

文章编号: 1000-8152(2001)05-0647-06

结构振动控制的新进展*

毛剑琴 卜庆忠 张杰

范国滨

(北京航空航天大学第七研究室·北京, 100083) (中国工程物理研究院应用电子学研究所·成都, 610003)

摘要: 近年来基于控制、计算机、材料和结构力学等领域的新技术使结构振动控制取得了新的进展,同时也带来了一些挑战性的问题. 本文从不同角度对结构振动控制进行了分类,介绍了其发展与现状,并对近年来控制理论在结构控制方面的新进展给以综述,最后对有待进一步研究的问题进行了探讨.

关键词: 结构振动控制; 主动振动控制; 智能结构; 土木工程结构

文献标识码: A

Advances in Structural Vibration Control

MAO Jianqin, BU Qingzhong and ZHANG Jie

(The Seventh Division, Beijing University of Aeronautics & Astronautics · Beijing, 100083, P. R. China)

Fan Guobin

(The Institute of Applied Electronics of Academy of Engineering Physics · Chengdu, 610003, P. R. China)

Abstract: Recently the great advance has been made in the structure vibration control field, since the development of new technology in the fields of control, computer, material and structural dynamics. There are some challenging problems brought about as well. In this paper a summary of the newest advance of the structure vibration control and the classification of the research problems in this field are presented. Finally, the further research and applications are discussed.

Key words: structural vibration control; active control; smart structure; civil engineering structure

1 前言 (Introduction)

结构振动控制是一个应用领域广泛的工程问题. 所谓结构振动控制(以下称为结构控制)是指采用某种措施使结构在动力载荷作用下的响应不超过某一限量,以满足工程要求^[1].

21 世纪初叶,起因于解决内燃机的振动问题,开始较系统地结构振动进行了研究. 二战后,随着军事工业,民用工业与空间技术发展的需求,结构控制的研究在理论和应用方面也取得了迅速发展;特别是近年来,在结构大型化、柔性化、智能化、高精度控制等方面取得了长足发展.

在民用工业,如土木工程中,随着材料强度的提高和施工技术的进步,工程结构的尺寸越来越大,如超高层建筑、大跨度桥梁等,结构刚度显著降低,舒适性和抗震性随之恶化^[2]. 目前,土木结构控制,包括结构的安全,使用寿命和人的舒适等,在世界范围内已成为最需优先考虑的重大问题之一.

在空间技术领域,为了完成多样化的任务,现代航天器通常带有一系列大型柔性附件,如太阳能帆板、空间天线和空间望远镜等;同时对控制精度要求也更高. 忽略弹性附件振动的刚体模型及半刚体模型已不能满足实际工程的要求.

大型空间结构的柔性附件运动已成为系统动力学和控制中的一个突出问题.

在军事工业方面,一些新型武器系统要求高精度的稳定平台. 而实战中武器系统往往要工作于复杂的环境中,环境中各种振源都会导致武器平台产生振动,从而影响整个武器系统的跟踪、瞄准和发射精度. 因此平台系统要有很强的隔振能力,才能满足一些现代武器作战时间短、空域宽、要重复发射等要求.

随着结构控制应用的发展,传统结构控制机理与技术在一些工程实际问题中已不能满足要求. 80 代以来,智能结构(intelligent structures 或 smart structures)得到了广泛关注. 探索新的智能化结构控制机理与技术成为一个研究热点. 智能结构的出现与智能材料的发展密切相关. 智能结构控制系统中传感与执行器件通常为某种智能材料(intelligent material/smart material/functional material),如压电陶瓷^[3]、形状记忆合金^[4]、电/磁流变材料^[5]、电/磁致伸缩材料^[6,7]等. 将智能材料应用于结构控制中,为许多采用常规材料难以解决的结构控制问题开拓了一条新的解决途径,但智能材料往往具有强非线性与分布参数的特点,使得智能结构的控制问题成为一类挑战性课题.

* 基金项目:国防基础基金(J1600D001),国家 863 青年基金与国家 863 重点实验室基金资助项目.
收稿日期:1998-10-28; 收修改稿日期:2001-04-16.

