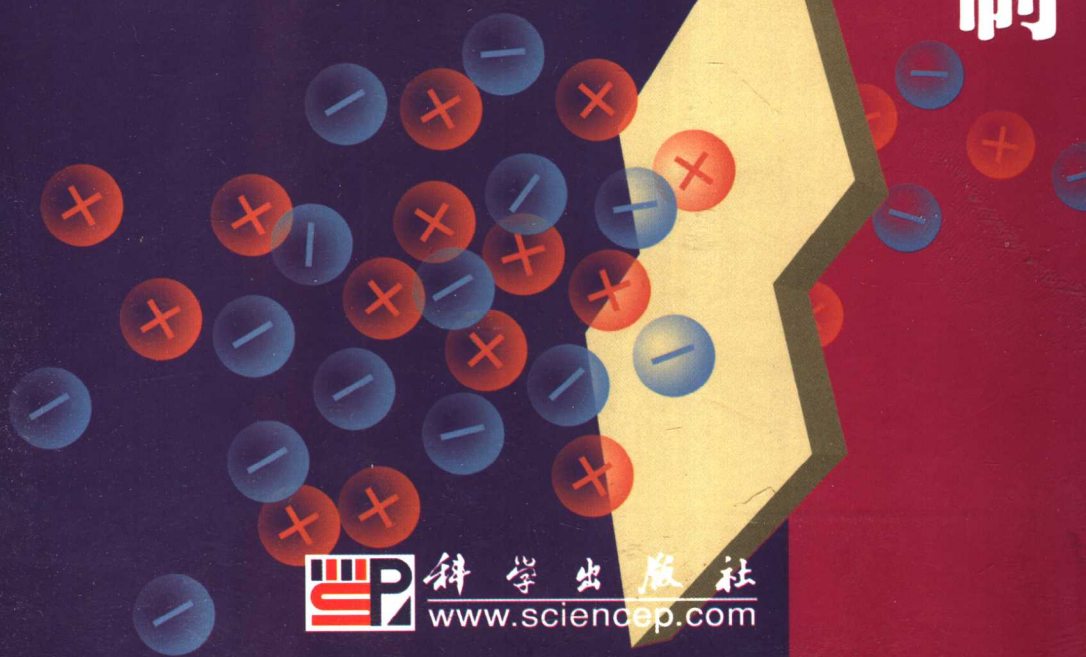


磁流变阻尼控制 理论与技术

周云
谭平◇著



科学出版社
www.sciencep.com

作者简介



周云, 1965年9月生, 云南泸西人。1996年12月获哈尔滨建筑大学结构力学专业博士学位, 1997年3月至2000年6月在哈尔滨工业大学力学博士后流动站进行博士研究, 2001年12月破格晋升为教授。长期从事工程抗震与工程减震控制、城市公共安全与防灾减灾研究。先后主持完成国家自然科学基金等项目十余项, 获省(部)级科技进步二、三等奖3项, 市科技进步二、三等奖2项。在《土木工程学报》等学术刊物上发表学术论文90余篇, 获国家新型实用专利6项, 在科学出版社等出版社出版教材和著作14本。兼任土木工程学会防灾减灾工程技术委员会副主任、高等学校土木工程专业指导委员会委员、国际结构控制协会中国分会等16个协会或专业委员会的常务委员或委员;《土木工程学报》等7个学术刊物编委。

谭平, 1973年9月生, 湖南常德人。1995年7月毕业于郑州工学院土木系工业与民用建筑专业, 2000年7月获湖南大学结构工程专业博士学位, 2002年2月至2005年12月分别在美国华盛顿大学与纽约城市大学进行博士后研究。现在广州大学工程抗震研究中心从事结构减震控制、工程抗震与健康监测方面的研究工作。已在国内外核心期刊和国际会议上发表论文30多篇, 主持和参加国家自然科学基金、美国国家自然科学基金及省市自然科学基金等项目多项。现为国际隔震消能减震控制学会会员, 并担任多家国际学术刊物的特邀审稿人。



