



结构振动控制

—— 主动、半主动和智能控制

欧进萍 著



科学出版社

www.sciencep.com

TU311.3

0240

结构振动控制

——主动、半主动和智能控制

欧进萍 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地总结和阐述了土木工程结构的主动、半主动和智能控制理论、方法、技术、系统和工程应用的主要研究成果。第1、2章是动态系统的重要特性和主动控制算法;第3~5章是动态系统的智能控制算法;第6~8章是以控制装置为核心的结构主动和半主动控制系统;第9~11章是以智能驱动和阻尼材料及其控制装置为核心的结构智能控制系统;第12章是结构主动、半主动和智能控制系统的设计方法。附录介绍了土木工程结构振动控制的 Benchmark 模型和性能评价体系。

本书可供从事土木工程、水利工程、海洋与船舶工程、航空航天工程、机械设计制造与自动化、材料科学与工程、力学研究、设计与制造的广大科技人员参考,可作为上述专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构振动控制:主动、半主动和智能控制/欧进萍著. —北京:科学出版社,2003. 11

ISBN 7-03-012117-1

I. 结… II. 欧… III. 土木工程-工程结构-振动控制
IV. TU311. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 075516 号

责任编辑:杨家福 刘剑波/责任校对:宋玲玲

责任印制:刘士平/封面设计:张 放

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年11月第一版 开本:B5(720×1000)

2003年11月第一次印刷 印张:35 1/2

印数:1-5 000 字数:682 000

定价:66.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

土木工程结构振动控制可以有效地减轻结构在车辆、风、海浪、流冰、地震等动力作用下的反应和损伤积累,有效地提高结构的抗振能力和抗灾性能,是结构抗振减振和防灾减灾积极有效的方法和技术。

土木工程结构振动控制的研究和应用已有 30 余年的历史,其研究和应用大体上分为三个领域:基础隔震、被动耗能减振以及主动、半主动和智能控制。隔震桥梁和建筑已在国内外建成了上千座;被动耗能减振继基础隔震之后逐步走向成熟和工程应用。结构主动、半主动和智能控制以其严密的科学理论、优良的振动控制效果、更宽广的适应范围和可灵活选择的控制目标,以及多学科交叉与高新技术融合的特征吸引了国内外众多科技工作者的研究和应用兴趣。也正因为多学科科技工作者的广泛交流、合作与联合研究和开发,大大缩短了土木工程这一富有挑战性的领域从研究走向工程应用的历程。迄今为止,国内外已建成 70 余座主动、半主动和智能控制的高层建筑、电视塔和桥梁等大型结构,这些结构在台风和地震作用下初步经受了考验,显示出了良好的抗风和抗震性能。随着现代科学技术的发展,结构振动控制不仅正在形成多学科交叉的新型分支学科,而且还将形成振动控制装备的新兴产业,显示出了智能结构系统的美好前景。

本书与作者同期出版的《结构振动控制——被动耗能减振》互成姊妹篇,系统地总结和阐述了近 30 年来国内外研究和发展的结构主动、半主动与智能控制的理论、方法、技术、装备、系统和工程应用的主要研究成果,以及作者及其合作者相关的研究成果。全书包括绪论、1~12 章和附录。绪论较全面地综述了结构主动、半主动与智能控制研究与应用的主要进展和发展趋势。第 1 章动态系统及其重要特性,介绍了结构振动控制的动态系统模型以及系统稳定性、能控性和能观性等重要特性。第 2 章结构振动的主动控制算法,介绍了结构振动控制的极点配置、线性二次型最优控制、模态控制、滑移模态、 H_2 和 H_∞ 等控制算法。这些控制算法是结构主动控制系统,同时也是半主动和智能控制系统的控制器设计的理论基础。第 3 章结构振动的模糊控制,介绍了模糊控制器的基本结构、实测信息的模糊化方法、模糊逻辑推理的基本方法以及模糊控制规则的提取方法。第 4 章结构振动控制的神经网络辨识与控制,介绍了神经网络基本原理、BP 网络和变结构 BP 网络、Elman 网络和变结构 Elman 网络、双向模糊神经网络以及结构振动控制的神经网络建模和模糊神经网络控制算法。第 5 章结构振动的模糊神经网络遗传优化控制,介绍了遗传算法基本理论、模糊神经网络优化的实数编码和混合编码遗传算法及其在结构振动控制中的应用。第 3~5 章是与第 1~2 章并行的结构振动控制的智能建模与控

