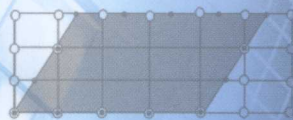
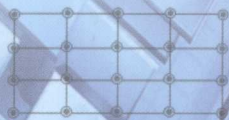
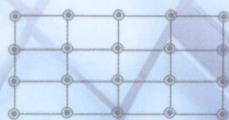


Advanced Computational Mechanics

高等计算力学

杨庆生 郑代华 编著



高等计算力学

Advanced Computational Mechanics

杨庆生 郑代华 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书阐述了以非线性有限法为主要内容的高等计算力学的基本理论、方法原理和计算机程序实现过程,主要包括小变形弹塑性问题、有限变形问题的有限元法和弹塑性断裂、复合材料高速冲击损伤和分子动力学模拟等专题。

本书可以作为力学专业研究生或本科高年级学生的教材,也可作为相关研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高等计算力学 / 杨庆生, 郑代华编著. —北京: 科学出版社, 2009
ISBN 978-7-03-025519-8

I. 高… II. ①杨…②郑… III. 计算力学-高等学校-教材 IV. 0302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 159516 号

责任编辑: 任加林 / 责任校对: 赵 燕

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 11 月第一次印刷 印张: 16 1/2

印数: 1—2 000 字数: 304 920

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

本书是《现代计算固体力学》*的续篇,主要目的是为满足研究生教学和科研工作的需要。《现代计算固体力学》一书出版后,对于研究生课程教学起到了重要作用,该书已被评为北京市高等教育精品教材。

本书主要讲述小变形弹塑性问题和有限变形问题的计算力学,以及若干非线性计算力学专题:非线性断裂、复合材料高速冲击和分子动力学模拟等问题。

非线性是现代科学与工程的主要特征之一,非线性力学问题广泛存在于科学与工程各个领域。非线性力学问题一般包括材料非线性、几何非线性和边界非线性问题。

在有限元法被工程师广泛接受以后,线性有限元法已经成为工程分析与设计的有力工具,但是非线性有限元法的发展却相对滞后。非线性有限元法是非线性力学问题分析的一种数值方法。非线性计算力学在工科研究生培养中也具有重要的地位。

阅读本书的读者需要具备良好的弹性力学和有限元法的知识,并且最好进行过编写有限元程序的训练。为了与线性有限元法相衔接,并考虑到读者使用本书的方便,我们特意准备了弹性力学与有限元法基本理论一章,使读者能够提纲性地温习弹性力学和有限元法的主要内容。

要学好非线性计算力学,首先要学好非线性力学的基本理论。本书用相当大篇幅介绍弹塑性力学、非线性连续介质力学等基本内容,其目的在于使读者深入理解非线性力学的基本概念和基本理论,并在此基础上正确地完成有限元法的构造过程。关于塑性力学和连续介质力学的教材已经很多,本书广泛地参考了这些文献,并在各个章节予以明确标注。

本书是一本以实际应用和适应工程类研究生教学为目的的教材,在内容选择和编排体例上以成熟性、通用性和知识的内在逻辑性为原则,同时兼顾计算力学的最新发展。在综合多本教材和学术专著的基础上,在基础理论部分(弹塑性力学和连续介质力学)尽量做到精炼,并与本书介绍的计算机程序密切对应,力求使读者理解基本理论与程序实现之间的对应关系。在专题部分,结合通用程序,重点介绍各专题的基本理论、程序实现和应用技术。

* 杨庆生, 2007. 现代计算固体力学[M]. 北京: 科学出版社

本书编写过程中,得到了旅美学者郑代华博士的关注,他结合自己多年来在应用 LS-DYNA 进行复合材料结构高速冲击模拟方面的丰富经验,编写了第 9 章。书稿在北京工业大学力学专业博士和硕士研究生教学中使用多次,多名研究生参与了书稿的整理和程序调试。本书的编写得到北京工业大学研究生课程重点建设项目的资助,作者特此一并感谢。本书虽经多次修改完善,但还会存在不足之处,欢迎广大读者提出批评和建议。

作者

2009 年 4 月

Preface

This book is the continuation of the book *Modern Computational Solid Mechanics** that has played a significant role in the teaching and research of graduate level classes and thus been assessed as a high-quality tutorial material for the advanced education.

