

神经网络及模糊控制

在 振动主动控制 中的应用

陈玉强 肖友洪 李桂权◇著

黑龙江教育出版社

本书由牡丹江师范学院学科建设专项资金资助出版

神经网络及模糊控制在振动 主动控制中的应用

陈玉强 肖友洪 李桂权 著

黑龙江教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

神经网络及模糊控制在振动主动控制中的应用/陈玉强,肖友洪,李桂权著. —哈尔滨:黑龙江教育出版社, 2007. 12

ISBN 978 - 7 - 5316 - 4856 - 7

I. 神... II. ①陈... ②肖... ③李... III. ①神经网络—应用—振动控制②模糊控制—应用—振动控制 IV. TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 194465 号

神经网络及模糊控制在振动主动控制中的应用

SHENJING WANGLUO JI MOHU KONGZHI ZAI ZHENDONG KONGZHI ZHONG DE YINGYONG

陈玉强 肖友洪 李桂权 著

责任编辑 徐永进

封面设计 袁 洁

责任校对 夏 为

出版发行 黑龙江教育出版社

(哈尔滨市南岗区花园街 158 号, 150001)

印 刷 哈尔滨太平洋彩印有限公司

开 本 880 × 1230 毫米 1/32

印 张 5.5

字 数 150 千

版 次 2007 年 12 月第 1 版

印 次 2007 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5316 - 4856 - 7/G · 3768

定 价 32.00 元

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 振动主动控制技术及其发展	(2)
第二节 神经网络振动主动控制	(6)
第三节 模糊控制振动主动控制	(10)
第四节 本书主要研究内容	(12)
第二章 神经网络及模糊控制的基础理论	(14)
第一节 神经网络的基础理论	(14)
一、神经元的基本模型	(15)
二、神经网络的构成	(16)
三、神经网络的学习算法	(18)
四、误差反向传播网络	(19)
第二节 模糊控制基本理论	(24)
一、模糊集合和隶属函数	(24)
二、模糊关系、模糊矩阵与模糊变换	(25)
三、模糊逻辑与模糊语言	(27)
四、模糊推理	(29)
五、模糊控制系统结构	(30)
六、模糊控制器设计的基本方法	(32)
七、模糊控制存在的问题	(40)
本章小结	(40)
第三章 神经网络及模糊控制振动主动控制仿真	(41)
第一节 单神经元自适应 PID 振动主动控制	(41)
一、常规 PID 控制	(41)
二、自适应神经元及其学习策略	(44)

三、基于单神经元的 PID 控制	(45)
四、仿真研究	(46)
第二节 直接自适应神经网络振动主动控制	(53)
一、控制结构	(54)
二、神经网络结构及学习算法	(55)
三、数字仿真研究	(57)
第三节 直接自适应 PD 神经网络振动主动控制	(59)
一、控制系统结构	(59)
二、PD 神经网络结构及学习算法	(60)
三、数字仿真研究	(61)
第四节 模糊控制隔振系统的设计	(63)
第五节 双层隔振模糊主动控制仿真	(73)
第六节 双层隔振自适应模糊控制方法研究	(79)
一、自适应模糊控制器结构	(80)
二、参数自校正模糊控制器	(82)
三、仿真研究	(84)
本章小结	(87)
第四章 液压伺服振动主动控制系统特性分析	(89)
第一节 模型分析	(90)
第二节 控制系统	(95)
第三节 控制器输入参数对隔振系统控制性能的影响	(97)
第四节 刚度、阻尼及下层质量的变化对系统隔振能力的影响	(103)
第五节 下层质量响应与上下层相对位移组合输入对系统的影响	(113)
本章小结	(115)
第五章 振动主动控制实验研究	(116)
第一节 柴油机液压伺服系统主动隔振实验研究	(117)
一、柴油机装置液压伺服主动隔振台架	(117)

二、台架激振实验	(118)
三、柴油机振动实验	(119)
四、基于神经网络振动主动控制实验	(123)
第二节 神经网络双层隔振模拟台架振动主动控制实验研究	(128)
一、双层隔振主动控制模拟实验台	(128)
二、基于直接自适应神经网络的振动主动控制实验	(131)
三、基于直接自适应 PD 神经网络的振动主动控制实验	(132)
四、基于神经网络的非并置振动主动控制实验	(133)
第三节 模糊控制主动隔振试验研究	(137)
本章小结	(148)
致谢	(150)
参考文献	(151)

