

工程结构非线性

秦 荣 著



科学出版社
www.sciencep.com

工程结构非线性

秦 荣 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍结构非线性分析的新理论新方法,重点介绍作者的新成果。主要包括:材料非线性理论,几何非线性理论,双重非线性理论,结构非线性稳定性问题,结构非线性动力问题,钢筋混凝土结构非线性问题,结构非线性分析的新方法,结构不确定性非线性分析的新方法,结构损伤分析的新方法,结构非线性地震反应分析的新方法,结构非线性可靠度分析的新方法及其工程应用。本书内容丰富、新颖、富有创造性,不仅有理论意义,而且有广泛的应用前景。

本书可供土木工程、水利工程、材料科学与工程、工程力学、固体力学、矿山工程、机械工程、航天航空航海工程、国防工程及有关工科专业的科技人员,以及相关专业的高校师生和硕士生及博士生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构非线性/秦荣著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-016416-4

I. 工… II. 秦… III. 工程结构-非线性结构分析 N. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 127394 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:柏连海

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年3月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2006年3月第一次印刷 印张:32 3/4

印数:1—3 000 字数:633 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

前 言

工程结构包括建筑结构、桥梁结构、地下结构、水工结构、海洋工程结构、航天航空工程结构、航海工程结构、矿山工程结构、国防军事工程结构及生命线工程结构等。大型复杂结构包括高耸结构、高层与超高层建筑结构、大跨度空间结构、大跨度桥梁结构、大型地下结构及高拱坝。它们的科技进步,对促进经济建设、国防建设及社会进步有重要意义。

工程结构在服役期间会受到各种作用,甚至可能受到灾害性作用,结构的抗力可能由于碳化、腐蚀及环境影响等原因会发生衰减。因此,结构在服役期间几乎不可避免地会产生非线性效应,呈现出一系列复杂的非线性问题。

工程结构从本质上来讲是非线性的,线性假设只是实际问题的一种简化。如果工程结构按线性理论设计,则它的经济合理及安全可靠难以保证。例如,在实际工程中,四边简支矩形薄板在其平面内受压能力可大大超过线性理论的临界力,甚至在产生局部屈曲时也能继续工作,因此这时按线性理论设计就会浪费。又例如,受轴压的圆柱薄壳在线性理论临界力的几分之一的作用下就会突然破坏,因此这时按线性理论设计就会造成灾难。弹塑性是一种材料非线性,在结构工程设计中如果考虑弹塑性效应,则可以挖掘材料潜力,提高工程结构承载能力,节约材料,正确估计工程安全度,使工程经济合理及安全可靠;如果按线弹性理论设计,则会显得保守。由此可知,在工程结构设计中,必须考虑非线性问题才能保证结构工程既经济合理又安全可靠。

结构非线性包括几何非线性、材料非线性、双重非线性(既含几何非线性又含材料非线性)及接触非线性。近年来,在现代化建设中,人们面临着越来越多的结构非线性力学问题,结构非线性分析已成为工程设计与施工不可缺少的一项工作,因此结构非线性力学已成为工程设计与施工不可缺少的一门重要学科。

结构非线性力学与工程的经济及安全有密切关系,特别对大型复杂结构的设计与施工,必须进行双重非线性分析才能保证它们的经济合理及安全可靠,否则不仅会造成浪费,而且还会造成灾难。目前,国内外对结构双重非线性分析几乎都采用基于几何非线性理论、经典本构关系及有限元法建立的非线性有限元法。这种方法对结构非线性分析有很大的贡献,但存在下列缺陷:① 在理论上采用流动法则理论,不仅计算复杂,而且难保逼真度;② 在方法上采用有限元法,它是一个网格法,在大变形问题中网格会发生严重变形,在计算过程中需要网格重构;③ 在算法

上数值计算量过于庞大,迭代收敛速度慢,甚至出现迭代失效或不收敛于正确解。因此利用非线性有限元法分析结构非线性问题,不是一个经济有效的方法,显然需要另外创立一些经济有效的新理论新方法。