The main focus of this book is on nonlinear computational mechanics for infinitesimal plastic deformation and finite deformation of continua and structures, as well as computational mechanics for nonlinear fracture mechanics, high-velocity impact of composite structures and simulation of molecular dynamics.

Nonlinearity is a main characteristic of modern science and engineering. Nonlinear mechanics has been playing a significant role in many fields of science and engineering. Nonlinear mechanics includes material nonlinearity, geometrical nonlinearity and boundary nonlinearity.

Linear finite element has been a powerful tool for engineering analysis and design since it was introduced and accepted by engineers. The development and application of nonlinear finite element, which is numerical method for nonlinear mechanics, has been relatively lagged behind. It should be pointed out that the understanding of nonlinear computational mechanics is crucial for the training of graduate students.

It is suggested that the reader of the book should have good background on elasticity and finite element method. It is better to have had some training on finite element programming before. In order to bridge the gap between linear and nonlinear finite element, the basic elasticity and finite element knowledge were prepared in Chapter 0. The reader can use this chapter to refresh the memory on those basic topics.

In order to learn nonlinear computational mechanics more effectively, we have to understand some basic theories of nonlinear mechanics. In this book, there are a lot of efforts to explain concepts of elasto-plastic mechanics and nonlinear continuum mechanics in order for the reader to master these basic concepts

* Qingsheng Yang, 2007, *Modern computational solid mechanics*[J]. Beijing: Science Press

and theories of nonlinear mechanics. On the basis of this, the procedure of finite element was given. There are many references relating to plasticity and continuum mechanics included in this book.

This book has been written primarily to meet the needs of the teaching and research of graduate students of Engineering Mechanics, Mechanical and Civil Engineering. On top of this, the criteria on the selection of subjects are validity, applicability, inside logic as well as the new advances on computational mechanics. In order to help the reader better understand the connection between the basic theory and practical application of nonlinear finite element method, the correspondency of the equations with programming was emphasized. In other in-depth subjects, the basic theory, finite element programming and the engineering application were explained sequentially.

Thanks are gratefully extended to Dr. Daihua Zheng in US, who wrote Chapter 9 on the numerical simulation of high-velocity impact of composite structures using LS-DYNA based on his many years of engineering and research experience. The manuscript has been used many times as the lecture note to the graduate level classes in Beijing University of Technology. Without the help of many graduate students here, it is impossible to have such significant improvements over the original manuscript. Thanks are also extended to the support on the graduate teaching project from Beijing University of Technology. All comments are welcomed from the reader of the book.

Yang Qingsheng and
Zheng Daihua

April 20, 2009

目 录

前言

第 0 章 弹性力学和有限元法基本理论	1
0.1 弹性力学基本方程	1
0.2 弹性力学问题的建立与求解	3
0.3 弹性体的能量原理	6
0.4 有限元分析的基本过程	8
0.4.1 单元位移模式	8
0.4.2 单元刚度阵和有限元方程的建立	9
0.4.3 整体有限元方程的组装	10
0.4.4 边界条件的引入与方程的求解	10
0.5 有限元法的一般化——加权余值法.....	11

第一篇 小变形弹塑性计算力学

第一章 应变与应力、一维弹塑性力学模型	15
1.1 应变张量与应力张量.....	15
1.2 不变量和偏张量.....	16
1.3 π 平面的概念	20
1.4 一维弹塑性力学模型.....	20
1.4.1 金属的简单拉压实验结果.....	21
1.4.2 应力-应变关系的简化模型	23
第二章 弹塑性屈服条件和本构关系	26
2.1 屈服条件.....	26
2.1.1 材料变形的基本假设	26
2.1.2 屈服条件的一般形式	26
2.2 几个常用的屈服条件.....	28
2.2.1 Tresca 屈服条件	28
2.2.2 Mises 屈服条件	29
2.2.3 Tresca 与 Mises 屈服条件的比较	30
2.2.4 最大偏应力屈服条件(双剪应力屈服条件).....	30
2.2.5 Mohr-Coulomb 屈服条件	31

