



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

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

结 构 力 学 II

——专题教程

第 4 版

龙驭球 包世华 袁 驷 主编

高等教育出版社

“十五”普通高等教育本科国家级规划教材



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

结构力学 II

J I E G O U L I X U E

——专题教程

Z H U A N T I J I A O C H E N G

第 4 版

龙驭球 包世华 袁 驷 主编



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是在第1版(面向21世纪课程教材,2002年全国普通高等学校优秀教材一等奖)、第2版(普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2007年度普通高等教育精品教材)和第3版(“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材)的基础上修订而成的;以本教材为基础的教学实践获2001年国家级教学成果一等奖,清华大学“结构力学”课程被评为2003年度国家精品课程。

本次修订字斟句酌,力求准确,反映学科新发展。修订内容共18章,仍编为《结构力学Ⅰ——基础教程》和《结构力学Ⅱ——专题教程》。基础教程着眼于为课程打好基础,落实课程的基本要求;专题教程着眼于扩大和提高,各校可根据实际情况选择其中不同层次的增选和专题内容,不拘一格地提升教学水平。全书采用四色印刷。

本书为《结构力学Ⅱ——专题教程》(第4版),共8章,主要包括矩阵位移法、结构动力计算基础、能量原理、结构矩阵分析续论、结构动力计算续论、结构的稳定计算、结构的极限荷载、结构力学与方法论等。

本书配有Abook数字课程网站,内容包括结构力学求解器,电子教案,教材中打“*”号的章节内容等。另外,与本书配套的还有《结构力学学习指导》、《结构力学网络课程》。配套的数字化教学资源充分发挥多媒体先进的表现手段,营造一种良好的学习环境,既可作为工科学生在网络环境下自主、完整、系统地学习结构力学的课程,也可作为从事土建、水利等领域工程技术人员知识更新的自学环境。

本书可作为高等学校土建、水利、力学等专业结构力学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学. Ⅱ, 专题教程 / 龙驭球, 包世华, 袁驷主编. --4版. --北京: 高等教育出版社, 2018.8
ISBN 978-7-04-049924-7

I. ①结… II. ①龙… ②包… ③袁… III. ①结构力学-高等学校-教材 IV. ①O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 123734 号

策划编辑	水 渊	责任编辑	葛 心	封面设计	张雨微	版式设计	马敬茹
插图绘制	于 博	责任校对	张 薇	责任印制	刘思涵		

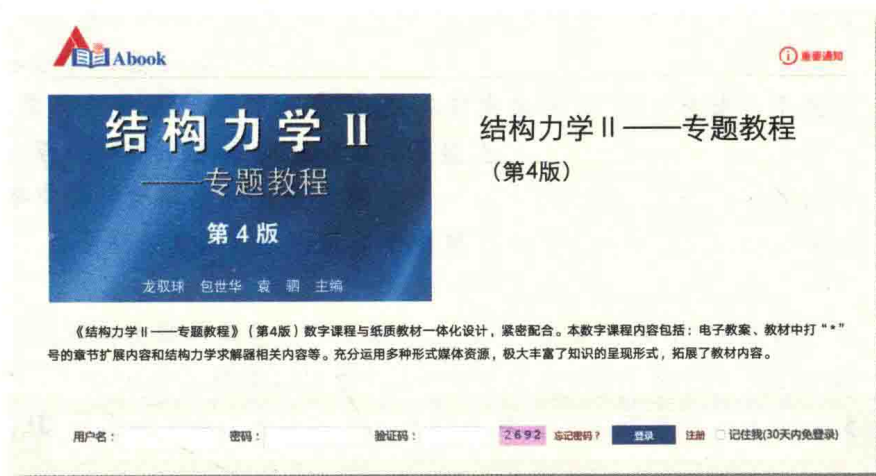
出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	山东鸿君杰文化发展有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	17	版 次	2001 年 1 月第 1 版
字 数	400 千字		2018 年 8 月第 4 版
购书热线	010-58581118	印 次	2018 年 8 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	55.00 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 49924-00

结构力学 II ——专题教程

第 4 版

- 1 计算机访问 <http://abook.hep.com.cn/1220188>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号 (20 位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至 abook@hep.com.cn。



扫描二维码
下载 Abook 应用

<http://abook.hep.com.cn/1220188>

第 4 版 序

本书第 3 版是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本版属第 4 版,是根据“结构力学课程教学基本要求(A类)”(教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会制订,见本书后附录 C),在第 3 版基础上修订而成。修订时有以下一些考虑:

1. “基本要求”中将课程内容分为两类:基础部分和专题部分。此次修订按照这个分类法,对全书的章次进行了调整。将原在卷 I 的矩阵位移法、结构动力计算基础纳入卷 II,将原在卷 II 的静定结构总论、超静定结构总论纳入卷 I。

2. 将纸质教材与电子教材综合考虑,线上线下相互配合,各自发挥所长,以便构建一个彼此呼应、立体交叉的教材模式。这是一个新的尝试,有待以后完善提高。

3. 在纸质教材方面,对力学中的传统解法和功能解法作了一些比较和呼应,对力学方法论和对偶互伴现象作了一些阐述。由于有些较深内容由纸质教材转移到电子教材,因此纸质教材的篇幅较第 3 版有所减少。

4. 在电子教材方面,除上面提到的由纸质版移入电子版的内容外,重要的章节有《结构力学求解器》的内容。卷 I 附录 A 为《结构力学求解器》2D 版和 3D 版使用说明,可登录本书配套的 Abook 数字课程网站下载软件,3D 版是此次修订新增的。卷 II 附录 B 为平面刚架程序的框图设计和源程序。

全书中凡收入电子版的内容均在前面加了“*”号。

作为立体交叉新形态教材的一部分,本书配套了电子课件。课件由邢泌妍等同志进行编制。

此次修订工作得到了清华大学结构力学教研室多位老师的帮助,叶康生教授还提供了书面意见,在此表示感谢。

以书会友,恳请批评指正。

作 者

2018 年春于清华园

第 3 版 序

本书第 1 版是面向 21 世纪课程教材。本版属第 3 版,是根据“结构力学课程教学基本要求”(教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会制订),在第 2 版(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)的基础上修订而成。值得一提的是以下几点(两老三新):

1. “卷 I 保底,卷 II 开花”,沿用第 2 版**老**格局。
2. 字斟句酌,力求准确,保持过去**老**作风。
3. 增写新章(第 14 章),反映学科**新**发展。
4. 《结构力学求解器》升级,增加包络图**新**内容。
5. 采用四色印刷,让新书换上**新**衣裳。