综上,结构控制问题是一种多学科交叉的理论与工程问题,其结构类型繁多、控制目标不同、实现手段多样。目前,国内外控制界对这类问题的研究十分重视,有大量的学术论文发表,其中不少新结果得到了实际工程应用。本文旨在对当前结构控制的一些新进展加以综述,并对一些有待进一步研究的问题给以归纳。

2 结构控制的特点、发展与现状 (Characteristic, development and actuality of structure control)

结构控制的明显特点是面向问题的,不同的实际结构,采用的控制机理也不同。本文从几个角度对控制机理进行划分,以反映其特点。

1) 按控制对能量需求来划分。

从控制对外部能量需求角度^[2],结构控制可分为:被动结构控制;主动结构控制;混合结构控制;半主动结构控制。

除被动控制外,其它三种控制方式中的控制力全部或部分地根据反馈信号按照某种事先设计的控制律实时产生。主动结构控制效果较好,对环境有较强的适应力,但完全依赖外部能源,闭环稳定性比其它方式差;在被动控制中,控制力下是由反馈产生的,其主要优点是:成本低;不消耗外部能量;不会影响结构的稳定性;缺点是对环境变化的适应力与控制效果不如其它方案;混合控制是指用主动控制来补充和改善被动控制性能的方案。由于混合了被动控制,因此减小了全主动控制方案中对能量的要求。半主动控制中通常包含某种对能量需求很低的可控设备,如可变节流孔阻尼器等,作用时所需的外部能量通常比主动控制小得多。一些初步研究表明混合控制与半主动控制的性能大大优于被动控制,甚至可达到或超过主动控制的性能,并在稳定性与适用性方面要优于后者^[8],因此成为当前研究的一个热点。

2) 按结构特性划分。

从被控结构的特性划分,结构控制可分为柔性结构控制^[9]与刚性结构控制。其中柔性结构包括大型柔性空间结构;大跨度桥梁等;刚性结构则包括武器系统中稳定平台、车辆悬挂系统,多刚体机器人等。

对于两类结构控制所用的主动控制设备也不相同,如在柔性结构控制中传感器与执行器常用的智能材料是分布智能材料,如压电材料;而刚性结构控制中传感器与执行器常用的智能材料是电智能材料,如磁致伸缩材料。相应地所研究的问题侧重点也有所不同,如柔性结构控制中多研究分布参数系统^[10,11],在控制器设计时所考虑的是模型简化与控制溢出^[12]等问题,波动控制是其中较新提出的一类控制问题^[12,13];而在刚性结构控制中则较多研究智能材料的非线性与在不同约束下的控制器设计问题。

3) 按控制效果要求划分。

精度要求是根据不同的应用而定的,不同的指标决定了不同的控制。如稳定平台,控制目的是消除振动,使平台系统尽可能保持稳定;而土木结构中,控制目的是减少振动和保证安全,并不要求完全消除振动。

在高精度应用中常采用精密的智能结构,如 Stewart 六

自由度稳定平台^[6],采用 Terfenol-D 材料,在尺寸与重量方面都较小,在控制器设计时常采取比较复杂的控制策略,以求达到高的控制效果,比如微米级或纳米级精度;而相对地,对控制能量要求不大;相反在一些低精度结构控制中由于被控结构特点往往超大尺寸,超大重量,如高层建筑,控制律则要相对简单,高可靠性,低控制能量^[17]。

此外,从结构是否含有智能材料的角度划分,还可分为智能结构与非智能(传统)结构。

现代意义上的结构控制是在空间技术领域首先提出的,关于这方面的发展已有不少综述,本文着重介绍目前结构控制两个重要方向的一些研究现状,即智能结构控制与土木结构控制。

1° 智能结构控制。

系统地研究智能结构始于 80 年代中期。美国军队研究局(US Army Research Office)于 1984 年开始资助这方面的研究项目,随后,日本、英国和德国等国家也相继开始了这方面的研究工作^[3]。到 80 年代末 90 年代初,智能结构的研究已空前活跃,国际交流也广泛开展起来。近年来,在许多国家召开了有关智能材料与智能结构的一系列学术会议,此外,相继有几种相关的学术期刊创刊。我国的智能结构振动控制的研究也已开展,并已在理论及其应用方面取得了一些有意义的成果^[3,7,14]。