制算法。第 6 章结构主动质量阻尼 (AMD) 控制系统,介绍了 AMD 控制系统的减振机理、控制装置、系统模型、试验方法、参数分析、反应分析与设计方法,以及日本 Otis Shibyama 高层建筑和我国南京电视塔 AMD 控制系统等两个典型工程应用实例。第 7 章结构主动变刚度控制系统,介绍了结构主动变刚度控制的基本原理、装置、控制算法与反应分析方法,以及日本 Kajima 三层办公楼主动变刚度控制系统(世界上目前惟一的工程应用实例)。第 8 章结构主动变阻尼控制系统,介绍了结构主动变阻尼控制原理、装置、系统模型、半主动控制算法、反应分析与试验方法,以及日本 Kajima 五层办公楼和美国 I-35 桥梁结构主动变阻尼控制系统等两个典型工程应用实例。第 9 章结构磁流变阻尼控制系统,介绍了磁流变液及其阻尼装置的特性、力学模型、设计与制备,以及磁流变阻尼减振与隔震系统和反应分析方法;介绍了斜拉索磁流变阻尼控制反应分析方法以及我国山东滨州黄河公路大桥斜拉索磁流变阻尼控制系统设计和洞庭湖大桥斜拉索磁流变阻尼控制系统等两个典型的工程应用实例。第 10 章结构压电驱动和压电变摩擦阻尼控制系统,介绍了压电陶瓷及其驱动器的特性、本构关系和制备,以及结构振动的压电陶瓷驱动控制的方法和技术,结构振动控制的压电变摩擦阻尼器构造、设计与系统反应分析方法。第 11 章结构形状记忆合金(SMA)驱动和阻尼控制系统,介绍了 SMA 的基本功能特性、相变机理、本构模型以及 SMA 被动耗能减振系统与结构损伤的 SMA 控制系统。第 12 章结构主动、半主动与智能控制系统设计方法,介绍了结构主动控制的最优控制力、受控反应特征及其分析方法、以主动控制理论为基础的结构主动变阻尼和智能阻尼系统,以及被动耗能减振系统的设计方法;针对 20 层钢结构抗震和 76 层钢筋混凝土结构抗风的 Benchmark 振动控制,详细地介绍了主动控制系统、特别是各种半主动控制系统和被动耗能减振系统的最优控制力设计、半主动控制力和被动阻尼力与主动最优控制力及其控制效果的关系。附录结构振动控制的 Benchmark 问题,介绍了建筑结构小比例线性模型、足尺线性结构和非线性结构振动控制的 Benchmark 模型及其性能评价体系以及相关的主要研究进展。

结构主动、半主动和智能控制的研究和应用涉及材料、机械、传感与数据处理、计算机与控制系统等多学科交叉和多领域高新技术的融合。土木工程结构特殊的抗振减振和防灾减灾问题为多学科交叉和融合提供了施展的空间和平台,同时更促进了土木工程的发展,而且还将对土木工程其他领域多学科交叉的发展和人才培养产生深远的影响。本书的撰写虽然主要是以土木工程结构为对象和背景展开的,但是其中大部分的理论、方法、技术、系统和应用也适用于其他学科领域的结构振动控制问题。我国整体科学技术水平正在逐步提升和快速发展,但是有关本领域及其相关学科的技术、装备、制造和系统集成的储备还相对不足,加之我国在这一领域的研究起步较晚,成果积累还不是很丰富,因此本书总结的和系统化的几个大类的控制系统都是国外首先提出来的,其核心技术主要是国外、特别是美国和日本等发达国家的研究成果。作者以期本书的出版对我国在本领域及其相关学科领域

研究和应用的发展能尽微薄之力。

本书是在李惠、龙复兴、张吉礼、关新春和张春巍等的部分合作和参与下完成的。他们各自的不同学科基础、知识结构和研究专长的充分发挥,才使这部涉及多学科交叉和体现现代科学技术融合、反映近 30 年来国内外本领域研究主要成就的书稿得以完成。作者有幸与他们共事多年,在这一富有挑战性的学科领域的某些分支合作研究和合作为研究生讲授本门课程。作者还特别高兴地看到我们多年合作研究的部分成果、合作授课积累的部分素材和心得体会能够与国内外丰富的研究成果一起融会入本书中。作者对他们的合作表示由衷的感谢!