书稿得到东南大学单建教授的审阅和指点,谨致谢意,并无端想起东坡诗句:人间有味是清欢。

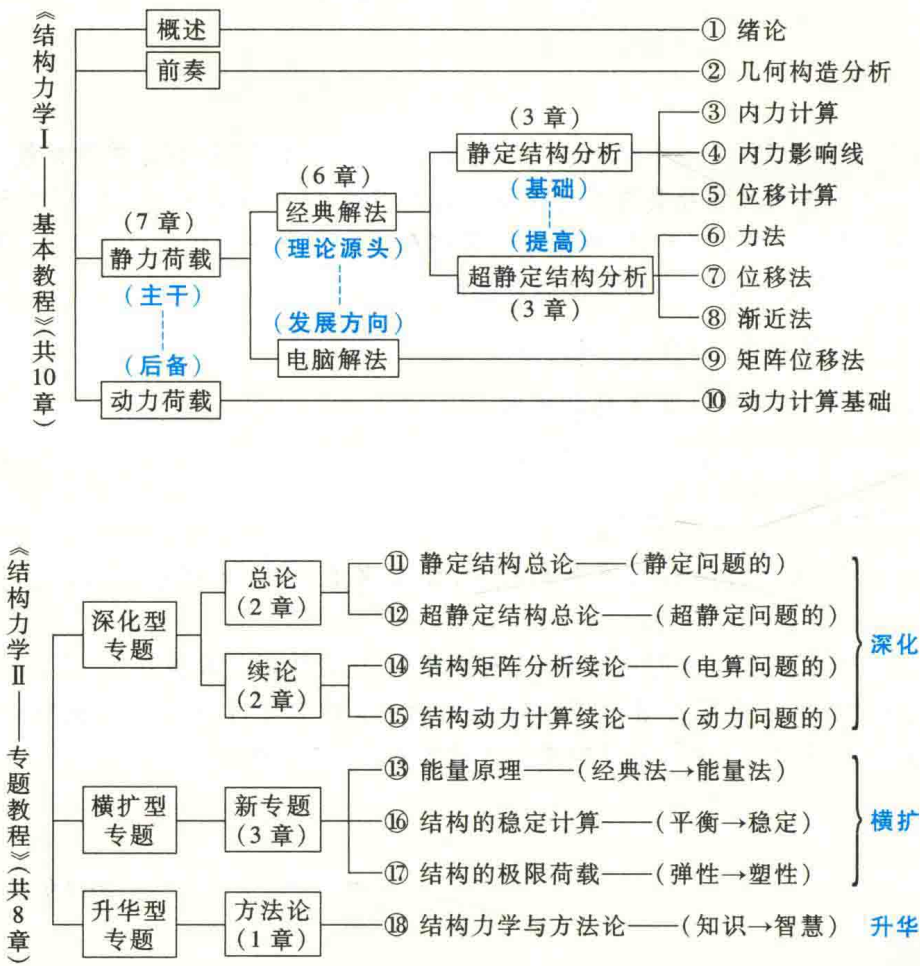
以书会友,倾听老师和同学们的批评、议论和争鸣,这是作者的真情。

阅读也是悦读,学习更需游赏。下面绘出两帧《结构力学 I——基本教程》、《结构力学 II——专题教程》游赏图,与读者一同游赏。边游边赏,边赏边游。

作 者

2012 年春于清华园

《结构力学 I —— 基本教程》、《结构力学 II —— 专题教程》游赏图



第 2 版 序

本书第 2 版是第 1 版的传承和发展。具有以下特点:

一、传承原有编写风格

继续保持“打好基础,脉络清晰,理论联系实际,符合认识规律”的编写方针。继续发扬纸质教材与电子教材的互补作用,以《结构力学求解器》为工具,提高学生利用计算机分析结构的能力。继续加强能量原理与方法论等方面的教学内容,提高学生的理论水平和科学素质。

二、采用新的编排方针

第 2 版采用新的编排方针:首先把全书内容明确地分为基本内容与增选、专题内容两部分,然后将基本内容编成结构力学 I——基本教程;将增选、专题内容编成结构力学 II——专题教程。

在第 2 版里,卷 I 与卷 II 的分工是非常明确的。卷 I 只包括课程教学的基本要求。对全国各校来说,课程教学的基本要求应当是统一的,是“死”的。其目的是保证课程的基本教学质量,或者说是“保底”。卷 II 包含一些各具特色的增选、专题内容,在“保底”的基础上,各校可根据各自情况自行选用。对全国高校来说,这些增选、专题内容应当是不拘一格的,是“活”的。这种在“保底”基础上不拘一格地增选和提升,可以比喻为“开花”。概括地说,“卷 I 保底,卷 II 开花”,这就是新版采用的新的编排方针。

要“开花”,必先“保底”。“保底”是硬任务,“开花”是活功夫。一硬一活,才会形成既有扎实功底而又充满活力的学习景象。我们希望,体现“保底—开花”精神的第 2 版教材将会更好地适应我国技术基础课程教学发展的需求,适应不同高校对教材类型的多样性需求。

继第 1 版之后,第 2 版书稿又得到西安建筑科技大学刘铮教授的审阅和指点,谨致谢意。

欣逢青藏铁路全线通车,特以拉萨河特大铁路桥的倩影作为封面,以誌喜庆。

本书封面照片由拉萨指挥部宣传部干章林先生提供,在此表示感谢。

恳请批评和指正。

作 者

2006 年夏于清华园

第 1 版序

教材建设是一项需要长期积累而又不断翻新的工作,既要锲而不舍、精益求精,又要善于探索、有所创新。本书是在清华大学四十多年结构力学教材建设和近几年教学改革实践的基础上编写的,主要想在以下几个方面作些新的尝试和安排:

一、由一本书扩充为三书鼎立。由于结构力学计算机化的进程日新月异,以及在计算机化的形势下结构定性分析的能力培养日益显得更为重要,因此除编写一本《结构力学教程》侧重于经典结构力学的基本理论和基本方法外,还拟编写两本配套教材,即《程序结构力学》及《定性结构力学》,分别侧重于计算机方法和定性分析方法。三书鼎立,相互呼应,以期适应新世纪、新形势的新要求。

二、为计算机化提供新的基础知识和新工具。在为矩阵位移法配置的计算机程序方面,有 FORTRAN 77 程序, Fortran 90 程序。此外,还引入作者教学和科研成果《结构力学求解器》作为新工具,提高解算大型结构、复杂结构的例题、习题的能力,开拓教学内容的广度和深度,利用动画显示,提高对结构性能的感性认识。

