




结构振动控制的 理论、技术和方法

滕军 著

 科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

结构振动控制的理论、技术和方法

滕 军 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结了结构振动控制的主要技术,尤其是耗能减振、隔震结构和调谐质量阻尼动力吸振结构控制技术;对装置关键技术、优化理论和设计方法进行了归类;介绍了作者针对具体工程问题的结构控制装置设计、参数优化和工程应用,以及实现控制装置在工程应用中的关键问题及其解决途径。在结构控制系统优化理论方面,系统介绍了主被动结构控制系统参数优化、最优控制系统设计,以及控制器在结构中的数量、位置优化的理论和方法;论述了结构控制系统稳定性和定量分析理论和方法。

本书适合结构工程、地震工程、风工程、防灾减灾领域的科研工作者、研究生阅读,也适合从事结构设计和掌握结构抗震和抗风工程中结构控制技术的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构振动控制的理论、技术和方法/滕军著.—北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023365-3

I. 结… II. 滕… III. 建筑结构-结构振动-振动控制 IV. TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 175699 号

责任编辑:牛宇锋/责任校对:鲁素

责任印制:赵博/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

*

2009 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 7 月第一次印刷 印张: 28 1/4

印数: 1—2 500 字数: 554 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来,在大地震和风灾造成损失越来越严重的情况下,人们越来越认识到传统的结构设计对未知强度的自然灾害抗御能力的局限性和不可改变性(如地震设防烈度的不准确性及灾害性天气超出历史统计等)。同时,作为智能结构的一个重要内容,结构振动控制技术及其理论和应用研究也受到极大的重视。结构振动控制技术改变了传统的采用承重结构体系直接抵御灾害作用的思路,而采用非承重的结构控制装置或构件来减小主体承重结构的灾害响应,提高了工程结构抵御灾害作用的能力,使工程结构在灾害作用下少损坏或不损坏,并使其完全满足设计要求有了可能,它是土木工程结构防灾减灾设计思想的新变革。

由科学出版社2006年出版的《学科发展战略研究报告(2006~2010)·建筑、环境与土木工程Ⅱ》一书中明确提出了以智能结构为特征的第三代结构的概念。以实现第三代结构为代表,目前结构工程学科的发展趋势主要包括:结构材料向高性能、多功能、高耐久性方向发展;结构体系向多种结构形式优化组合的新型结构方向发展;结构功能向自感知、自控制、自适应、自诊断、自修复的智能结构方向发展;结构计算和设计方法向精细化计算与试验交互性仿真和全寿命性能设计的方向发展。结构振动控制,尤其是结构控制技术在实际结构中的应用,是我国“十一五”期间的重点发展方向。在国际上,结构振动控制研究近年来得到快速发展,美国已有多项成熟产品提供市场;日本在阪神地震后,为提高结构的抗震能力,新建的房屋80%以上采用结构振动控制技术。耗能减振技术用来提高结构振动耗能能力和提高结构阻尼,作为解决工程问题的有效途径得到较大程度的重视,一些大型结构上采用了主被动动力吸振结构控制装置,降低了结构风振响应,保证了结构抗震安全,体现了在现代大型结构上采用高新技术提高结构安全性和满足高水平功能要求的发展趋势。我国上海环球金融中心和广州新电视塔上均采用了主动和主被动混合控制技术。

目前,研究有效、经济、简单、可靠的结构振动控制装置已成为研究和实践发展的趋势,这对在建筑结构上普及采用结构控制技术意义重大。结构振动控制研究的重点是,为推动结构振动控制技术在工程中应用进行的优化设计理论方法和关键技术研究,特别强调应用结构振动控制技术,针对具体工程问题所提出的具体结构控制方案,以及采取的理论方法和关键技术。本书从理论研究和工程实践角度,提出了多项针对具体问题的结构控制理论、方法和关键技术,在结构控制研究领域有较大的导向作用和启发作用。针对目前研究普遍存在的宽泛性,本

书特别强调工程应用背景的目标性，理论和关键技术均具有明确的应用意义，这为该领域科学研究提供了方法和指导。针对工程界对结构振动控制技术理解不够，特别是对其有所了解但在应用上无所适从的现状，本书重点论述了各种结构控制技术的装置机理、分类、关键技术、优化设计方法，应用结构振动控制技术解决具体结构抗震和抗风工程问题的装置方案、分析方法和优化设计实例，为结构振动控制的普及应用起到推动作用。

