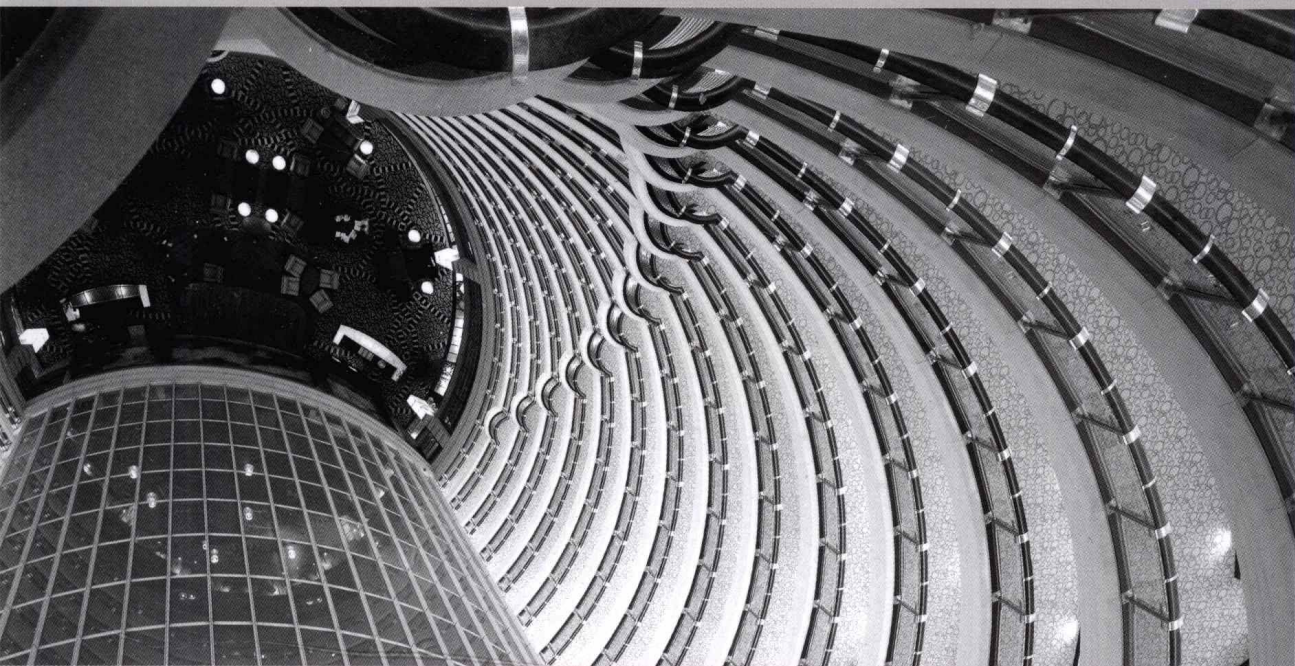




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



Programming Structural Mechanics

程序结构力学

第2版

袁 驷 编著



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

程序结构力学

(第2版)

袁 驷 编著



高等教育出版社
Higher Education Press

图书在版编目(CIP)数据

程序结构力学 / 袁驷编著. —2 版. —北京:高等教育出版社,2008.6

ISBN 978 - 7 - 04 - 023926 - 3

I. 程… II. 袁… 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(2008)第 071179 号

策划编辑 杨 倩 责任编辑 张玉海 封面设计 赵 阳 责任绘图 朱 静
版式设计 张 岚 责任校对 金 辉 责任印制 宋克学

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
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	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京地质印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
		版 次	2001 年 3 月第 1 版
开 本	787 × 960 1/16		2008 年 6 月第 2 版
印 张	21.25	印 次	2008 年 6 月第 1 次印刷
字 数	370 000	定 价	39.80 元 (含光盘)

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 23926 - 00

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,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”和“高等教育百门精品课程教材建设计划”的研究成果,是在第 1 版的基础上修订而成的。

