-1 结论	188
	7-4-2 讨论	189
	思考题	190
	习 题	191
第 8 章	多自由度体系的振动分析	193
§ 8-1	无阻尼多自由度体系的自由振动	193
	8-1-1 两自由度体系运动方程的特解和通解	194
	8-1-2 两自由度体系的频率和振型	195
	8-1-3 两自由度体系频率和振型计算举例	197
	8-1-4 多自由度体系的振型和频率	199

	8-1-5 多自由度体系自由振动的通解	203
§ 8-2	多自由度体系振型的正交性	204
	8-2-1 正交的概念	204
	8-2-2 振型向量的正交性	204
	8-2-3 关于振型正交性的物理解释	205
	8-2-4 振型正交性的利用	205
	8-2-5 多自由度体系振型正交性应用举例	207
§ 8-3	多自由度体系的受迫振动	209
	8-3-1 简谐荷载作用下的无阻尼受迫振动分析	209
	8-3-2 无阻尼体系在任意荷载作用下的受迫振动分析	211
	8-3-3 无阻尼结构的动内力计算	214
	8-3-4 有阻尼受迫振动分析	216
	8-3-5 有关阻尼矩阵的补充说明	217
* § 8-4	杆系结构有限元动力分析	218
	8-4-1 基本原理	218
	8-4-2 杆件单元的单元运动方程及结构运动方程的建立	219
* § 8-5	多自由度体系的逐步积分方法	223
	8-5-1 线加速度法	223
	8-5-2 Wilson- θ 法	224
	8-5-3 Newmark- β 法	226
§ 8-6	结论与讨论	227
	8-6-1 结论	227
	8-6-2 讨论	228
思考题	229
习 题	230
第 9 章	频率和振型的实用计算方法	233
§ 9-1	能量法	233
	9-1-1 单自由度体系	233
	9-1-2 多自由度体系	234
	* 9-1-3 无限自由度体系	237
	9-1-4 瑞利比	239
§ 9-2	迭代法求频率和振型	240
	9-2-1 计算第一振型和频率	240
	9-2-2 迭代法求高阶振型和频率	242
	9-2-3 迭代法算例	243
* § 9-3	瑞利-里兹法	245
	9-3-1 瑞利比的特性	245

9-3-2	瑞利-里兹法的内容	245
9-3-3	瑞利-里兹法的步骤	247
* § 9-4	子空间迭代法	247
9-4-1	子空间迭代法基本思路	248
9-4-2	多自由度体系瑞利-里兹法的矩阵表达式	248
9-4-3	子空间迭代法的内容	250
9-4-4	子空间迭代法算例	252
§ 9-5	几点结论	254
思考题		255
习 题		255
第 10 章	结构的地震响应分析及振动控制概述	257
§ 10-1	地震作用与地震作用理论概述	257
10-1-1	地震作用	257
10-1-2	地震作用理论	258
§ 10-2	单自由度体系的地震作用分析	259
10-2-1	地震作用下结构的运动方程	259
10-2-2	地震作用反应谱理论的基本假定	260
10-2-3	地震作用分析	261
§ 10-3	地震反应谱	262
10-3-1	相对位移、相对速度和绝对加速度反应谱	263
10-3-2	三种反应谱间的关系	265
10-3-3	地震反应谱的标准化	265
10-3-4	抗震设计反应谱	268
§ 10-4	多自由度线性体系地震响应分析	269
10-4-1	振型分解法解多自由度体系地震响应	269
10-4-2	线性多自由度体系的地震作用——振型分解反应谱法	270
10-4-3	关于振型组合问题	271
§ 10-5	结构对策的发展和结构振动控制的概念	273
10-5-1	结构对策的发展	274
10-5-2	结构振动控制的概念	275
§ 10-6	结构被动控制概述	275
10-6-1	基底隔震	276
10-6-2	耗能装置	277
10-6-3	利用吸振原理设计的减震装置	280
§ 10-7	结构主动控制概述	282
10-7-1	主动控制系统的构成和分类	282

10-7-2 AMD 受控系统运动方程与状态方程	283
10-7-3 主动控制常用控制算法简要说明	284
10-7-4 主动控制试验	285
§ 10-8 几点结论	286
思考题	287
索 引	288
作者简介	294

结构计算机分析篇

自 20 世纪 50 年代初 Ray W. Clough 等人将矩阵位移法的思想扩展到平面连续体问题,并且命名为**有限单元法**(the finite element method)以来这一方法发展异常迅速,现已成为结构力学的一个新的分支——**计算结构力学**(compute structural mechanics),同时也促使计算机和计算技术得到了飞速发展。目前国内外大型工程辅助设计软件的核心计算部分,都是有限单元法(简称为有限元)的分析程序。

有限单元法既可用于解各种杆系结构的受力和变形,也可用于求解平面问题、空间三维问题、薄板和薄壳等问题;既可用于解决静力荷载作用下的计算问题,也可用来解决动荷载下的响应分析问题;既能用于求解线性问题,还可用来求解非线性问题。本篇作为有限单元法的基础,将仅仅介绍线弹性静力问题、以位移作基本未知量的最基本的一些知识,包括:作为有限元理论基础的能量原理,杆系结构、平面问题有限元分析基础,有限元法在杆系结构稳定和极限荷载分析中的应用等。

有限元的分析步骤和矩阵位移法基本相同,也分为:

(1) 对所分析的物体进行**离散化**,使连续体变成仅在一些选定点[称为**结点**(node)]处相连的单元集合,同时为进一步分析做好数据准备(也即数据化)。

(2) 合理地假设各单元的**位移场**(displacement field),亦即选择合适的函数将单元内任一点的位移用结点位移表示。

(3) 用势能原理(或虚位移原理)对单元进行分析,建立单元的结点力-结点位移关系,像矩阵位移法一样,这也称为**单元刚度方程**(element stiffness equation)。

(4) 在**单元分析**(the element analysis)基础上,以满足位移协调为前提,对单元集合体进行**整体分析**(the integral analysis),建立以位移为基本未知量的线性代数方程组,也即结构的整体刚度方程——实质仍为结点平衡方程。

(5) 利用解线性代数方程组的数学方法,求解方程组得到全部结点位移。

(6) 利用已求得的位移,进一步求内力、应力,或结合具体规范和工程结构设计知识进行**结构设计**(structural design)。

不难看出,除单元分析[(2)、(3)两步]外,其他步骤和矩阵位移法完全一

样。本篇在第2、3章里,将按有限元的原理和方法对杆系结构有限元分析作全面介绍,以便通过和矩阵位移法的对照,加深对有限元的理解。而对弹性力学平面问题,将仅介绍和杆系结构不同的有关内容。在此基础上,有兴趣的读者,可以自行研究三维块体单元,以使用以解决三维物体的受力、变形分析。

为配合有限元原理的教学,随本书发行的光盘中有根据基本原理编制的应用程序,其计算结果(除空间问题外的变形和应力等)能以图形形式给出直观表示。有的还给出了 Fortran 90 语言的源程序,所有的可执行程序,除供教学应用外,均可用于实际工程问题的计算。有兴趣的读者,在掌握程序应用的基础上,最好结合一些工程实际问题,做多种参数变动下的计算,再从分析计算结果中总结各种参数变化对结构受力、变形等的影响规律。这些定性的结论,要花一定的精力才能得到,但从它对今后工作所起的作用考虑,应该是非常值得的。