第一章 绪 论

振动控制是振动工程领域内的一个重要分支,是振动研究的出发点与归宿。从广义上说,振动控制包括两个方面的内容:一是振动的利用,充分利用有利的振动如各类振动机器;另一是振动的抑制,尽量减小有害的振动,因为振动加速机械的磨损,缩短产品与结构的寿命,使人易于疲劳,使仪器易于失灵,这里所讨论的振动控制只是振动的抑制。

振动控制的任务就是通过一定的手段使受控对象的振动水平满足人们的预定要求。

按是否需要能源区分振动控制可分为无源控制与有源控制,前者又称被动控制后者又称主动控制。振动被动控制由于不需外界能源,易于实现,经济性与可靠性高,在许多场合下减振效果满足要求,已广泛地应用在各工程领域中。但是随着科学技术的发展以及对振动环境、产品与结构振动特性越来越高的要求,振动被动控制的局限性就暴露出来了,难以满足人们的要求。主动控制技术由于效果好,适应性强等潜在的优越性,很自然地成为一条重要的振动控制新途径。振动主动控制包括开环控制与闭环控制。目前应用最为广泛的是闭环控制。一个振动主动控制系统主要由以下几个环节组成:(1)受控对象;(2)执行器;(3)控制器;(4)测量系统;(5)能源。其中控制器(控制律)的设计是中心环节,作动器(执行器)的设计是关键^[1]。

舰船柴油机振动和噪声的隔离是提高舰船隐蔽性和战斗力的

主要途径之一。振动具有危害性,对舰船而言,振动和噪声严重地影响其隐蔽性和防卫能力。根据各种声纳与本舰噪声的关系,降低本舰的振动噪声可以大大提高探测能力。对舰艇进行减振降噪处理,决不是单纯地从舒适性方面考虑的,重点在于提高舰艇的战斗能力。所以舰艇减振降噪的目的主要是:(1)提高舰艇的隐蔽性。因为迄今为止对水下目标的探测主要还是利用水声,而减振降噪既能降低自身舰艇辐射的水声,又能减少对自身声纳的干扰,从而提高其探测能力,这两者都有助于提高舰艇的隐蔽性。(2)改善舰员的工作环境条件。噪声与振动常常导致人员疲劳,造成误操作,这一点对于提高战斗力关系重大。(3)防止水雷与避开鱼雷跟踪。目前水雷都有声讯号引爆装置,而鱼雷上又有水声制导装置。以上几点很早以前就为人们所认识,但随着武器装备的发展,其相对重要意义有所不同。海湾战争中美国隐形飞机奇袭成功,使隐蔽性的重要意义空前突出,各海军强国纷纷研制隐形舰艇。主动隔振技术是隔振技术发展的主要方向,双层隔振系统广泛地应用于舰船,汽车的隔振。这种隔振系统能有效地隔离中高频振动,但对较低频率的振动却无能为力。低频隔振一直是被动隔振中的难题。对于舰船而言,低频振动与噪声对其隐蔽性和战斗力有着严重的影响,主动控制技术的发展为解决低频振动与噪声的隔离提供了新的方法。采用双层隔振与主动控制相结合以实际发动机进行实验研究具有重要的实际意义。

第一节 振动主动控制技术及其发展

振动主动控制取得了很大的发展^[1-6]。振动主动控制装置的雏形可追溯到上世纪初 20 年代出现的采用电磁阀控制的缓冲器。直到 1960 年前后才出现比较复杂的振动控制系统,其中以针对解

决航空工程中出现的振动问题为主。20 世纪中期就提出过用主动控制系统抑制颤振的主张,70 年代不少国家完成了大量实验,证实了主动减振的效果。1973 年 8 月采用颤振抑制系统的 B—52 型飞机以世界上第一次超过无主动控制时的颤振临界速度的速度飞行而载入史册^[7]。美国早在 1965 年前后完成了两代测试用主动隔振台,加速度干扰已被抑制到 $10^{-6}g$ 的水平,它为今天美国的航海、航天、航空作出了重要贡献。随着振动主动控制技术水平的提高,这一技术引起了科技界与工程界的关注。Abeel[1967]和 Schubert[1969]先后发表了电动吸振器和电液隔振系统的研究论文^{[8][9]},Bonder[1968]提出了车辆悬挂隔振控制的设想^[10]。在 20 世纪 70 年代初期,能源危机促进了新能源的开发,为此美国制定了空间太阳能电站的研究计划,这种大型航天器上安装的太阳能帆板属于大型挠性结构,除去控制其姿态使其跟踪太阳采集能量外,在张开帆板和机动飞行时都要求抑制它的振动,挠性结构主动减振开始受到重视。进入上世纪 70 年代,振动有源控制技术研究进入了广泛探索阶段。除了在航空航天方面继续研究探索,其它诸如机械工程、土木工程、交通运输等方面都开始了积极的理论和实验研究。