本书内容覆盖了经典结构力学中的所有问题:几何组成、静定结构、超静定结构、影响线、包络图、自由振动、弹性稳定,以及极限荷载等。而且,全部为精确单元模型和精确算法,是一套完整的结构力学的新体系。

本版的修订目标有三。一是使其更加便于教学:不再要求读者熟悉 Fortran 77 语言,将 Fortran 90 作为自包容的内容;二是使其体系更加完整:以作者的最新研究成果为基础,增加了移动荷载下结构的内力包络图分析一章;三是更加面向工程应用:增加了考虑剪切变形的杆件单元、不同截面影响线的快速计算,以及自由振动分析的导护型 Newton 法等内容。

此外,本书所附的《结构力学求解器》软件也升级为新的版本,它可以分析计算本书各章中所涉及的所有结构力学问题,全部为精确解,其中的教学版还为工程中用得最多的静力分析和自由振动分析提供了前后处理的界面程序。

本书体系完整、内容新颖、信息丰富、特色鲜明。本书既可作为高等学校土木、水利、交通、力学等专业结构力学课程教材,又是一本有特色的著作,可供教师、学生和工程技术人员使用。

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

反盗版举报传真：(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：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

第 2 版前言

“程序结构力学”课程是对现有的“结构矩阵分析”或类似课程在内容体系上的改革创新。它仍以杆系结构为基本对象,以力学为本,以新一代工程计算程序语言 Fortran 90 为工具,旨在系统地训练计算机建模、编程、分析、计算的能力,是面向计算机的结构力学课程。以本课程为基础的教学实践获 2001 年国家级教学成果一等奖,以本书为基础的结构力学课程于 2003 年被评为首批国家级精品课程。

本书第 1 版已初步形成了一个面向计算机的结构力学新体系,本次修订的目标是使这个体系更加完整和完善。主要修订的内容有如下几点。

一、将 Fortran 90 作为自包容的内容,不再要求读者掌握或熟悉 Fortran 77 语言。基于此,对第 2 章和附录 A 作了较大幅度的修订,适当增加了 Fortran 语言的基础知识内容,特别是强调了计算机数值计算中的一些基本概念,如实型数的表示和取值范围等。尽管最新的 Fortran 语言标准已经升级为 Fortran 2003,但由于目前全面支持 Fortran 2003 的编译器尚未普遍,而且本书也没有必要用到更新的语法特性,因此本书仍采用 Fortran 90 语言。

二、本书最重要的修订是增加了结构的内力包络图分析一章(第 8 章)。本章内容是最新的研究成果,同全书其他章节一样,是精确算法,给出精确解。结构内力包络图的分析计算,在工程中十分有用,但在传统的结构力学教材中,限于计算手段限制,这一部分内容普遍比较欠缺且薄弱。正是这一章内容的增加,使得本书中的面向计算机的结构力学新体系变得更加完整。

三、其他章节中局部修订的内容有:在超静定结构分析一章(第 6 章)中,增加了考虑剪切变形的杆件单元的内容;在影响线分析一章(第 7 章)中,增加了杆件内不同位置截面的影响线的快速计算方法;在结构的自由振动分析一章(第 9 章)中,重新梳理了内容结构,用动力刚度矩阵的导数矩阵取代了原书中的差分法,并给出了更加高效可靠的导护型 Newton 法的完整算法。

四、更新了结构力学求解器教学版,使其不仅可以用于静力分析计算(第 6 章)还可以用于自由振动分析计算(第 9 章)。学生可以在教学版的基础上,用书中的高效精确的算法和 Fortran 90 语言,为自己开发一个可直接

对大型结构进行静力分析和动力特性分析的工程计算软件。

面向计算机的结构力学新体系是本书的一贯追求,但由于时间紧促、水平有限,不足、不妥之处恐在所难免,期盼读者指正。

本书稿得到东南大学单建教授审阅和指点,谨致谢意。

作 者

2007 年 11 月于清华园

第 1 版前言

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,是面向 21 世纪课程教材,是面向计算机建模、编程、分析和计算能力培养的普通高校结构力学课程教材。作者最初只是想对传统的“结构矩阵分析”或类似的课程在内容体系更新上做一点尝试,但最终却以一个完整的、面向计算机的结构力学新体系作为归宿。尽管始料不及,但却不无欣慰。