我国国家自然科学基金委员会和国家高技术研究与发展(863)计划对本领域及其相关学科分支领域给与了大力的支持。作者及其合作者近 10 年来有关本领域的研究先后得到了国家杰出青年科学基金项目——重大工程结构的累积损伤、安全评定与控制(项目编号:59625815)、国家自然科学基金委员会与中海石油天津分公司联合资助的“九五”重大项目专题——海洋平台结构冰振机理与控制(项目编号:59895410)、国家自然科学基金重点项目——土木工程结构振动的智能控制(项目编号:50038010)、国家自然科学基金项目——磁流变液及其智能结构减振驱动器的理论与试验研究(项目编号:50108004)、国家自然科学基金项目——土木工程结构损伤智能监测与控制的形状记忆合金系统(项目编号:50178025)、国家自然科学基金项目——建筑热工系统模糊-神经网络控制理论与技术开发(项目编号:59908001)、国家高技术研究与发展(863)计划项目子课题——新型平台结构智能阻尼减振隔震控制技术(项目编号:2001AA602015)、国家高技术研究与发展(863)计划项目——海洋平台结构振动的主动质量驱动(AMD)控制技术(项目编号:2002AA615070)的大力资助,作者和参与本书撰写的合作者表示衷心的感谢!

本书作者及其领导的课题组近 10 年来在结构振动控制方面的研究一直得到王光远院士的鼓励和指导,作者特表由衷的感谢!在攻读博士和硕士学位期间参加作者与本书相关内容课题研究的有张吉礼、关新春、王刚、隋莉莉、杨颀、张春巍、张微敬、张利芬、李金海、刘峰等,作者对他们为本书相关内容研究所做出的贡献表示感谢!作者感谢美国 University of Illinois at Urbana-Champaign 的 B. F. Spencer Jr. 教授,他提供了即将在他的综述文章中发表的结构主动、半主动和智能控制的工程应用一览表,并允许作者在本书中引用。

主要符号

A	结构控制系统矩阵
A, B, C	模糊集或隶属函数
A_f, A_s	形状记忆合金的奥氏体相变结束温度, 开始温度
B, B_s	控制力作用位置矩阵
c, C	阻尼系数, 阻尼系数矩阵
c_a	AMD 系统阻尼系数
c_d	阻尼器的阻尼系数
c_{cG}, C_{cG}	主动控制力等效增益阻尼系数, 等效增益阻尼矩阵
c_G, C_G	主动控制力增益阻尼分量, 增益阻尼分块矩阵
C_o	状态输出矩阵
D, D_s	环境作用(干扰)位置矩阵
d_{31}, d_{33}	电荷常数
E	弹性模量或能量
$f(\cdot), F(\cdot)$	干扰和干扰力向量
$F_a(\cdot)$	AMD 系统的驱动力
f_d, F_D	阻尼器的阻尼力
g_{31}, g_{33}	电压常数
f_{dy}	磁流变液阻尼器屈服力或压电变摩擦阻尼器的最大阻尼力
G	控制力增益矩阵
I_i	神经网络输入
k, K	刚度, 刚度矩阵
k_a	AMD 系统刚度
k_{cG}, K_{cG}	主动控制力等效增益刚度, 等效增益刚度矩阵
k_G, K_G	主动控制力增益刚度分量, 增益刚度分块矩阵
$\Delta k, k_r$	变刚度系统的刚度
i	电流
m, M	质量和质量系数矩阵
m_a	AMD 系统质量
M_f, M_s	形状记忆合金马氏体相变结束温度, 开始温度
O_i	神经网络输出

