



结构多维减震控制

李宏男 霍林生 著



科学出版社
www.sciencep.com

TU352.104/22

2008

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

结构多维减震控制

李宏男 霍林生 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

由于地震动的多维性及结构本身的不对称性,结构的地震反应实际上是扭转耦联的空间振动。本书系统地论述了空间结构多维减震控制的理论、方法和技术,共分四篇。第一篇论述了多维地震动和结构多维振动模型的建立及结构多维地震反应的分析方法;第二篇论述了结构被动控制系统的基本原理及其在结构多维减震控制中的应用;第三篇总结了结构控制中常用的主动控制算法和智能控制算法;第四篇论述了主动、半主动及智能控制系统的减震机理及其在结构多维减震控制中的应用。

本书可作为相关专业大学高年级本科生和研究生的学习用书,也可供土木建筑、水利工程、海洋与船舶工程、工程力学等相关专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构多维减震控制/李宏男,霍林生著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-020327-4

I. 结… II. ①李…②霍… III. 建筑结构-抗震设计 IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 023436 号

责任编辑:周 炜 王志欣 王向珍 / 责任校对:张怡君
责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年3月第一次印刷 印张:51 1/4

印数:1—2 000 字数:1 004 000

定价:140.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

自从 20 世纪 70 年代初,美籍华人姚治平教授将控制理论和控制系统的概念引入土木工程后,国内外广大学者经过三十多年的努力,在结构振动控制的理论分析、试验研究、工程应用等方面取得了丰硕的成果。结构振动控制可分为被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制。被动控制不需要外部提供能量,而是依靠结构构件之间、结构与辅助系统之间的相互作用消耗振动能量,从而达到减振的目的;主动控制需要外部提供能量来减小结构的振动;半主动控制以被动控制为依托,以较小的能量对控制状态进行切换来获得较好的控制效果;混合控制是将不同的控制方法相结合,发挥各自的优点,使主动控制提供较小的控制力就可以有效减小结构的振动。

目前的减振控制研究,大都是将结构简化成平面模型进行控制,通常只考虑结构的平动反应。然而,结构在地震作用下的反应,除了发生平移振动外,还可能会发生扭转振动,这一点从理论分析和震害现象都可以得到证明。引起扭转振动的原因:一是地面运动存在转动分量,或地震时地面各点的运动存在着相位差;二是结构本身存在偏心,即结构的质量中心与刚度中心不相重合。震害表明,扭转作用会加重结构的破坏,尤其是对于偏心结构,在某些情况下将成为导致结构破坏的主要因素。因此,结构扭转耦联振动控制问题的研究非常重要。

到目前为止,仅有少数学者对结构多维减震控制的问题进行了研究,研究成果散现于各种文献资料中。作者多年从事结构多维抗震与减震控制的研究,发表有关研究论文百余篇,因此有了将研究成果及散现在文献中的论文重新整理成书的想法。全书分为四篇:第一篇为多维地震动及结构多维振动分析,论述了多维地震动计算方法,结构多维振动模型的建立,结构多维地震反应的分析及非经典阻尼体系地震反应分析,这些为结构多维减震控制奠定了基础;第二篇为结构被动控制系统,论述了多维地震动作用下空间结构的基础隔震、调谐质量阻尼器、调谐液体阻尼器、调液柱型阻尼器及耗能阻尼器的基本原理及其在结构多维减震控制中的应用;第三篇为控制算法,总结了结构控制中常用的基于现代控制理论的控制算法和智能控制算法;第四篇为主动、半主动及智能控制系统,论述了主动质量阻尼器、半主动调液柱型阻尼器、磁流变阻尼器、压电摩擦阻尼器及形状记忆合金阻尼器的减震机理及其在结构多维减震控制中的应用。本书各篇内容相互联系、相互贯通,初步形成了结构多维减震控制的理论框架。

本书是作者及合作者十多年来研究工作的总结。阎石教授和贾影教授,博士

生李秀领、李钢、崔迪、任文杰、赵大海、钱辉,硕士生殷永炜、杨浩、吴香香、李军、李学涛、李瀛、金峤、常治国、孙强、孙立烨等做了大量的研究工作,是他们的辛勤劳动才使得这项研究工作逐步深入,也使得本书内容丰富、翔实,在此表示衷心的感谢。

书中研究成果得到了国家自然科学基金委员会“国家杰出青年科学基金”(50025823、50328807)、面上基金(59778036、50678029),国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAJ03A03)和重点项目(2006BAJ06B03),高等学校学科创新引智计划资助项目(B08014)和教育部创新团队资助计划(IRT0518)资助,在此表示衷心感谢。