在传统的“结构矩阵分析”课程中,力学模型比较单调,基本上是单一的位移法刚度模型,虽然有“以不变应万变”的效力,但在内容体系上更多的是面向“计算”和“实用”的,而较少地面向力学建模能力的训练与培养,有力学让位于计算、力学服从于计算、力学受限于计算之感。给人的印象好像是:计算机的方法基本上就是一个矩阵位移法,而像稳定、振动等问题就只能用 Ritz(里兹)法或有限元法去做近似的处理。写本教材的目的之一是试图“平衡”一下这种以偏概全的局面。

本书名为“程序结构力学”,之所以也称为“结构力学”,因为在内容上它与经典结构力学是相对应、相平行的,基本上覆盖了经典结构力学中所涉及的所有问题——从几何组成、静定结构,一直到动力计算、极限荷载。因此,本教材是针对整个结构力学体系的,而不仅是其中的个别方法,如矩阵位移法。希望读者学完本课程后获得的印象是,计算机方法适用于经典结构力学中的所有问题,而且在效力上远胜过经典结构力学。

仍用“结构力学”这一名称的另一个原因是,本教材自始至终以“力学”为本。计算机编程首先是计算机建模训练,其次才是“计算”和“应用”。譬如,虽然矩阵位移法可以用来统一求解静定和超静定结构,但是在本教材中仍然以专门章节介绍仅用平衡条件的静力法。虽然纯静力方法未必很实用,但是从计算机建模能力培养的角度来看,其不失为一个有益的教学训练环节。

在“结构力学”前面冠以“程序”二字,点出了本书与经典结构力学中不同的前提、手段、出发点和立足点。经典结构力学面向“人脑”,程序结构力学面向“电脑”。“程序”是“电脑”思维的载体,是“人脑”指使“电脑”思维的

工具。用“电脑”分析结构力学,实质上就是用“程序”进行结构的分析计算。面向“电脑”的结构力学,若不落实到“程序”,似有一种“有矢”而“无的”的感觉。

程序须用“语言”来写。程序语言的质量优劣、功能强弱及先进与否,直接影响本教材的内容体系。本教材选择了新一代的工程计算语言 Fortran 90,并限制在一个精选的子集范围内。Fortran 90 所具有的面向 21 世纪的特性,为本教材注入了时代的气息;其内在的、面向并行计算的特点,对于以大型工程计算为实用背景的工科学生来讲,是一个天然的佳选;而其面向数组矩阵运算的特征,在很大程度上可直接用程序语言取代矩阵运算, ($A=0$ 既是矩阵公式又是程序语言),更使得它成为本课程所难以推却的语言,也使得“程序结构力学”中的“程序”二字更为贴切,更加富有内涵。

作为本教材的一个直接的、配套的产品,我们开发研制了一个 MS Windows 环境下的计算机辅助分析计算软件——“结构力学求解器”。该求解器可以求解本教材中从几何组成一直到振动、稳定以及极限荷载等所有问题,是本教材内容的具体的程序实现,也是本课程的产品的一个示范。学完本课程后就掌握了求解器中核心的分析计算理论和算法,也就具备了与开发该求解器中核心计算程序相当的能力。

作为继承,本教材目前仍以经典结构力学为基础,对经典结构力学中已经讲述了的内容作了尽可能的从简。作为发展,本教材在内容体系上的完整性使其有潜力在未来成为独立于经典结构力学的新体系。我们认为,兼顾继承和发展,在继承中发展,在发展中创新,是面向 21 世纪教学内容体系改革的精神所在。我们把这个正在出现的新体系归功于 21 世纪,并将其献给 21 世纪。