在智能结构中,以压电材料与形状记忆合金应用较多^[3]。最近研究表明磁致伸缩材料与磁流变材料在某类特定结构控制问题中有良好的应用前景,下面介绍由这两种材料构成的智能结构的振动控制。

磁致伸缩材料(magnetostrictive material)具有在外加磁场作用下产生应变的特性^[6,7]。70 年代美国海军武器中心(Naval Surface Weapons Center)开发了一种具有磁致伸缩特性合金材料,命名为 Terfenol-D。

在高精度稳定平台等特殊结构中, Terfenol-D 是一种很有前途的材料。它在磁场作用下机械形变能力为压电陶瓷材料的 10 倍,杨氏模量相当高,约为 $2.5 \times 10^{10} \sim 3.5 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$,因此能够提供较大的控制力。美国的一些公司已开发出几种商品化的 Terfenol-D 器件,我国也有实验室样品^[7]。Geng 等人^[6]利用 Terfenol-D 构成的六自由度隔振平台。平台分为两层,由基座与可运动平板组成,基座下面与振动接触,上面与由 Terfenol-D 杆构成的 Stewart 衍架结构与可运动平板相连。通过控制 Terfenol-D 杆外围的励磁线圈的电流改变磁场大小,调节杆件的长度,隔离基座传来的振动。实验证明振动降低了 30dB 以上。

磁-流变体材料(MR)在磁场作用下可以改变其阻尼与刚度,利用这一特性可以对结构进行控制。MR 通常是微米级的顺磁材料微粒的非胶体悬浊液。虽然 ER 和 MR 材料几乎是同时在 40 年代后期被发现,但对 ER 的研究相对较多,直到最近一个时期,人们重新发现了 MR 具有不少 ER 所没有的优点^[3],从而对于 MR 材料的应用研究也就逐渐多了起来。

目前,对各种智能结构构成的概念讨论较多,对由于功

能材料介入后的结构的控制方法的研究则较为鲜见,不仅因为这类问题属于高度非线性的复杂系统,还因为这方面的研究是非常新的前沿,亟待开展

2° 土木工程结构控制

土木结构主动控制是自动控制工程、结构工程、机械工程相结合的交叉科学,属于土木结构工程中新兴的高科技领域。土木结构控制的概念是 Kobori 和 Minai 于 1960 年首先提出的, Yao^[15] 于 1972 年首先将控制理论应用于土木结构振动的分析, 80 年代日本和美国已开展了试验研究工作, 在欧洲与俄罗斯也开展了相关的工作, 我国也已开始了这方面的研究^[16,17]。

土木结构主动控制系统种类较多,其中以主动质量阻尼器(active mass damper, AMD)^[18]是最流行的的控制技术,此外,还有主动“腱”(active tendon)控制^[19], TMD(tuned mass damper)^[24], 摩擦阻尼器^[20], 液体阻尼器, 主动地基隔振系统等^[14,21]。值得一提的是智能材料在土木结构控制中也开始得到研究与应用,主要是电/磁流变材料,其中磁流变体材料是最近才被用于结构控制中,由于它的一些优良特性,可以期望应用前景是广阔的

T. T. Song^[8]指出,目前在土木结构控制中,鲁棒控制技术也有了广泛的应用,如 H_∞ 、 μ 理论、LMI、变结构滑模等。虽然这些技术还很下成熟,但却是土木结构控制研究的发展方向。土木结构控制技术虽然已被应用于实际工程,但土木结构控制技术仍面临着巨大的挑战。

3 结构振动控制中的自动控制理论与技术(Automatic control theory and technology in structure vibration control)

一些结构控制中提出的方法如独立模态空间控制、直接输出控制、波动控制等,已有不少文章加以评述^[1],本文就不再赘述。这里对一般性的控制理论与控制算法在结构控制中的应用加以总结。

