



# 智能结构分析 的新理论新方法

秦荣著



科学出版社

# 智能结构分析的新理论新方法

秦 荣 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要介绍智能结构分析的新理论新方法,重点介绍作者研究的新成果。全书共二十六章,内容包括:基本概念,压电智能非线性本构关系,压电热动力变分原理,智能结构理论,压电智能结构线性及非线性分析的新理论新方法,非线性分析的新算法,压电材料参数识别分析的新方法,电磁热弹塑性体系变分原理,形状记忆合金及形状记忆聚合物智能变分原理,形状记忆智能结构分析的新理论新方法,智能结构的动力稳定性、动力承载能力及体系可靠度分析的新理论新方法,大型复杂智能结构分析的新理论新方法及其工程应用。

本书是作者的一部科研成果专著,内容丰富、新颖、富有创造性,不仅有理论意义,而且有应用价值。

本书可供航空航天工程、土木工程、水利工程、防灾减灾抗灾工程、国防工程、航海工程及工程力学等专业的科技人员,高校师生、研究生学习及参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能结构分析的新理论新方法 / 秦荣著. —北京:科学出版社,2014  
ISBN 978-7-03-040100-7

I. ①智… II. ①秦… III. ①智能结构-结构分析 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 045349 号

责任编辑:童安齐 袁莉莉 / 责任校对:王万红  
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

\*

2014年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:31 1/2

字数:743 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 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

智能结构体系是一种仿生结构体系,它集主结构、智能传感器、智能驱动器及智能控制器于一体,具有结构健康自诊断自监控、环境自适应、损伤自愈合自修复的生命特征及智能功能,在危险发生时能自己保护自己。由此可知,智能结构具有生命及智能,可保证结构安全可靠及经济合理,突破了传统结构体系。

智能结构已在航空航天、精密仪器、微型机电系统、机器人、汽车、船舶、土木工程、水利水电工程、建筑工程、国防工程及防灾减灾抗灾工程方面展现了广泛的应用前景,引起世界发达国家的极大重视。近十多年来,美国、日本、英国、德国等许多国家投入大量的人力、物力及财力用于智能结构的研究及探索,使智能结构得到迅速发展,研制了不少智能材料,但其研究主要集中在智能材料及简单智能结构方面的研究,主要利用传统方法及实验方法进行研究,还没有系统地建立智能结构分析及设计的新理论新方法。

智能结构分析的新理论新方法是推动智能结构发展的重要理论基础,它是结构健康诊断与监控智能体系、结构振动与灾害反应智能控制体系、结构局部损伤与修复智能体系及结构安全监控智能体系的重要理论基础。因此,智能结构分析的新理论新方法是极重要的研究方向,它是当前国际前沿的研究领域。目前,国内外对智能结构的分析主要采用有限元法。有限元法是一种网格法,利用它分析复杂的智能结构有巨大困难及严重缺陷。另外,目前国内外对智能结构分析在力场方面,主要考虑智能结构线弹性问题,而考虑智能结构非线性(几何非线性及材料非线性)问题的文献很少见,根本没有分析智能结构双重非线性问题的研究成果,另外,智能本构关系是智能结构分析的基础,目前问题很多,例如:①目前国内外在压电智能结构方面只有线弹性智能本构关系,没有建立弹塑性/弹黏塑性智能本构关系,无法分析压电智能结构力场非线性问题。②在形状记忆合金本构关系方面,国内外从微观力学、细观力学及宏观力学出发做过许多研究,对形状记忆合金智能结构的发展有很大的贡献。但存在许多问题:从微观力学及细观力学出发建立的本构关系,测量参数有很大的困难,在工程上无法应用;从宏观力学出发建立的本构关系,仍利用经典塑性本构关系描述塑性行为,这对形状记忆合金智能结构非线性分析带来巨大困难及严重缺陷。对于大型复杂智能结构,必须进行双重非线性分析才能保证它的安全可靠及经济合理。这显然需要另外创立智能结构分析的新理论新方法。

智能结构体系是 21 世纪世界各国列为优先发展的研究领域及高新科技产业之一,也是当前结构防灾减灾抗灾的前沿研究领域。21 世纪是智能结构时代,智能结构分析的新理论新方法是当前国际前沿研究领域。由此可见,致力于研究智能结构分析的新理论新方法有重要意义,不仅是长远之计,也是当务之急。

