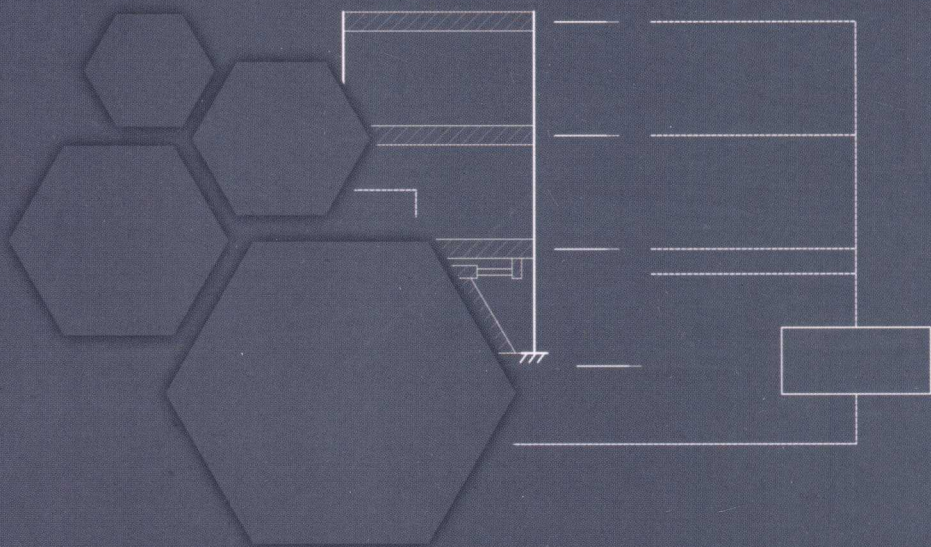




结构振动主动控制

周星德 姜冬菊 著



科学出版社
www.sciencep.com

结构振动主动控制

周星德 姜冬菊 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对振动主动控制技术的常用方法和最新研究进展展开论述,共分六章进行介绍。第一章主要介绍振动主动控制系统的组成、感知材料与传感元件、驱动材料与控制装置及振动主动控制模型研究中的几个问题。第二章主要介绍单自由度和多自由度系统的振动、非线性系统的动力分析和振动主动控制系统模型。第三章主要介绍目前流行的一些控制方法,包括极点配置法、线性二次型最优控制法、次优控制法、能量控制法及预测控制法。第四章重点介绍一些新的控制方法,如改进的 LQG 控制法、多点同时最优控制法、含任意时滞预测控制法和分数阶控制法。第五章介绍非线性结构振动控制法和基于 LMI 的鲁棒控制法。第六章包含模型降阶和基准建筑物两部分内容:在模型降阶部分,重点介绍了近年来出现的线性和非线性模型降阶方法;在基准建筑物部分,详细介绍了第三代基准建筑物模型,并且对基准程序的使用方法进行了详细介绍。

本书可作为高等院校工程力学专业及其相关专业的研究生、高年级本科生的学习用书,也可供土木建筑、水利工程、交通、海洋工程等有关领域工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构振动主动控制 / 周星德,姜冬菊著. —北京:科学出版社,2009
ISBN 978-7-03-025770-3

I. 结… II. ①周…②姜… III. 结构振动-振动控制 IV. O327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 182531 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:柏连海

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>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 11 月第一次印刷 印张: 10 1/2

印数: 1—2 500 字数: 202 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62134988 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

结构振动的主动控制是利用外部能源,在结构物受到外部激励而发生振动的过程中,瞬时施加控制力或瞬时改变结构的动力特性,以迅速衰减和控制结构振动反应的一种减振技术。结构振动主动控制作为固体力学、自动控制、计算机、材料与测试技术等多学科的交叉,是振动控制领域内的一项高新技术,对其研究具有重要的理论意义和实用价值,是目前振动工程领域研究的热点之一。

本书根据作者为力学、土木工程、海洋工程、交通等专业的本科生及研究生讲授的“结构动力学”和“结构振动主动控制”,以及作者 20 余年的研究成果与体会整理成册,以飨读者。与国内同类著作相比,本书的体系和内容主要突出结构振动主动控制方法、力学基础和建模思想,具有举一反三的启迪作用,有助于对振动主动控制理论的理解和掌握。在编写过程中,力求突出以下特色:

1. 以结构振动主动控制设计方法为主线贯穿始终,先建立概念、铺垫基础,再奔主题,最后论述应用。
2. 在剖析常用模型的基础上,给出了实现过程的实例。
3. 概念清晰、推理严密、逻辑性强、便于自学。
4. 基础理论与实践应用并重,同时结合振动主动控制技术的发展趋势,融入相关前沿领域,具有启迪和延拓性。
5. 结构紧凑、层次分明、重点突出、适用面宽,可作为工科结构类专业的研究生教材。

本书总体布局、写作大纲由周星德提出和撰写。本书第一、二章由姜冬菊执笔,第三、四、五、六章由周星德执笔。书中图形绘制及排版由研究生蒋扬、王玉、竺启泽、刘谦敏完成。

我们的研究工作得到了“十一五”国家科技支撑计划、江苏省自然科学基金、河海大学理科基金等项目的支持。此外,在写作过程中得到了河海大学工程力学系张子明教授的指教和帮助,以及夫人刘克翠、女儿周子言的大力支持,在此一并表示衷心地感谢。

近年来,结构振动主动控制技术发展很快,由于作者水平有限,书中难免挂一漏万,衷心欢迎读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 振动主动控制系统的组成	2
1.2 感知材料与传感元件	3
1.3 驱动材料与控制装置	5
1.4 振动主动控制模型研究中的几个问题	8
参考文献	10
第二章 预备知识	11
2.1 单自由度系统的振动	11
2.1.1 运动方程	11
2.1.2 无阻尼自由振动	11
2.1.3 有阻尼自由振动	12
2.1.4 简谐荷载作用下的无阻尼受迫振动	12
2.1.5 简谐荷载作用下的有阻尼受迫振动	15
2.1.6 周期荷载作用下的响应	16
2.1.7 一般荷载作用下的响应	17
2.2 多自由度系统的振动	20
2.2.1 运动方程	20
2.2.2 自由振动	21
2.2.3 模态的正交关系	23
2.2.4 多自由度系统的动力响应	25
2.3 非线性系统的动力分析	27
2.3.1 Wilson- θ 法	27
2.3.2 Newmark- β 法	29
2.4 振动主动控制系统模型	30
2.4.1 线性系统的状态方程	30
2.4.2 线性定常系统的可控性	33
2.4.3 线性定常系统的可观性	34
2.4.4 Lyapunov 稳定性分析方法	34

参考文献	36
第三章 控制器设计方法	37
3.1 极点配置法	37
3.1.1 基于状态反馈的极点配置法	38
3.1.2 基于输出反馈的极点配置法	42
3.2 线性二次型最优控制法	43
3.2.1 线性二次型最优调节器	43
3.2.2 线性二次型 Gauss 控制算法	45
3.3 次优控制法	54
3.3.1 次优控制方程	55
3.3.2 次优控制的控制律设计方法	56
3.4 能量控制法	58
3.4.1 Rayleigh 概率分布	59
3.4.2 动力反应的能量	59
3.4.3 控制力的大小与方向	61
3.5 预测控制法	62
3.5.1 连续系统状态方程的离散化	62
3.5.2 无时滞预测控制法	62
3.5.3 考虑时滞预测控制法	64
参考文献	67
第四章 改进的控制器设计方法	68
4.1 改进的 LQG 控制法	68
4.1.1 广义 LQG 控制法	68
4.1.2 LQG- α 控制法	75
4.2 多点同时最优控制法	81
4.3 含任意时滞预测控制法	86
4.3.1 状态方程离散	86
4.3.2 外部激励为离散形式的积分方法	88
4.3.3 含时滞的广义预测控制	89
4.4 分数阶控制法	92
4.4.1 分数阶微积分的定义与性质	92
4.4.2 分数阶微分的滤波器近似及应用	93
4.4.3 含分数阶的 PID 控制器	94
4.4.4 分数阶多自由度系统最优控制	96
参考文献	105