1) 结构控制中建模与模型简化

建模的目的是建立结构及控制系统在外部动态载荷作用下的动力响应模型,尽量真实地描述整个系统的行为,通常的建模方法有两种^[2]:一是根据牛顿力学原理建立系统的数学模型,对于复杂结构,这类模型往往维数较高或者是分布系统,多用于系统动力学响应分析与对闭环系统的性能评价方面,另一种途径则是利用系统的输入/输出数据采用控制中的系统辨识算法辨识出系统模型,辨识算法不同,则得到的描述模型也不尽相同,如由状态方程^[23]、神经元网络、模糊规则集^[24]等描述的模型,辨识方法可分为参数辨识与非参数辨识

与建模密切相关的是模型简化,由于离散结构模型往往维数很高,不便于结构控制设计与分析,需要对模型进行简化,即降阶,[25]中评述了一些降阶方法如:Padé 逼近、模态截断、平衡降阶、Hankel 平衡降阶等,[26]中针对二阶形式结构动力学方程提出了一种平衡降阶方法,此外,[27]中考虑了结构控制中降阶 H_∞ 控制器设计。

2) 最优控制问题

常规最优控制如 LQR 等在结构控制中已得到很多应用,并有大量文献对此加以评述,如[28],这里仅考虑两类较新的应用。

1° 混合最优控制,通过被动控制可以在一个给定范围内改变结构的质量,刚度与阻尼等参数,进而改变结构的动力学特性,而基于结构原始参数,按照某一准则,可设计出具有理想闭环性能的控制,在保证上述理想闭环系统动态特性前提下,同步进行控制器与结构参数重新设计,就有可能同时优化结构与控制参数^[29],在同样的控制效果下最小化控制能量,即实现“被动与主动控制的最优混合”,得到性能与结构参数满足给定约束的最小能量控制器,如果通过这种优化得到的主动控制器所需能量为零,则对应的最优控制是被动控制,这种最优混合问题可化为凸二次规划问题,数值解的收敛速度快并能保证全局最优解^[29,30]。

2° 可行控制

通常的输出或输入约束下的最优控制是在 L_2 范数约束下最小化通常最优控制中的某一标量性能函数,而可行控制是对输出和输入同时加可行性约束,但并不最小化某个标量性能指标,从这一意义上,可行控制不是最优的,但优点在于易于求得数值解,如利用 MATLAB 的 LMI 软件工具箱,控制器设计问题可以化为线性矩阵不等式(LMIs)约束问题,LMIs 技术除可处理 L_2 范数约束问题,还可处理 L_∞ 范数约束的问题。

3) 随机控制

在结构模型中,结构动力学特性与外部作用力通常存在着不确定性,此外对结构响应输出测量时,由于柔性结构动力学特性是无穷维的,分散点测量无法对状态进行完全观测,而且存在传感器噪声,因此对结构控制中一些问题的研究需要随机控制理论。

时域 LQG 理论,以及其频域形式 H_2 控制问题在结构控制中已有了很多应用^[3],此外下面两类与随机控制有关问题在结构控制中也有所应用

1° 协方差控制,在结构控制中有时希望某些自由度的位移与速度相对于其期望值的变化不大,比如在控制高层土木结构对强风或地震的响应时,要求结构的每层位移或速度的协方差不超过一个事先给定的界,提高结构的可靠度,这时则可以采用协方差控制,为每个状态配置协方差。

2° 随机鲁棒评价,若结构是含参数不确定性的线性时不变系统,不确定性由为随机变量的实参数 P 给出时,要确定开环系统,或相应的闭环系统不稳定或控制性能不能保持的概率 p_f 的问题就是鲁棒随机评价,这与结构可靠度设计有密切关系,尽管没有有效的算法可用来建立系统不稳定的概率与控制器设计的关系,然而,最近提出几种框架,通过这些框架可以评价被控系统含有某类随机不确定性时的鲁棒性,如一阶和二阶可靠度方法(FORM/SORM)、图形法或 MCS(Monte Carlo simulation)仿真; Spencer^[31]提出采用结构可靠度作为成本函数进行随机最优控制设计。

4) 自适应控制.

由于复杂结构中往往含有未知参数,因此自适应控制也在结构控制中得到了广泛应用.自适应控制中的间接法与直接法在结构控制中各有优缺点:间接法的优点是可以应用于非最小相位系统,这种系统对应于结构控制中传感器与执行器不同位的情况,但为保证估计参数的收敛性,需要持续激励^[32];直接方法的优点是不要求持续激励,但其缺点是只适用于最小相位系统^[33],因此直接自适应通常只适用于传感器与执行器同位的情况.