1998 年以来,作者针对智能结构分析存在的问题,致力于研究智能结构分析的新理论新方法,获得一系列新成果:①在理论上,对智能结构分析时不仅考虑力场及电场线性问题,而且还考虑力场及电场非线性问题,创立了智能结构新的智能本构关系,新的智能

变分原理及新的智能广义变分原理。②在方法上,对智能结构分析不用有限元法,而采用样条函数方法,创立了智能结构分析的新方法:智能样条有限点法、智能样条子域法、智能QR法、智能样条加权残数法、智能样条边界元法及智能样条无网格法。这些新方法比有限元法优越,克服了有限元法分析复杂智能结构带来的巨大困难及严重缺陷,突破了有限元法的局限性,为智能结构分析及设计开拓了新途径。③在算法上,利用样条加权残数法创立了智能结构振动控制及动力反应的新算法。由上述新成果可知,作者创立了智能结构分析的新理论新方法。

2005年,作者出版了一部专著——《智能结构力学》,这是国内外研究智能结构力学的第一部专著,奠定了智能结构力学的新理论基础。2005年后(2005~2012年),作者在智能本构关系、智能广义变分原理、智能结构分析的新方法、智能结构振动控制、智能结构非线性分析的新方法、智能结构动力极限承载能力、智能结构体系可靠性及电磁热弹塑性分析的新理论新方法方面,又获得了一系列新成果。2012年3月广西科技厅组织成果评审,同行专家评审认为本成果创立的智能结构分析的新理论新方法,为国内外首创,达到了国际领先水平。作者决定在上述基础上出版一部专著:《智能结构分析的新理论新方法》。

本书是在上述成果基础上撰写成的,是作者科研成果的总结,是一部科研成果专著。主要介绍智能结构分析的新理论新方法,内容丰富,新颖,富有创造性,因此对促进智能结构的科技进步有重要意义。

本书是在《智能结构力学》的基础上修改及补充写成的,有突破性的新进展,创立了智能结构分析的新理论新方法。本书共二十六章。第一章主要介绍智能材料性质、智能结构的应用及发展前途。第二章主要介绍压电智能本构关系,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果:压电弹塑性智能本构关系、压电热弹塑性智能本构关系、压电非线性智能本构关系(力场电场都是非线性的)、宏观本构关系与微观模型的关系,这些新成果填补了这方面的空白,奠定了智能结构非线性分析的新理论基础。第三章主要介绍智能变分原理及智能广义变分原理。在简介基本概念的基础上重点介绍作者的新成果:压电热双重非线性瞬时广义变分原理。这个变分原理是作者利用加权残数法创立的,填补了这方面的空白,它是一个统一的新变分原理,对智能结构双重非线性问题、几何非线性问题、材料非线性问题及线弹性问题的分析都适用,奠定了智能结构分析的新理论基础。

第四至七章主要介绍压电智能结构线弹性分析的新方法,重点介绍作者的新成果:智能样条有限点法、智能样条无网格法及智能QR法。这些新方法突破了有限元法,为智能结构分析开拓了新途径。第八至十章主要介绍压电智能结构非线性分析的新方法,重点介绍作者新成果:智能非线性样条有限点法、智能非线性无网格法及智能非线性QR法,这些新方法突破了有限元法,为压电智能结构非线性分析开拓了新途径。第十一至十四章主要介绍智能结构非线性分析的新算法、压电材料参数识别分析的新方法、电磁热弹塑性体系分析的新理论新方法。

第十五至十七章主要介绍形状记忆智能结构分析的新理论新方法,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果:形状记忆合金智能本构关系、形状记忆聚合物智能本构关系、智能变分原理及智能结构分析的新方法。这些新理论新方法,为形状记忆智能结

构分析开拓了新途径。第十八章主要介绍压电智能结构动力稳定性分析的新方法。

第十九至二十一章主要介绍压电智能结构振动控制的新算法,重点介绍作者的新成果:智能控制-样条加权残数法、最优智能控制-样条加权残数法及模糊控制算法。

第二十二至二十六章主要介绍大型复杂智能结构分析的新理论新方法,其为大型复杂智能结构的分析开拓了新途径。其中,第二十三章主要介绍智能结构稳定性分析的新方法,其为智能结构稳定性分析开拓了新途径。第二十四章主要介绍智能结构动力极限承载能力分析的新理论新方法,其为智能结构极限分析开拓了新途径。第二十五章主要介绍智能结构体系可靠度分析的新理论新方法,其为智能结构体系可靠性分析开拓了新途径。

1998年以来,上述内容对作者的硕士生及博士生讲授过,反映很好。至今在这方面培养了3位博士及9位硕士。

本书获得广西大学土木建筑工程学院及广西大学“211工程”项目资助出版,特此对广西大学及土木建筑工程学院表示衷心感谢!