感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书的资助。

本书的部分研究内容是作者主持的国家自然科学基金青年基金项目(批准号: 59308081)“平动与转动惯量动力吸振结构控制装置研究”和自然科学基金项目(批准号: 50478031)“电视塔桅杆结构风振控制实用方法和有效性安全性保障”的研究成果，感谢国家自然科学基金长期以来给予作者的资助。

本书许多章节的前期研究，是在作者的导师刘季教授指导下开展的，非常感谢刘季教授将作者带入结构控制领域，并且教给作者做人、做事和做学问的方法。2008年10月13日是刘季教授逝世10周年纪念日，谨以此书纪念刘季教授。

本书的第1章及第2章的2.1节、2.2节为博士研究生马伯涛在导师容柏生院士和本书作者指导下完成的博士学位论文的部分内容，第3章部分内容由博士研究生鲁志雄完成，第5章中的大量内容由河南理工大学闫安志教授在与本书作者合作博士后期间完成，在此对他们付出的辛勤工作表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者不吝赐教。

作者

2009年2月

目 录

前言

第 1 章 被动耗能减振控制装置概述	1
1.1 被动耗能减振发展概况和基本概念.....	2
1.1.1 发展概况	2
1.1.2 基本概念	4
1.2 黏弹性阻尼器概述	10
1.2.1 黏弹性阻尼策略及基本原理.....	11
1.2.2 黏弹性阻尼器特点和设计要点.....	12
1.2.3 装置分类、构造及应用.....	13
1.3 金属阻尼器概述	19
1.3.1 基本原理及特点.....	19
1.3.2 装置分类、构造及应用.....	20
1.4 摩擦阻尼器概述	29
1.4.1 摩擦阻尼器特点.....	29
1.4.2 装置分类、构造及应用.....	30
1.5 黏滞液体阻尼器概述	37
1.5.1 基本原理.....	38
1.5.2 黏滞液体阻尼器的改进和发展.....	41
1.5.3 黏滞液体阻尼器应用.....	43
1.5.4 黏滞阻尼墙.....	45
1.5.5 黏滞阻尼墙的应用.....	46
1.6 复合阻尼器简介	47
1.6.1 黏弹性-摩擦复合阻尼器	48
1.6.2 SMA-摩擦复合阻尼器	48
1.6.3 压电-摩擦复合阻尼器	49
1.7 本章小结	49
参考文献	50
第 2 章 被动耗能减振控制的实用技术研究	55
2.1 增强剪力墙连梁耗能能力的阻尼耗能减振方法	55
2.1.1 研究概述.....	55

2.1.2	双列孔软钢阻尼器力学性能分析	57
2.1.3	连梁软钢阻尼器的试验研究	68
2.1.4	安装阻尼器的联肢剪力墙结构地震响应分析	79
2.1.5	小结	86
2.2	提高大厦舒适度的耗能减振设计应用技术研究	87
2.2.1	工程概况	87
2.2.2	屋顶构架控制装置构造	91
2.2.3	弯曲错动阻尼片工作机理分析	92
2.2.4	弯曲错动阻尼片试验研究	97
2.2.5	原型结构三维有限元计算分析	98
2.2.6	安装阻尼片后结构脉动风荷载作用下的计算结果	105
2.2.7	小结	109
2.3	钢结构人行天桥人行激励作用的振动控制	109
2.3.1	研究概述	109
2.3.2	结构模型及人行荷载模拟	110
2.3.3	结构减振分析	114
2.3.4	小结	115
	参考文献	115
第3章	隔震结构	117
3.1	引言	117
3.2	隔震建筑发展现状	118
3.2.1	早期隔震技术	118
3.2.2	现代隔震技术	119
3.2.3	我国建筑隔震应用特点	121
3.3	隔震装置构造、工作机理及应用	122
3.3.1	隔震结构体系的基本特性	122
3.3.2	叠层橡胶垫支座	124
3.3.3	摩擦滑移隔震	131
3.3.4	滑板支座	133
3.3.5	其他隔震支座	135
3.4	隔震结构的基本原理	139
3.4.1	摩擦滑移隔震系统的运动方程	139
3.4.2	橡胶垫隔震支座的运动方程	140
3.4.3	隔震结构的减振效果分析	141
3.5	隔震结构分析方法	142

