

压电自适应桁架结构智能振动控制

郑 凯¹, 陈 杰², 杨义勇³

(1. 华北电力大学(北京) 能源动力与机械工程学院 生物质发电成套设备国家工程实验室, 北京 102206;

2. 北京理工大学 自动化学院 复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 介绍了采用模糊神经网络模型进行振动主动控制的压电自适应桁架结构设计、应用及实验结果. 设计了一种具有自适应结构技术的压电主动构件结构, 并提出了具有5层结构能够自调整隶属函数的模糊神经网络控制模型. 为了验证控制模型的有效性, 搭建了配置压电主动构件的双跨桁架结构试验平台, 通过检测误差信号, 由模糊神经网络控制模型确定主动构件的驱动输出. 试验结果证实了模糊神经网络控制模型在振动抑制方面的有效性.

关键词: 自适应桁架结构; 振动控制; 模糊神经网络

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Intelligent vibration control of adaptive piezoelectric truss structure

ZHENG Kai¹, CHEN Jie², YANG Yi-yong³

(1. National Engineering Laboratory for Biomass Power Generation Equipment, School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University(Beijing), Beijing 102206, China;

2. Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision, Ministry of Education, School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The design, implementation and experimental results of active intelligent vibration control of an adaptive truss structure are presented. An adaptive truss structure with self-learning active vibration control system is developed. A fuzzy-neural-network(FNN) controller with adaptive membership functions is presented. The experimental setup of a two-bay truss structure with active members is constructed, and the FNN controller is applied to suppress the vibration of the truss. First, the output of the accelerometer is sensed as an error signal for activating the adaptation of the weights of the controller; and then, the control command signal is calculated based on the FNN inference mechanism for driving the active members. Experimental results demonstrate that the active FNN controller can effectively reduce the truss vibration.

Key words: adaptive truss structure; vibration control; fuzzy neural network

1 引言(Introduction)

随着航天技术的发展, 空间飞行结构向大型化、复杂化、轻量化、柔性化的方向发展, 以适应其低能耗、高精度、低成本等要求^[1,2]. 桁架类结构以其良好的力学特性得到大量应用, 如用于支撑测量仪器、天线、折叠翻板等对一些振动敏感的设备. 为了提高桁架结构的动力学特性, 解决空间结构的形变、振动等问题, 目前国内外研究最多的是采用自适应结构技术, 通过在杆件结构中内嵌传感器、作动器和微处理器, 可以自主感知外界干扰, 并迅速做出合理响应. 由于压电陶瓷材料(PTZ)具有刚度高、频带宽、高转换率、质量轻等特点, 在自适应桁架结构中常被用于制作传感器和作动器.

目前国内外对压电材料的诸多研究已取得了丰硕成果, 但大多集中在板、梁、壳等方面, 对桁架类结构研究不足, 对以主动构件形式进行震动主动抑制的研究相当缺乏. 文中介绍了自行研制的压电主动构件, 具有传感和作动的双重功能, 可以替代传统桁架结构中的关键杆件, 达到精密定位和振动控制的目的^[3,4]. 考虑到桁架结构的柔性化和环境复杂性, 传统控制方法存在建模困难、适应面少等问题, 文中采用了模糊神经网络的智能控制方法^[5~9].

2 压电主动杆件的设计(Design of piezoelectric active member)

压电陶瓷材料因具有逆压电效应, 即通电后会发生产生形变产生位移, 而被广泛用作作动器. 假设压电片

沿厚度 t 变形均匀,当仅在压电陶瓷片的极化方向作用电压 V 、外力 F 时,压电陶瓷片的轴向变形量 Δ_3 为

$$\delta_3 = \frac{s_{33}^E t F}{A} + d_{33} V, \quad (1)$$

式中: s_{33}^E 为恒定电场情况下的弹性柔度阵, A 为横截面积, d_{33} 为压电应变系数.为了获取更大的输出位移,通常采用将 n 片厚度为 t 压电陶瓷片按极性相对,力学上串联、电学上并联的形式粘合而成压电叠层的形式,也称为压电堆,其轴向输出位移

$$\delta = n\delta_3 = n\left(\frac{s_{33}^E t F}{A} + D_{33} V\right). \quad (2)$$