2.3	本构关系的一般论述	32
2.3.1	应力率与应变率	32
2.3.2	加卸载准则	34
2.3.3	有关材料性质的几个假设	35
2.4	增量型本构关系	36
2.4.1	增量型本构方程的一般形式	36
2.4.2	本构关系的一些常用表达式	37
2.5	全量理论	40
第三章	弹塑性问题的有限元法	43
3.1	材料非线性问题有限元方程的一般形式	43
3.2	弹塑性问题有限元方程的建立	47
3.3	屈服面奇点的处理	51
3.4	弹塑性问题的计算方法	51
3.4.1	增量切线刚度法的计算原理	52
3.4.2	切线刚度阵的形成	52
3.4.3	增量切线刚度法的计算步骤	53
3.5	弹塑性有限元程序总体设计	53
3.5.1	弹塑性程序的基本流程	54
3.5.2	数值例题	55
3.5.3	主要变量	56
3.5.4	主程序	58
3.5.5	主要子程序功能	60

第二篇 有限变形计算力学

第四章	连续介质力学基础	67
4.1	引言	67
4.1.1	指标记法	67
4.1.2	张量记法	67
4.1.3	矩阵记法	68
4.1.4	Voigt 记法	68
4.2	连续介质的运动与变形	69
4.2.1	Euler 和 Lagrange 坐标	70
4.2.2	位移、速度和加速度	70
4.2.3	变形梯度	72
4.3	连续介质的应变	75

4.3.1	Green 应变张量	75
4.3.2	变形率	76
4.3.3	变形率与 Green 应变的关系	77
4.3.4	应变的前推和后拉变换	78
4.4	连续介质的应力	79
4.4.1	几种应力定义	79
4.4.2	应力之间的转换	80
4.4.3	应力的客观率	82
4.5	连续介质力学的守恒方程	83
4.5.1	质量守恒	84
4.5.2	线动量守恒	85
4.5.3	角动量守恒	86
4.5.4	能量守恒	86
第五章	连续介质力学中的本构关系	88
5.1	单轴应力-应变曲线	88
5.1.1	单轴拉伸实验	88
5.1.2	大应变	90
5.1.3	体积压缩性的影响	90
5.2	有限变形的弹性本构模型	91
5.2.1	Kirchhoff 材料	91
5.2.2	次弹性材料	92
5.2.3	超弹性材料	92
5.3	几种常用的超弹性材料本构模型	93
5.3.1	各向同性超弹性材料	93
5.3.2	Neo-Hooke 材料	94
5.3.3	Mooney-Rivlin 材料	95
5.3.4	主轴超弹性模型	95
5.4	弹-塑性材料模型	95
5.4.1	塑性变形	95
5.4.2	用 Cauchy 应力表示的次弹-塑性本构模型	96
5.4.3	小应变的弹塑性公式	97
5.4.4	用 Kirchhoff 应力表示的 J_2 塑性流动理论	98
5.5	超弹-塑性材料模型	99
5.5.1	变形梯度的乘法分解	99
5.5.2	超弹性势能和应力	100

5.5.3	Neo-Hooke 超弹性- J_2 流动理论	100
第六章	有限变形有限元法	103
6.1	Lagrange 与 Euler 网格	103
6.2	UL 格式有限元公式	107
6.2.1	基本控制方程	107
6.2.2	弱形式	107
6.2.3	有限元离散	108
6.2.4	质量矩阵	111
6.2.5	单元内部节点力的计算	111
6.3	常用的 UL 格式单元	112
6.3.1	2 节点一维单元	112
6.3.2	3 节点三角形单元	114
6.3.3	四边形单元和其他二维等参单元	118
6.3.4	三维等参单元	121
6.3.5	轴对称四边形单元	123
6.4	TL 格式的有限元公式	124
6.4.1	控制方程	125
6.4.2	通过转换获得 TL 有限元方程	125
6.4.3	TL 格式的弱形式	126
6.4.4	有限元半离散化	127
6.4.5	TL 格式的内部节点力算法	129
6.5	常用的 TL 格式单元	129
6.5.1	2 节点一维线性位移单元	129
6.5.2	二维杆	131
6.5.3	三角形单元	132
6.5.4	二维等参单元	133
6.5.5	三维单元	134
6.6	连续介质力学的 ALE 描述	135
6.6.1	ALE 描述	135
6.6.2	ALE 描述与 Euler 和 Lagrange 描述的关系	138
6.6.3	ALE 描述中的基本方程	138
6.7	ALE 有限元法	139
6.7.1	连续方程的弱形式	139
6.7.2	动量方程的弱形式	140
6.7.3	有限元近似	140