Rodellar^[22]研究了混合结构系统的直接自适应控制方法.Abraham等人^[34]增益调整算法控制结构的响应.Burdisso^[35]给出了主动调谐质量阻尼器系统中,采用 Filtered-x LMS 算法在线自适应调整反馈控制器的参数.采用类似的算法,Geng等人^[6]控制含有磁致伸缩材料 Telferon-D 的 Stewart 平台的振动;Masri等采用自适应来辨识 Bouc-Wen 模型的滞回参数.同时,Rahman等人^[36]使用 LMS 跟踪慢时变周期信号,对窄带振动进行主动隔离.

5) 智能控制.

在结构控制中,神经网络除用于辨识结构模型外,也用于结构控制.间接预报学习控制^[24]用于大型空间结构中,自适应神经控制用于柔性空间结构振动控制,使用 BP 算法及随机优化搜索算法训练的神经网络逼近多自由度结构的逆动态和控制结构响应^[2,37].

6) 模糊控制.

模糊技术也在结构控制中得到了应用.[37]中利用模糊推理规则改进神经网络控制器.[38]中使用模糊逻辑确定可变阻尼器的最优阻尼值.在 TMD 结构中^[20],通过模糊规则控制能量在结构中的流动.[39]中使用类似的方法控制液压执行器.在模糊结构控制中一个较多研究的问题是对于隶属度函数的改进.如使用优化技术以获得最优隶属度函数^[40];使用遗传算法调整隶属度函数的形状与参数^[39];基于 ANFIS 模型使用神经网络得到隶属度函数^[37].

7) 变结构控制.

在结构控制方面,Yang^[19]研究了滑动模态控制技术在含有非线性与有滞回特性的结构中的应用.Yang在结构控制中使用了被封在高压密封流体室中 Telferon/不锈钢板的可控滑动摩擦垫,这种结构是有滞回特性的非线性结构,采用滑动模态控制设计控制律,切换控制律控制在流体室的流体压力,调整摩擦力控制结构的振动.Krishnan^[41]研究了使用滑动模态控制对线性结构和非线性结构在地震或风作用下的结构响应的控制问题.Adhikari^[42]应用滑动模态控制对主动调谐质量阻尼器来控制风产生的振动,基于平均风速的测量设计切换律.

8) 鲁棒控制.

当结构有一个小扰动时,实际模态可能发生很大的变化,基于模态控制的方法对此无能为力,因此在结构控制设计中必须考虑鲁棒性问题.鲁棒控制器设计方法如 H_{∞} 等^[46]在结构控制中得到的许多应用.Spencer^[42]总结 H_{∞} 在结构控

制中的一些应用;Abraham等人^[34]采用增益自适应调整技术控制大型结构在地震下的响应;Chase^[43]研究了执行器饱和和同时参数存在时变不确定性的情形;Yoshida^[44]对基础隔振结构采用了鲁棒控制;Yoshida^[45]研究了采用多调谐质量阻尼器进行结构控制的可能性,Nishimura^[46]在结构控制中采用了结合极点配置的鲁棒控制技术;在提高结构控制的鲁棒性同时改善结构的动态响应,Nishitani^[27]给出了使用降阶模型的 H_{∞} 结构响应控制.Liu等人^[47]利用 μ 理论研究的结构中刚度参数含不确定性时的鲁棒控制问题;张杰、毛剑琴^[18,48]利用 LMI 技术研究了结构中含参数不确定性时基于输出反馈的控制器设计.

4 有待研究的控制问题(The problems under investigation)

结构控制这一课题,近年来,受到了多个领域的学者与专家的高度重视,越来越多的控制专家投身于该研究中,在理论上取得了不少新结果,在应用上成功的例子也很多,但仍有一些问题有待进一步深入探讨.

1) 从控制器设计角度的建模与模型简化:由于结构系统维数高,含有未建模动态特性及参数不确定性等,研究面向低阶鲁棒控制器设计的辨识方法及模型简化技术等问题是具有实际意义的,同时对于含智能材料的结构,由于材料的强非线性,对材料与结构间的非线性相互作用的辨识也需进一步研究.