P	Ricatii 方程的解矩阵
Q	LQR 算法结构反应权矩阵
q, \dot{q}, \ddot{q}	广义坐标位移, 速度, 加速度
R	LQR 算法控制力权矩阵
R, \mathbf{R}	模糊蕴涵关系矩阵
s_{11}^D, s_{33}^D	压电弹性常数
T	温度, 持时或传递函数
u, U	主动最优控制力, 主动最优控制力向量
u_d	阻尼器的阻尼力
u_s, U_s	半主动控制力, 半主动控制力向量
v, V	电压
x, \dot{x}, \ddot{x}	结构位移, 速度, 加速度
X, \dot{X}, \ddot{X}	结构位移向量, 速度向量, 加速度向量
\ddot{x}_g	地震地面运动加速度
Z	状态变量
ζ	阻尼比
τ	剪应力
τ_y	磁流变液的剪切屈服强度
γ	剪应变
$\gamma_{u_{iy}}, \gamma_{u_{iy}}$	主动最优控制力方向特征标识参数
μ	质量比或隶属函数
Φ, φ	振型矩阵, 振型向量
ϵ	应变
ϵ_{33}^T	压电介电常数
$\tan\delta$	压电介电损耗
Ω	形状记忆合金相变张量
ω	圆频率
ω_{kj}	神经元的连接权值
θ	形状记忆合金热弹性张量或神经元阈值
ξ	形状记忆合金马氏体含量体积百分数

目 录

前 言

主要符号

绪 论	1
第 1 章 动态系统及其重要特性	39
1.1 动态系统的数学描述	39
1.1.1 连续时间状态方程及其解	39
1.1.2 离散时间状态方程及其解	43
1.2 动态系统的稳定性	44
1.3 线性定常系统的能控性	50
1.3.1 系统的能控性	50
1.3.2 系统能控性的判别方法	50
1.4 线性定常系统的能观性	51
1.4.1 系统的能观性	51
1.4.2 系统能观性的判别方法	52
1.4.3 线性系统能控性与能观性的对偶关系	52
1.5 线性系统的传递函数	53
第 2 章 结构振动的主动控制算法	56
2.1 线性定常系统的极点配置	56
2.1.1 状态反馈的系统极点配置	56
2.1.2 输出反馈的系统极点配置	58
2.2 线性二次型最优控制	61
2.2.1 线性二次型(LQR)经典最优控制	61
2.2.2 线性二次型 Gauss(LQG)最优控制	66
2.2.3 土木工程结构的最优控制问题	67
2.3 线性定常系统的模态控制	68
2.3.1 状态方程的模态控制	68
2.3.2 运动方程的模态控制	70
2.4 滑移模态控制	71
2.4.1 滑移面设计	71
2.4.2 滑移模态控制器设计	73
2.5 H_2 和 H_∞ 控制算法	75

2.5.1	H_2 和 H_∞ 范数	75
2.5.2	H_2 和 H_∞ 控制算法	77
2.6	采用不同控制算法的结构振动控制算例	80
2.6.1	结构振动控制系统模型	80
2.6.2	LQR 控制算法	81
2.6.3	LQG 控制算法	87
2.6.4	模态控制算法	89
2.6.5	极点配置控制算法	93
2.6.6	滑移模态控制算法	95
第 3 章	结构振动的模糊控制	98
3.1	模糊控制器的基本结构	98
3.2	实测信息的模糊化方法	103
3.3	模糊控制的基本推理方法	106
3.3.1	模糊关系合成法	106
3.3.2	特征展开推理法	107
3.3.3	真值流推理法	107
3.3.4	作用模糊子集推理法	108
3.3.5	不同推理方法推理结果分析	109
3.3.6	不同推理方法推理速度分析	110
3.3.7	不同推理方法控制效果分析	111
3.4	模糊控制规则提取方法 1——基于结构振动模糊关系	113
3.4.1	单自由度体系的运动方程与模糊关系	113
3.4.2	模糊关系的建立	114
3.4.3	控制规则提取	115
3.4.4	结构振动的模糊控制仿真	117
3.5	模糊控制规则提取方法 2——基于结构振动特征响应分析	118
3.5.1	计算模型	119
3.5.2	模糊控制系统的结构	119
3.5.3	模糊控制规则提取	120
3.5.4	地震反应模糊控制的数值仿真	123
3.6	模糊控制与 LQR 控制的比较	124
第 4 章	结构振动的神经网络辨识与控制	126
4.1	神经网络基本原理	127
4.1.1	神经网络的逼近能力	127
4.1.2	神经网络前馈建模的基本原理	128
4.1.3	神经元的基本组成要素	129