3.5.1	等效侧力法	143
3.5.2	时程分析法	146
3.6	隔震结构设计方法	149
3.6.1	隔震结构设计方针	150
3.6.2	隔震结构设计要点	151
3.7	隔震建筑设计实例	152
3.7.1	工程概况	152
3.7.2	隔震设计原理	154
3.7.3	多遇地震作用响应分析	157
3.7.4	罕遇地震作用响应分析	160
3.7.5	结果分析	161
3.8	本章小结	161
	参考文献	161
第4章	调谐质量阻尼控制装置的关键技术、基本原理及设计方法	163
4.1	调谐质量阻尼控制装置的分类和应用现状	163
4.2	TMD 装置各主要部件的设计技术	171
4.2.1	惯性质量的支撑系统	172
4.2.2	弹簧系统	178
4.2.3	阻尼系统	178
4.2.4	主动控制驱动系统	180
4.2.5	导向与限位系统	182
4.3	TMD 装置综合	184
4.3.1	上海东方明珠电视塔风振控制 TMD 装置设计	184
4.3.2	深圳地王商业大厦风振 HMD 控制装置设计方案	185
4.4	调谐质量阻尼控制系统原理和优化设计	189
4.4.1	调谐质量动力吸振原理	190
4.4.2	调谐质量阻尼动力吸振原理	192
4.4.3	主结构的阻尼效应	195
4.5	地震和脉动风作用下调谐质量阻尼控制系统优化设计	197
4.5.1	地震作用下 TMD 控制系统的频率响应函数	197
4.5.2	脉动风压作用下 TMD 控制系统的频率响应函数	198
4.5.3	TMD 控制系统的优化设计	200
4.6	多个 TMD 控制装置控制系统优化设计	206
4.7	主被动混合调谐质量阻尼控制器的参数优化分析	215
4.7.1	HMD 装置方案及其在具体结构中的应用	215

4.7.2	HMD 主被动控制的基本方程	217
4.7.3	HMD 被动控制参数优化分析	218
4.7.4	HMD 主动控制参数优化分析	219
4.7.5	HMD 主被动控制混合减振控制分析	221
4.7.6	TMD 对地王大厦地震响应的控制分析	230
4.8	本章小结	240
	参考文献	241
第 5 章	结构振动的 SATMD 控制及碰撞问题	245
5.1	引言	245
5.2	半主动调谐质量阻尼器	247
5.2.1	被动、主动和半主动 TMD 的建模	248
5.2.2	时频分析算法	250
5.2.3	数值仿真	255
5.2.4	小结	265
5.3	考虑装置非线性的控制效果	265
5.3.1	运动方程	266
5.3.2	非线性问题近似分析方法	269
5.3.3	数值仿真	278
5.3.4	小结	288
5.4	TMD 的碰撞问题	288
5.4.1	运动方程	290
5.4.2	周期解的存在性分析	291
5.4.3	无阻尼自由振动系统的谐波平衡解	293
5.4.4	参数灵敏度的分析	296
5.4.5	小结	301
	参考文献	301
第 6 章	振动控制系统的特性分析及控制律参数选择	307
6.1	单自由度体系对一般动力荷载响应的时域和频域分析方法	307
6.1.1	频域分析方法	308
6.1.2	时域分析方法	308
6.1.3	频域和时域分析方法的比较	308
6.2	二阶系统的极点及其与结构频域特性的关系	309
6.2.1	二阶系统的极点	309
6.2.2	极点的形式	310
6.2.3	极点在复平面上的位置与系统动力特性的关系	311