1986年以来,作者结合土木、水利及建筑工程的生产及科研任务,致力于研究结构非线性力学及其应用,创立了结构非线性分析的新理论新方法。这种新理论新方法有下列优点:①在理论上建立了弹塑性应变/弹粘塑性应变与总应变的新关系,避免了流动法则理论带来的困难及缺陷;②在方法上建立了新方法,避免了有限元法带来的困难及缺陷;③在算法上数值计算量不大,迭代收敛速度快,不仅计算简便,而且精度也高。这些成果获广西自然科学优秀论文成果一等奖1项、省部级科技进步二等奖6项、全国优秀学术成果一等奖1项及东方名人成就奖1项。同行专家鉴定认为,这些成果为国内外首创,达到国际先进水平。这些成果大多数在国内外已公开发表,被引用很多,有些论文被EI(美国)、PЖ(前苏联)、ISTP(美国)及SCI(美国)收录,日本、美国、英国、保加利亚、意大利、新加坡、德国、罗马尼亚、法国、以色列等国家的有关学者也来函索取有关文献,在国内外学术界产生了广泛影响。

本书是在上述基础上撰写成的,是作者科研成果的总结,是一部科研成果专著。

本书共十八章。第一章主要介绍非线性力学的一些基本概念。第二章主要介绍材料非线性理论,在简介经典本构关系的基础上重点介绍作者的新成果:弹塑性/弹粘塑性应变与总应变的新关系、材料非线性变分原理及材料非线性广义变分原理。

第三章主要介绍几何非线性理论,在简介小变形几何非线性及大变形几何非线性理论的基础上重点介绍作者的新成果:几何非线性变分原理及几何非线性广义变分原理。

第四章主要介绍双重非线性理论,在简介大变形本构关系的基础上重点介绍作者的新成果:双重非线性变分原理及双重非线性广义变分原理。

第五章至第八章主要介绍作者提出的新方法:非线性样条有限点法、非线性样条子域法、非线性QR法及非线性样条无网格法。其中样条有限点法、样条子域法及QR法是在有限元法与有限条法之间另辟的一条新路,集有限元法、有限条法、无限元法及样条函数方法的优点于一体,其中样条无网格法是在有限元法及有限条法之外另辟的一条新路,克服了有限元法及有限条法的缺点,突破了它们的局限性,为结构非线性分析开拓了新途径。

第九章主要介绍结构非线性动力分析的新方法,重点介绍作者的新成果,包括瞬时变分原理及瞬时广义变分原理、建模的新方法、非线性动力响应的新算法。

第十章主要介绍结构非线性稳定性分析的新方法,在简介结构稳定性概念的

基础上重点介绍作者提出的新方法,包括建立结构非线性稳定性的变分原理、新模型及新算法。

第十一章主要介绍钢筋混凝土结构非线性分析的新方法,在简介钢筋混凝土非线性基本理论的基础上重点介绍作者的新成果。

第十二章主要介绍结构损伤分析的新方法,实际结构都有损伤,因此对结构进行损伤分析有重要意义。损伤力学是固体力学近年来出现的一个新兴分支,它的发展为结构损伤分析提供了理论基础及分析手段。本章在简介损伤力学的基本概念及基本理论的基础上重点介绍作者的新成果,包括损伤本构关系、损伤变分原理、损伤广义变分原理及损伤分析的新方法。

第十三章主要介绍结构非线性分析的样条摄动法。摄动法是结构非线性分析及结构不确定性分析的有效方法之一,作者提出了样条摄动法,本节重点介绍作者的新成果。

第十四章主要介绍结构不确定性非线性分析的新方法。目前,结构工程遇到的挑战首先是要实现结构性能设计。对结构进行精细化的分析与设计是现代性能设计理论的客观要求。考虑结构的非线性效应和结构荷载、物理参数及几何参数不确定性的影响是对结构性能进行精细化分析与设计的必然要求。结构不确定性非线性分析是结构工程设计的一个重要问题。本章在简介结构不确定性基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果:结构随机非线性力学、结构模糊非线性力学、结构随机模糊非线性力学及结构随机模糊非线性振动。

第十五章主要介绍结构可靠度分析的新方法。工程结构可靠度分析是工程设计中的一个重要课题。发展工程结构可靠度的精细化分析方法,是解决当前工程结构可靠度理论困境的出路。本章在简介结构可靠性基本概念及基本理论的基础上重点介绍作者的新成果。