第五章 非线性和鲁棒控制器设计方法	108
5.1 非线性结构振动控制法	108
5.1.1 非线性建筑结构振动的最优控制法	108
5.1.2 基于线性化的非线性结构振动控制法	115
5.2 鲁棒控制法	121
5.2.1 H_2 和 H_∞ 控制问题	121
5.2.2 基于 LMI 的鲁棒控制方法	122
5.2.3 基于 LMI 的多目标控制法	133
参考文献.....	138
第六章 模型降阶和基准建筑物	140
6.1 平衡降阶法	140
6.1.1 基于状态方程的降阶方法	141
6.1.2 基于运动方程的降阶方法	142
6.2 Schur 降阶法	143
6.3 Pade 降阶法	145
6.4 非线性系统的经验模型降阶法	146
6.4.1 经验可控性和可观性格拉姆矩阵	147
6.4.2 采用平衡截断的模型降阶法	147
6.5 基准建筑物	147
6.5.1 第三代基准建筑物	148
6.5.2 程序释疑	153
参考文献.....	160

第一章 绪 论

土木工程结构的抗震,若单纯依靠加大构件尺寸、采用新型材料(如高强混凝土)等传统方法,不仅增加结构造价,而且由于荷载的不确定性,难以达到预期效果^[1]。所以,结构振动控制这种积极主动的抗震设计新思想在土木工程界受到广泛重视^[2]。目前,在计算机技术和测控技术发展的推动下,振动主动控制技术有了巨大的进步。

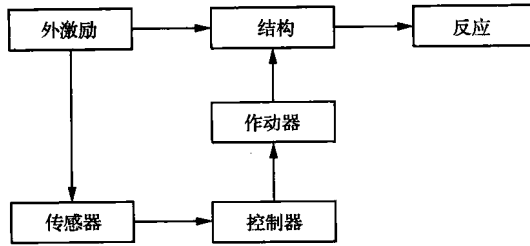
日本是多地震的国家,其振动控制技术发展处于世界领先地位。到1996年为止,在日本已建成应用结构主动振动控制技术的建筑物21栋。采用的主动控制系统有:①主动质量阻尼器(AMD)的全主动控制;②混合质量阻尼器(HMD)的混合控制;③主被动调谐质量阻尼器(APTMD)的半主动控制;④主动变刚度控制系统(AVS)。

1994年在日本东京建成AMD控制的一幢超高层建筑,高134.4m。振动主动控制系统为设置在屋顶上的两个AMD,质量为1.5t,最大滑动位移为1m,最大驱动力达到8700kgf^①。振动台试验和地震实测记录表明:AMD系统安置在屋顶是较优的位置;与无控制时相比较,地震时的响应减少50%~80%。1989年在日本东京建成一幢AMD控制的扁形钢框架结构高层建筑,高33m、宽4m。主动控制系统为安置在屋顶上的两个AMD,其一为控制结构主振动,质量为4t,其二为控制结构扭转振动,质量为1t。通过地震实测记录表明:与无控制时比较,地震时的响应减少60%。1993年在日本东京建成一幢APTMD控制的14层钢结构建筑物,APTMD中的AMD质量为2×2t,TMD质量为18t,地震实测记录表明:与无控制时比较,地震时的响应减少60%。在1992~1996年期间,日本共建成15幢HMD控制的建筑物,由HMD控制的振动台试验结果表明:与无控制时比较,地震时的响应减少50%。1990年日本建成AVS控制的一幢三层钢结构建筑物,经过加速度峰值为0.25g(g 表示重力加速度)的强地震考验,地震实测记录表明:与无控制时比较,结构位移响应减少60%,加速度响应减少60%。振动主动控制技术由于具有效果好、适应性强等潜在的优越性,很自然成为抗震设计的一条重要的新途径^[3]。

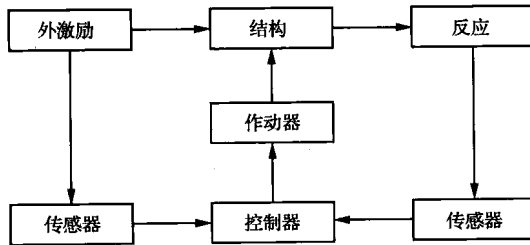
① 1kgf=9.806 65N,下同。

1.1 振动主动控制系统的组成^[4,5]