4.2	BP 网络	132
4.2.1	BP 网络模型	132
4.2.2	BP 网络学习算法	133
4.2.3	基于神经网络的系统模型辨识方法	136
4.3	变结构 BP 网络	137
4.3.1	隐层变结构算法	137
4.3.2	输入层剪枝算法	139
4.3.3	变结构 BP 网络算法步骤	141
4.3.4	20 层钢结构振动控制模型辨识	141
4.4	Elman 网络	145
4.4.1	Elman 网络的基本结构	145
4.4.2	Elman 网络的学习算法	146
4.4.3	改进的 Elman 网络学习算法	148
4.4.4	基于 Elman 网络的结构振动控制模型辨识	149
4.4.5	变结构 Elman 网络学习算法	153
4.4.6	基于变结构 Elman 网络的结构振动控制模型辨识	154
4.5	双向模糊神经网络控制算法	157
4.5.1	双向模糊神经网络的结构	157
4.5.2	双向模糊神经网络的前向过程	158
4.5.3	模糊控制算法的混合学习过程	159
4.5.4	结构振动模糊神经网络控制仿真分析	163
第 5 章	结构振动的模糊神经网络遗传优化控制	168
5.1	遗传算法基本理论	169
5.1.1	遗传算法的结构	169
5.1.2	初始化编码、选择、交叉和变异方法	170
5.1.3	遗传算法的实现步骤	172
5.2	模糊神经网络优化的遗传算法	172
5.2.1	模糊神经网络结构	172
5.2.2	实数编码的遗传算法	174
5.2.3	变长混合编码的遗传算法	177
5.3	结构模糊神经网络遗传优化控制的仿真分析	180
5.3.1	三层钢结构控制(实数编码)	180
5.3.2	三层钢结构控制(变长混合编码)	183
第 6 章	结构主动质量阻尼(AMD)控制系统	186
6.1	AMD 控制系统的减振机理与控制装置	187
6.1.1	减振机理	187

6.1.2	AMD 控制装置的基本形式	190
6.2	结构 AMD 控制系统的模型	193
6.2.1	基本模型	193
6.2.2	考虑 AMD 动力特性的系统模型	199
6.2.3	考虑扭转振动的系统模型	200
6.3	结构 AMD 控制系统的控制参数与系统参数分析	202
6.4	结构 AMD 控制的试验系统与试验方法	207
6.4.1	试验系统	207
6.4.2	试验结果与分析	210
6.5	渤海 JZ20-2MUQ 平台结构 AMD 控制系统设计、分析与试验	211
6.5.1	平台结构设计参数与计算模型	211
6.5.2	系统参数分析与设计	215
6.5.3	冰振与地震反应分析	216
6.5.4	AMD 控制试验	219
6.6	工程应用	223
6.6.1	日本 Otis Shibyama 高层建筑 AMD 控制系统	223
6.6.2	南京电视塔 AMD 控制系统	231
第 7 章	结构主动变刚度控制系统	236
7.1	结构主动变刚度控制的基本原理	236
7.1.1	基本原理与力学模型	236
7.1.2	控制系统的动力特性	239
7.2	主动变刚度控制装置	240
7.2.1	主动变刚度控制装置	240
7.2.2	主动变刚度 TMD 装置	241
7.2.3	被动变刚度控制装置	242
7.3	结构主动变刚度控制算法与反应分析	243
7.3.1	Bang-Bang (ON/OFF) 控制算法	244
7.3.2	其他控制算法	246
7.3.3	结构主动变刚度控制系统的反应分析	247
7.4	日本 Kajima 三层办公楼的主动变刚度控制系统	252
第 8 章	结构主动变阻尼控制系统	258
8.1	结构主动变阻尼控制原理	258
8.1.1	基本原理	258
8.1.2	控制系统的动力特性	262
8.2	主动变阻尼控制装置与计算模型	264
8.2.1	控制装置的基本构造	264