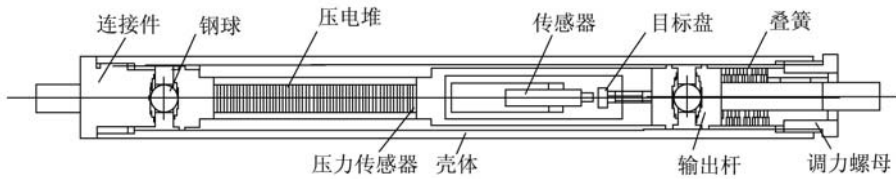


图1 压电主动构杆结构图

Fig. 1 Structure of active member

3 模糊神经网络控制器(Fuzzy neural controller)

由式(2)可以看出,在压电堆结构一定的情况下,其输出位移只取决于外部驱动电压.因此振动控制模型的任务即为实现外界扰动与驱动电压的映射关系.为了构建压电桁架结构的自学习主动振动控制系统,文中提出了一个5层结构的模糊神经网络(FNN)控制模型,如图2所示.

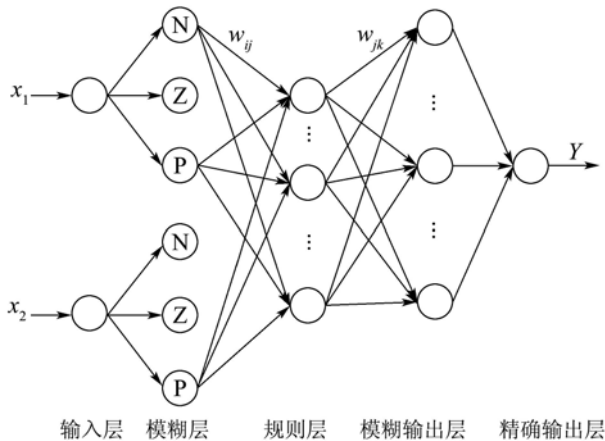


图2 模糊神经网络控制器结构

Fig. 2 Structure diagram of the FNN

第1层为输入层,输入节点代表振动过程中传感器检测到的位移误差及加速度信号.第2层为模糊层,由隶属函数节点组成,表示输入节点的模

因此选用较薄的压电片,较多的压电片数,以及较大的压电片面积,有利于减小驱动电压,提高压电堆作动器位移输出量和改善力学特性.

由于压电堆作动器在工作时只能承受压力,在压电主动构杆结构内部添加了预压装置—通过叠簧施加预压力,通过调力螺母可以调整预压力的大小.通过在构件两端添加钢球,以保证压电堆作动器避免受到扭矩作用.压电主动构件结构如图1所示.压电堆作动器的输出性能直接影响到压电主动构杆的控制应用.

糊集,完成从精确值到模糊值的映射.第3层为规则层,代表模糊规则,所有节点构成模糊规则基.第4层为模糊输出层,节点表示输出变量离散域内的模糊值.模糊层和模糊输出层中的每个节点都可以构成一个单独的隶属函数运算器.第3,4层间的连线起到连接机制的模糊推理作用,第3层规则层连线规定规则节点的前提条件,第4层模糊输出层节点规定规则节点的结论.第5层为精确输出层,执行解模糊过程,可得精确输出,即压电堆作动器的驱动电压.

3.1 神经网络层间计算(Layered operation of FNN)

用 x_i^k 表示第 k 层的第 i 个输入, net_j^k 表示第 k 层第 j 个节点的净输入, y_j^k 表示第 k 层的第 j 个节点的输出,即 $y_i^k = x_j^{k+1}$,网络模型中每层节点的函数功能如下:

$$y_j^1 = \text{net}_j^1, \text{net}_j^1 = x_i^1, j = i, \quad (3)$$

式中: x_i^1 为第1层的第 i 个输入, $i = 1, 2$.该层只有两个输入节点,即振动位移及振动加速度.

第2层为模糊层,也可称为隶属函数层,单个节点构成一个简单的隶属函数,采用高斯形函数:

$$\text{net}_j^2 = \frac{(x_i - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}, y_j^2 = \exp(\text{net}_j^2), \quad (4)$$

式中: m_{ij} 和 σ_{ij} 分别是第 i 个输入变量的第 j 个模糊集合隶属函数的中心值和宽度值.