本教材的完成是几年来坚持不懈的思考、探索、研究和完善的结果,其中不乏独特的内容素材和处理手法,而有些内容甚至在国际上也属前沿之列(如自由振动中的振型计算等)。在潜心研究过程中,我们有幸得到一些令人满意的成果,使得本教材所构思的内容体系得以完备。

本教材的形成不完全是教师的成果。几个章节(如几何组成分析、自由振动、弹性稳定、极限荷载)的内容,最初都是作者给因材施教的本科学生所布置的课题,后来便在教师带学生、学生促教师、教学相长、教学共进的过程中逐步结出了成果。这里,作者要特别提到叶康生和林永静这两位学生,在上面提到的几个章节中包含了他们的辛勤努力和聪明才智。

本课程自 1997 年开始,每年都在清华大学土木系讲授,每次仅用 32 课内学时。1998 年在北方交通大学土木系的学生中作了试点教学,用了 38 课内学时,取得了很好的效果。教学中对程序的要求是:作为基本要求,让学

生用 Fortran 90 完成一个完整的平面刚架的静力分析计算程序;对清华的学生,还以课程考核的形式要求学生编制频率与振型计算程序。这些程序的 32 位保护模式和完全的动态资源管理的特性,使学生在课程结束之后,享有一个有效的计算工具,可以直接用于实际工程当中的大规模分析计算。

在结束前言之前,回顾本教材编制过程中的创意与追求,总结一下特色,似有以下几点可以提及:

1. 能力培养的系统性:系统地培养计算机建模编程、分析计算能力。
2. 内容体系的完整性:覆盖了经典结构力学中几乎所有的问题。
3. 内容体系的一致性:从头至尾一致为精确单元和精确算法。
4. 内容体系的综合性:广泛综合力学、数学、计算技术、程序技巧等内容。
5. 内容体系的现代性:有些内容(如振型计算)为学科前沿最新研究成果。
6. 程序语言的先进性:采用了先进的 Fortran 90 程序语言。

以上虽是我们追求的特色,但未必都已得到很好的实现。由于时间紧迫、水平有限,不妥和错误之处恐在所难免,期盼读者指正。

本书稿请大连理工大学钟万勰院士、东南大学单建教授审阅,他们在审阅中提出很多宝贵意见和建议,作者致以衷心的感谢。

作 者

2000 年 10 月于清华大学

本书符号表说明

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,本书有的仍沿用以往教材的符号。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)。

4. 本书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及计算机运算的方便,作了必要的处理。具体情况在本书的相应处已有说明。

5. 本书中内力等各物理量是有单位的,但计算机程序只能进行纯数值运算。因此,在某些矩阵运算和程序运算过程中,未一一注明单位。全书类同。

主要符号表

数学符号	Fortran 90 表示	含 义	出现章号
EA, EI, KGA	Elem(:)% EA, Elem(:)% EI, Elem(:)% GA	杆件截面的抗拉刚度, 抗弯刚度, 抗剪 刚度	6、7 8、9、10
F_P		集中力荷载	全书
F_N		轴力	全书
F_A, F_B		支座 A, B 反力	全书
\overline{F}^e, F^e	EF(:)	单元杆端力向量(局部坐标、整体坐标)	全书
F_x^e, F_x	EF(:)	单元基本未知力向量, 整体未知力向量	5、11
$\overline{F}^{Fe}, F^{Fe}$	EP(:)	单元固端力向量(局部坐标、整体坐标)	6、11
$\overline{F}_N^e, \overline{F}_N$		轴力影响面(单元、结构)	8
F_{Pu}		极限荷载	11
F_p^+, F_p^-		可破坏荷载, 可接受荷载	11
$\overline{F}_Q^e, \overline{F}_Q$		剪力影响面(单元、结构)	8
\overline{F}_u^e, F_u^e		极限弯矩形成的单元“荷载”向量 (局部坐标, 整体坐标)	11
F_u		极限弯矩形成的整体“荷载”向量	11
$\overline{F}_{xi}, \overline{F}_{yi}, M_i$		局部坐标下杆端 i 的杆端力分量	全书
F_{xi}, F_{yi}, M_i		整体坐标下杆端 i 的杆端力分量	全书
g^e	EG(1:3, 1:6)	单元几何约束矩阵	4、5
G	G(:, :)	整体几何约束矩阵	4、5
\overline{h}^e, h^e	EH(1:6, 1:3)	单元平衡矩阵(局部坐标, 整体坐标)	5、6 11
H	GH(:, :)	整体平衡矩阵	5、11
J		低于给定值的频率数	9、10
J_0, J_K	J0, JK	低于给定值的单元固端频率数, K^Δ 对角线上负元素的数目	9、10
\overline{k}^e, k^e	EK(1:6, 1:6)	单元刚度矩阵(局部坐标, 整体坐标)	全书
K	GK(:, :)	整体刚度矩阵	全书
	Kcol(:)% row(:)	变列宽存储的整体刚度矩阵	
K^Δ		用高斯消去法将 K 消成的上三角阵	9、10