在本书的写作过程中,作者得到了许多同行的热情关照及大力支持,作者指导的许多硕士生及博士生利用这些新理论新方法编制程序,算过许多例题,其中秦俊、李双蓓及文红为本书做过许多有益的工作,特此对他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请指正!

# 目 录

## 前言

第一章 基本概念	1
1.1 压电智能材料	1
1.2 形状记忆合金	2
1.2.1 形状记忆效应	2
1.2.2 马氏体相变	3
1.2.3 超弹性效应	3
1.2.4 SMA	4
1.3 磁致形状记忆合金	4
1.4 电(磁)流变体智能材料	5
1.4.1 电流变体	5
1.4.2 磁流变体	6
1.4.3 ERF/MRF 的特性	6
1.4.4 ERF/MRF 研究及应用	6
1.5 铁电微观模型	7
1.6 压电陶瓷非线性成因	8
1.6.1 压电陶瓷位移的微观机理	8
1.6.2 非线性成因	10
1.6.3 非线性及迟滞的影响因素	11
1.7 应用前景	12
1.7.1 智能结构在航空航天工程中的应用	12
1.7.2 智能结构在土木工程中的应用	13
1.7.3 智能结构在机器人中的应用	14
1.8 展望	14
参考文献	15
第二章 压电非线性智能本构关系	16
2.1 智能结构仿生学模型	16
2.2 智能线弹性-压电本构关系	17
2.3 弹塑性-压电本构关系	18
2.3.1 弹塑性-压电本构关系	19
2.3.2 热弹塑性-压电本构关系	20
2.4 非线性-压电本构关系	24
2.5 压电宏观本构关系与微观模型的关系	26

2.5.1	本构关系	26
2.5.2	电畴翻转对宏观物理量的影响	26
2.5.3	电畴翻转驱动力与体积分数的关系	27
2.5.4	压电非线性本构行为的计算方法	28
	参考文献	29
<b>第三章</b>	<b>压电热动力智能变分原理</b>	<b>31</b>
3.1	加权残数法	31
3.2	压电热弹性动力问题	32
3.2.1	动力方程——应力与体力关系	32
3.2.2	电场控制方程	32
3.2.3	几何方程——应变与位移关系	32
3.2.4	热场控制方程	32
3.2.5	本构方程	32
3.2.6	边界条件	33
3.2.7	初始条件	33
3.3	压电热弹性瞬时变分原理	33
3.3.1	瞬时势能原理	33
3.3.2	瞬时余能原理	37
3.4	压电热弹性瞬时广义变分原理	38
3.4.1	第一种压电热弹性九类变量瞬时广义变分原理	38
3.4.2	第二种压电热弹性九类变量瞬时广义变分原理	40
3.4.3	等价原理	41
3.4.4	压电热弹性体的势能密度及余能度	41
3.4.5	第三种压电热弹性广义变分原理	41
3.5	压电热弹性瞬时广义虚功原理	41
3.6	压电智能结构几何非线性瞬时变分原理	42
3.6.1	基本方程	42
3.6.2	热压电智能结构几何非线性瞬时变分原理	43
3.6.3	热压电智能结构几何非线性瞬时广义变分原理	43
3.6.4	压电弹性体的势能密度及余能密度	44
3.7	压电智能结构双重非线性瞬时变分原理	45
3.7.1	基本方程	45
3.7.2	压电智能双重非线性瞬时变分原理	46
3.7.3	压电智能结构双重非线性瞬时广义变分原理	47
3.7.4	压电弹塑性体的势能密度及余能密度	47
	参考文献	48
<b>第四章</b>	<b>压电智能梁动力问题</b>	<b>50</b>
4.1	智能梁理论	50