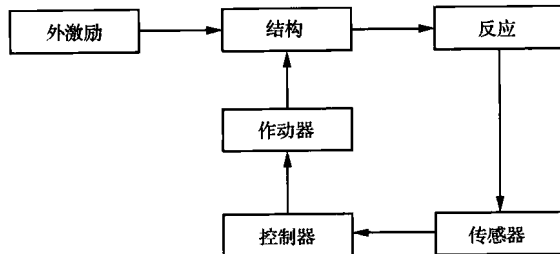
振动主动控制是主动控制技术在振动领域的一项重要应用,按控制器的工作方式可分为开环控制、闭环控制及开闭环控制。开环控制又称为程序控制,其控制器中的控制律是预先设计好的,只需借助于传感器测出输入结构的外部激励,据此来调整作动器施加给结构的控制力,而不反映系统输出的结构反应信息,也就是说,开环控制与受控对象的振动状态无关。开环控制系统如图 1.1(a)所示。闭环控制中的控制器是按受控对象的振动状态为反馈信息而工作的,需要通过传感器测得结构特定部位的反应,据此来调整作动器施加给结构的控制力,而不反映输入



(a) 开环控制系统



(b) 闭环控制系统



(c) 开闭环控制系统

图 1.1 振动主动控制系统

结构的外部激励的信息,如图 1.1(b)所示。开闭环控制,控制系统通过传感器同时测得输入结构的外部激励和系统输出的结构反应,据此综合信息来调整作动器施加给结构的控制力,如图 1.1(c)所示。

闭环控制系统可以实时跟踪结构的动力反应,是目前应用最广泛的一类控制,也是本书论述的重点。从图 1.1 可以看出,振动主动控制系统主要由以下三部分组成:

1) 作动器,又称为驱动装置。它是一种能够提供作用力(或力矩)的装置。常用的作动器有伺服液压式、伺服气动式、电磁式、电动式和压电式等。

2) 控制器,是振动主动控制的核心环节,由它实现所需的控制律,控制律就是输入与输出之间的传递关系。

3) 传感器,用于测量外部激励和结构动力反应。与之配套的有信号适调器、A/D 转换(即把测量的电压模拟信号转换为电压数字信号)、D/A 转换(即把计算出的控制力的电压数字信号转换为电压模拟信号)、滤波器和放大器等。

1.2 感知材料与传感元件^[6]

通常,把制作传感元件的材料称为感知材料。近年来研究开发的具有感知特性的智能材料为高性能感知材料,主要有光导纤维(简称光纤)、电阻应变丝、疲劳寿命丝(箔)、压电材料、碳纤维、半导体材料等。

用高性能感知材料可以制作性能更佳的传感元件,特别是制作大规模表面附着式或埋入式传感分布阵列,从而使结构的重要构件或整体具有感知特性,以便实现其自修复、调节和控制的功能。

1. 光纤

光纤作为传感元件主要是因为光纤的局部变形可通过光纤中光的传播发生变化而反映出来。光导纤维很细,可传输数据,反应灵敏。其对埋置材料性能影响小,抗电磁干扰强,熔点高,耐腐蚀,适用于高、低温及有害环境,可沿单线多路复用,能实现点测量、线测量和网测量。

2. 电阻应变片

电阻应变片是结构表面局部应变测量中常用的传感元件,性能受基底和胶层的影响,使用寿命短。电阻应变丝可埋入结构中,与基底材料胶合,性能较稳定,而且可组成各种形状和面积的阵列,防电磁干扰,耐久性好。电阻应变丝直径很小,仅 $3\sim 10\mu\text{m}$,不影响埋置材料的性能。

3. 疲劳寿命丝(箔)

疲劳寿命丝(箔)的外形与电阻应变丝(片)相似,但合金成分与热处理方式不同。疲劳寿命丝(箔)的电阻值随交变应变幅值和循环次数单调增加,荷载卸除后,增加的电阻值保持不变,可以用于结构构件和节点的剩余疲劳寿命预报。

4. 压电材料

压电材料在变形过程中会产生电势,称为正压电效应;而当施加电压时,又会产生变形,称为逆压电效应。利用正压电效应,压电材料可以制作传感元件;利用逆压电效应,压电材料可制作驱动元件。采用压电材料制作的传感元件很薄,可以附着或埋置于结构中。

5. 碳纤维

在一定条件下将聚合纤维燃烧,可以得到接近于完整分子结构的碳长链,也就是碳纤维。碳纤维通常合成为 $7\sim 30\mu\text{m}$ 一股,具有导电性、化学稳定性、耐高温,并且强度和弹性模量均较高。由于高强度和高弹性模量,碳纤维的接触电阻会随着压力变化而变化,利用这一特性可以用碳纤维制作压力和应变传感器,原理如图 1.2 所示。