第3层为规则层, 用来执行模糊逻辑规则前提条件的匹配, 规则节点具有“与”运算功能:

$$\text{net}_i^3 = x_1^3 \cdot x_2^3 \cdot \cdots \cdot x_p^3, y_i^3 = \text{net}_i^3, \quad (5)$$

式中 y_j^3 即第 j 条规则的激活度。

第4层模糊输出层的节点与第2层模糊层的节点作用相同, 得到模糊输出的隶属度。

第5层为精确输出层, 实现对模糊输出的重心法解模糊化:

$$\begin{cases} \text{net}_j^5 = \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^5 x_i^5 = \sum_{i,j=1}^N (m_{ij} \sigma_{ij}) x_i^5, \\ y_j^5 = \frac{\text{net}_j^5}{\sum_{i,j=1}^N \sigma_{ij} x_i^5}. \end{cases} \quad (6)$$

式中 y_1^5 即网络最后的输出, 第5层的连接权 $w_{ij}^5 = m_{ij} \sigma_{ij}$. 该层只有一个输出节点, 即压电堆作动器的驱动电压。

3.2 模糊规则的定义(Definition and adjustment of fuzzy rules)

网络的输入将被模糊化为7级, 即负大、负中、负小、零、正小、正中、正大, 依次表示为NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB. 根据测量数值, 可以对其进行量化. 同样, 输出项也分为7级. 隶属函数采用高斯型函数. 根据模糊推理规则

如果 A 是 A_i , B 是 B_j , 然后 U 是 U_{ij} ,
 $i, j = 1, 2, \cdots, 7$.

可以得到如表1所示的模糊规则。

表1 模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules U

A	B						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PM	ZE	ZE
NM	PB	PB	PB	PM	PM	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NS
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM
PM	PS	ZE	ZE	NM	NM	NB	NB
PB	ZE	ZE	ZE	NM	NM	NB	NB

所有的控制规则都可以用一系列的数字信号来表示. 模糊规则库, 可以通过具有学习功能的神经网络权值进行存贮. 神经网络的权值通过反向

误差传播(BP)算法进行训练, 误差函数定义为

$$E = \frac{1}{2}(y_d - y_1^5)^2, \quad (7)$$

其中 y_d 为期望输出. 误差信号将从第5层向第1层反向传播。

对每组训练数据, 首先从输入节点开始, 逐层计算所有节点的激活值. 然后, 从输出节点开始反向计算. 假设 w 是一节点的可调参数, 学习规则为

$$\begin{aligned} \Delta w &\propto -\frac{\partial E}{\partial w}, \\ w(t+1) &= w(t) + \eta \left(-\frac{\partial E}{\partial w}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

式中 η 为学习效率, 且

$$\frac{\partial E}{\partial w} = \frac{\partial E}{\partial \text{net}} \cdot \frac{\partial \text{net}}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial E}, \quad (9)$$

先逐层计算 $\frac{\partial E}{\partial y}$, 从输出节点开始, 使用隶属函数进行计算, 因此用隶属函数中心值 m_i 和宽度 σ_i 作为可调整参数。

第5层中心值 m_i :

$$m_i(t+1) = m_i(t) + \eta(y_d - y_1^5) \frac{\sigma_i}{\sum_{i=1}^N (\sigma_i x_i^5)}. \quad (10)$$

宽度 σ_i :

$$\begin{aligned} \sigma_i(t+1) = & \\ & \frac{m_i x_i^5 \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i x_i^5 \right) - \left(\sum_{i=1}^N m_i \sigma_i x_i^5 \right) x_i^5}{\left(\sum_{i=1}^N \sigma_i x_i^5 \right)^2} \cdot \sigma_i(t) + \eta(y_d - y_1^5). \end{aligned} \quad (11)$$

传递误差 δ^5 至第4层:

$$\delta^5 = y_d - y_1^5. \quad (12)$$

第4层误差信号:

$$\delta_i^4 = (y_d - y_1^5) \frac{m_i \sigma_i \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i x_i^4 \right) - \left(\sum_{i=1}^N m_i \sigma_i x_i^4 \right) \sigma_i}{\left(\sum_{i=1}^N \sigma_i x_i^4 \right)^2}. \quad (13)$$

第3层误差信号:

$$\delta_i^3 = -\frac{\partial E}{\partial y_i^3} = \delta_i^4 \frac{\partial y_i^4}{\partial x_i^4} = \delta_i^4. \quad (14)$$