4.1.1	位移模式	50
4.1.2	几何方程	51
4.1.3	智能本构关系	51
4.1.4	智能变分原理	52
4.2	智能样条有限点法	52
4.2.1	样条离散化	52
4.2.2	建立智能样条离散化泛函	54
4.2.3	建立智能样条离散化动力方程	55
4.3	智能样条子域法	55
4.3.1	划分子域	56
4.3.2	建立智能样条子域	56
4.3.3	建立智能梁样条离散化动力方程	58
4.4	智能梁振动主动控制	58
4.4.1	基本原理	58
4.4.2	智能结构振动主动控制算法	59
4.4.3	智能结构分析的新方法	59
4.5	计算例题	60
4.6	附录:样条函数	63
4.6.1	样条函数	63
4.6.2	智能梁	69
	参考文献	73
<b>第五章</b>	<b>智能样条有限点法</b>	<b>74</b>
5.1	智能板壳理论	74
5.1.1	位移模式	74
5.1.2	几何方程	75
5.1.3	智能扁壳本构关系	75
5.1.4	智能变分原理	76
5.2	智能样条有限点法	77
5.2.1	单样条有限点法	77
5.2.2	双样条有限点法	81
5.2.3	双向单样条有限点法	84
5.3	计算例题	86
5.4	附录	86
5.4.1	位移模式	86
5.4.2	几何方程	87
5.4.3	样条形函数	89
5.4.4	应变转换矩阵	92
5.4.5	积分公式	94

参考文献 .....	95
<b>第六章 智能样条无网格法 .....</b>	<b>97</b>
6.1 基本原理 .....	97
6.1.1 径向样条基函数 .....	97
6.1.2 样条无网格法 .....	100
6.2 智能弹性体问题 .....	105
6.3 智能板壳问题 .....	108
6.4 计算例题 .....	113
参考文献 .....	115
<b>第七章 智能 QR 法 .....</b>	<b>117</b>
7.1 基本原理 .....	117
7.2 智能板壳分析的 QR 法 .....	119
7.3 智能板壳振动控制 .....	124
7.4 计算例题 .....	125
7.5 附录 .....	128
7.5.1 智能梁单元 .....	128
7.5.2 智能板单元 .....	131
7.5.3 智能板壳单元 .....	134
参考文献 .....	136
<b>第八章 压电智能结构几何非线性动力问题 .....</b>	<b>138</b>
8.1 智能非线性动力变分原理 .....	138
8.1.1 基本方程 .....	138
8.1.2 智能结构几何非线性瞬时势能原理 .....	139
8.1.3 智能结构几何非线性瞬时广义变分原理 .....	139
8.2 智能梁几何非线性问题 .....	140
8.2.1 基本理论 .....	140
8.2.2 非线性样条有限点法 .....	141
8.2.3 小结 .....	151
8.3 智能板壳几何非线性问题 .....	152
8.3.1 基本理论 .....	152
8.3.2 非线性样条有限点法 .....	154
8.3.3 小结 .....	158
8.4 智能圆板问题 .....	159
8.5 计算例题 .....	163
参考文献 .....	166
<b>第九章 压电智能结构材料非线性动力问题 .....</b>	<b>167</b>
9.1 压电智能梁材料非线性动力问题 .....	167
9.1.1 本构关系 .....	167

9.1.2	几何方程 .....	169
9.1.3	变分原理 .....	169
9.1.4	样条有限点法 .....	169
9.2	压电智能板壳材料非线性动力问题 .....	171
9.2.1	压电非线性本构关系 .....	171
9.2.2	几何方程 .....	172
9.2.3	变分原理 .....	172
9.2.4	智能样条无网格法 .....	173
9.3	压电陶瓷非线性断裂问题 .....	173
9.3.1	智能 QR 法 .....	174
9.3.2	断裂问题 .....	175
9.4	计算例题 .....	176
	参考文献 .....	177
<b>第十章</b>	<b>智能压电结构双重非线性动力问题 .....</b>	<b>178</b>
10.1	基本理论 .....	178
10.2	建模的新方法 .....	178
10.3	新算法 .....	183
	参考文献 .....	183
<b>第十一章</b>	<b>智能结构动力反应分析的新算法 .....</b>	<b>184</b>
11.1	结构线弹性动力反应分析的新算法 .....	184
11.1.1	基本方程 .....	184
11.1.2	建立递推格式 .....	185
11.1.3	建立无条件稳定算法(5SWRM-1) .....	187
11.1.4	建立条件稳定算法 .....	188
11.2	结构非线性动力分析的新算法 .....	189
11.2.1	非线性动力方程 .....	190
11.2.2	第三种样条递推算法 .....	191
11.2.3	几种新算法 .....	195
11.3	状态方程的算法 .....	198
11.3.1	精细算法 .....	198
11.3.2	样条加权残数法(一) .....	200
11.3.3	样条加权残数法(二) .....	203
11.4	样条无条件稳定算法 .....	204
11.5	计算例题 .....	205
	参考文献 .....	205
<b>第十二章</b>	<b>智能结构静力非线性分析的新算法 .....</b>	<b>206</b>
12.1	结构非线性刚度方程 .....	206
12.1.1	第一种格式 .....	207