1980 年后振动主动控制进入了蓬勃发展的阶段^[11]。近二十年来,振动主动控制技术已日趋成熟,在控制理论、控制形式、执行机构等方面形成了较为系统的理论和技术。具体表现在以下几个方面:

a. 研究对象已经从单自由度振动系统发展到多自由度振动系统、从单方向振动发展到多方向耦合振动,相应的控制系统从简单的单输入单输出系统发展到单输入多输出,多输入多输出系统。如高精度的六自由度隔振平台的主动控制^[12-20]就是典型的这类系统。同时,也开始对非线性振动系统进行主动控制研究,出现很多非线性控制算法,如模糊主动控制^[20-26]、人工神经网络^[27-31]及

遗传算法^[32-37]等等。

b. DSP 芯片的发展和先进的数字信号处理技术使很多复杂的控制策略在一个合理的代价下得以实现,使振动主动控制得到更广泛的发展。而数字控制技术也成为主动控制领域的主导技术,以自适应滤波算法为基础的自适应控制技术发展尤为成熟和系统^{[11][38-40]}。

c. 发展了一系列如气动伺服式^{[12][41][42]}、液压伺服式^{[45][46][47-52]}、电磁式^{[11][18]}、电动式、压电式^{[13][51-53]}及磁致伸缩材料^{[54-59][14][15]},还有反作用式执行器^{[60][61]}、形状记忆合金^{[62][63]}和电流变流体^{[64][65]}等构成的执行器。

d. 从理论探索和实验室验证,逐步走向实际应用领域。在航天^{[18][20][66-69]}、航空^[70-73]、舰船^{[45][75][76]}、车辆^{[25][46-49][77-100]}、精密机床^{[38][101]}、高精密隔振平台^{[12-20][66-69]}以及机器人动态特性控制^[102-113]及土木工程^[114-118]等领域均有广泛的应用,有些已有成功应用的实例。文献^[45]介绍的船用柴油机双层隔振系统,是振动主动控制技术较早应用的例子。该系统装在拖船 Fukae Maru III (总吨位 449t,主机为 6DWL-26S 型增压柴油机,720r/min,1100kw)上,采用六个主动控制隔振单元,液压缸最大作用力为 14.5kN,最大行程为 690 μ m,控制频率 1~100Hz。控制策略采用自学习算法。在主动控制系统工作时,在 1~100Hz 范围内,中间质量的速度级衰减量大于 30dB。

文献^[15]介绍的一个六自由度微振动主动隔振平台(长 2000mm,宽 1400mm,高 230mm 和 2t 重)。采用六个空气弹簧、八个磁致伸缩材料作动器和六个加速度传感器,平台可载重 2 吨。其中四个作动器装在水平方向,另四个装在垂直方向。采用反馈控制策略。这种隔振平台(绰号 Fine LAPUTA)已于 1998 年秋得到成功应用。见诸报道的还有美国 Bell 公司(Bell's Research Electronics Group)的 MAVSS(Multipoint Adaptive Vibration Suppression)

系统^[70], Lotus 和 Infinity 公司生产的具有主动悬挂的汽车^[38], 应用于英国 - 意大利的 EH101 型样机 (the prototype Anglo - Italian EH101 helicopter) 的直升机结构振动主动控制系统 ACSR^[72] (Active Control of Structural Response) 等。

国内在振动主动控制领域的研究起步较晚。上世纪 80 年代初, 在航空界率先进行飞机机翼颤振主动抑制研究^[141]的同时, 土木工程领域结构振动控制也开始了研究^[116]。近二十年来, 我国从事此项研究的专家和学者不断增加, 研究领域已遍及重要的国防和民用工程。如结构振动^{[51][117][118][120][121]}、舰船柴油机双层隔振^{[26][30][31][74][122-126]}、主动吸振^{[75][127]}、内燃机轴系扭振和整机振动^{[76][128]}、车辆主动及半主动悬挂^{[27][47-49][89-100]}、柔臂机器人臂的振动控制^{[112][113]}、智能结构^{[54][55][129]}的研究等等, 取得了一些可喜的成果。1997 年, 国内第一部有关振动主动控制的专著在南京问世^[1]。国内学者在振动主动控制理论研究方面已接近或达到国际同步的水平, 但在开展工程应用研究方面却与国外相差较大。