6.2.4 基于复平面上极点位置的二阶系统稳定性指标	311
6.3 振动控制系统的品质分析	313
6.3.1 系统响应的峰值时间 t_p	313
6.3.2 系统响应的峰值 A_p	313
6.3.3 超调比 σ_p	314
6.3.4 影响时域 t_s	314
6.4 系统的位移反馈控制规律的性能指标评价	315
6.4.1 闭环控制系统的脉冲响应函数	315
6.4.2 位移反馈控制作用对系统性能指标的影响	316
6.5 系统的位移速度反馈控制规律的性能指标评价	317
6.5.1 位移速度反馈控制作用	317
6.5.2 闭环系统的频率响应函数及主动阻尼	317
6.5.3 位移速度反馈控制作用对系统性能的影响	318
6.6 高阶系统的瞬态响应分析方法	319
6.6.1 三阶系统的脉冲响应	319
6.6.2 闭环主导极点	320
6.6.3 闭环零点	321
6.6.4 高阶系统的动态响应特性	322
6.7 结构振动控制的振型控制系统	323
6.7.1 底层柔性控制结构系统	324
6.7.2 主动 AMD 控制系统	324
6.7.3 两结构联体系系主动控制系统	325
6.7.4 系统振型组合控制作用	325
6.8 位移速度反馈控制系统的性能分析及系统控制律设计	326
6.8.1 振型位移速度反馈控制系统的脉冲响应函数	326
6.8.2 振型位移速度反馈控制系统的性能分析	326
6.8.3 位移速度反馈控制律设计	327
6.8.4 位移速度反馈控制作用中的位移开关控制	328
6.9 位移速度反馈控制系统的数值仿真分析	329
6.10 本章小结	332
参考文献	333
第7章 基于状态空间的最优控制系统设计方法	334
7.1 结构振动控制系统的状态空间表达式	336
7.1.1 结构振动控制连续时间系统的状态方程	336
7.1.2 结构振动控制离散时间系统的状态方程	337

7.2	结构最优控制系统设计方法	339
7.2.1	结构最优控制的一般问题	339
7.2.2	性能指标加权矩阵选取的讨论	341
7.2.3	连续时间系统最优控制	342
7.2.4	离散时间系统最优控制	345
7.3	被动控制的等价最优控制器参数	348
7.3.1	被动控制等效最优控制及参数表达式	348
7.3.2	被动控制等效最优控制系统仿真	349
7.4	本章小结	353
	参考文献	353
第8章	随机系统针对未知扰动输入的主动自适应控制	354
8.1	随机系统的自适应控制的特点和解决的问题	354
8.2	自适应控制系统的分类和基本工作原理	356
8.2.1	随机自适应控制系统	357
8.2.2	模型参考自适应控制系统	358
8.3	结构振动控制系统的差分方程模型	360
8.3.1	将一般结构控制离散时间系统状态方程转化为典范状态	360
8.3.2	将结构控制离散时间系统的典范状态方程转化为差分方程	362
8.4	基于系统输出的最优预报的系统自适应控制律	363
8.4.1	系统输出的最优预报	363
8.4.2	系统自适应控制律	365
8.5	辅助系统差分方程模型参数辨识	366
8.5.1	参数辨识的理论基础	366
8.5.2	最小二乘参数估计的递推算法	367
8.5.3	参数递推估计中的遗忘因子	368
8.5.4	参数递推估计中初值的选定	369
8.6	地震作用下结构振型组合自适应控制	370
8.6.1	结构的振型组合控制作用	371
8.6.2	结构振型控制系统差分方程模型	371
8.6.3	振型控制系统的自适应控制设计	372
8.6.4	结构的振型组合自适应控制过程	374
8.6.5	实际控制中需要考虑的问题	375
8.6.6	系统控制数值仿真分析	376
8.7	模型参考自适应控制系统简介	379
8.7.1	基于 Lyapunov 稳定性理论的参考自适应控制系统	381

8.7.2 增广误差信号系统和模型参考自适应控制的直接法	385
8.7.3 自适应状态观测器及模型参考自适应控制的间接法	390
8.7.4 基于超稳定性理论的模型参考自适应控制系统	394
8.7.5 基于超稳定性理论设计适应式模型跟随系统	397
8.8 本章小结	402
参考文献	403
第9章 控制作用数量和位置优化设计的二次型性能指标增量方法	406
9.1 引言	406
9.2 二次型性能指标增量方法	407
9.2.1 连续时间系统的最优控制系统方程和性能指标	407
9.2.2 离散时间系统的最优控制系统方程和性能指标	408
9.2.3 连续时间系统二次型性能指标增量表达式	408
9.2.4 离散时间系统二次型性能指标增量表达式	410
9.2.5 二次型性能指标增量的线性关系	413
9.3 次最优反馈增益矩阵及结构次最优控制响应	413
9.3.1 连续时间系统次最优反馈增益	413
9.3.2 离散时间系统次最优反馈增益	415
9.4 二次型性能指标增量方法的实用性验证数值分析	416
9.5 控制系统的数值分析	418
9.6 多结构联系振动控制体系及最优控制模型建立	420
9.7 相邻结构间控制器位置及控制律的降阶优化方法	423
9.8 连续时间最优控制系统和离散时间最优控制仿真对比分析	428
9.8.1 系统控制器最优布置性能指标增量方法的计算验证	428
9.8.2 系统控制器优化降阶的数值分析	430
9.9 本章小结	438
参考文献	439