第十六章主要介绍结构抗震分析的新方法。结构抗灾包括抗震、抗风、抗火、抗洪,本章在简介基本概念的基础上重点介绍作者提出的新成果。

第十七章至第十八章主要介绍高层与超高层建筑结构、网壳结构、大跨度拱桥及大型复杂结构非线性分析的新方法,重点简介作者的新成果。

本书内容丰富、新颖、富有创造性,突破了传统方法,既有理论,又有应用,不仅可用于结构工程、桥梁工程、水利工程、地下工程、岩土工程、海洋工程、航天航空工程、航海工程、生命线工程、抗灾工程、矿山工程,而且对机械、化工及国防工程也适用。因此,本书适用范围很广,通用性很强。

作者致力于研究结构非线性力学及其应用时,国家自然科学基金委员会、广西科委及广西教委给予很大的资助,先后资助下列项目:结构分析的样条子域法(批准号:18962001)、结构塑性力学的样条函数方法(批准号:19262001)、结构有限变形弹塑性动力响应的样条半解析法(批准号:19872020)、结构非线性稳定性分析的

新理论新方法(桂科自 0339013)、岩土工程中的数值方法研究(广西自然科学基金项目)、桥梁结构分析的新方法(广西教委)、高层住宅钢结构应用研究(广西科学研究与技术开发项目)、应用仿真技术和方法研究结构动力反应全过程(广西科学研究与技术开发项目)、防灾减灾技术开发与示范——结构抗震性能的诊断及评估研究(桂科攻 0322022-2)及薄壳桥梁结构分析的新理论新方法(广西自然科学基金项目)。本书包含这些项目的许多研究成果,作者借此机会对相关单位表示衷心的感谢!

在本书的写作过程中,得到国内外许多同行的热情关怀和大力支持,我的许多硕士生及博士生利用这些新理论新方法算过许多例题并分析过一些工程,特此对他们表示感谢!

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬请批评指正!

目 录

前言

第一章 基本概念	1
1.1 变形状态	1
1.2 应变状态	2
1.2.1 Green 应变张量	3
1.2.2 Almansi 应变张量	3
1.3 应力状态	4
1.3.1 应力张量	4
1.3.2 三种应力张量之间的关系	6
1.4 结构非线性问题	7
1.4.1 基本方程	7
1.4.2 结构非线性问题	9
1.5 张量记号	9
1.6 结构非线性研究的意义	11
参考文献	12
第二章 材料非线性	13
2.1 材料特性	13
2.2 非线性弹性本构关系	16
2.3 屈服条件	17
2.3.1 常用的几种屈服条件	18
2.3.2 加载条件	21
2.4 弹塑性本构关系	25
2.4.1 增量理论	25
2.4.2 Mises 等向强化弹塑性矩阵	27
2.4.3 Mises 随动强化弹塑性矩阵	32
2.4.4 广义等向强化弹塑性矩阵	33
2.4.5 Zienkiewicz-Pande 等向强化模型	36
2.4.6 全量理论	38
2.5 弹粘塑性本构关系	41
2.5.1 弹粘塑性模型	42

2.5.2	本构关系	43
2.6	弹塑性应变理论	47
2.6.1	弹塑性应变理论	47
2.6.2	热弹塑性应变理论	51
2.7	弹粘塑性应变理论	54
2.7.1	弹粘塑性应变理论	54
2.7.2	热弹粘塑性应变理论	56
2.8	材料非线性变分原理	57
2.8.1	虚功原理	58
2.8.2	弹塑性变分原理	60
2.9	材料非线性广义变分原理	64
2.9.1	弹塑性广义变分原理	64
2.9.2	弹粘塑性变分原理	69
2.10	材料非线性分析方法	73
	参考文献	73
第三章	几何非线性	75
3.1	小变形几何非线性问题	75
3.1.1	梁的小变形几何非线性理论	75
3.1.2	薄板的小变形几何非线性理论	77
3.1.3	两个重要性质	80
3.2	大变形几何非线性问题	80
3.2.1	有限变形理论	80
3.2.2	两个重要性质	82
3.3	几何非线性变分原理	83
3.3.1	基本方程	83
3.3.2	最小势能原理	84
3.4	几何非线性广义变分原理	85
3.5	几何非线性分析方法	89
	参考文献	89
第四章	双重非线性	91
4.1	大变形本构关系	91
4.1.1	一般原理	91
4.1.2	大变形弹塑性本构关系	92
4.1.3	本构关系的客观性原理	93
4.1.4	Jauman 应力率	95