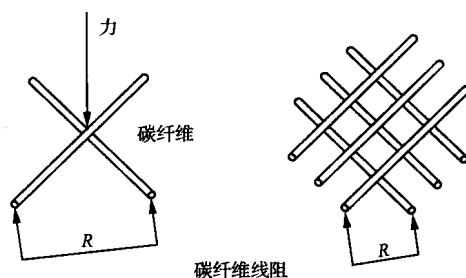


图 1.2 碳纤维传感器原理图

6. 半导体材料

半导体材料可用于制作与基体材料融合的模块或薄片传感元件,是智能传感元件发展的一个主要方向。目前已有的气压硅传感器体积小、价格便宜,可以用于测量结构物表面的风压分布。

由于光纤性能优越,可以附着或埋置于大体积素混凝土或钢筋混凝土构件中,是目前土木工程中最有应用前景的传感元件之一,已经成功应用于混凝土结构、高速公路、铁路、桥梁、大坝、建筑物监测中。

光纤传感器测量的量是光的强度、相位滞后、波长或光的干涉条纹改变等,因此它对土木结构反应过于敏感,测量范围还应适当放宽;光纤传感器能够记录不同原因造成的结构状态变化的综合,但很难将某一种原因引起的变化分离出来;对于很大应力和应变的结构,光纤的使用还受到限制;埋置在混凝土中的光纤传感器的耐久性还需进一步研究。

1.3 驱动材料与控制装置^[6~9]

土木工程结构的控制装置总体上可分为三类,即改变结构频率的隔震装置、耗散结构振动能量的阻尼装置和给结构施加控制力的驱动装置。近年来研究开发的可用于制作控制装置的驱动材料主要有电/磁流变液体(也称可控流体)、形状记忆材料(含合金和聚合物)、压电材料(含电致伸缩材料)、磁致伸缩材料及可收缩膨胀聚合胶体。

采用智能驱动材料可以制作电(磁)或温度等调节的被动阻尼减振装置和主动控制的驱动装置,且出力大、能耗小、反应迅速,将成为结构振动控制新一代的减振驱动装置。

1. 电/磁流变流体

电/磁流变流体在外加电场/磁场作用下可以在毫秒级的瞬间由牛顿流体变成 Bingham 塑性体或黏弹性体。两种可控流体的主要性能参数见表 1.1。

表 1.1 电/磁流变体的主要性能参数

性能	最大场强	最大屈服应力 /kPa	表观黏度 /Pa·s	适用温度 /℃	杂质敏 感性	反应 时间	密度 /(g/cm ³)	耗电功率/W
电流 变体	—4 /(kV/mm)	2~5	0.2~1.0	10~50	敏感	ms 级	1~2	2~50(2000~5000V, 1~10mA)
磁流 变体	250 /(A/mm)	50~100	0.2~1.0	-50~150	不敏感	ms 级	3~4	2~50 (2~25V,1~2A)

从表 1.1 中参数可以看出,在相同耗电功率条件下,磁流变体的最大屈服应力是电流变体的 10~15 倍,且外加电压低、安全性好,是制作土木结构减振驱动装置很有前途的材料。

电/磁流变流体已经用于制作多种形式的减振驱动器,如美国 Lord 公司生产的最大阻尼力为 20t 的双推杆磁流变流体减振驱动器,以及 2008 年我国华中科技大学土木工程与力学学院瞿伟廉制作的 200kN 足尺磁流变液阻尼器。电/磁流变液阻尼器的构造原理见图 1.3。这些装置已经用于土木结构的振动控制试验,如 Dake 等^[11]用磁流变减振驱动器对一座三层框架的地震反应进行了试验,如图 1.4