2) 研究一些较新的鲁棒控制器设计方法,如 H_{∞} 、 μ 、LMI,鲁棒变结构控制等在含有不确定性的结构控制中的应用;另外研究基于某类特殊结构(如含磁致伸缩材料的稳定平台)的振动控制机理与鲁棒控制算法等都是有很强工程应用前景的问题.

3) 结构控制中的非线性控制:研究带有滞回环及饱和的非线性控制问题,这类问题本身在控制界有着广泛的兴趣,另外智能控制如模糊控制等在非线性结构控制中会有很好的应用前景,也值得深入探讨.

4) 结构控制中的混合控制:不同类型的控制算法集成的研究即混合(hybrid)控制方式目前是控制界极受关注的问题,在结构控制中研究主动与被动控制间的最优混合,是具有实际意义的方向.此外,利用一些主动控制算法进行结构设计参数的优化问题也值得进一步研究.

5) 多目标及多约束下结构控制器设计问题.结构控制问题的一个显著特点是工程背景强,在实际工程应用中对控制器存在一些约束,如控制器能量限制、执行器的行程限制、结构的输出约束,而且可能存在不同类型的外界干扰输入,因此组合多目标多约束的控制器设计的问题值得深入研究.

6) 许多结构控制问题对于可靠性要求很高,而在正常条件下又无法对整个闭环系统进行实现证实控制方案的正确性,如为提高建筑物的抗震能力而设计的结构控制器.这样,探讨结构控制的实验证实方案是十分重要的问题.

5 结论(Conclusion)

综上所述,本文从多个方面说明了结构控制与控制理论的不

同分支间的联系. 结构振动主动控制技术 & 智能结构的出现, 为这一古老问题的解决提供了新的手段, 并大大地扩展了它的应用范围. 同时也带来了一些挑战性的问题, 需要对振动控制的机理作进一步的探讨. 新的振动控制技术处于多学科的交叉领域, 融合了控制、材料结构学及计算机等领域的技术, 其中自动控制是关键技术之一. 一方面, 结构振动控制为控制理论研究与应用提供了一个新的广阔空间, 另一方面, 其中一些亟待解决的问题同时也对控制界提出了新的挑战. 此项研究的科学意义和应用价值的重要性和迫切性是十分显然的. 90 年代以来, 在国际上已逐渐形成一支由控制、结构力学、材料等方面专家组成学术研究力量. 而我国还在起步阶段, 需要更多的控制专家尽早涉入, 以推动为我国在该学术方向作出国际先进水平的工作.

参考文献 (References)