4.1.5	证明大变形弹塑性本构关系	96
4.2	双重非线性变分原理	97
4.2.1	基本方程	97
4.2.2	有限变形弹塑性变分原理	98
4.3	双重非线性广义变分原理	99
4.3.1	有限变形弹塑性广义变分原理	99
4.3.2	带权参数变分原理	100
4.4	双重非线性分析方法	100
	参考文献	101
第五章	非线性样条有限点法	102
5.1	基本原理	102
5.2	结构材料非线性样条有限点法	104
5.2.1	薄板弹塑性分析的样条有限点法	104
5.2.2	弹塑性二维问题分析的样条有限点法	115
5.2.3	薄壳弹塑性分析的样条有限点法	122
5.3	结构几何非线性样条有限点法	126
5.3.1	结构几何非线性分析方法	127
5.3.2	梁的几何非线性样条有限点法	127
5.3.3	板壳几何非线性样条有限点法	135
5.3.4	三维弹性体几何非线性样条有限点法	141
5.3.5	算法	145
5.4	结构双重非线性样条有限点法	147
5.4.1	梁的双重非线性分析的样条有限点法	148
5.4.2	梁的双重非线性问题	152
5.4.3	薄壳双重非线性分析的样条有限点法	155
5.4.4	板壳双重非线性问题	159
5.4.5	增量迭代法	162
5.5	计算例题	163
5.6	附录	166
5.6.1	B 样条函数	166
5.6.2	样条基函数	167
	参考文献	170
第六章	非线性样条子域法	172
6.1	基本原理	172
6.2	结构材料非线性样条子域法	175

6.2.1	弹塑性样条梁子域	175
6.2.2	样条拱子域	182
6.2.3	弹塑性二维及三维问题样条子域	188
6.2.4	弹塑性薄板样条子域	189
6.3	结构几何非线性样条子域法	190
6.3.1	几何非线性样条平面梁子域(GSB-1)	190
6.3.2	几何非线性样条平面梁子域(GSB-2)	193
6.3.3	几何非线性样条空间梁子域(GSB-3)	195
6.3.4	几何非线性样条空间梁子域(GSB-4)	197
6.3.5	几何非线性样条平面拱子域(GSA-1)	199
6.3.6	几何非线性样条平面拱子域(GSA-2)	201
6.3.7	几何非线性样条空间拱子域(GSA-3)	202
6.3.8	几何非线性样条空间拱子域(GSA-4)	203
6.4	结构双重非线性样条子域法	205
6.4.1	双重非线性样条梁子域	205
6.4.2	双重非线性样条拱子域	207
6.4.3	双重非线性样条子域	209
6.5	计算例题	212
	参考文献	214
第七章	非线性 QR 法	215
7.1	基本原理	215
7.2	结构材料非线性 QR 法	218
7.2.1	高层框架弹塑性分析的 QR 法	218
7.2.2	增量迭代法	222
7.3	结构几何非线性 QR 法	224
7.3.1	高层框架几何非线性分析的 QR 法	224
7.3.2	结构几何非线性方程的算法	228
7.4	结构双重非线性 QR 法	229
7.4.1	高层框架双重非线性分析的 QR 法	229
7.4.2	增量迭代法	233
7.5	计算例题	234
7.6	附录	236
7.6.1	材料非线性单元	236
7.6.2	几何非线性单元	239
7.6.3	双重非线性单元	240