所示。试验结果表明:不加磁场和加最大磁场都有控制效果;半主动限幅最优控制接近理想主动控制的效果,而且总是稳定的。

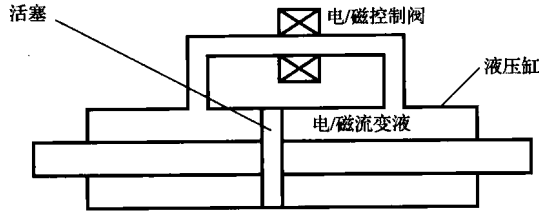


图 1.3 电/磁流变液阻尼器的构造原理

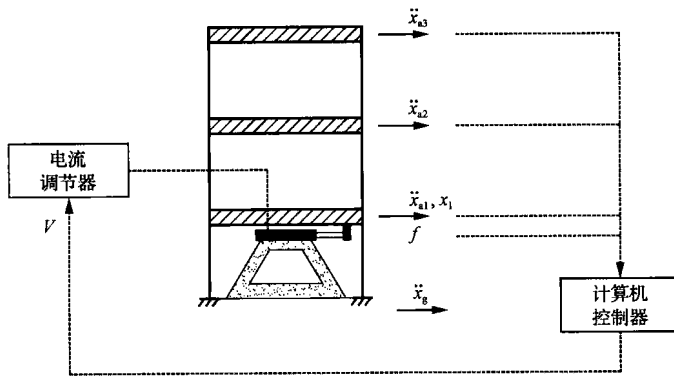


图 1.4 磁流变液驱动器用于三层框架模型地震反应控制

电/磁流变体材料的性能、长期搁放后的固体颗粒沉降及对流体性能稳定性的影响、电流变体的温度适用范围、磁流变体的退磁现象等问题仍然有待于进一步研究。电/磁流变体减振驱动装置的开发、性能研究,作为被动耗能减振器和半主动控制驱动器的控制策略、控制效果,以及在实际工程中的应用等方面都还有大量深入细致的工作要做,以期取得满意的效果和效益。

2. 形状记忆材料

形状记忆效应是指材料在高温下定形后冷却至低温(或室温)并施加变形使其存在残余变形,然后加热到一定温度时仍然恢复到变形前原始形状的能力。这种只能记住高温或低温状态形状的效应称为单程形状记忆。如果材料具有重复记住高温两种状态形状的能力,则称为双程形状记忆。

迄今为止已经发现具有形状记忆效应的合金数十种,其中性能好、有实用价值的是 Ni-Ti 和 Cu-Zn-Al 两类合金。表 1.2 列出了 Ni-Ti 合金的主要性能参数。

表 1.2 Ti-50%Ni 合金的主要性能参数

硬度/HV	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	断面收缩率/%
180~250	850	180	70~80	45	30

形状记忆合金变形量大,加热时能产生很大的回复应力,可以实现多种变形形式,易于和基体材料融合,因此可埋置于结构中。结构振动控制可以从两个方面利用形状记忆合金的特性。其一是利用其超弹性记忆效应——高应变循环下的滞回曲线,形状记忆合金丝本身就可以作为阻尼耗能元件。其二是利用其温度形状记忆效应,将形状记忆合金制作为温度调节的主动控制驱动装置。

3. 压电材料

如前所述,压电材料既可用作传感元件,又可用作驱动元件。常用的压电材料有压电晶体、压电陶瓷,以及最近研制的压电聚合物。压电陶瓷与压电单晶体相比,具有容易制备、可制成任意形状和极化方向的产品、耐热、耐湿等优点,因此应用更加广泛。压电聚合物与压电陶瓷相比,柔韧、耐冲击性好,能制成大面积薄膜传感材料,也是一种非常具有应用前景的压电材料。但目前所有的压电材料中,压电陶瓷是应用最广、研究最为活跃的一种。

压电陶瓷在沿材料极化方向的 $1\text{MV}/\text{m}$ 的电场作用下,可产生 0.1% 的应变,在此应变下的弹性模量为 70GPa 左右,因此压电材料具有很大的储能能力,可以产生很大的外力。由于压电陶瓷应变小,通常采用多层叠加的方式制作压电陶瓷驱动器,如图 1.5 所示。较早将压电陶瓷驱动器用于框架结构研究的是日本的 Kamada 等^[12]。他们制作的压电陶瓷叠加驱动器大小为 $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 36\text{mm}$,每 100V 电压可产生 $30\mu\text{m}$ 变形,提供 19.6kN 的力,对一个 4 层、 3.7m

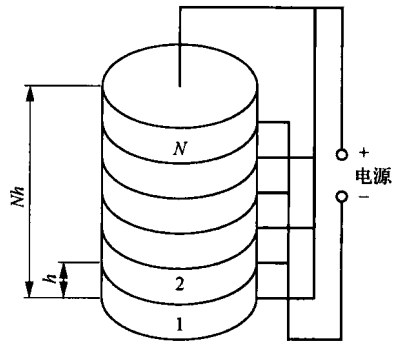


图 1.5 叠层式压电驱动器

高、 3000kg 的钢框架结构的振动进行了主动控制试验。在框架底层四个柱的底端各设置 8 个压电陶瓷驱动器,采用鲁棒主动控制算法,通过控制弯曲力矩和轴向力将结构的第一、二阶模态阻尼比提高到 10% ,达到了预期的目的。