12.1.2 第二种格式/第三种格式 .....	207
12.2 样条递推法 .....	208
12.2.1 第一种样条递推算法 .....	208
12.2.2 第二种样条递推法 .....	211
12.2.3 第三种样条递推法 .....	211
12.3 样条增量迭代法 .....	212
12.3.1 第一种增量迭代法 .....	212
12.3.2 第二种增量迭代法 .....	214
12.3.3 第三种增量迭代法 .....	214
12.4 材料非线性分析的新算法 .....	215
12.4.1 样条初应力递推法 .....	215
12.4.2 样条初应力增量迭代法 .....	215
12.4.3 样条变刚度增量迭代法 .....	215
12.5 双重非线性分析的新算法 .....	216
参考文献 .....	217
<b>第十三章 压电材料参数识别分析的新方法 .....</b>	<b>218</b>
13.1 概述 .....	218
13.2 参数识别模型 .....	219
13.3 非线性最小二乘问题的算法 .....	220
13.3.1 牛顿法 .....	220
13.3.2 高斯-牛顿法 .....	221
13.3.3 单位步长 Levenberg-Marquardt 方法 .....	222
13.3.4 利用信赖域技巧的 Levenberg-Marquardt 方法 .....	222
13.4 灵敏度计算 .....	223
13.4.1 求导数法 .....	223
13.4.2 差分法 .....	227
13.5 误差分析 .....	227
13.6 材料参数识别分析的算例 .....	228
13.6.1 均质板 $E, \mu$ 的识别 .....	228
13.6.2 压电双晶板 $e_{31}$ 的识别 .....	233
13.6.3 压电层合板 $D_{11}, D_{12}, E$ 的识别 .....	239
13.7 材料参数识别分析的新方法 .....	243
13.7.1 建立结构分析的新模型 .....	243
13.7.2 建立材料参数识别的新算法 .....	243
13.8 本章小结 .....	245
参考文献 .....	245
<b>第十四章 电磁热体系非线性问题 .....</b>	<b>248</b>
14.1 电磁热弹性动力问题 .....	248

14.2	电磁热弹性瞬时变分原理	250
14.2.1	瞬时势能原理	250
14.2.2	瞬时余能原理	251
14.3	电磁热弹性瞬时广义变分原理	252
14.3.1	第一种电磁热弹性瞬时广义变分原理	252
14.3.2	第二种电磁热弹性瞬时广义变分原理	252
14.3.3	等价原理	253
14.4	电磁热弹性瞬时广义虚功原理	253
14.5	电磁热弹性几何非线性瞬时变分原理	253
14.5.1	基本方程	253
14.5.2	电磁热弹性几何非线性瞬时势能原理	254
14.5.3	电磁热弹性几何非线性瞬时广义变分原理	254
14.6	电磁热双重非线性瞬时广义变分原理	255
14.6.1	基本方程	255
14.6.2	电磁热双重非线性变分原理	255
14.6.3	电磁热双重非线性瞬时广义变分原理	255
14.6.4	电磁热弹塑性体的势能密度及余能密度	255
14.7	电磁热体系分析的新方法	256
	参考文献	257
<b>第十五章</b>	<b>形状记忆合金宏观本构关系</b>	<b>258</b>
15.1	基于热力学的本构关系	258
15.2	带有塑性理论特点的本构关系	259
15.3	SMA 热弹塑性本构关系	260
15.3.1	热弹塑性本构关系	260
15.3.2	弹塑性应变理论	261
15.3.3	弹塑性矩阵	262
15.4	热弹塑性-相变智能本构关系	263
15.4.1	材料性质与 $T$ 及 $\xi$ 无关	263
15.4.2	材料性质与 $T$ 及 $\xi$ 有关	264
15.5	热弹黏塑性-相变本构关系	266
15.5.1	弹黏塑性应变理论	266
15.5.2	热弹黏塑性-相变本构关系	268
15.6	SMA 非线性智能本构关系	269
15.6.1	一维本构关系	269
15.6.2	三维本构关系	270
15.6.3	考虑塑性应变影响的 SMA 本构关系	271
15.7	附录: SMA 相变行为	272
	参考文献	274