续表

数学符号	Fortran 90 表示	含 义	出现章号
l	Elem(:)% Len	单元长度, 杆件长度	全书
L, \hat{L}		所有单元长度之和, 所有受荷单元长度之和	8
m		体系自由度数	4、5
\bar{m}	Elem(:)% m	均布质量	9
M	NElem * 3	几何约束方程数	4、5
M_u	Elem(:)% Mu	极限弯矩	11
\bar{M}^e, \bar{M}		弯矩影响面(单元、结构)	8
n		多余约束数	4、5
ne	NElem	结构的单元数	全书
N	NG1bDOF	结构结点位移总数、结构结点自由度总数	全书
N_r, N_{r_0}		频率区间(ω_l, ω_u)中的频率数和固端频率数	9、10
p, p_u		荷载比例系数, 极限荷载比例系数	11
P	GP(:), Gload(:)	整体总结点荷载向量	5、6
\bar{P}_E^e, \bar{P}_E	EP(:)	单元等效结点荷载向量(局部坐标, 整体坐标)	5、6
P_J		结点荷载向量	全书
q, p, m_0		均布横向荷载, 均布轴向荷载, 均布力矩	5、6
r		独立约束数	4、5
T	ET(:, :)	坐标变换矩阵	全书
$\bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{\theta}_i$		局部坐标下杆端 i 的位移分量	全书
u_i, v_i, θ_i		整体坐标下杆端 i 的位移分量	全书
x, y		整体坐标, 结构坐标	全书
\bar{x}, \bar{y}		局部坐标, 单元坐标	全书
$\bar{x}_a, \bar{x}_p, x_a, x_p$		截面和荷载位置坐标(局部、整体)	8
Δ	Disp(:)	整体结点位移向量	全书
$\bar{\Delta}^e, \bar{\Delta}^e$	EDisp(1:6)	单元杆端位移向量(局部坐标, 整体坐标)	全书
λ		特征值(频率参数, 失稳荷载系数), 位置参数	9、10
λ^e	ELocVec(1:6), Elem(:)% G1bDOF (1:6)	单元定位向量	全书
ω, ω_f	Freq	自振频率, 单元固端频率	9
ω_l, ω_u	Freq1, Freq2	自振频率下界和上界	9

目 录

第 1 章	绪论	1
§ 1-1	结构力学教学内容的改革与发展	1
§ 1-2	面向能力培养的结构力学	2
§ 1-3	一个基础、两座大厦	3
§ 1-4	三个基本关系	4
§ 1-5	杆件与结构	4
§ 1-6	内容的教学安排	5
第 2 章	Fortran 90 编程简介	7
§ 2-1	Fortran 90 的新特性	8
§ 2-2	Fortran 90 的子集语言	9
§ 2-3	常用语言特性介绍	14
§ 2-4	编程风格与约定	29
	习题	29
第 3 章	结构体系的数值化	32
§ 3-1	坐标系、位移和力	33
§ 3-2	结构的编码	36
§ 3-3	Fortran 90 实现	39
§ 3-4	在求解器中输入结构体系	44
	习题	48
第 4 章	几何组成分析	50
§ 4-1	单元分析	51
§ 4-2	整体分析	53
§ 4-3	几何可变性分析	55
§ 4-4	算法	56
§ 4-5	例题	58
§ 4-6	用求解器进行几何组成分析	63