虽然压电陶瓷已经在很多领域得到应用,但它的小应变特性始终在一定程度上限制其作为驱动器件的应用。最近研制的大应变压电材料 RAINBOW(reduced and internally biased oxide wafer)在一定程度上解决了这一难题。它的变形能力要比压电陶瓷大得多,其最大位移可以达到自身长度的 $35\% \sim 50\%$,弹性模量约

为 1×10^5 MPa。RAINBOW 的应用方式和应用领域基本与压电陶瓷类似,也可以叠加起来做成压电驱动器。

4. 磁致伸缩材料

因磁化状态的改变而引起的磁性体产生应变的现象称为磁致伸缩现象。磁致伸缩现象在稀土和稀土-铁化合物中广泛存在,但它们在常温下的磁致伸缩量很小,应用价值不大。直到大磁致伸缩材料 Terfenol-D 研制成功,才开始了磁致伸缩材料的应用研究。智能材料中的磁致伸缩材料指的就是大磁致伸缩材料 Terfenol-D,它是由美国海军军械研究室发明的。

与压电陶瓷性能相比, Terfenol-D 在强磁场的作用下变形能够达到 $(1500 \sim 2000) \times 10^{-6}$,这一数值是普通的压电陶瓷变形能力的 $10 \sim 50$ 倍;此外,用 Terfenol-D 制作的驱动器所需的电压较低,因此较压电陶瓷器件更加安全; Terfenol-D 的弹性模量也很大,最大可以达到 100GPa。由于它的变形大,弹性模量高,储能也较相同体积的压电陶瓷大,再加上其频响性好,是制作大能量驱动器的良好材料。对于长度为 20cm、直径为 1cm 的圆柱体可产生几千牛顿力。

目前的磁致伸缩材料仅用于小型机构的控制,而研究制作适合于大型土木结构的大位移、大驱动力的驱动元件则是今后的重点发展方向。

5. 可收缩膨胀聚合胶体

这种胶体在物理或化学等因素的激励下,产生体积形变、长度变化和作用力的变化。目前主要应用化学激励,即由化学能转变为机械能,而采用电激励方式,则由于电能转化为机械能的效率低,目前还很不成熟。

采用改性的聚丙烯腈纤维,经 220°C 加热后在浓缩 NaOH 溶液中水解,可以得到具有两种特征的纤维。这种纤维从碱性到酸性,在无荷载下可以有 70% 量级的收缩比,时间常数为 2s;直径 $30\mu\text{m}$ 纤维的等轴力集度可以达到 1MPa。

这种胶体用于制作土木结构控制的驱动器还有待研究。

1.4 振动主动控制模型研究中的几个问题^[2,9]

结构振动控制经过近 40 年的研究和发展,已经取得了包括理论、试验和应用等方面的成果。虽然如此,以下几个方面仍存在许多问题需要解决:① 结构控制的模型研究,即充分利用结构本身的特点参与控制,考虑土-结构相互作用、时滞现象、控制力限制、辅助质量的冲程长度限制、非经典阻尼等理想化模型与实际结构差异的影响;② 结构控制的理论研究,即研究控制结构的优化问题,控制参数的优化问题,随机荷载作用下的控制问题,结构控制可靠性问题,以及模糊数学、系统辨

识在系统控制中的应用问题等;③ 结构控制的措施研究,即寻求构造简单、造价低、能耗少、施工方便、可靠性大的各种控制措施。另外,为推动结构控制广泛应用,制定结构控制的设计指南或设计规范是必要的。

此处主要讨论模型研究的几个问题。理想化模型与实际结构之间差异的存在势必影响结构控制的精确性,甚至影响结构控制的稳定性和可行性。解决好这些问题是保证控制系统正常发挥作用的必要条件,具有非常重要的现实意义。

1. 土-结构相互作用

近 40 年来的研究表明,土-结构相互作用对地震激励下结构响应主要有以下几方面的显著影响:减少共振频率;通过波辐射耗散能量;改变结构基础的运动。在地震活跃区的结构设计分析时,考虑土-结构相互作用非常重要,但是目前绝大部分结构振动控制研究都忽略这种效应,即把地基作为刚性来处理。