第2层误差信号:

$$\delta_j^2 = \frac{\partial E}{\partial \text{net}_j^2} = \left(\sum_{i=1}^N \delta_k^3 \cdot y_i^2 \right) y_j^2, \quad (15)$$

$$m_{ij}(t+1) = m_{ij}(t) + \delta_j^2 \frac{2(y_i^1 - m_{ij}(t))}{\sigma_{ij}^3}, \quad (16)$$

$$\sigma_{ij}(t+1) = \sigma_{ij}(t) + \sigma_j^2 \frac{2(y_i^1 - m_{ij}(t))}{\sigma_{ij}^3}. \quad (17)$$

4 振动控制实验(Active vibration control experiment)

振动试验平台如图3所示, 压电主动构件被安装在双跨桁架的对角线位置, 其余杆件均为铝合金空心管. 桁架关键节点处安装扬州无线电二厂CA-YD-103型压电式加速度传感器(轴向灵敏度为 2 PC/ms^{-2} , 最大横向灵敏度 $\leq 5\%$, 安装谐振频率 40 kHz). 试验采用东方振动与噪声研究所的INV-8多功能抗混滤波放大器以及INV306DF型智能信号采集处理分析仪, 扬州无线电二厂LC型冲击力锤, 哈工大博实精密测控有限责任公司3B0300A0350型压电陶瓷驱动电源, 三路输出, 最高输出电压 350 V , 输出电压分辨率 9 mV , 频率响应 2 kHz .



图3 振动控制试验平台

Fig. 3 Vibration experimental setup

振动控制流程图如图4所示. 采用5层结构的模糊神经网络模型进行振动控制, 其中, 训练控制器节点权值的BP算法中 $\alpha = 0.02$, $\beta = 0.02$, 其余参数为 $[0, 1]$ 的随机值, 在累积误差收敛的情况下离线训练30万次. 试验采样频率为 1 kHz . 控制器首先检测加速度传感器的误差信号, 并进行控制器权值的调整, 通过控制器的推理机制得出控制信号, 驱动压电主动构件做出响应. 控制过程中所测得的振动信号的误差以及误差变化幅值为: $e \in [-1, +1] \text{ V}$, $\dot{e} \in [-500, +500] \text{ V/s}$, 输出控制信号的范围 $u \in [-5, +5] \text{ V}$, 该信号经电压放大后为 $[0, 350] \text{ V}$.

在桁架结构的B点处施加脉冲激励, 开闭环状态下A点处的时域振动响应信号如图5所示. 可以

看出, 控制后的振动响应较之开环状态大幅降低, 稳定时间由 0.3 s 减少至 0.1 s , 控制器提供了良好的阻尼率. 在其他位置的多次宽频域的激励试验, 得到了类似的控制效果.

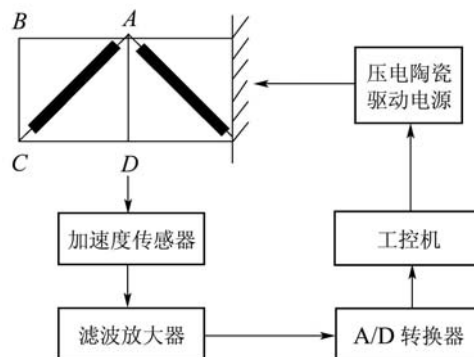
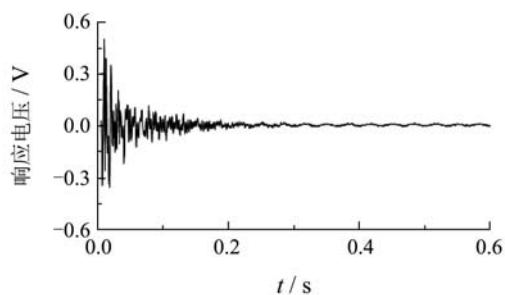
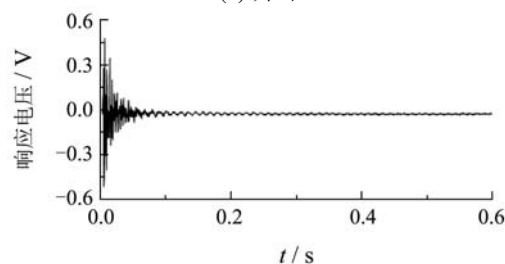


图4 控制方块流程图

Fig. 4 Control flow chart



(a) 开环



(b) 闭环

图5 脉冲激励的振动响应

Fig. 5 Response of the truss under a pulse

5 结论(Conclusions)

文中设计了采用压电堆作动器的压电主动构件, 并提出了具有自适应隶属函数调整功能的模糊神经网络控制器. 搭建了振动控制试验平台, 通过对振动加速度信号的检测, 由模糊神经网络控制器得到对压电主动构件的驱动输出. 实验结构证实了模糊神经网络控制模型在自适应桁架结构振动控制方面的有效性.