ISBN 978-7-03-018627-0



9 787030 186270 >

定价: 48.00 元

磁流变阻尼控制理论 与技术

周 云 谭 平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地总结和阐述了磁流变阻尼器的类型与性能、恢复力模型、控制算法、地震反应和风振反应及工程应用。书中主要内容包括磁流变液的特性、磁流变阻尼器的类型与性能、磁流变阻尼器的恢复力模型、现代控制的基本理论、结构振动的控制算法、智能控制算法、磁流变阻尼结构的地震反应分析、磁流变阻尼结构的风振反应分析、磁流变阻尼器的优化设置、磁流变阻尼隔震结构地震反应分析等。

本书可供从事土木工程、防灾减灾工程及防护工程、航空航天工程、机械设计制造与自动化、材料科学与工程、力学等研究的科技人员阅读, 亦可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁流变阻尼控制理论与技术/周云, 谭平著. —北京: 科学出版社, 2007
ISBN 978-7-03-018627-0

I. 磁… II. ①周…②谭… III. 磁流体—流变—阻尼减振 IV. TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 025195 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 刘彦妮
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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 3 月第一次印刷 印张: 19

印数: 1—2 500 字数: 342 000

定价: 48.00 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 (BA08)

前 言

美籍华人 Yao 于 1972 年结合现代控制理论第一次提出了土木工程结构振动控制的概念,开创了结构振动的主动控制研究新的里程。随后国内外学者对这一领域进行了大量的研究,取得了丰富的成果,但由于主动控制系统结构复杂,造价昂贵,所需的巨大能源在强烈地震时无法完全保证等原因,使主动控制在土木工程中的应用遇到了很大的困难。磁流变阻尼器作为一种半主动控制因其能耗低、结构简单、阻尼力大、可控性强而成为土木工程结构新一代的高性能半主动控制装置。

近 30 年来,国内外学者对这一技术及相关的理论、方法进行了大量的研究和应用,取得了丰硕成果。作者结合承担的国家自然科学基金项目的研究,较系统地总结这一领域的研究成果,希望能对磁流变阻尼控制理论和技术的发展起到促进作用。

本书系统地总结和阐述了磁流变阻尼器控制理论及其应用。全书共十一章。第一章介绍了结构振动控制的概念、原理,结构振动控制的分类及磁流变阻尼控制技术的应用现状;第二章阐述了磁流变液的组成和性能,并给出了多家科研院所及 LORD 公司的磁流变液的性能参数;第三章介绍了磁流变阻尼器的工作原理、类型、力学特性及性能试验结果;第四章叙述了磁流变阻尼器的伪静力模型、动力模型和非参数化模型;第五章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;第六章论述了线性二次型经典最优控制、极点配置法、瞬时最优控制、独立模态控制、滑动模态控制、 H_∞ 状态反馈控制、最优多项式控制的原理以及几种半主动控制律;第七章简要阐述了模糊控制、神经网络控制和遗传算法;第八章介绍了装有磁流变阻尼器的半主动控制系统的仿真分析;第九章论述了高层建筑磁流变阻尼器风振控制及拉索的振动与控制;第十章叙述了磁流变阻尼器的布置位置和时间滞后对控制系统性能的影响及其优化设计;第十一章介绍了磁流变阻尼隔震结构地震反应分析。

本书部分研究内容得到国家自然科学基金项目的资助。本书的出版得到了周福霖等前辈和同行的鼓励、指导和支持;李忠献完成了本书中的部分研究内容,并给予作者许多指导和帮助;徐龙河、吴志远、刘炳凯等参加了本书部分内容的研究工作,在此一并表示感谢。

在本书的撰写过程中,参阅了国内外许多学者的著作、论文和研究报告,特此对其作者表示衷心的感谢。

谭平对本书初稿部分内容进行了补充和完善,作者的研究生廖红伟等协助进

行了本书的资料收集和录入等工作，在此对他们表示谢意。

由于磁流变阻尼控制理论与技术内容十分丰富，书中难免挂一漏万，我们将在今后的研究中逐步完善；同时由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，衷心希望读者批评指正。