第 1 章 被动耗能减振控制装置概述

建筑结构设计中将荷载分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载三类,有关规范规定对不同荷载应采用不同代表值进行设计,并且考虑多种荷载间的荷载组合。这种做法的目的在于尽可能地将建筑结构在服役期的荷载考虑周全,同时根据经济能力兼顾工程造价。永久荷载是结构服役期内相对不变的荷载,主要包括结构自重、土压力、预应力等,由于其相对服役期变形缓慢,故可以通过静力计算和合理的安全系数进行结构抗力设计。可变荷载,如楼面活荷载、屋面活荷载、积灰荷载、吊车荷载、风荷载、雪荷载等及地震作用等偶然荷载,目前设计主要体现为“包络设计”。就目前的研究现状来看,对于楼(屋)面活荷等中小荷载可行,通过多年的地震数据积累和基于一定假定的地震反应谱法,包络设计对一般设防烈度的地震作用基本可以,但是强风、台风下结构响应分析尚不成熟,有关规范推荐的 Davenport 谱等效静力计算的包络设计方法还存在疑义。诸如罕遇地震、爆炸力、撞击力等偶然作用或荷载,目前只能由各部门以其专业本身特点,按经验采用,有关规范尚未明确其设计方法,并且国内外在该方面的研究未有成熟的确定方法。可以说,建筑结构所经受的荷载可能超出目前结构设计的“包络设计”水平。

传统的抗震抗风设计主要体现为“抗”,曾经出现过的设计概念有刚性设计、柔性设计、上刚下柔设计和延性设计,我国规范规定的抗震设防目标为“小震不坏,中震可修,大震不倒”。但是对“中震可修,大震不倒”的抗震设防目标及在极端气象环境下结构设防目标的准确把握的研究仍有不足,现代设计难于有效保证在突发的罕遇地震或强风、台风等作用下达到结构预定设防目标。特别是在对超出结构设防等级的偶遇荷载(如超出设防烈度的强震或罕遇强风)作用下,依常规设计的结构抗力不能调整,依靠设定的固定抗力进行抵抗,不具备能动性和适应性,属于被动的抵抗措施。所以,在我国国情及经济条件制约下,有必要寻求一种安全、经济、有效的设计方法。

高层建筑向着高度更高、体型更大、结构更复杂、建筑更艺术更优美的方向发展。在美观和使用功能要求,结构复杂程度增高,建筑高度不断增长,出现了很多新的结构形式和多种形式的复杂组合,给结构工程师带来新的挑战。为了追求结构与建筑和使用要求的协调,更需要一种安全、经济、可行的措施来实现。

结构增设被动耗能减振(震)装置的目的在于减小建筑结构地震响应及其他外因引起的结构振动。为方便讲解,本章将减小结构地震反应和风致振动等结构振动统称为减振,或称振动控制。被动耗能减振装置造价低廉、构造简单、布设方便,

对强震、强风及人为振动、噪声振动的减振效果明显,能够对结构整体和局部进行控制,满足多种特殊使用功能的要求。

通过以上对结构荷载、结构设计现状及结构体系的分析可见,“结构被动耗能减振控制体系”的设计和应用有重要意义和应用前景。建筑结构被动耗能减振设计应被看成是结构概念设计的一部分,作为提高结构延性的一种措施。