感谢国家科学技术学术著作出版基金资助本书出版。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏及不足之处,衷心希望读者批评指正。

作 者

2007年8月

目 录

前言

第一篇 多维地震动及结构多维振动分析

第 1 章 多维地震动	3
1.1 概述	3
1.2 地震动转动分量的求取方法	4
1.2.1 转动分量的弹性波理论方法	4
1.2.2 转动分量的两点差法	8
1.2.3 转动分量的强震观测	8
1.3 体波情况下转动分量的时程	9
1.3.1 转动分量计算公式	9
1.3.2 入射角	13
1.3.3 视波速	18
1.3.4 坐标变换	18
1.3.5 计算步骤和数值算例	19
1.4 面波情况下转动分量的时程	23
1.4.1 R 波情况	23
1.4.2 L 波情况	24
1.4.3 相速度	25
1.5 地震动转动分量的随机模型	32
1.5.1 体波情况	32
1.5.2 面波情况	36
参考文献	38
第 2 章 结构多维振动模型	40
2.1 概述	40
2.2 具有刚性楼盖结构的平扭耦联振动	40
2.2.1 单层结构体系	40
2.2.2 多层结构体系	47
2.3 等效刚度参数识别法	56
2.3.1 等效刚度参数识别的基本原理	56

2.3.2 空间结构的等效刚度参数识别法	57
参考文献	58
第3章 结构多维地震反应	59
3.1 时域分析	59
3.1.1 结构多维振动方程	59
3.1.2 振型分解法	60
3.1.3 地震反应的逐步积分法	61
3.1.4 地震反应的状态空间分析法	72
3.2 随机反应分析	73
3.2.1 结构随机振动的振型位移法	73
3.2.2 多维随机振动的振型加速度法	74
3.3 基于 Simulink 仿真分析	77
3.3.1 系统状态方程	77
3.3.2 Simulink 仿真环境简介	77
3.3.3 Simulink 模型的建立	79
3.3.4 Simulink 模型的有效性分析	84
参考文献	85
第4章 非经典阻尼体系地震反应	87
4.1 复特征向量的正交性	87
4.2 复模态叠加法	88
4.3 非经典阻尼体系随机反应	90
参考文献	93

第二篇 结构被动控制系统

第5章 基础隔震结构体系	97
5.1 概述	97
5.2 隔震装置	101
5.2.1 多层橡胶支座的分类	102
5.2.2 多层橡胶支座的力学性能	103
5.2.3 多层橡胶支座的设计	109
5.3 隔震结构模型及高宽比限值简化公式	112
5.3.1 隔震结构计算模型	112
5.3.2 高宽比限值简化公式推导	116
5.4 水平地震动作用下隔震结构高宽比限值分析	119
5.4.1 影响高宽比限值的因素	119

5.4.2 影响因素分析	120
5.5 考虑竖向地震作用时高宽比限值分析	124
5.5.1 竖向地震作用下隔震结构的运动方程	124
5.5.2 竖向地震作用对高宽比限值的影响	125
5.5.3 隔震结构高宽比限值的建议	128
5.6 偏心隔震结构简化计算公式	129
5.6.1 偏心隔震结构动力方程的建立	130
5.6.2 偏心隔震结构地震反应分析	132
5.6.3 偏心隔震结构地震作用的简化计算公式	142
参考文献	145
第6章 调谐质量阻尼器减振体系	148
6.1 概述	148
6.2 TMD的计算模型及影响参数分析	148
6.3 TMD系统对结构地震反应的控制	151
6.4 多调谐质量阻尼器系统的控制原理	153
6.5 MTMD对偏心结构的减震控制	155
6.5.1 偏心结构-MTMD计算模型	155
6.5.2 MTMD控制系统参数的优化设计	157
6.5.3 数值算例	159
参考文献	163
第7章 调谐液体阻尼器减振体系	164
7.1 概述	164
7.2 TLD的减振原理	164
7.3 TLD中动水压力的简化计算	165
7.3.1 矩形 TLD 中水的固有特性	165
7.3.2 TLD 中液体动液压力的计算	166
7.4 TLD 结构减振体系的简化计算方法	168
7.4.1 控制系统的数学模型	168
7.4.2 TLD-结构体系的状态方程及时域分析	168
7.4.3 TLD 结构体系简化计算实例	169
7.5 利用多个 TLD 控制结构多振型反应	171
7.5.1 结构计算模型与动力特性计算	171
7.5.2 被动控制装置 TLD 尺寸的选取	172
7.5.3 利用 TLD 控制多振型动力反应	172
7.6 TLD 的实验研究	173