参考文献	240
第八章 非线性样条无网格法	242
8.1 基本原理	242
8.1.1 径向样条基函数	242
8.1.2 样条无网格法	245
8.2 结构材料非线性样条无网格法	250
8.2.1 弹塑性本构关系	250
8.2.2 结构弹塑性样条无网格法	251
8.3 结构几何非线性样条无网格法	254
8.3.1 结构几何非线性样条无网格法第一种格式	254
8.3.2 结构几何非线性样条无网格法第二种格式	257
8.3.3 结构几何非线性样条无网格法第三种格式	258
8.4 结构双重非线性样条无网格法	259
8.4.1 结构双重非线性样条无网格法第一种格式	259
8.4.2 结构双重非线性样条无网格法第二种格式	260
8.4.3 结构双重非线性样条无网格法第三种格式	261
8.5 计算例题	262
参考文献	263
第九章 结构非线性动力分析的新理论、新方法	265
9.1 动力本构关系	265
9.2 瞬时变分原理	265
9.2.1 非线性动力问题	266
9.2.2 瞬时虚功原理	267
9.2.3 瞬时最小势能原理	268
9.2.4 Hamilton 原理	268
9.2.5 三者内在关系	270
9.3 瞬时广义变分原理	271
9.4 结构几何非线性动力问题	271
9.4.1 第一种格式	272
9.4.2 第二种格式	273
9.4.3 第三种格式	275
9.5 结构双重非线性动力问题	276
9.5.1 第一种格式	276
9.5.2 第二种格式	277
9.5.3 第三种格式	278

9.6	结构材料非线性动力问题	278
9.7	非线性动力响应的新算法	279
9.7.1	非线性动力方程	279
9.7.2	求解非线性增量动力方程的新算法	280
9.7.3	求解非线性动力方程的几种新算法	283
9.7.4	无条件稳定算法	286
9.8	计算例题	286
	参考文献	288
第十章	结构非线性稳定性分析的新方法	290
10.1	基本概念	290
10.1.1	结构失稳特性	290
10.1.2	判断结构稳定性的能量准则	291
10.1.3	结构动力稳定性	292
10.2	结构非线性静力稳定性问题	292
10.2.1	建模	292
10.2.2	算法	293
10.2.3	迭代收敛准则	299
10.3	结构非线性平衡路径跟踪	300
10.3.1	切线刚度法	300
10.3.2	特征刚度法	302
10.3.3	位移收敛控制增量迭代法	304
10.4	结构非线性动力稳定性问题	306
10.4.1	建模	306
10.4.2	算法	307
10.5	计算例题	309
	参考文献	312
第十一章	钢筋混凝土结构非线性分析的新方法	314
11.1	混凝土破坏准则	314
11.2	混凝土本构关系	317
11.2.1	弹塑性理论	317
11.2.2	弹粘塑性理论	321
11.2.3	弹塑性应变理论	323
11.3	钢筋本构关系	324
11.4	钢筋混凝土结构非线性分析的 QR 法	325
11.5	算法	327
11.5.1	增量初应力迭代法	327

11.5.2 增量变刚度迭代法	329
11.6 计算例题	330
参考文献	331
第十二章 结构损伤分析的新方法	332
12.1 基本概念	332
12.1.1 结构损伤	332
12.1.2 基本方程	332
12.1.3 损伤变量	334
12.1.4 应力应变关系	334
12.1.5 演化方程	335
12.1.6 损伤力学中的热力学基础	335
12.1.7 应力等效原理	335
12.2 损伤本构关系	336
12.2.1 弹性损伤本构关系	336
12.2.2 弹塑性损伤本构关系	336
12.2.3 弹塑性应变理论	339
12.2.4 弹粘塑性理论	340
12.3 混凝土损伤本构关系	340
12.3.1 混凝土弹性损伤本构关系	341
12.3.2 混凝土弹塑性损伤本构关系	341
12.3.3 混凝土弹粘塑性损伤本构关系	343
12.3.4 弹塑性应变理论	343
12.3.5 损伤演化方程	344
12.4 损伤变分原理	345
12.4.1 损伤变分原理	345
12.4.2 三类变量损伤广义变分原理	345
12.4.3 二类变量损伤广义变分原理	345
12.5 结构损伤分析的新方法	346
12.5.1 建模	346
12.5.2 算法	347
参考文献	347
第十三章 结构非线性分析的样条摄动法	348
13.1 材料非线性样条摄动法	348
13.1.1 摄动弹塑性变分原理	348
13.1.2 摄动弹塑性广义变分原理	349