<b>第十六章 形状记忆聚合物宏观本构关系</b> .....	275
16.1 基本概念 .....	275
16.1.1 SMP 形状记忆效应 .....	275
16.1.2 SMP 形状记忆效应的基本原理 .....	275
16.1.3 SMP 形状记忆效应的机械黏弹性模型 .....	277
16.2 SMP 宏观智能本构关系 .....	281
16.2.1 一维本构关系 .....	281
16.2.2 三维本构关系 .....	283
16.3 SMP 材料性能与温度的关系 .....	284
16.3.1 弹性模量与温度的关系 .....	285
16.3.2 材料强化系数与温度的关系 .....	286
16.3.3 黏性系数与温度的关系 .....	286
16.3.4 延迟时间与温度的关系 .....	287
16.3.5 屈服应力与温度的关系 .....	287
参考文献 .....	288
<b>第十七章 形状记忆智能结构分析的新方法</b> .....	289
17.1 SMA 智能结构材料非线性问题 .....	289
17.1.1 SMA 本构关系 .....	289
17.1.2 结构变形控制 .....	289
17.2 SMA 智能结构双重非线性问题 .....	294
17.2.1 SMA 本构关系 .....	294
17.2.2 非线性几何方程 .....	294
17.2.3 变分方程 .....	294
17.2.4 建模方法 .....	295
17.2.5 算法 .....	297
17.3 计算例题 .....	297
17.4 智能高拱坝 .....	298
17.4.1 智能混凝土设计 .....	298
17.4.2 智能高拱坝分析的新理论新方法 .....	299
参考文献 .....	299
<b>第十八章 智能结构动力稳定性</b> .....	300
18.1 非线性几何方程 .....	300
18.2 非线性本构关系 .....	300
18.3 智能结构稳定性 .....	300
18.3.1 建模 .....	300
18.3.2 算法 .....	301
18.4 计算例题 .....	301
参考文献 .....	303

<b>第十九章 智能控制的新算法</b> .....	305
19.1 压电智能结构振动主动控制原理 .....	305
19.2 智能结构振动主动控制的新算法 .....	306
19.2.1 新模型 .....	306
19.2.2 新算法 .....	307
19.3 智能控制-样条加权残数法 .....	307
19.3.1 计算原理 .....	307
19.3.2 新算法 .....	310
19.4 最优智能控制-样条加权残数法 .....	310
19.5 模糊控制原理 .....	311
19.5.1 模糊控制组成 .....	311
19.5.2 受控系统模型 .....	312
19.6 结构振动的模糊控制算法 .....	313
19.6.1 普通模糊控制算法 .....	313
19.6.2 变增益模糊控制算法 .....	315
19.6.3 协调模糊控制算法 .....	316
19.7 计算例题 .....	318
19.8 钢结构非线性地震反应的压电变阻尼智能控制 .....	329
19.8.1 结构模型 .....	329
19.8.2 3层钢结构非线性地震反应的压电变阻尼智能控制 .....	333
19.8.3 20层钢结构非线性地震反应的压电变阻尼智能控制 .....	337
参考文献 .....	341
<b>第二十章 智能框架静力控制分析的新方法</b> .....	343
20.1 概述 .....	343
20.2 建立考虑高阶剪切影响的压电梁单元刚度矩阵 .....	344
20.2.1 考虑高阶剪切影响的位移函数 .....	344
20.2.2 考虑高阶剪切影响的位移和应变形函数矩阵 .....	347
20.2.3 压电梁的电势和场强形函数矩阵 .....	348
20.2.4 考虑高阶剪切影响的单元刚度矩阵 .....	348
20.3 建立考虑初始几何缺陷及 $P-\Delta$ 效应的压电梁柱单元刚度矩阵 .....	351
20.4 压电智能平面钢框架结构动力分析的 QR 法 .....	353
20.4.1 压电智能框架结构的样条位移函数及样条电势函数 .....	353
20.4.2 QR 法变换 .....	354
20.4.3 建立压电梁柱单元势能泛函 .....	354
20.4.4 利用变分原理建立压电智能框架结构分析的 QR 法动力方程 .....	355
20.4.5 压电智能框架结构 QR 法静力控制分析 .....	355
20.5 压电层合梁一阶剪切理论解析法 .....	356
20.5.1 压电层合梁的平衡方程 .....	356