三、将虚功-能量方法贯通全书,提高理论水平。以前的结构力学教材也讲一点虚功-能量方法,但讲得太晚,太集中,学与用离得太远。针对这种情况,本书改为“提前讲、分段讲、就近用”的作法,以便收到“由浅入深、分散难点、学了就用、便于生根”的效果,从而进一步提高理论水平。计算机化不仅不排斥力学理论,而且更加需要力学理论的指导,呼唤力学理论的深化。

四、注意培养思维能力和科学素质。为了把力学方法上升到方法论的高度,在书中专门写了四节:

- 方法论(1)——学习方法(第 1 章)。
- 方法论(2)——静定结构部分(第 6 章)。
- 方法论(3)——超静定结构部分(第 12 章)。
- 方法论(4)——结构力学之道(最后一章)。

为了指导学习和启发思考,专门写了两章“总论”,分别对静定结构和超静定结构两大部分内容进行融会贯通的梳理和开阔视野的指点;几乎每一章都专门写了“小结”和“思考与讨论”两节,引导读者跨进更广的思考空间。

五、适当更新内容。除了删去和压缩比较陈旧的内容外,还注意扩大专业覆盖面,新加悬索、空间结构等内容,适当介绍一些科研成果,包括作者新近的部分学术成果。

总的来说,“守本翻新”是本书的编写方针。守本,是指继续保持“打好基础,脉络清晰,理论联系实际,符合认识规律”的编写风格。翻新,是指进行一些经过初步实践的新尝试,包括上面提到的五点。

本书内容各校可根据具体教学要求选用,带 * 号者为选学、提高内容。

本书稿请西安建筑科技大学刘铮教授和东南大学单建教授审阅,在审阅中提了不少宝贵意见。清华大学雷钟和教授提供了本书部分思考题及习题,张玉良副教授提供了 FORTRAN 77 程序的初稿。作者谨向他们表示衷心的感谢。

欢迎批评,恳请指正。

作 者

1999 年冬于清华园

主要符号表说明

在实施国家标准《量和单位》(GB 3100~3102—93)的过程中,为保证国家标准和现有惯例的衔接,本书作如下说明,请读者注意。

1. 国家标准规范的物理量、名称和符号,按国家标准使用,注重量的物理属性。如,以前称剪应力 τ 、剪应变(剪切角) γ ,现改称切应力 τ 、切应变 γ ;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)、 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. 在结构力学中经常应用“单位量”的概念,如单位力 $X=1$,单位荷载 $F_p=1$,单位位移 $\Delta=1$ 等。现以单位力 $X=1$ 为例加以说明。单位力 $X=1$ 是一种简称,详细地说,是指数值为1而其量纲指数都为零(量纲并不为零,量纲为一)的特定广义力 $\bar{X}=1$ (这里, $\bar{X}$ 与 X 在数值上相等,但量纲不同。 $\bar{X}$ 是一个量纲一的量,以前称为无量纲量)。单位量的概念主要用于求比例系数(或称影响系数)。仍以力 X 引起某量 M 的情况为例,二者的比例系数为 $\bar{M}=\frac{M}{X}$ 。在线性问题中,比例系数是一个重要的概念。

4. 本教材中某些符号及有关公式运算中的单位表示,考虑以往教材的习惯和结合工程实际运算的方便,作了必要的处理。具体情况在本教材的相应处已有说明。

主要符号表

a	振幅
A	面积
c	支座广义位移、粘滞阻尼系数
c_{cr}	临界阻尼系数
C	弯矩传递系数
d	结间距离
E	弹性模量
E_C	余能
E_P	势能
f	拱高、矢高、工程频率
F_c	阻尼力
F_e	弹性力
F_H	水平推力、水平反力、水平约束力
F_I	惯性力
F_N	轴力
$F_{Nx}、F_{Ny}$	轴力在水平(x)、竖向(y)的分力
F_P	集中荷载
$\mathbf{F}_P$	荷载向量
F_P^+	可破坏荷载
F_P^-	可接受荷载
F_{Pcr}	临界荷载
F_{Pe}	欧拉临界荷载
F_{Pu}	极限荷载
F_Q	剪力
F_Q^F	固端剪力
$F_Q^L、F_Q^R$	截面左、右的剪力
F_R	广义反力、反力合力、约束力
F_V	竖向反力、竖向约束力
$F_x、F_y$	水平(x)、竖向(y)的分力
$\mathbf{F}^e$	整体坐标系下单元杆端力向量
$\overline{\mathbf{F}}^e$	局部坐标系下单元杆端力向量