8.2.2	控制装置的计算模型	264
8.3	结构主动变阻尼控制算法、反应分析和试验方法	269
8.3.1	半主动控制算法	269
8.3.2	反应分析	271
8.3.3	试验方法	282
8.4	结构主动变阻尼控制系统的工程应用	285
8.4.1	日本 Kajima 五层办公楼主动变阻尼控制系统	286
8.4.2	美国 I-35 桥梁结构主动变阻尼控制系统	290
第 9 章	结构磁流变阻尼控制系统	296
9.1	磁流变液及其装置的发展概况	296
9.2	磁流变液	303
9.2.1	流变机理	303
9.2.2	本构关系	304
9.2.3	制备	306
9.3	磁流变液阻尼器及其力学特性	309
9.3.1	平板间磁流变液流动的计算理论	310
9.3.2	阻尼力计算模型	313
9.3.3	阻尼力参数影响	316
9.3.4	阻尼力特性	316
9.3.5	200kN 足尺磁流变液阻尼器性能试验	319
9.4	磁流变液阻尼器的磁路设计与控制器设计	322
9.4.1	磁路设计	322
9.4.2	控制器设计	324
9.5	结构振动的磁流变阻尼控制反应分析	326
9.5.1	受控系统基本模型	326
9.5.2	半主动控制算法	328
9.5.3	结构磁流变阻尼控制的反应分析	330
9.5.4	结构磁流变阻尼隔震的反应分析	334
9.6	渤海 JZ20-2MUQ 平台结构磁流变阻尼隔振设计与分析	340
9.6.1	平台结构磁流变阻尼隔振系统及其简化计算模型	341
9.6.2	隔振层参数设计与反应分析	342
9.7	斜拉索磁流变阻尼控制与工程应用	346
9.7.1	计算模型	347
9.7.2	系统反应的模态分析方法	349
9.7.3	阻尼器参数设计与半主动控制算法	352
9.7.4	山东滨州黄河公路大桥斜拉索磁流变阻尼控制系统设计与反应分析	354

9.7.5	洞庭湖大桥斜拉索磁流变阻尼控制系统	360
第 10 章	结构压电驱动和压电变摩擦阻尼控制系统	364
10.1	压电陶瓷及其驱动器的发展概况	364
10.2	压电陶瓷	369
10.2.1	压电机理	369
10.2.2	本构关系	369
10.2.3	主要性能参数	371
10.2.4	制备	373
10.3	压电陶瓷驱动器	373
10.3.1	分类	373
10.3.2	制备	376
10.4	结构振动的压电陶瓷驱动控制	378
10.4.1	单片式压电陶瓷驱动控制	378
10.4.2	多层式压电陶瓷驱动控制	380
10.5	压电变摩擦阻尼器	382
10.5.1	阻尼器的构造与阻尼力模型	382
10.5.2	性能试验	385
10.5.3	规格化设计	389
10.6	结构振动的压电变摩擦阻尼控制	390
10.6.1	受控系统模型	390
10.6.2	反应分析	391
第 11 章	结构形状记忆合金(SMA)驱动和阻尼控制系统	395
11.1	SMA 及其智能系统的发展概况	396
11.2	SMA 的热弹性马氏体相变	403
11.2.1	SMA 的基本功能特性	403
11.2.2	SMA 的热弹性马氏体相变机理	404
11.3	SMA 本构模型	406
11.3.1	恒温拉伸 SMA 的超弹性特性简化本构模型	409
11.3.2	SMA 受限回复力模型	411
11.4	SMA 阻尼器与被动耗能减振系统	412
11.4.1	SMA 阻尼器及其力学模型	412
11.4.2	结构被动 SMA 阻尼系统的反应分析	414
11.5	结构损伤的 SMA 智能控制系统	417
11.5.1	钢筋混凝土梁损伤的 SMA 筋控制分析	417
11.5.2	钢筋混凝土梁损伤的 SMA 筋控制的有限元分析实例	418