习题	66
第 5 章 静定结构分析	69
§ 5-1 单元分析	70
§ 5-2 整体分析	73
§ 5-3 例题	75
§ 5-4 静力平衡与几何组成	80
§ 5-5 用求解器求解静定结构	82
习题	90
第 6 章 超静定结构分析	94
§ 6-1 单元分析	95
§ 6-2 整体分析	100
§ 6-3 若干性质和讨论	103
§ 6-4 变带宽矩阵的直接存储	111
§ 6-5 变带宽矩阵的分解求解	115
§ 6-6 Fortran 90 程序设计样例	124
§ 6-7 考虑剪切变形的梁单元	131
§ 6-8 用求解器求解超静定结构	136
习题	141
第 7 章 结构的影响线分析	144
§ 7-1 虚位移法求影响线	144
§ 7-2 矩阵位移法求影响线	146
§ 7-3 杆件内不同位置截面的影响线	150
§ 7-4 例题	152
§ 7-5 用求解器计算结构的影响线	155
习题	159
第 8 章 结构的内力包络图分析	160
§ 8-1 内力影响面	161
§ 8-2 内力影响面的计算	163
§ 8-3 内力面	167
§ 8-4 内力最大值和最小值的确定	170
§ 8-5 例题	171
§ 8-6 考虑剪切变形的杆件	176
§ 8-7 用求解器计算结构的内力包络图	177
习题	179

第 9 章 结构的自由振动分析	180
§ 9-1 单元分析	181
§ 9-2 整体刚度方程	187
§ 9-3 Wittrick-Williams 算法	189
§ 9-4 频率的计算	193
§ 9-5 振型的计算	200
§ 9-6 高效算法——导护型 Newton 法	211
§ 9-7 用求解器求解自振频率与振型	215
习题	218
第 10 章 结构的弹性稳定分析	221
§ 10-1 问题的预处理	222
§ 10-2 单元分析	222
§ 10-3 整体刚度方程	226
§ 10-4 失稳荷载系数的计算	227
§ 10-5 失稳模态的计算	228
§ 10-6 例题	228
§ 10-7 用求解器求失稳荷载和模态	231
习题	234
第 11 章 结构的极限分析	235
§ 11-1 图解法	236
§ 11-2 单元分析	238
§ 11-3 整体分析	240
§ 11-4 均布荷载的处理	245
§ 11-5 用求解器求极限荷载	247
习题	249
附录 A Fortran 90 语言精要	252
§ A-1 语言组成	252
§ A-2 表达式和赋值	258
§ A-3 控制语句	261
§ A-4 程序单元和过程	263
§ A-5 数组处理	267
§ A-6 指针	272
§ A-7 类型说明语句	276
§ A-8 固有过程	279
§ A-9 输入和输出	280

附录 B 《结构力学求解器》(学生版)介绍	285
§ B-1 简介	285
§ B-2 求解功能	286
§ B-3 技术性能	286
§ B-4 装机与运行	287
§ B-5 研制组	287
§ B-6 命令指南	288
§ B-7 致谢	296
附录 C 《结构力学求解器》(教学版)介绍	297
§ C-1 简介	297
§ C-2 软件安装	298
§ C-3 接口说明	298
附录 D 静力分析编程大作业题目	300
附录 E 线性规划简介	301
§ E-1 线性规划问题	301
§ E-2 标准化方法	302
§ E-3 可行域与基本可行解	302
§ E-4 单纯形法	304
§ E-5 单纯形法 Fortran 90 程序	305
§ E-6 初始标准基向量	307
§ E-7 例题	307
主要参考文献	309
部分习题答案	311
索引	318
作者简介	322