F^{Fe}	整体坐标系下单元固端力向量
$\bar{F}^{Fe}$	局部坐标系下单元固端力向量
G	切变模量
i	线刚度
I	惯性矩
I	单位矩阵
k	刚度系数、切应力分布不均匀系数
k^e	整体坐标系下单元刚度矩阵
$\bar{k}^e$	局部坐标系下单元刚度矩阵
K	结构刚度矩阵
m	质量、分布弯矩
$\bar{m}$	线分布质量
M	力矩、力偶矩、弯矩
M	质量矩阵
M_e	弹性极限弯矩
M_u	极限弯矩
M^F	固端弯矩
N	形函数矩阵
p	均布荷载集度
P	广义荷载、广义力
P	结构结点荷载向量
P^e	单元结点荷载向量
q	均布荷载集度
r	半径、反力影响系数
R	半径
S	转动刚度
t	时间
T	周期、动能
T	坐标转换矩阵
u	水平位移
v	竖向位移、挠度、速度
v_c	应变余能密度
v_ε	应变能密度
V_c	应变余能
V_p	荷载势能
V_ε	应变能
W	功、计算自由度、弯曲截面系数
X	广义未知力、广义多余未知力

y	位移
$\dot{y} = \frac{dy}{dt}$	速度
$\ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2}$	加速度
Y	位移幅值向量、主振型向量、主振型矩阵
Z	影响线量值
α	线膨胀系数、初相角
β	动力系数
γ_0	平均切应变
δ	柔度系数、位移影响系数
Δ	广义未知位移
Δ	位移向量
Δ^e	单元杆端位移向量
ε	线应变
θ	截面的转角、干扰力频率
κ	曲率
μ	力矩分配系数
φ	弦转角
ξ	阻尼比
σ_b	强度极限
σ_s	屈服应力
σ_u	极限应力
ω	圆频率

目 录

第 11 章 矩阵位移法——结构

矩阵分析基础 1

§ 11-1 概述	1
§ 11-2 结构体系的数值化	2
§ 11-3 单元分析	6
§ 11-4 连续梁的整体刚度矩阵	9
§ 11-5 刚架的整体刚度矩阵	16
§ 11-6 等效结点荷载向量	21
§ 11-7 矩阵位移法的计算步骤	25
§ 11-8 桁架及组合结构的矩阵 位移法	30
§ 11-9 小结	40
§ 11-10 思考与讨论	41
习题	41

第 12 章 结构动力计算基础 44

§ 12-1 结构动力计算的特点和动力 自由度	44
§ 12-2 单自由度体系的自由振动	47
§ 12-3 单自由度体系的强迫振动	51
§ 12-4 阻尼对振动的影响	58
§ 12-5 双自由度体系的自由振动	65
§ 12-6 双自由度体系在简谐 荷载下的强迫振动	73
§ 12-7 小结	79
§ 12-8 思考与讨论	79
习题	82

第 13 章 能量原理 87

§ 13-1 可能内力与可能位移	87
§ 13-2 应变能与应变余能	93
§ 13-3 势能驻值原理	99
§ 13-4 势能法与位移法之间的对偶	

关系 101

§ 13-5 由势能原理推导矩阵位移法 基本方程	107
§ 13-6 余能驻值原理	112
§ 13-7 余能法与力法之间的对偶 关系	115
§ 13-8 分区混合能量驻值原理	120
* § 13-9 卡氏第一与第二定理和 克罗蒂-恩格塞定理	124
* § 13-10 势能和余能偏导数定理—— 卡氏定理的推广	124
* § 13-11 分区混合能量偏导数定理 ...	124
§ 13-12 结构力学中的对偶关系	124
§ 13-13 思考与讨论	128
习题	129

* 第 14 章 结构矩阵分析续论 132

* § 14-1 概述	132
* § 14-2 单元平衡矩阵及其两种方案 (局部坐标系)	132
* § 14-3 单元几何矩阵及其两种方案 (局部坐标系)	132
* § 14-4 “平衡-几何”互伴定理	133
* § 14-5 整体坐标系中的单元平衡 矩阵与单元几何矩阵	133
* § 14-6 整体平衡矩阵与整体几何 矩阵	133
* § 14-7 本构矩阵	133
* § 14-8 刚度矩阵的新算式	133
* § 14-9 矩阵内力法及其两种应用 方案	133
* § 14-10 超静定结构的矩阵冗力法 ...	133
* § 14-11 思考与讨论	133
* 习题	133