哈尔滨工程大学动力与核能工程学院在国内较早地进行了振动主动控制的工程应用研究, 在舰船柴油机双层隔振主动控制系统的应用研究领域进行着前沿性的实验研究, 积累了丰富的理论与工程相结合的宝贵经验。舰船柴油机动力装置低频振动的主动控制技术一直是国防重点预研项目, 针对双层主动隔振台, 课题已从垂向的单自由度振动的主动控制^{[74][122][124][125]}发展到多自由度耦合振动的主动控制研究^{[123][2]}, 先后采用了自适应 MLMS 算法^[74]、自适应 x - RLMS 算法^[125]、自适应梳状滤波算法^{[122][125]}、多误差 LMS 算法^{[123][2]}等多种前馈控制算法, 取得了对单频、线谱和宽带振动突出的主动隔振效果, 同时, 该课题组在人工智能振动主动控制技术方面也进行了探索性研究^{[30][31]}, 这些理论与实验成果为本书研究奠定了良好的工作基础。

国内从事振动主动控制的单位还有南京航空航天大学

学^{[1][141][20][55]}、天津大学^{[3][128][130]}、上海交通大学^{[47][97][93][131]}、海军工程大学^[54]、哈尔滨工业大学(包括哈尔滨建筑大学)^{[95][116-118]}、北京理工大学^{[91][92]}、西安交大^{[23][24]}、西南交大^{[48][50][89][96][98]}等等。

第二节 神经网络振动主动控制

控制策略反映控制器输入与输出的关系,是振动主动控制中的核心问题。因此,控制策略的研究成为整个振动主动控制领域中的一个很重要的方面。到目前为止,振动主动控制的策略绝大多数基于控制领域和数字信号处理领域已有的成果,特别是先进的数字信号处理技术使很多复杂的控制策略成为可能。但都要根据振动问题的特殊性予以考虑加以修改,以满足实际应用的需要。

振动主动控制的策略基本上可分为两类,反馈控制和前馈控制。反馈控制的算法可以是经典的或现代的,如模态控制^[132-135]、极点配置法^{[131][136-139]}、最优控制(如 LQG)^{[46][96][99]}、鲁棒控制(如 H_∞ 控制)^{[83][134][140]}等等。

上面提到了振动主动控制的多种控制方法,这些方法虽各有优点,但一般都存在这样或那样的局限性,如模态空间控制将高阶系统的控制转换为低维控制,但存在“模态溢出”的问题;又如极点配置法虽有利于改善系统的稳定性,但通常仅考虑特征值的配置,而同时兼顾零、极点的配置的方法尚待研究;再如最优控制虽可兼顾系统的稳定性和控制的经济性,但通常需用试凑法选定加权矩阵,而且需要求解复杂的 Riccati 矩阵方程;鲁棒控制对系统不确定性具有较强的鲁棒性,但其控制律设计需要知道系统的部分先验知识。这些理论共同的局限性就是仅能处理缓时变线性系统的控制问题,并且都需要系统部分先验知识。然而工程中存在大量

的非线性、时变不确定性的“黑箱”系统,系统的特性难于用参数模型定量描述。如由机床结构与切削过程形成的闭环反馈系统、在微重力条件下的大挠性空间结构、受外界非平稳随机激励的汽车悬挂系统、大型船舶柴油发动机隔振系统以及车、舰载火炮隔振系统等。对这类系统的振动主动控制一般需借助非线性控制理论和智能工程理论加以解决。

非线性控制一直是控制领域研究的热点,主要涉及到用反馈线性化策略,如微分几何或逆系统方法研究系统的输出调节问题^{[142][143]},且均依赖于建立被控对象的精确解析模型。相应的建模与辨识方法主要有基于函数逼近的非参数化方法和基于非线性时序分析的参数化方法两类^[144],且均存在一定的局限性。如前者的建模精度通常依赖于模型选择,且不适于在线辨识;而后者运用系统的先验知识确定模型结构,因而工程实用性不强。因此对于上述“黑箱”系统,试图应用传统的非线性控制理论获得足够的精确性,又便于系统控制律设计的解析模型是非常困难的,因而使得基于模型的反馈线性控制策略受到极大的限制。