7.6.1	试验模型及实验参数	173
7.6.2	试验结果分析	174
7.7	利用 TLD 进行空间结构减振控制	175
7.7.1	理论自振周期	177
7.7.2	非线性 TLD 模型	177
7.7.3	试验设备及步骤	178
7.7.4	试验结果	179
	参考文献	181
第 8 章	调液柱型阻尼器减振体系	183
8.1	概述	183
8.2	环形调液阻尼器的减振研究	184
8.2.1	CTLCD 减振系统的运动方程	185
8.2.2	CTLCD 中阻尼的等价线性化	186
8.2.3	CTLCD-结构体系的运动方程	187
8.2.4	CTLCD 等效阻尼的精确性分析	188
8.2.5	控制器的最优参数	191
8.2.6	CTLCD 对结构扭转振动控制的参数分析	193
8.2.7	CTLCD 对结构平移-扭转耦联振动控制的参数分析	194
8.3	调液阻尼器对结构扭转耦联振动控制的优化设计	197
8.3.1	控制体系的运动方程	198
8.3.2	目标函数评估	201
8.4	调液阻尼器对多层偏心结构扭转耦联振动控制的分析	204
8.5	CTLCD 振动控制中的拍	210
8.5.1	纯扭转振动控制中的拍	211
8.5.2	拍对结构受迫振动的影响	219
8.5.3	结构扭转耦联振动控制中拍的研究	221
8.6	调液阻尼器对结构扭转耦联振动控制的试验研究	224
8.6.1	试验模型	224
8.6.2	试验参数	225
8.6.3	试验结果分析	226
8.6.4	理论值与试验值的比较	229
	参考文献	230
第 9 章	耗能阻尼器的减震与设计	233
9.1	概述	233
9.2	摩擦阻尼器	233

9.2.1 摩擦阻尼器的构造	233
9.2.2 摩擦阻尼器受力特性	235
9.2.3 摩擦阻尼器的减震效果和设计	236
9.3 黏弹性阻尼器	239
9.3.1 黏弹性阻尼器的构造	239
9.3.2 VED 的受力特性	241
9.3.3 剪力储存模量和损耗模量的影响因素	242
9.3.4 VED 的减震效果和设计	246
9.4 黏滞液体阻尼器	250
9.4.1 黏滞液体阻尼器的构造	250
9.4.2 VFD 的受力特性	252
9.4.3 VFD 的减震效果和设计	258
9.5 软钢阻尼器	265
9.5.1 软钢阻尼器的构造	265
9.5.2 软钢阻尼器受力特性	265
9.5.3 软钢阻尼器的振动台减震试验	272
9.5.4 偏心结构软钢阻尼器减震设计的简化能力谱方法	282
9.5.5 消能支撑对结构不利因素影响	305
9.5.6 工程应用	313
参考文献	326

第三篇 控制算法

第 10 章 基于现代控制理论的主动控制算法	333
10.1 概述	333
10.2 最优控制算法	333
10.2.1 LQR	333
10.2.2 瞬时最优控制算法	334
10.3 模态控制算法	336
10.3.1 极点配制法	336
10.3.2 独立模态空间控制	337
10.3.3 滑动模态控制	337
10.4 鲁棒控制算法	338
参考文献	339
第 11 章 神经网络控制算法	340
11.1 概述	340

11.2	人工神经网络的性能	341
11.3	结构控制中常用的神经网络模型	343
11.3.1	静态多层前向网络	343
11.3.2	动态网络模型	344
11.4	人工神经元模型及传递函数	344
11.5	多层前向网络的函数逼近能力	346
11.6	多层前向网络的学习	346
11.6.1	神经网络的学习方式和学习算法	346
11.6.2	BP 算法	347
11.7	BP 算法的改进	351
11.8	神经网络的稳定性、容错性、鲁棒性和泛化能力	352
11.9	神经网络控制方案	354
11.9.1	神经网络监督控制	354
11.9.2	神经网络直接逆模型控制	355
11.9.3	神经网络自适应控制	355
11.9.4	神经网络内模控制	357
11.9.5	神经网络预测控制	357
11.9.6	神经网络自适应判断控制	357
11.10	基于多分支 BP 网络的结构系统辨识	358
11.10.1	系统辨识基础	359
11.10.2	ANN 系统辨识方法	360
11.10.3	基于多分支 BP 网络的结构系统辨识	362
	参考文献	375
第 12 章	模糊逻辑控制算法	377
12.1	概述	377
12.2	模糊逻辑控制的特点	377
12.3	模糊逻辑控制中的基本概念	378
12.3.1	模糊集合及其运算	378
12.3.2	模糊控制中隶属度函数的确定原则	380
12.3.3	模糊控制中常用的隶属度函数形式	381
12.3.4	模糊逻辑及其运算	382
12.4	模糊逻辑与近似推理	382
12.5	模糊逻辑控制的基本原理	384
12.5.1	模糊结构控制过程	384
12.5.2	模糊逻辑控制方式	387