周 云

2006 年 10 月于广州大学城

目 录

前言

第一章 概论	1
1.1 结构振动控制	1
1.1.1 结构振动控制的概念、原理和分类	1
1.1.2 被动控制原理与类型	2
1.1.3 主动控制原理与类型	3
1.1.4 半主动控制原理与类型	4
1.1.5 混合控制原理与类型	6
1.2 磁流变技术的应用	7
1.2.1 磁流变技术在土木工程中的应用	7
1.2.2 磁流变技术在其他方面的应用	9
1.3 磁流变阻尼控制理论和技术的发展展望.....	13
参考文献	14
第二章 磁流变液的组成与性能	16
2.1 磁流变液的流变机理.....	17
2.2 磁流变液的组成.....	18
2.2.1 磁流变液的组成与类型	18
2.2.2 磁流变液的组成成分	19
2.3 磁流变液的本构关系.....	20
2.3.1 稳态剪切场下的本构关系.....	20
2.3.2 动态剪切场下的本构关系.....	22
2.3.3 磁流变液的性能	22
2.3.4 产品的优化设计和性能评价	24
2.3.5 部分单位研制的磁流变液的性能参数	25
2.4 磁流变液和电流变液的比较.....	30
参考文献	31
第三章 磁流变阻尼器的类型与性能	33
3.1 磁流变阻尼器的工作原理及分类.....	33
3.2 磁流变阻尼器力学特性.....	36
3.2.1 平板间磁流变液流动的计算理论	36
3.2.2 阻尼力计算模型	37

3.3 磁流变阻尼器的性能研究.....	40
3.3.1 美国 Notre Dame 大学研制的阻尼器性能试验	40
3.3.2 美国内华达大学研制的阻尼器性能试验	46
3.3.3 哈尔滨工业大学研制的阻尼器性能试验	46
3.3.4 天津大学研制的阻尼器性能试验	47
3.3.5 宁波杉工监控研制的阻尼器性能试验	49
3.4 磁流变阻尼器的磁路设计与结构设计原则.....	50
3.4.1 磁流变阻尼器的磁路设计.....	50
3.4.2 磁流变阻尼器的设计原则	53
3.5 磁流变阻尼器的振动台试验.....	55
参考文献	69
第四章 磁流变阻尼器的恢复力模型	71
4.1 伪静力模型.....	71
4.1.1 轴对称模型	72
4.1.2 平板模型	76
4.2 动力模型.....	79
4.2.1 Bingham 模型	80
4.2.2 Bingham 黏弹-塑性模型	81
4.2.3 修正的 Bingham 模型	82
4.2.4 非线性双黏性模型	82
4.2.5 Bouc-Wen 模型	83
4.2.6 修正的 Dahl 模型	83
4.2.7 现象模型	84
4.2.8 修正 Bouc-Wen 模型	85
4.2.9 修正的现象模型	86
4.2.10 非线性滞回双黏性模型	87
4.2.11 非线性滞回模型	88
4.2.12 Sigmoid 模型	88
4.2.13 带质量元素的温度唯象模型	89
4.2.14 双 Sigmoid 模型	90
4.3 非参数化模型.....	90
参考文献	92
第五章 现代控制的基本理论	94
5.1 控制系统状态方程及其解.....	94
5.1.1 状态变量及状态空间表达式	94

5.1.2 连续时间状态方程的求解	98
5.2 控制系统的稳定性	102
5.2.1 系统的平衡点	102
5.2.2 李亚普诺夫意义下的稳定性	103
5.2.3 李亚普诺夫第二法判别	104
5.3 线性定常控制系统的能控性和能观性	106
5.3.1 线性定常系统的能控性	106
5.3.2 系统能控性的判别方法	107
5.3.3 线性定常系统的能观性	108
5.3.4 系统能观性的判别方法	108
参考文献	109
第六章 结构振动的控制算法	110
6.1 受控系统基本模型	110
6.2 线性二次型经典最优控制	111
6.3 极点配置法	116
6.3.1 状态反馈的系统极点配置	117
6.3.2 输出反馈的系统极点配置	118
6.4 瞬时最优控制	118
6.5 独立模态控制	120
6.6 滑动模态控制	122
6.6.1 滑移面的确定	122
6.6.2 滑移模态控制器设计	125
6.7 H_{∞} 状态反馈控制	126
6.8 最优多项式控制	127
6.9 磁流变半主动控制算法	127
6.9.1 受控系统基本模型	128
6.9.2 半主动控制算法要点	130
6.9.3 状态方程的离散化	131
6.9.4 半主动控制算法	132
参考文献	138
第七章 智能控制算法	140
7.1 基于模糊控制的控制算法	140
7.1.1 引言	140
7.1.2 模糊集合和隶属函数	141
7.1.3 模糊关系、模糊矩阵和模糊变换	143