- [1] Bai H. Approach of some problems in elastic structure vibration control [D]. Beijing: Peking University, 1995 (in Chinese)
- [2] Housner G W. Structural control: past, present, future [J]. J. Engrg. Mech., ASCE, 1997, 123(9): 897 - 971
- [3] Sun Dong, Wang Dajun and Xu Z L. Distributed piezoelectric segment method for vibration control of smart beams [J]. AIAA J., 1997, 35(4): 583 - 584
- [4] Liang C and Rogers C A. Onedimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials [J]. Intelligent Mat. Sys. and Struct., 1990, 1(2): 207 - 234
- [5] Masri S F. Modeling and control of an electrothelological device for structural control applications [J]. Smart Mater. and Struct., 1995, 4(A): 121 - 131
- [6] Jason Geng Z and Leonard S Haynes. Six degree-of-freedom active vibration control using the stewart platforms [J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 1994, 2(1): 45 - 53
- [7] Jiang Chengbao. Tissue and performances of directional freeze supermagnet-strictive alloy $Tb_{0.3} Dy_{0.7} (Fe, Mn)_{1.95}$ [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 1995 (in Chinese)
- [8] Song T T. An overview of active and hybrid structural control research in the U.S. [J]. The Struct. Dyn. Design of Tall Buildings, 1993, 2(1): 192 - 209
- [9] Xu Bohou and Bao Ronghao. Approximation of repeated mode subspace to a closely mode subspace in vibration control of a flexible structure [J]. Int. J. Nonlinear Science: Chaos, Soliton and Fractals, 1997, 8(10): 1609 - 1621
- [10] Feng Dexing and Zhang Weitao. Nonlinear feedback control of Timoshenko beam [J]. Science in China, Series A, 1995, 38(8): 918 - 927
- [11] Zhang Weitao and Feng Dexing. Boundary feedback stabilization of the wave equation in 2-D. C. R. A. cad [J]. Paris Ser I Math., 1996, 322: 1057 - 1062
- [12] Adhikari R. Adaptive control of nonstationary wind-induced vibration of tall buildings [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, TA4: 43 - 52
- [13] Wang Quan, Wang Dajun A and Leung T T. The method of successive decrease and the harmonic wave filter for wave control in structures [J]. Science in China, Series A, 1996, 39(6): 647 - 656
- [14] Wang Quan, Wang Dajun and Zhi Yang. The method and expectation of wave control [J]. Dynamics Evolution, 1994, 24(4): 489 - 497 (in Chinese)
- [15] Dyke S J. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction [J]. Smart. Mater. Struct., 1996, 4(5): 565 - 575
- [16] Yao J T P. Concept of structural control. [J]. J. Struct. Engrg. ASCE, 1972, 16(12): 1567 - 1574
- [17] Yan Weimin, Zhou Fulin and Tan Ping. Research development of vibration control of civil engineering structures [J]. World Earthquake Engineering, 1997, 13(2): 8 - 19 (in Chinese)
- [18] Zhang Jie and Mao Jianqin. Design method of AMD structure controller based by using output feedback based on LMI [A]. Collected Papers of Chinese Control Conference [C], Ningbo, 1998, 85 - 90 (in Chinese)
- [19] Yang J N. Parametric control of seismic-excited structures [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, WAI: 13 - 22
- [20] Abe M. Rule-based control algorithm for active tuned mass dampers [J]. J. Engrg. Mech., ASCE, 1996, 122(8): 705 - 713
- [21] Feng M Q, Maria Q F and Masanobu S. Friction-controllable sliding isolation system [J]. J. Engrg. Mech., ASCE, 1993, 119(9): 1845 - 1864
- [22] Rodellar J. Response analyses of buildings with a new nonlinear base isolation system [A]. Proc. First World Conf. on Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, TP1: 31 - 40
- [23] Yoshida I. Parameter identification on active control of a structural model [J]. Smart. Mater. Struct., 1995, 4(A): 82 - 90
- [24] Yen G G. Reconfigurable learning control in large space structures [J]. IEEE Trans. on Control Sys. Tech., 1994, 2(4): 362 - 371
- [25] Yu Yimei, Wu Qitai and Xu Bohou. Reduced dimension method of elastic structure control [J]. Advances in Mechanics, 1993, 23(4): 540 - 546 (in Chinese)
- [26] Meyer D and Srinivasan S. Balancing and model reduction for second-order form linear systems [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1996, 41(11): 1632 - 1644
- [27] Nishitani A. H_∞ structural response control with reduced-order controller [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, TP4: 63 - 72
- [28] Anderson B D O and Moore B. Optimal Control, Linear Quadratic Methods [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1990
- [29] Skelton R. Structure redesign for improved dynamic response [J]. AIAA J. Guidance, Control and Dyn., 1992, 15(5): 1271 - 1278
- [30] Grigoriadis K, Zhu G and Skelton R. Optimal redesign of linear systems [J]. J. Dyn. Sys., Measurement and Control, 1996, 118(3): 598 - 605
- [31] Spencer B F Jr. Structural control design: a reliability-based approach [A]. Proc. American Control [C], Baltimore Maryland, 1994, 1062 - 1066