神经网络具有极强的非线性映射能力和学习能力,在“黑箱”系统的在线识别与非线性控制方面表现出巨大的潜力^{[145][146]}。因此,借助人工神经网络开展“黑箱”振动系统主动控制的研究对解决工程中复杂的振动控制问题有着重要的理论意义和实用价值。

神经网络是一种大规模并行分布处理非线性系统,由于它的非线性动力学复杂性,故在更高层次上体现了人类的智能行为,并为智能控制提供了新途径。神经网络的智能信息处理能力及控制系统所面临的愈来愈严重的挑战促进了神经网络控制的发展。目前这一研究正蓬勃发展、方兴未艾,神经网络在工程领域的应用主要表现在非线性系统辨识与神经网络控制两方面^{[147][148]}。

神经网络因其自身的非线性逼近能力,在系统辨识方面具有很大潜力,Narandra 与 Parthasarathy 提出了基于 BP 算法的四类离

散非线性动态系统辨识方法^{[149][150]},给出了通用的 SISO、MIMO 系统辨识模型。Ribeiro B M 和 Correia A D,对石灰窑炉应用四层前馈神经网络进行了建模,神经网络模型达到了足够高的精度^[151]。随着神经网络理论的日益成熟,神经网络将成为非线性系统辨识的重要手段,尽管如此,现有的神经网络辨识方法存在一些局限性:如网络参数较多,收敛速度较慢,辨识方法不具有普遍适用性等,许多学者在这些方面进行了有益的研究^{[152][153]}。

由于神经网络具有自学习功能,引起的控制工程领域的极大关注,基于神经网络的智能控制方法已成为控制领域的研究热点,将神经网络与传统的控制技术相结合也取得许多令人鼓舞的结果^[154-157]。Psaltis 等人给出了用作控制器的多层神经网络模型^[158],Guez 等提出了基于神经网络的自适应控制器^[159],Barto 等成功地将神经网络用于小车倒摆控制^{[160][161]},Donat 等将神经网络预测控制应用于反应釜内液体的 pH 值控制^[162],Miller 等将 CMAC 神经网络应于二关节机械手的伺服控制,解决了机械手的逆动力学问题^[163]。

尽管神经网络在化工过程、小车倒摆控制及机器人控制等方面已有成功尝试,但神经网络用于振动主动控制在 20 世纪 90 年代才刚刚起步,国外仅有少量文献报道,大都局限于计算机仿真与模型实验阶段,如 Scott. D. Snyder 将自适应滤波算法推广,进行了结构主动控制仿真研究^[27],考虑了控制器参考输入信号与外界干扰之间的非线性以及作动器本身的非线性,但所研究的受控结构为传递函数已知,且要求干扰可测。Jamshid Ghaboussi 用两个 BP 神经网络进行了结构主动控制研究^[28],先训练了一个神经网络辨识器用来预测结构的响应,然后用辨识器对神经网络控制器进行训练,取得了积极的仿真效果,但是不具有自适应性。Yu Tang 对单自由度结构进行了主动控制研究,提出了一种简单有效的控制策略^[164],在每一步对结构的响应建立进行抵消,下一步控制力的计

算由当前的系统信息获得,从而消除了延迟的影响。仿真效果表明,这种控制策略,能够有效地控制结构振动。Antonio Moran 和 Masao Nagai 对汽车悬架用神经网络进行了主动控制仿真研究^[165],与被动控制和线性最优(LQ)控制进行了比较,结果是神经网络控制优于 LQ 控制。Martin Bouchard 和 Bruno Paillard 等人对振动噪声的神经网络控制进行了研究,取得了较好的控制效果^[166]。Al - Nassar 等人用神经网络对转子振动进行了仿真控制研究,也采用了两个神经网络,一个用于传播误差,一个用作控制器,并讨论了神经网络结构参数与控制效果的关系^[167]。朱美玲等^[29]提出了基于神经网络的自适应振动控制方法,也是具有两个神经网络的控制方案,仿真表明该方法对非线性振动具有较强的控制能力。天津大学的刘华^[3]在神经网络振动主动控制方面进行了深入的研究,他采用了双神经网络的控制形式如图 1.1,图中 PLANT 表示被控振动结构,NNC 表示神经网络控制器,NNI 为神经网络辨识器,在控制过程中两个神经网络交替进行学习。哈尔滨工程大学孙承顺与黄金娥开展了双层隔振振动主动控制的神经网络控制研究^{[30][31]},文献[30]采用了双神经网络的控制方式,进行了仿真研究,并分析了神经网络形式与控制效果的关系;文献[31]采用了单神经元 PID 控制方法,使用误差平方为性能指标进行了仿真与实验研究取得了积极的成果。尽管已有的成果令人鼓舞,但仍存在一些不足,如同时训练两个神经网络,控制结构复杂,算法收敛速度慢等。基于神经网络的双层隔振振动主动控制研究还处于探索阶段,无论在理论上还是在应用上都需要进一步的研究,特别是具有液压伺服系统的柴油机振动主动控制的研究目前国内才刚刚开始。鉴于具有液压伺服系统的柴油机双层隔振系统的复杂性,系统的精确模型不易建立的原因,基于神经网络振动控制方法具有较强的自适应性、鲁棒性与容错性等优点,本文采用神经网络控制技术对柴油机的振动进行主动控制。