参考文献	388
第 13 章 遗传算法	389
13.1 概述	389
13.2 标准的 GA 及其原理	390
13.2.1 GA 的生物学基础	390
13.2.2 标准的 GA	391
13.3 GA 的运行参数	395
13.4 GA 的基本原理	396
13.4.1 模式定理(schema theorem)	396
13.4.2 积木块假设	401
13.4.3 GA 欺骗问题	401
13.4.4 隐含并行性	402
13.5 GA 的应用示例	403
13.5.1 结构模型及参数	403
13.5.2 地震记录	404
13.5.3 遗传优化算法	405
13.5.4 计算及分析结果	406
参考文献	410
第 14 章 混合智能控制算法	411
14.1 概述	411
14.2 遗传优化神经网络控制	411
14.2.1 BP 神经网络的遗传训练方法	411
14.2.2 神经网络结构的遗传优化设计	412
14.3 基于 GA 的模糊逻辑控制	414
14.3.1 基于 GA 的隶属度函数选择	415
14.3.2 GA 在模糊规则优化中的应用	415
14.4 模糊神经网络	417
14.4.1 基于标准型的模糊神经网络	418
14.4.2 基于 Takagi-Sugeno 模型的模糊神经网络	424
参考文献	429

第四篇 主动、半主动及智能控制系统

第 15 章 主动质量阻尼器控制系统	433
15.1 概述	433
15.2 AMD 主动控制系统的减振机理	434

15.3	AMD 主动控制系统的设计	436
15.4	偏心结构利用 AMD 减震的遗传 BP 神经网络控制	441
15.4.1	AMD-偏心结构控制系统模型	441
15.4.2	遗传 BP 神经网络对结构反应的预测与控制	443
15.4.3	数值算例	445
	参考文献	449
第 16 章	半主动调液柱型阻尼器控制系统	451
16.1	概述	451
16.2	半主动 TLCD 减振机理	452
16.2.1	控制系统力学模型及减振设计	452
16.2.2	数值算例	455
16.3	偏心结构利用半主动 TLCD 减震的智能控制	458
16.3.1	控制系统运动方程	458
16.3.2	半主动控制准则	460
16.3.3	神经网络对结构响应的预测	461
16.3.4	TLCD 减震的神经网络控制	462
16.3.5	TLCD 减震的模糊半主动控制	468
16.4	半主动变刚度 TLCD 减震控制的研究	472
16.4.1	SAVS-TLCD 的减振性能	473
16.4.2	半主动控制策略	475
16.4.3	单自由度数值算例	476
16.4.4	多自由度算例分析	480
16.4.5	偏心结构利用 SAVS-TLCD 的减震控制	483
	参考文献	486
第 17 章	磁流变阻尼器控制系统	488
17.1	概述	488
17.1.1	MRF 的基本构成	488
17.1.2	磁流变阻尼器的构造	490
17.1.3	MRD 在土木工程中的研究进展	492
17.1.4	MRD 在其他领域中的应用	503
17.1.5	小结	506
17.2	MRD 动力学模型	506
17.2.1	MRD 参数化动力学模型	507
17.2.2	MRD 非参数化动力学模型	518
17.2.3	MRD 的双 Sigmoid 模型	520