- [32] Astrom K J and Wittenmark B. Adaptive Control [M]. Addison Wesley Publishing Co., Reading, Mass, 1995
- [33] Ih C H. Experimental study of robustness in adaptive control for large flexible structures [J]. AIAA J. Guidance, Control and Dyn., 1993, 16(1):9-13
- [34] Abraham M A and Morgan J R. Gain-scheduled adaptive control of a hybrid structure [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, TP4:3-12
- [35] Burdisso R A. Structural attenuation due to seismic inputs with active/ adaptive system [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, TA4: 3-12
- [36] Rahman Z and Spanos J. Active narrow-band vibration isolation of large engineering structures [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, FA4:23-32
- [37] Joghataie A. Neural networks and fuzzy logic in structural control [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, FA2:63-72
- [38] Sun L and Goto Y. Application of fuzzy theory to variable dampers for bridge vibration control [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C]. Los Angeles, 1994, WP1:31-40
- [39] Furuta H. Application of genetic algorithms to self-tuning of fuzzy active control for structural vibration [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, WP1:3-12
- [40] Yamada M. Active vibration control using fuzzy theory—Part 2: optimal membership functions [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, WP1:13-20
- [41] Krishnan R. Mitigation of wind and earthquake effects on structures by sliding mode control [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, WA2: 13-22
- [42] Spencer B F Jr, Suhardjo J and Sain M K. Frequency domain control algorithms for civil engineering applications [A]. International Workshop on Technology for Hong Kong's Infrastructure Development [C], Hong Kong, 1991, 169-178
- [43] Chase G J. Robust H_{∞} control considering actuator saturation [J]. J. Engrg. Mech., ASCE, 1996, 122(10):976-983
- [44] Yoshida K. LQG control and H_{∞} control of vibration isolation for multi-degree-freedom system [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, TP4: 43-52
- [45] Yoshida I. Robust control of structural vibrations using active dynamic vibration absorber systems [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, TP4:53-62
- [46] Nishimura H. H_{∞} control with pole assignment for building-like structure by using active dynamic vibration absorber [A]. Proc. First World Conf. Struct. Control [C], Los Angeles, 1994, TP4: 73-82
- [47] Liu D D, Mao J Q and Zhang J. Structure control with stiffness uncertainty in earthquake zone [A]. IEEE International Conf. on Control App. [C], Italy, 1998
- [48] Zhang Jie. Design of structure vibration controller based on LMI and its application to laser platform [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999 (in Chinese)

本文作者简介

毛剑琴 见本刊 2001 年第 2 期第 223 页

卜庆忠 1972 年生 北京航空航天大学 99 级博士生 主要研究方向为智能控制、鲁棒控制和低阶控制器设计

张杰 1969 年生 1990 年毕业于内蒙古大学电子学系电子学与信息系统专业,获工学学士学位,1995 年在哈尔滨理工大学工程系获得硕士学位,2000 年在北京航空航天大学获工学博士学位。研究方向为结构振动控制,鲁棒控制,信号处理等。

范国滨 1959 年生 1982 年毕业于国防科技大学自动控制系飞行器轨道与控制专业 1982 年~1985 年,从事国家地下核实验引爆控制系统研制及惯性引信等科研工作 1986 年至今,从事国家高技术激光技术总体研究工作。现任中国工程物理研究院应用电子学研究所副所长,高级工程师。研究方向为激光系统平台设计。

下期要目

| | |
|---|--------------------------|
| 不确定广义系统鲁棒区域稳定性 | 赵克友 |
| 网络通信量控制的主从模型 | 井元伟 陈兵 乔治·迪米罗夫斯基 科斯罗·索拉比 |
| 模糊自学习滑模变结构控制的研究及在直线 AC 系统中的应用 | 孙宜标 郭庆鼎 刘洋 |
| 一类线性不可观非线性系统的动态输出反馈镇定 | 陈彭年 秦化淑 |
| 线性时滞系统的耗散控制 | 李志虎 邵惠鹤 王景成 |
| (ρ, σ) -方法关于刚性延迟微分代数系统的非线性稳定性 | 张诚坚 廖晓昕 |
| 线性系统静态输出反馈镇定的 LMI 方法 | 王金枝 张纪峰 |
| 基于资源约束的并行活动优化调度方法 | 闫纪红 吴澄 |
| 遗传退火算法及收敛性分析 | 潘永湘 李敏远 李守智 |
| 线性多步法模糊逻辑系统 | 孙多青 霍伟 |
| 串级预测控制及其在涤纶片基生产线中的应用 | 李少远 席裕庚 陈增强 袁著祉 |
| Q 学习对制糖结晶遗传神经网络收敛性的改进 | 罗飞 毛宗源 莫鸿强 卢子广 |