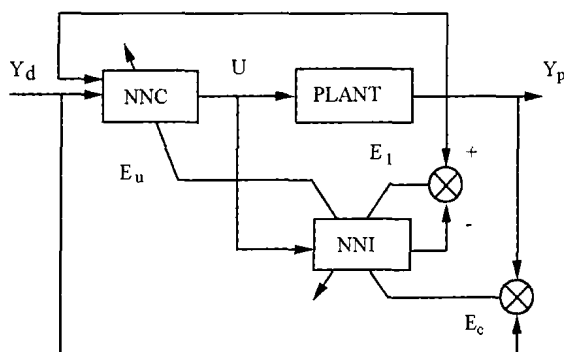


图 1.1 间接自适应神经网络控制结构

第三节 模糊控制振动主动控制

模糊控制实际上是一种非线性控制,从属于智能控制的范畴。模糊控制获得巨大成功的主要原因在于它具有如下一些突出特点:

a. 模糊控制是一种基于规则的控制,它直接采用语言型控制规则,其依据是现场操作人员的控制经验或相关专家的知识,在设计中不需要建立被控对象的精确数学模型,因而使得控制机理和策略易于接受和理解,设计简单,便于应用。

b. 由工业过程的定性认识出发,比较容易建立语言控制规则,因而模糊控制对那些数学模型难以获取,动态性能不易掌握或变化非常显著的对象非常适用。

c. 基于模型的控制算法及系统设计方法,由于出发点和性能指标的不同,容易导致较大差异;但一个系统语言控制规则却具有相对的独立性,利用这些控制规则间的模糊连接,容易找到折中的选择,使控制效果优于常规控制器。

d. 模糊控制是基于启发性知识及语言决策规则设计的,这有利于模拟人工控制的过程和方法,增强控制系统的适应能力,使之具有一定的智能水平。

e. 模糊控制系统的鲁棒性强,干扰和参数变化对控制效果的影响被大大减弱,尤其适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制。

从某种意义上讲,人工神经网络试图模仿大脑的硬件,而模糊系统则旨在模拟人脑的软件,它是对人的思维方式的模拟。模糊控制最初由美国的扎德(L. A. Zadeh)教授提出,之后得到了广泛的重视和迅速发展。从根本上讲,模糊逻辑是系统分析中处理非精确依赖关系的一种有效方法,它与人的直觉接近。因此模糊控制不仅适用于小规模线性单变量系统,而且逐渐向大规模非线性系统扩展。模糊控制的优越性使人们开始考虑到将模糊控制应用到震动控制领域。J. R. Wiegand^[178]等人最先将模糊控制应用于 AS-TREX 空间柔性结构的振动主动控制,I. J. Zeinou^[179]则将神经网络与模糊控制技术相结合构成模糊神经网络对柔性臂进行主动控制。文献[181]给出另一种基于自适应模糊逻辑系统的主动前馈控制方法,该方法能有效地解决一些诸如前馈控制中参考信号与外干扰呈非线性函数关系的非线性控制问题。仿真结果表明模糊自适应滤波器具有优于线性滤波器的控制效果。文献[180]将基于连续模糊判决函数实现的模糊 PD 控制用于柔性结构的振动主动控制。文献[177]将设计的模糊逻辑控制器用于双层隔振平台,仿真结果表明,基本上能完全将下层的振动消除,同时指出,这种控制器具有鲁棒性好、易于设计、反应快、易于实现等特点。可以预见,人工智能控制技术在振动主动控制领域具有广阔的应用前景。