13.1.3	摄动样条函数方法	351
13.2	几何非线性样条摄动法	352
13.2.1	摄动几何非线性变分原理	352
13.2.2	摄动样条函数方法	354
13.3	双重非线性样条摄动法	356
13.3.1	摄动双重非线性变分原理	356
13.3.2	摄动样条函数方法	358
13.4	计算例题	359
	参考文献	359
第十四章	结构不确定性分析的新方法	360
14.1	基本概念	360
14.2	结构随机力学	360
14.2.1	随机弹性变分原理	361
14.2.2	随机样条函数方法	362
14.3	结构随机非线性力学	366
14.3.1	随机塑性力学	366
14.3.2	随机几何非线性力学	369
14.3.3	随机双重非线性力学	373
14.4	结构模糊力学	375
14.4.1	模糊集合概念	375
14.4.2	模糊向量及模糊矩阵	376
14.4.3	模糊弹性变分原理	378
14.4.4	模糊样条函数方法	378
14.4.5	模糊刚度方程的解法	379
14.4.6	模糊摄动法	382
14.4.7	结构模糊分析	386
14.4.8	计算过程	387
14.5	结构模糊非线性力学	388
14.5.1	结构模糊弹塑性力学	388
14.5.2	模糊变分原理	392
14.5.3	模糊摄动非线性变分原理	394
14.5.4	模糊非线性分析的样条摄动法	395
14.6	结构随机模糊力学	396
14.6.1	随机模糊变分原理	397
14.6.2	随机模糊样条函数方法	398

14.7 结构随机模糊振动	399
14.7.1 随机振动	399
14.7.2 随机模糊振动	401
14.8 附录	401
14.8.1 随机变量	401
14.8.2 模糊变量	403
参考文献	407
第十五章 结构可靠度分析的新方法	408
15.1 基本概念	408
15.1.1 结构可靠度	408
15.1.2 结构可靠度度量的三个水准	409
15.1.3 结构生命全过程可靠度	409
15.1.4 结构功能函数	409
15.1.5 结构失效概率	410
15.1.6 结构可靠指标	410
15.1.7 求可靠度指标 β 的方法	411
15.1.8 结构可靠度理论研究的发展方向	412
15.2 结构静力可靠度	413
15.2.1 基本原理	413
15.2.2 随机样条函数方法	415
15.2.3 随机模糊函数方法	417
15.2.4 结构时变可靠度分析的随机样条函数方法	418
15.3 结构动力可靠度	419
15.3.1 基本原理	419
15.3.2 结构动力可靠度分析的样条函数方法	419
15.3.3 确定结构动力可靠度	420
参考文献	422
第十六章 结构抗震分析的新方法	423
16.1 基本概念	423
16.1.1 抗震的基本对策	423
16.1.2 结构抗震设防目标	423
16.1.3 抗震设计	424
16.1.4 地震作用理论	424
16.2 恢复力模型	425
16.3 结构非线性地震反应分析的新方法	426
16.3.1 建模	426

16.3.2 算法	427
16.4 结构不确定性地震反应分析的新方法	431
16.4.1 结构随机非线性地震反应分析的新方法	431
16.4.2 结构随机模糊非线性地震反应分析的新方法	432
16.5 结构抗震可靠度分析的新方法	432
16.5.1 结构“小震不坏”的可靠度	433
16.5.2 结构“中震可修”的可靠度	433
16.5.3 结构“大震不倒”的可靠度	433
16.5.4 结构抗震可靠度公式	434
16.6 工程实例分析	434
参考文献	439
第十七章 高层与超高层建筑结构分析的新方法	440
17.1 高层建筑结构分析的 QR 法	440
17.1.1 QR 法	441
17.1.2 高层建筑筒体结构分析的 QR 法	444
17.1.3 高层建筑空间结构分析的 QR 法	447
17.1.4 带转换层的高层建筑结构的新方法	447
17.2 结构非线性分析的 QR 法	448
17.2.1 建模	448
17.2.2 算法	448
17.2.3 高层与超高层建筑结构非线性稳定性分析的新方法	448
17.2.4 结构损伤分析的新方法	449
17.3 Pushover-QR 法	449
17.3.1 Pushover 法	449
17.3.2 Pushover-QR 法	449
17.4 结构非线性地震反应分析的新方法	450
17.4.1 建模	450
17.4.2 算法	450
17.4.3 简化算法	455
17.5 结构抗震能力评估分析的 QR 法	459
17.5.1 基本原理	459
17.5.2 等效单自由度体系动力方程的解法	460
17.5.3 结构抗震能力评估分析步骤	462
17.6 工程实例分析: 南宁香格里拉大楼地震反应	463
17.7 工程实例分析: 南宁国际会展中心地震反应	468