1.1 被动耗能减振发展概况和基本概念

1.1.1 发展概况

建筑结构被动耗能减振技术的研究和应用已有 30 余年的历史,一些装置的设计概念最初是从航空航天、机械等领域引进的。较早应用被动耗能阻尼器的建筑结构是 1969 年的美国世界贸易中心双塔,在双塔的每个塔楼中安装了 10000 个黏弹性阻尼器,用来减小风振响应(Mahmoodi et al., 1987; Mahmoodi, 1969),采用了 3M 公司生产的钢板橡胶叠层装置的黏弹性阻尼器。钢结构的发展带动了金属阻尼器的出现,在传统钢结构中,抗震设计依靠结构构件的后屈服延性来消耗结构的振动能量。Kelly 等(1972)和 Skinner 等(1975)提出了利用金属阻尼器消耗结构地震响应的震动能量的概念,具有代表性的第一代金属阻尼器有扭转梁、弯曲梁、U 形带阻尼器,这些阻尼器主要由软钢制作,利用软钢进入塑性变形后的弯、扭变形消耗振动能量。铅阻尼器是一种耗能效果很好的金属阻尼器,其利用铅棒进入塑性变形后的挤压变形和剪切变形产生铅金属分子晶格的塑性剪切和重组来消耗能量。金属阻尼器种类繁多,应用广泛。受到汽车工业刹车片的启发, Pall 等(1979)开始对摩擦阻尼器进行研究。摩擦阻尼器是通过非制动性的摩擦来减小结构的振动。相对于黏弹性阻尼器和金属阻尼器,摩擦阻尼器属于外摩擦型阻尼器。黏滞液体阻尼器的概念起源于机械、汽车、航天及军事工业。汽车减振器即是一个例子。在 20 世纪 80 年代,美国学者最初将其移植到桥梁结构减振,利用液体的黏性流动来耗能。目前典型的黏滞液体阻尼器构造有活塞式阻尼器和黏滞阻尼墙。随着以上各类被动耗能阻尼器的出现和研究的逐步深入,各类阻尼器之间的组合出现了,将其中加入新型智能材料,形成了新型复合阻尼器,如黏弹性-摩擦阻尼器、SMA-摩擦阻尼器、压电-摩擦阻尼器等。被动耗能减振阻尼器逐步得到认可和应用,据不完全统计,截至 2000 年,世界上已经有 1000 余座建筑和桥梁应用被动减振装置,统计数据见表 1.1 和表 1.2(引自 Berkeley 网站)。

结构被动耗能减振装置或构件(一般称之为阻尼器或耗能器)通常作为结构的非结构构件或耗能元件,不参与结构主要承力。结构振动为耗能元件提供往复变形或速度,从而耗散结构振动能量,降低结构动力反应和结构重要构件的耗能要求值。结构设置被动耗能减振装置一般不改变原结构的结构形式,也无需外部能量

输入。被动耗能减振装置不仅能减小结构的地震响应,也能有效地减小结构的风振响应。

表 1.1 20 世纪末世界被动减振建筑和桥梁统计

国家	建筑类别	数目
美国	桥梁	114
	建筑	38
日本	桥梁	43
	建筑	多于 300
新西兰	桥梁	43
	建筑	8
意大利	桥梁	261
	建筑	47
中国	桥梁	多于 20
	建筑	19
其他	桥梁	15
	建筑	4
TMD 的应用		45
合计		多于 1041

表 1.2 北美(截至 1997 年)、日本(截至 2002 年)应用被动耗能装置建筑统计

地区	阻尼器类别	数目
北美	黏弹性阻尼器	8
	金属阻尼器	4
	摩擦阻尼器	25
	黏滞液体阻尼器	25
	小计	62
日本	黏弹性阻尼器	3
	金属阻尼器	15
	摩擦阻尼器	3
	黏滞液体阻尼器	2
	黏滞阻尼墙	10
小计		33

注:上述表格仅为 Berkeley 网站统计的不完全数据。有文献称:截至 2001 年,在日本有 30 多幢重要建筑物使用黏滞阻尼墙进行耗能减振(闫锋等, 2004)。

目前的建筑结构设计理论正在由以前的确保在永久荷载、可变荷载和偶然荷载三类荷载作用下结构使用极限状态和结构安全极限状态设计,向确保结构遭受各种环境振动和意外袭击下建筑结构的实用功能能够正常发挥的方向发展。结构控制技术可以为结构提供能动的抵御超出设计极限的意外荷载。可见,结构控制在结构抗震、抗风和抗击意外袭击设计的地位将越来越重要。当今及以后一段时期内,结构被动耗能减振控制技术的研究和发展面临的主要问题有(韦德香等, 2001):