7.1.4	模糊逻辑与模糊语言	144
7.1.5	模糊逻辑控制器的基本原理	146
7.1.6	模糊逻辑推理	150
7.1.7	反模糊化	155
7.1.8	模糊控制的特点	156
7.1.9	磁流变阻尼结构的模糊逻辑全态控制	156
7.2	基于神经网络的控制算法	159
7.2.1	神经网络基本原理	160
7.2.2	神经网络的逼近能力分析	168
7.2.3	BP 网络	170
7.3	基于遗传算法的控制算法	179
7.3.1	遗传算法基本理论	179
7.3.2	基本遗传算法	185
7.3.3	基于遗传算法的磁流变阻尼器半主动控制研究	194
7.3.4	程序设计与算例分析	195
	参考文献	200
第八章	磁流变阻尼结构的地震反应分析	203
8.1	磁流变阻尼器半主动控制系统仿真分析	203
8.1.1	运动方程的建立	203
8.1.2	算例分析	203
8.2	多结构联系体系磁流变阻尼器半主动控制系统优化设计	211
8.2.1	两结构联系体系振动控制系统状态方程	211
8.2.2	两结构联系体系半主动控制系统优化设计	213
8.2.3	两结构联系体系磁流变阻尼器半主动控制系统仿真分析	213
	参考文献	222
第九章	磁流变阻尼结构的风振反应分析	224
9.1	风荷载基本理论	224
9.1.1	结构上的平均风荷载	224
9.1.2	结构上的脉动风荷载	225
9.2	结构风振控制的基本思路	225
9.3	磁流变阻尼器对高层建筑风振的控制算法	227
9.3.1	主动控制的最优化理论	227
9.3.2	线性最优控制	228
9.3.3	半主动控制律	228
9.3.4	权矩阵的选取	229

9.4 高层建筑半主动磁流变风振控制的计算机模拟	230
9.4.1 广义脉动风荷载的模拟计算	230
9.4.2 半主动控制结构风振反应模拟计算的步步积分法	232
9.4.3 控制力的模拟计算	233
9.4.4 半主动风振控制的计算机模拟程序及算例分析	233
9.5 磁流变阻尼器对高层建筑风振舒适度控制的设计	237
9.5.1 我国规范对高层建筑人体舒适度的验算	238
9.5.2 规范与仿真模拟对舒适度的比较分析	240
9.5.3 磁流变阻尼器对风振舒适度的控制	243
9.5.4 磁流变阻尼器对于风振舒适度的设计	244
9.6 拉索的振动与控制	247
9.6.1 斜拉索-阻尼器系统运动方程	249
9.6.2 系统反应的模态分析方法	250
参考文献	252
第十章 磁流变阻尼器半主动控制系统优化设计	254
10.1 控制系统权矩阵的选取	254
10.1.1 基于 Lyapunov 理论的方法	255
10.1.2 基于能量的方法	256
10.1.3 权矩阵 R 的选取	257
10.1.4 算例分析	257
10.2 控制装置在受控结构中的优化设置	261
10.2.1 最优控制系统的性能指标	261
10.2.2 性能指标对控制装置位置矩阵的灵敏度	261
10.2.3 性能指标增量计算及控制装置的最优分布	264
10.2.4 算例分析	264
10.3 控制系统的时滞与补偿	267
10.3.1 时间滞后对控制系统控制效果的影响	268
10.3.2 控制系统时间滞后的补偿	268
10.3.3 时间滞后补偿的效果分析	269
参考文献	272
第十一章 磁流变阻尼隔震结构地震反应分析	274
11.1 磁流变阻尼隔震结构的分类	274
11.2 磁流变阻尼隔震结构的混合方式	275
11.2.1 磁流变阻尼器与滑移隔震混合方式	275
11.2.2 磁流变阻尼器与橡胶隔震垫混合方式	276

11.3 结构体系运动方程的建立.....	276
11.3.1 磁流变阻尼器与滑移隔震混合控制运动方程的建立	276
11.3.2 磁流变阻尼器与橡胶隔震垫混合控制运动方程的建立	276
11.4 磁流变阻尼隔震结构地震反应分析.....	277
参考文献.....	285