第 12 章 结构主动、半主动与智能控制系统设计方法	421
12.1 结构主动控制系统的最优控制力设计与分析.....	422
12.1.1 主动控制系统的最优控制力设计	422
12.1.2 主动最优控制力和受控反应特征分析	423
12.1.3 20 层钢结构抗震 Benchmark 模型	429
12.1.4 76 层钢筋混凝土结构风振 Benchmark 模型	438
12.2 结构主动变阻尼和智能阻尼控制系统的最优控制力设计与 分析.....	448
12.2.1 半主动最优控制力设计	449
12.2.2 系统反应分析	453
12.3 结构主动变刚度控制系统的最优控制力设计与分析.....	454
12.3.1 主动变刚度最优控制力设计	454
12.3.2 系统反应分析	457
12.4 结构被动耗能减振系统的最优阻尼力设计与分析.....	458
12.4.1 被动线性黏滞阻尼系统的最优阻尼力设计与反应分析	458
12.4.2 被动摩擦阻尼系统的摩擦力设计与反应分析	460
12.5 20 层钢结构抗震 Benchmark 模型的各种半主动控制力设计、分析 与比较.....	461
12.5.1 主动变阻尼控制系统(兼含被动线性黏滞阻尼系统)	461
12.5.2 磁流变阻尼控制系统	467
12.5.3 被动摩擦阻尼系统	473
12.5.4 主动变刚度控制系统	476
12.6 76 层钢筋混凝土结构风振 Benchmark 模型的各种最优控制力 设计、分析与比较	482
12.6.1 主动变阻尼控制系统(兼含结构线性黏滞阻尼系统)	482
12.6.2 磁流变阻尼控制系统	486
附录 结构振动控制的 Benchmark 问题	490
A.1 建筑结构振动控制 Benchmark 发展的第一阶段	491
A.1.1 ATS 控制模型	492
A.1.2 AMD 控制模型	493
A.1.3 评价指标	494
A.1.4 阶段成果	494
A.2 建筑结构振动控制 Benchmark 发展的第二阶段	495
A.2.1 地震作用 Benchmark 模型及其评价指标	496
A.2.2 风振控制 Benchmark 模型及其评价指标	501
A.2.3 阶段成果	505

A.3	建筑结构振动控制 Benchmark 发展的第三阶段	506
A.3.1	地震作用非线性 Benchmark 模型及其评价指标	506
A.3.2	风振控制 Benchmark 模型及其评价指标	515
A.3.3	阶段成果	516
A.4	其他结构振动控制 Benchmark 的发展	517
A.4.1	桥梁结构 Benchmark 模型	517
A.4.2	隔震结构 Benchmark 模型	519
	参考文献	520

CONTENTS

Preface

Main Symbols

Introduction	1
Chapter 1 Dynamic Systems and Their Key Properties	39
1.1 Mathematical Description of Dynamic Systems	39
1.1.1 State-space Representation and Solution of Continuous-time Systems	39
1.1.2 State-space Representation and Solution of Discrete-time Systems	43
1.2 Stability	44
1.3 Controllability	50
1.3.1 Definition	50
1.3.2 Controllability Condition	50
1.4 Observability	51
1.4.1 Definition	51
1.4.2 Observability Condition	52
1.4.3 Dual Relationship between Controllability and Observability	52
1.5 Transfer Function	53
Chapter 2 Active Control Algorithms	56
2.1 Pole Assignment	56
2.1.1 Pole Assignment by State Feedback	56
2.1.2 Pole Assignment by Static Output Feedback	58
2.2 Linear Optimal Control Algorithms	61
2.2.1 Classical Linear Quadratic Optimal Control (LQR)	61
2.2.2 Linear Quadratic Gaussian Optimal Control (LQG)	66
2.2.3 Optimal Control Problems of Civil Engineering Structures	67
2.3 Independent Modal Space Control Algorithms	68
2.3.1 Modal Control Algorithm Based on State-space Representation	68
2.3.2 Modal Control Algorithm Based on Equations of Motion	70
2.4 Sliding Mode Control	71
2.4.1 Sliding Surface	71
2.4.2 Sliding Mode Control	73