17.3	半主动控制策略	528
17.3.1	研究进展	529
17.3.2	多态控制策略	535
17.3.3	改进 Clipped-Optimal 控制策略	541
17.4	框-剪偏心结构 MRD 控制	543
17.4.1	磁流变阻尼结构动力方程	543
17.4.2	结构状态观测器和速度观测器的建立	549
17.4.3	结构状态方程	551
17.4.4	MRD 控制偏心结构的平扭耦联振动反应	551
17.4.5	小结	562
17.5	框-剪偏心结构扭转耦联反应半主动控制试验研究	562
17.5.1	结构控制系统的实现	563
17.5.2	试验建立	567
17.5.3	结构反应的测量	570
17.5.4	试验工况	573
17.5.5	试验结果与分析	576
17.6	MRD 智能加固体系的振动台试验	582
17.6.1	抗震结构的损伤准则	583
17.6.2	结构损伤的修复	587
17.6.3	MRD 抗震加固设计要点	590
17.6.4	MRD 抗震加固振动台试验	590
17.6.5	小结	596
	参考文献	596
第 18 章	压电摩擦阻尼器控制系统	608
18.1	压电效应与压电材料	608
18.2	压电智能减振器	610
18.2.1	压电智能主动控制装置	610
18.2.2	压电智能摩擦耗能器	613
18.3	压电摩擦阻尼器的性能测试	615
18.3.1	压电材料的本构方程	615
18.3.2	压电摩擦阻尼器	616
18.3.3	阻尼器的性能测试	619
18.4	半主动摩擦阻尼控制体系	621
18.4.1	控制体系数学模型	621
18.4.2	半主动摩擦阻尼器	623

18.4.3	控制算法	624
18.4.4	控制参数的优化	629
18.4.5	实施过程	630
18.5	仿真模型的建立与数值计算	630
18.5.1	被动摩擦阻尼器仿真模型的建立	630
18.5.2	半主动系统仿真模型的建立	633
18.5.3	程序验证	636
18.6	压电摩擦阻尼器减震的数值分析	637
18.6.1	单自由度数值算例	637
18.6.2	单向地震动多自由度算例	638
18.6.3	多维地震动多自由度算例	648
	参考文献	650
第 19 章	形状记忆合金阻尼器控制系统	653
19.1	形状记忆合金	653
19.1.1	SMA 工作原理(马氏体相变)	653
19.1.2	SMA 的特性	654
19.2	SMA 在结构振动控制中的应用	657
19.2.1	SMA 用于结构主动控制	657
19.2.2	SMA 用于结构被动控制	660
19.2.3	SMA 智能混凝土	668
19.3	SMA 线材力学性能试验研究	670
19.3.1	超弹性 SMA 线材的力学性能测试	671
19.3.2	马氏体相 SMA 线材回复力测试	677
19.4	SMA 本构关系模型	682
19.4.1	唯象理论模型	682
19.4.2	基于神经网络的 SMA 超弹性本构关系模型	686
19.5	SMA 混凝土梁自修复能力试验研究	692
19.5.1	试验设计及试件制作	693
19.5.2	超弹性 SMA 混凝土梁自修复性能测试	696
19.5.3	马氏体相 SMA 混凝土梁自修复性能测试	704
19.6	SMA 混凝土柱动态特性试验研究	706
19.6.1	试验设计	706
19.6.2	SMA 混凝土柱自由振动测试	707
19.6.3	SMA 混凝土柱通电激励振动测试	709
19.7	SMA 混凝土结构地震反应分析	711

19.7.1 单向地震作用下 SMA 混凝土结构地震反应分析	712
19.7.2 双向地震作用下 SMA 混凝土结构地震反应分析	723
19.8 超弹性形状记忆合金阻尼器	730
19.8.1 耗能-复位 SMA 阻尼器(CT-RC 阻尼器)	730
19.8.2 改进的 CT-RT 阻尼器	733
19.8.3 多维 SMA 阻尼器	734
参考文献	739
第 20 章 基于市场机制的结构控制	747
20.1 基于市场控制策略的提出	747
20.1.1 分布式控制	747
20.1.2 基于市场控制策略	748
20.2 基于市场的理论控制算法	750
20.2.1 结构振动方程和状态空间描述	750
20.2.2 线性二次型经典最优控制	751
20.2.3 MBC 算法的理论基础	753
20.2.4 结构控制系统的市场模型	755
20.2.5 MBC 算法应用总结	760
20.3 MBC 算法程序实现和参数优化设计	762
20.3.1 MBC 算法程序实现	763
20.3.2 算例分析与模型参数研究	765
20.3.3 市场模型参数优化	770
20.3.4 优化结果评估	771
20.4 改进 MBC 算法及应用	774
20.4.1 偏心结构动力方程和控制系统的状态空间表达	774
20.4.2 偏心平-扭耦联结构控制系统的市场模型建立	775
20.4.3 MRD 特性	778
20.4.4 计算实例	779
20.5 对偏心结构风振控制及算法的鲁棒性	789
20.5.1 偏心结构风振控制的力学模型	789
20.5.2 随机风模拟	790
20.5.3 数值算例及分析	792
参考文献	799

第一篇

多维地震动及结构多维振动分析