- (1) 研究在多维地震输入下能控制结构三维平动效应及三维扭转效应的技术;
- (2) 适用于小震或风振作用,也适用于罕遇地震作用的多级宽频复合被动减振控制装置的研究;
- (3) 主、被动复合控制装置研究;
- (4) 针对于高精密仪器室的抗噪声振动控制装置研究;
- (5) 被动控制装置在超高层建筑结构、塔桅结构、大跨结构、核电站等特殊结构及复杂结构的子结构中的技术研究和应用;
- (6) 新型高效、高衰减被动控制装置的研究和开发;
- (7) 装置维护、保养措施、耐久性的研究及相关规范的制定。

1.1.2 基本概念

本节对被动耗能减振装置所涉及的一些概念和基本原理作简要介绍,辅助读者对数值模拟结果进行定性分析。

1.1.2.1 结构动力学基本方程

单自由度体系的运动微分方程为

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = p(t) \quad (1.1)$$

不失一般性,仅取简谐荷载做定性分析,令 $p(t) = p_0 \sin \bar{\omega}t$, 且 $c = 2m\xi\omega$, 式(1.1)也可以写成

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega\dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = \frac{p_0}{m} \sin \bar{\omega}t \quad (1.2)$$

由式(1.2)可以解出结构响应的通解为

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) + \frac{p_0}{k} \frac{[(1 - \beta^2) \sin \bar{\omega}t - 2\xi\beta \sin \bar{\omega}t]}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (1.3)$$

式中, β 为作用荷载(激励)频率 $\bar{\omega}$ 与结构固有频率 ω 的比; ξ 为结构阻尼比; ω_D 定义为 $\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$; p_0/k 为结构静位移; A 、 B 为积分常数,可以由位移、速度初始条件求出。由于式(1.3)右端第一项为指数衰减项,阻尼的存在使该项很快消失,故求解 A 和 B 意义不大。式(1.3)右端第二项代表结构的稳态响应。

定义结构运动稳态响应的合振幅与静位移的比值为动力放大系数 D , 通过式(1.3)可求出

$$D \equiv \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (1.4)$$

阻尼响应的相位角可以表示成

$$\theta = \arctan\left(\frac{2\xi\beta}{1-\beta^2}\right) \quad (1.5)$$

式(1.4)和式(1.5)表示了结构振动响应与激励频率和结构阻尼比的关系, 参见图 1.1 和图 1.2, 相位角取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。共振时结构响应最大, 当频率比 β 一定时, 增大结构阻尼比可以降低动力放大系数 D , 同时也能增大相位角, 提高耗能能力, 这就是对结构施加阻尼耗能构件, 提高结构整体阻尼比的目的。

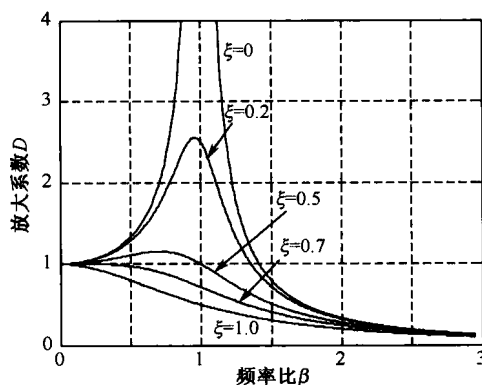


图 1.1 动力放大系数与结构频率比的关系

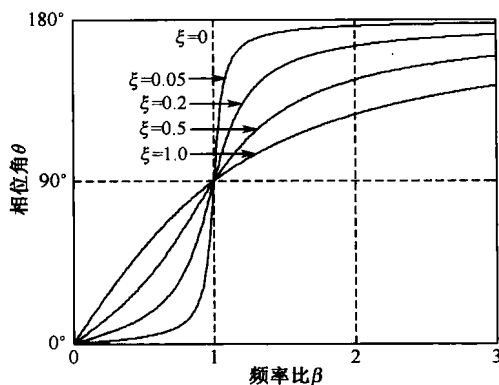


图 1.2 相角与结构频率比的关系