2. 时滞现象

结构振动控制中,传感器测量、处理器计算、信号传输、作动器驱动等需要一定的时间,导致出现控制力滞后于测量信号的时滞现象。时滞的影响及时滞补偿的重要性已经在试验中得到证实。时滞不仅减弱振动控制系统性能,并可能导致控制系统的不稳定性,尤其在考虑高模态控制情况下,时滞效果更为明显。目前的三类时滞补偿方法都存在局限性,有待进一步完善:① 理论型补偿。时滞系统描述为偏微分方程,在线计算量大,设计繁琐,Taylor 级数截断的简化算法也只能用于较小时滞的情况,基于 Pade 假定不必增加在线计算,但需要引入作动器的反馈迭代步骤。② 相空间补偿。通过反馈增益修正,使真实系统和理想系统具有相同的主动刚度和主动阻尼,它对系统的频率要求比较严格,否则会导致失稳。③ 时域补偿。用运动补偿设计(用 Taylor 展开更新系统状态)和动力补偿设计(用系统动力方程的在线解)预测响应,受系统噪声的影响很大。在离散时域采用理想控制增益,可以解决观测溢出导致的小阻尼模态不稳定问题。

3. 控制物理限制

以 ATMD(active tuned mass damper)为例,ATMD 系统所能提供的辅助质量冲程长度和控制力的最大值,在实际应用中受到经费、空间和电力动力设备的限制。线性控制理论缺乏适应性,强激励下可能因为冲程长度或控制力的物理限制导致整个系统停顿,而弱激励下能输出控制力又得不到充分利用。

4. 有限测点问题

实际的土木工程结构为无限体,含无穷多个自由度,但能够获得的结构反馈状

态变量信息十分有限。有限测点问题,即依据有限的信息反馈如何获得结构全状态反应信息问题,直接关系到结构控制的造价,是结构能否实际应用的关键问题。

5. 控制系统建模问题

实际土木工程结构的运动方程是含分数阶的运动方程^[13]。例如,对于黏性阻尼,通常假设其阻尼力与位移变量的一阶导数成正比,即 $F = cx\dot{x}$,而试验表明阻尼力应为 $F = cx^{(\alpha)}$, $x^{(\alpha)}$ 表示位移变量 x 的 α 阶导数, α 不是通常的整数,而是分数,如 0.90、0.83 等。目前,有关确定土木工程振动控制中参数 α 的文献还未见到。有关含分数阶控制系统的研究是近几年才开始的,多侧重于分数阶 PID 控制器的研究^[14,15],系统本身的含分数阶问题还极少涉及。

参 考 文 献

- [1] 李忠献. 结构地震反应优化阻尼器控制及非经典阻尼结构动力分析[D]. 天津:天津大学,1991.
- [2] 孙剑平,朱晔. 结构控制方法评述[J]. 力学进展,2000,30(3):495~505.
- [3] 陈国兴,金永彬,宰金珉. 结构主动减震控制研究进展[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(1):113~119.
- [4] 顾仲权,马扣根,陈卫东. 振动主动控制[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [5] 李宏男,李忠献,祁皓等. 结构振动与控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [6] 欧进萍,关新春. 土木工程智能结构体系的研究与发展[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(2):21~28.
- [7] 周锡元,阎维明,杨润林. 建筑结构的隔振、减震和振动控制[J]. 建筑结构学报,2002,23(3):2~12.
- [8] 瞿伟廉. 土木工程结构振动的智能控制[J]. 工程力学,2008,25(增刊II):106~116.
- [9] 胡海岩,郭大蕾,翁建生. 振动半主动控制技术的进展[J]. 振动、测试与诊断,2001,21(4):235~240.
- [10] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [11] Dyke S J, Spencer B F, Carlson J D. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction[J]. Smart Materials and Structures, 1996,5: 565~575.
- [12] Kamada T, Fujita T, Hatayama T. Active vibration control of frame structures with smart structures using piezoelectric actuator[J]. Smart Materials and Structures, 1997,6: 448~456.
- [13] 殷德顺,任俊娟. 一种新的岩土流变模型元件[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(9):1899~1903.
- [14] Cai X, Liu F. Numerical simulation of the fractional-order control system[J]. Journal of Applied Mathematics and Computing,2007, 23(1~2): 229~241.
- [15] Cao J Y, Cao B G. Design of fractional order controller based on particle swarm optimization[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2006, 4(6): 775~781.