6.7.4	有限元矩阵方程	141
第七章	有限变形有限元程序实现	143
7.1	超弹性模型的有限元列式	143
7.2	非线性问题的求解方法	146
7.2.1	平衡方程的线性化	146
7.2.2	Newton-Raphson 迭代法	147
7.2.3	线性搜索法	147
7.3	不可压缩问题的处理	148
7.3.1	平均膨胀法	149
7.3.2	B-bar 法	151
7.3.3	强化应变法	151
7.4	几种超弹性材料模型的数学表示	152
7.5	程序实现	156
7.6	有限变形超弹性有限元程序	159
7.6.1	主程序	159
7.6.2	主要子程序介绍	168
7.7	数值算例	174

第三篇 高等计算力学专题

第八章	非线性断裂力学有限元法	185
8.1	引言	185
8.2	断裂力学基本理论	185
8.2.1	线弹性断裂力学	186
8.2.2	弹塑性断裂力学	189
8.3	静态断裂参数的计算	190
8.4	断裂力学中的奇性单元	191
8.5	应力强度因子的提取	194
8.6	T 力的提取	196
8.7	裂纹扩展分析	197
8.7.1	最大切应力准则	197
8.7.2	最大释放率准则	198
8.7.3	$K_{II}=0$ 准则	198
第九章	基于 LS-DYNA 的复合材料高速冲击模拟	199
9.1	LS-DYNA 的历史	199

9.2	复合材料的应用	199
9.3	LS-DYDA 中的复合材料模型	200
9.3.1	复合材料损伤模型	201
9.3.2	单层板损伤模型	202
9.3.3	复合材料弹塑性损伤模型	205
9.3.4	其他复合材料模型	206
9.4	复合材料高速冲击分析的模拟指南	206
9.4.1	网格划分及单元	206
9.4.2	沙漏控制	207
9.4.3	复合材料的模拟	207
9.4.4	层裂模拟	208
第十章	分子动力学模拟	212
10.1	纳米力学概述	212
10.1.1	分子动力学模拟	213
10.1.2	蒙特卡罗模拟	213
10.1.3	准连续介质法	213
10.1.4	原子结构力学方法	214
10.2	分子动力学的基本理论	214
10.2.1	分子动力学基本方程	214
10.2.2	原子间作用势函数	216
10.2.3	截断半径	218
10.3	分子动力学模拟方法	219
10.3.1	几何模型的建立	219
10.3.2	初始条件和边界条件	220
10.3.3	温度调控	222
10.3.4	压力调控	224
10.4	时间积分算法和时间步长	226
10.4.1	时间积分算法	226
10.4.2	时间步长	227
10.5	分子动力学模拟过程	227
10.6	多尺度模拟方法	230
附录 A	矢量与张量的基本知识	231
A.1	矢量和张量	231
A.1.1	矢量及其运算	231

A.1.2 张量及其运算	232
A.2 四阶各向同性张量的逆的表达式	234
A.3 张量分析	236
附录 B 关键词索引	238
参考文献	241

CONTENTS

Preface

Chapter 0 Theory of elasticity and finite element method	1
0.1 Basic equations of elasticity	1
0.2 Solutions of elastic mechanics	3
0.3 Energy theorem of elastic body	6
0.4 Procedure of finite element analysis	8
0.4.1 Displacement mode of an element	8
0.4.2 Stiffness matrix and finite element equations	9
0.4.3 Assembly of finite element equations	10
0.4.4 Boundary conditions and solution of the equations	10
0.5 Generalization of finite element-weighted residual approach	11