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Mechanisms and Classification of Structural Vibration Control	1
1.1.1 Mechanisms and Classification of Structural Vibration Control	1
1.1.2 Mechanisms and Classification of Passive Control	2
1.1.3 Mechanisms and Classification of Active Control	3
1.1.4 Mechanisms and Classification of Semi-active Control	4
1.1.5 Mechanisms and Classification of Hybrid Control	6
1.2 Practical Application of MR Fluid Technology	7
1.2.1 Application of MR Fluid Damper in Civil Engineering	7
1.2.2 Other Applications of MR Fluid Technology	9
1.3 Outlook for the Development of MR Fluid Technology	13
References	14
Chapter 2 Components and Characteristics of MR Fluids	16
2.1 Rheological Mechanism of MRF	17
2.2 Components of MRF	18
2.2.1 Components and Classification of MRF	18
2.2.2 Components of MRF	19
2.3 Constitutive Model of MRF	20
2.3.1 Constitutive Model in Steady Shear Field	20
2.3.2 Constitutive Model in Dynamic Shear Field	22
2.3.3 Characteristics of MRF	22
2.3.4 Optimal Design and Performance Evaluation	24
2.3.5 Performance Parameters of MRF	25
2.4 Comparison between MRF and ERF	30
References	31
Chapter 3 Types and Performance of MRFD	33
3.1 Mechanism and Classification of MRFD	33
3.2 Mechanical Properties of MRFD	36
3.2.1 Theoretical Model of MRF for Flow Mode	36
3.2.2 Modeling of MR Fluid Dampers	37
3.3 Performance Tests of MRFD	40

3.3.1	Performance Tests of MRFD Developed by Notre Dame University	40
3.3.2	Performance Tests of MRFD Developed by University of Nevada	46
3.3.3	Performance Tests of MRFD Developed by HIT	46
3.3.4	Performance Tests of MRFD Developed by Tianjin University	47
3.3.5	Performance Tests of MRFD Developed by Shangong Corporation	49
3.4	Magnetic Circuit Design and Design Principle of MRFD	50
3.4.1	Magnetic Circuit Design of MRFD	50
3.4.2	Design Principle of MRFD	53
3.5	Shaking Table Test of MRFD	55
	References	69
Chapter 4	Restoring Force Model of MRFD	71
4.1	Quasi-static Modeling	71
4.1.1	Axisymmetric Modeling	72
4.1.2	Parallel Modeling	76
4.2	Dynamic Modeling	79
4.2.1	Bingham Model	80
4.2.2	Bingham Viscoelastic-Plastic Model	81
4.2.3	Modified Bingham Model	82
4.2.4	Nonlinear Bi-viscous Model	82
4.2.5	Bouc-wen Model	83
4.2.6	Modified Dahl Model	83
4.2.7	Phenomenological Model	84
4.2.8	Modified Bouc-wen Model	85
4.2.9	Modified Phenomenological Model	86
4.2.10	Nonlinear Hysteretic Bi-viscous Model	87
4.2.11	Nonlinear Hysteretic Model	88
4.2.12	Sigmoid Model	88
4.2.13	Temperature Phenomenological Model with Mass Element	89
4.2.14	Double-sigmoid Model	90
4.3	Nonparametric Model	90
	References	92
Chapter 5	Modern Control Theory	94
5.1	State-space Representation and Solution of Control Systems	94
5.1.1	State-variable and State-space Representation	94
5.1.2	State-space Representation and Solution of Continuous-time Systems	98

5.2	Stability of Control System	102
5.2.1	Balance Point	102
5.2.2	Lyapunov Stability	103
5.2.3	Application of Second Lyapunov Method to Stability Investigation ...	104
5.3	Controllability and Observability	106
5.3.1	Controllability	106
5.3.2	Controllability Condition	107
5.3.3	Observability	108
5.3.4	Observability Condition	108
	References	109
Chapter 6	Control Algorithms	110
6.1	Model of Control System	110
6.2	Linear Optimal Control	111
6.3	Pole Assignment	116
6.3.1	Pole Assignment by State Feedback	117
6.3.2	Pole Assignment by Static Output Feedback	118
6.4	Instantaneous Optimal Control	118
6.5	Independent Modal Space Control	120
6.6	Sliding Mode Control	122
6.6.1	Sliding Surface	122
6.6.2	Sliding Mode Control	125
6.7	H_{∞} Controller	126
6.8	Optimal Polynomial Control	127
6.9	Semi-active Control Algorithms	127
6.9.1	Model Control System	128
6.9.2	Key Points for Semi-active Control Algorithms	130
6.9.3	Discretization of State Equation	131
6.9.4	Semi-active Control Algorithms	132
	References	138
Chapter 7	Intelligent Control Algorithms	140
7.1	Fuzzy Control Algorithms	140
7.1.1	Introduction	140
7.1.2	Fuzzy Sets and Membership Function	141
7.1.3	Fuzzy Relations, Fuzzy Matrix and Fuzzy Transform	143
7.1.4	Fuzzy Logic and its Mathematical Language	144