20.5.2 压电筒支层合梁的求解 .....	357
20.6 计算例题 .....	358
20.6.1 验证算例 .....	358
20.6.2 压电智能框架结构变形控制分析 .....	362
20.7 本章小结 .....	367
参考文献 .....	368
<b>第二十一章 智能框架动力控制分析的新方法 .....</b>	<b>369</b>
21.1 概述 .....	369
21.2 智能结构振动主动控制原理 .....	370
21.3 结构振动主动控制算法 .....	371
21.3.1 线性二次型(LQR)经典最优控制 .....	371
21.3.2 模态控制 .....	375
21.4 压电堆工作原理 .....	376
21.5 计算例题 .....	377
21.5.1 振动频率和振型分析 .....	377
21.5.2 压电堆式驱动器控制框架变形分析 .....	379
21.5.3 结构振动控制分析 .....	381
21.6 本章小结 .....	393
参考文献 .....	394
<b>第二十二章 智能高层与超高层建筑结构分析的新方法 .....</b>	<b>396</b>
22.1 智能高层结构分析的新方法 .....	396
22.2 智能结构双重非线性分析的新方法 .....	399
22.3 智能高层结构稳定性分析的新方法 .....	401
22.4 智能高层结构振动主动控制 .....	401
22.5 计算例题 .....	402
22.6 附录 .....	402
22.6.1 智能梁单元 .....	402
22.6.2 智能板壳单元 .....	404
22.6.3 其他单元 .....	406
22.6.4 非线性 QR 法 .....	406
参考文献 .....	407
<b>第二十三章 智能结构稳定性分析的新方法 .....</b>	<b>408</b>
23.1 基本概念 .....	408
23.1.1 结构失稳特性 .....	408
23.1.2 判断结构稳定性的能量准则 .....	409
23.1.3 结构动力稳定性 .....	410
23.2 结构非线性静力稳定性问题 .....	410
23.2.1 建模 .....	410



23.2.2 算法	411
23.2.3 迭代收敛准则	415
23.3 结构非线性平衡路径跟踪算法	416
23.3.1 切线刚度法	416
23.3.2 特征刚度法	418
23.3.3 位移收敛控制增量迭代法	420
23.4 结构非线性静力稳定性简化算法	422
23.4.1 基本原理	422
23.4.2 计算步骤	423
23.4.3 算例	423
23.5 结构非线性动力稳定性问题的新模型	424
23.6 结构非线性动力稳定性问题的新算法	425
23.7 求解结构动力失稳临界荷载的实用方法	428
23.7.1 动力时程分析法	428
23.7.2 静力变换法	428
23.7.3 静力法	428
23.7.4 几点注意	429
23.8 计算例题	430
参考文献	430
<b>第二十四章 智能结构承载能力分析的新方法</b>	<b>432</b>
24.1 基本概念	432
24.1.1 基本理论	432
24.1.2 塑性极限理论	432
24.1.3 塑性铰模型	434
24.2 智能结构塑性极限分析的塑性铰模型—QR法	434
24.2.1 一阶塑性铰模型—QR法	435
24.2.2 二阶塑性铰模型—QR法	436
24.3 精化塑性铰模型—QR法	438
24.4 智能结构塑性极限分析的弹性调整—样条无网格法	438
24.4.1 一阶弹性调整—样条无网格法/QR法	439
24.4.2 二阶弹性调整—样条无网格法/QR法	442
24.5 智能结构动力极限承载能力分析的样条无网格法	443
24.5.1 建立新建模	443
24.5.2 选用新算法	444
24.6 一阶动力弹性调整—样条无网格法/QR法	445
24.6.1 计算原理	445
24.6.2 计算步骤	449
24.7 二阶动力弹性调整—样条无网格法/QR法	450
24.7.1 计算原理	450