第15章 结构动力计算续论 134

- § 15-1 多自由度体系的自由振动 134
- § 15-2 多自由度体系主振型的
正交性和主振型矩阵 141
- § 15-3 多自由度体系的强迫振动 146
- § 15-4 无限自由度体系的自由振动 ... 151
- * § 15-5 无限自由度体系自由振动的
常微分方程求解器解法 153
- § 15-6 近似法求自振频率 154
- * § 15-7 有限元法求刚架的自振频率 ... 160
- * § 15-8 用求解器求解自振频率与
振型 161
- § 15-9 小结 161
- § 15-10 思考与讨论 161
- 习题 166

第16章 结构的稳定计算 169

- § 16-1 两类稳定问题概述 169
- § 16-2 两类稳定问题计算简例 172
- § 16-3 有限自由度体系的稳定——
静力法和能量法 175
- § 16-4 无限自由度体系的稳定——
静力法 181
- § 16-5 无限自由度体系的稳定——
能量法 185
- * § 16-6 无限自由度体系稳定的
常微分方程求解器法 191
- * § 16-7 刚架的稳定——有限元法 191
- * § 16-8 组合杆的稳定 191
- * § 16-9 拱的稳定 192
- * § 16-10 考虑纵向力对横向荷载
影响的二阶分析 192
- * § 16-11 用求解器求临界荷载和
失稳形态 193

- § 16-12 小结 193
- § 16-13 思考与讨论 194
- 习题 197

第17章 结构的极限荷载 201

- § 17-1 概述 201
- § 17-2 极限弯矩、塑性铰和极限状态 ... 202
- § 17-3 超静定梁的极限荷载 204
- § 17-4 比例加载时判定极限荷载的
一般定理 208
- * § 17-5 刚架的极限荷载——增量变
刚度法 211
- * § 17-6 用求解器求极限荷载 211
- § 17-7 小结 211
- § 17-8 思考与讨论 211
- 习题 212

第18章 结构力学与方法论 215

- § 18-1 静定结构算法中蕴含的
方法论 215
- § 18-2 超静定结构算法中蕴含的
方法论 217
- § 18-3 力学方法论的常用三法 220
- § 18-4 分合法 221
- § 18-5 对比法 224
- § 18-6 过渡法 227
- § 18-7 结构力学之道 228

附录 A 习题答案 230

* 附录 B 平面刚架程序的框图设计 和源程序 238

索引 239

参考文献 243

Synopsis 244

Contents 245

第11章

矩阵位移法——结构矩阵分析基础

§ 11-1 概 述

计算机出现之前,计算手段以手算为主。随着计算机的出现,以及计算机方法在结构分析中的快速发展和广泛应用,结构矩阵分析方法应运而生。它是以传统的结构力学作为理论基础,以矩阵作为数学表述形式,以计算机作为计算手段,三位一体的方法。

与传统的力法、位移法相对应,结构矩阵分析方法也有矩阵力法和矩阵位移法,或者称柔度法和刚度法。矩阵位移法由于解答完备、易于编程、通用性强等优点获得广泛应用,本章只讨论矩阵位移法。

矩阵位移法的本质是位移法,是采用矩阵运算、计算机求解的位移法。学习矩阵位移法要注意其中的“变”与“不变”:位移法的基本原理不变,变的是计算手段——由“手算”变为“机算”。手算怕繁,机算怕乱。位移法中不少技巧性的简化处理,在矩阵位移法中不再必要,需要的是标准的步骤、统一的过程。表 11-1 对两种方法的不同给出了一些比较。

表 11-1 传统位移法和矩阵位移法的比较

传统位移法	矩阵位移法
面向“手算”	面向“机算”
尽量减少未知量,简化计算	尽量统一解法,便于编程
求解问题的规模小	求解问题的规模大
忽略轴向变形(偏离实际)	考虑轴向变形(符合实际)
支座结点位移不取为未知量	所有结点位移均取为未知量
杆件单元多样化:	杆件单元标准化:
固端 — 固端	固端 — 固端
固端 — 铰支	
固端 — 滑动	
固端 — 自由	

矩阵位移法是有限元法的雏形,也有文献不加区分地将其称为杆件结构的有限元法。这里要特别提示的是,矩阵位移法和常规的有限元法并不完全等价^①。但是,由于二者的绝大部分原

① 矩阵位移法采用的是精确单元,可以得到精确的结点位移;而最为突出的特点是在计算杆端内力时,须叠加固端力项,但常规有限元法则没有这项技术。见袁驷的文章《从矩阵位移法看有限元应力精度的损失与恢复》,力学与实践,1998,20(4):1-6。