7.1.5	Principles of Fuzzy Controller	146
7.1.6	Fuzzy Inference	150
7.1.7	Defuzzification	155
7.1.8	Characteristic of Fuzzy Control	156
7.1.9	Civil Structures Using MRFDs of Fuzzy Logic Control	156
7.2	Neural Network Algorithms	159
7.2.1	Principles of Neural Networks	160
7.2.2	Convergence Ability of Neural Networks	168
7.2.3	BP Neural Networks	170
7.3	GA Algorithms	179
7.3.1	Principles of GA	179
7.3.2	Basic GA	185
7.3.3	Studies on GA Based Semi-active Control for MRFDs	194
7.3.4	Program Designed and Example	195
	References	200
Chapter 8 Seismic Response Control of Civil Structures Using MRFDs		203
8.1	Simulation Analysis of Semi-active Control	203
8.1.1	Motion Equation	203
8.1.2	Example	203
8.2	Optimal Design of Multi-structure Complex with MRFDs	211
8.2.1	Governing Equation of Multi-structure Complex	211
8.2.2	Optimal Design of System of Multi-structure Complex	213
8.2.3	Simulation Analysis of Multi-structure Complex with MRFDs	213
	References	222
Chapter 9 Wind-Induced Response Control of Civil Structures Using MRFDs		224
9.1	Mechanism of Wind Loading	224
9.1.1	Mean Wind Load on Structure	224
9.1.2	Fluctuating Wind Load on Structure	225
9.2	Strategy for Wind-induced Vibration Control	225
9.3	Semi-active Control Algorithm for Wind-induced Vibration Using MRFDs	227
9.3.1	Optimal Control Theory	227
9.3.2	Linear Optimal Control	228

9.3.3	Semi-active Control Law	228
9.3.4	Selection of Weighting Matrices	229
9.4	Simulation of Wind-induced Vibration Control	230
9.4.1	Simulation of Fluctuating Wind Loading	230
9.4.2	Time-stepping Procedure for Wind Response of SA Controlled Structure	232
9.4.3	Simulation of SA Control Force	233
9.4.4	Numerical Example Analysis of Wind-excited Structure with MRFDs	233
9.5	Comfort Design of Wind-excited Vibration of High-rise Structure	237
9.5.1	Computation of Comfort Degree for High-rise Structure	238
9.5.2	Comparison of Simulated Comfort Degree with Calculated by Chinese Code	240
9.5.3	Comfort Control with MRFD	243
9.5.4	Optimal Design of MRFD for Wind Vibration Comfort	244
9.6	Oscillation and Control of Stay-cable	247
9.6.1	Equation of Motion of Cable-MRFD System	249
9.6.2	Modal Analysis of Cable-MRFD System	250
	References	252
Chapter 10	Optimal Design of Semi-active MRFD System	254
10.1	Methods for Selecting Weighting Matrices	254
10.1.1	Method Base on Lyapunov Theory	255
10.1.2	Energy-based Method	256
10.1.3	Selection of Weighting Matrix R	257
10.1.4	Numerical Example	257
10.2	Optimal Placement of Control Devices	261
10.2.1	Performance Index of Optimal Control System	261
10.2.2	Sensitivity of Performance Index to Device Placement Matrix	261
10.2.3	Performance Index Increment and Optimal Placement of Control Devices	264
10.2.4	Numerical Example	264
10.3	Time-delay and Compensation for Control System	267
10.3.1	Effects of Time-delay on Control Effectiveness	268
10.3.2	Compensation of Time-delay Systems	268