Part I. Elasto-plastic computational mechanics for infinitesimal deformation

Chapter 1 Strain, stress and one-dimensional elasto-plastic mechanical model	15
1.1 Strain and stress tensors	15
1.2 invariants and deviatoric tensors	16
1.3 Concept of π plane	20
1.4 One-dimensional elasto-plastic mechanical model	20
1.4.1 Results from tensile tests on metal	21
1.4.2 Simplificated models of stress-strain relation	23
Chapter 2 Elasto-plastic yield condition and constitutive relation	26
2.1 Yield condition	26
2.1.1 Assumption of material deformation	26
2.1.2 General form of yield condition	26
2.2 Several typical yield criterions	28
2.2.1 Tresca yield criterion	28
2.2.2 Mises yield criterion	29

2.2.3	Comparison of tresca and mises yield criterion	30
2.2.4	Maximum deviatoric stress yield criterion (dual shear stress yield criterion)	30
2.2.5	Mohr-colomb yield criterion	31
2.3	General review of constitutive relation	32
2.3.1	Stress rate and strain rate	32
2.3.2	Loading and unloading criterions	34
2.3.3	Several assumptions on material behavior	35
2.4	Incremental constitutive theory	36
2.4.1	General form of incremental constitutive equations	36
2.4.2	Particular constitutive equations	37
2.5	Total strain theory	40
Chapter 3	Finite element for elasto-plastic problems	43
3.1	Finite element equations for material nonlinearity	43
3.2	Finite element equations for elasto-plasticity	47
3.3	Singular points on yield surface	51
3.4	Computational procedure for elasto-plastic problem	51
3.4.1	Method of incremental tangent stiffness	52
3.4.2	Incremental tangent stiffness matrix	52
3.4.3	Calculation of incremental tangential stiffness	53
3.5	Elasto-plastic finite element equations	53
3.5.1	Basic procedure for elasto-plastic programming	54
3.5.2	Numerical examples	55
3.5.3	Main variables	56
3.5.4	Main program	58
3.5.5	Illustration of subroutines	60
Part II. Computational mechanics for finite deformation		
Chapter 4	Fundamental continuum mechanics	67
4.1	Introduction	67
4.1.1	Index notation	67
4.1.2	Tensor notation	67
4.1.3	Matrix notation	68
4.1.4	Voigt notation	68
4.2	Kinematics and deformation of continuum	69

4.2.1	Euler and lagrange coordinates	70
4.2.2	Displacement, velocity and acceleration	70
4.2.3	Deformation gradient	72
4.3	Strains of continuum	75
4.3.1	Green strain tensor	75
4.3.2	Deformation rate	76
4.3.3	Relation between deformation rate and green strain	77
4.3.4	Push-forward and pull-back operations of strains	78
4.4	Stresses of continuum	79
4.4.1	Definitions of stresses	79
4.4.2	Transformation of stresses	80
4.4.3	Objective rates	82
4.5	Conservation laws of continuum	83
4.5.1	Mass conservation	84
4.5.2	Linear momentum conservation	85
4.5.3	Angular momentum conservation	86
4.5.4	Energy conservation	86
Chapter 5	Constitutive relations in continuum mechanics	88
5.1	Uniaxial stress-strain relation	88
5.1.1	Uniaxial tensile tests	88
5.1.2	Large deformation	90
5.1.3	Incompressibility	90
5.2	Constitutive relations for finite deformation	91
5.2.1	Kirchoff material	91
5.2.2	Hypoelastic material	92
5.3.3	Hyperelastic material	92
5.3	Several hyperelastic constitutive relations	93
5.3.1	Isotropic hyperelastic material	93
5.3.2	Neo-hookean material	94
5.3.3	Moony-rivlin material	95
5.3.4	Hyperelastic Material in Principal Directions	95
5.4	Elasto-plastic material	95
5.4.1	Plastic deformation	95
5.4.2	Elasto-plastic constitutive relation using cauchy stress	96
5.4.3	Elasto-plastic equation for infinitesimal strain	97
5.4.4	J_2 Plastic flow theory using kirchhoff stress	98