参考文献(References):

- [1] WON C C, SULLA L, SPARKS D W. Application of piezoelectric devices to vibration suppression[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1994, 17(6): 1333 – 1338.
- [2] CHOI W C, KIM N N. Experimental study on active vibration control of a flexible cantilever using an artificial neural-network state predictor[J]. *Smart Material and Structure*, 1996, 5(6): 751 – 758.
- [3] MAYHAN P, SRINIVASAN K, ATECHAGIT S, et al. Dynamic modeling and controller design for a piezoelectric actuation system used for machine tool control[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, 11(10): 771 – 780.
- [4] 阎绍泽, 吴德隆, 叶青, 等. 用于自适应可展结构的压电式智能主动杆[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(6): 762 – 765.
(YAN Shaoze, WU Delong, YE Qing, et al. Intelligent active piezoelectric member for adaptive deployable structures[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2002, 42(6): 762 – 765).
- [5] DAVIS L, HYLAND D, YEN G. Adaptive neural control for space structure vibration suppression[J]. *Smart Material and Structure*, 1999, 8(6): 753 – 766.
- [6] CHEN Y J, TEND C C. Rule combination in a fuzzy neural network[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 82(2): 161 – 166.
- [7] FAA J L, RONG J W, KUO K S, et al. Recurrent fuzzy neural network control force piezoelectric ceramic linear ultrasonic motor drive[C] // *Proceedings of IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. [S.l.]: [s.n.], 2001, 48(4): 900 – 911.
- [8] FAA J L, HSIN J S, PO K H, et al. Adaptive control with hysteresis estimation and compensation using RFNN for piezo-actuator[C] // *Proceedings of IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. [S.l.]: [s.n.], 2006, 53(9): 1649 – 1661.
- [9] RONG J W, JENG D L. Intelligent motor control for linear piezoelectric ceramic motor drive[C] // *Proceedings of IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*. [S.l.]: [s.n.], 2004, 34(5): 2100 – 2111.

作者简介:

郑 凯 (1974—), 男, 博士, 讲师, 研究领域为智能结构设计及其控制、产品CAD设计等, Email: zkajiao@163.com;

陈 杰 (1965—), 男, 博士生导师, 教授, 研究领域为模式识别与智能系统, Email: chenjie@bit.edu.cn;

杨义勇 (1966—), 男, 副教授, 研究领域为自动控制、机械设计等, Email: yangyy@cugb.edu.cn.

(上接第942页)

- [3] HANSON J, SHEIKH S, GRAVEN P, et al. Noise analysis for X-ray navigation systems[C] // *Proceedings of IEEE-ION Position, Location and Navigation Symposium*. Madison Wisconsin, USA: Omnipress, 2008: 704 – 713.
- [4] 杨廷高. 用脉冲星钟做航天器时间标准[J]. 时间频率学报, 2007, 30(2): 125 – 131.
(YANG Tinggao. Using pulsar clock as time scale for spacecraft[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2007, 30(2): 125 – 131.)
- [5] 乔黎, 刘建业, 郑广楼, 等. XNAV算法及其整周模糊度确定方法研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1460–1465.
(QIAO Li, LIU Jianye, ZHENG Guanglou, et al. Development of XNAV Algorithm and Cycle Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(4): 1460 – 1465.)
- [6] MANCHESTER R R N, HOBBS G B, TEOH A, et al. The ATNF pulsar catalogue[EB/OL]. <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>[2009-04-05].
- [7] SHEIKH S I. *The use of variable celestial x-ray sources for spacecraft navigation*[D]. Maryland, USA: University of Maryland, 2005.

作者简介:

乔 黎 (1982—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为航天器自主导航和组合导航, E-mail: qiaoli@nuaa.edu.cn;

刘建业 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向为惯性技术、卫星定位和组合导航系统等, E-mail: ljyac@nuaa.edu.cn;

郑广楼 (1982—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为航天器天文导航技术, E-mail: zhenggl@nuaa.edu.cn;

熊 智 (1976—), 男, 副教授, 目前研究方向为惯性技术、景象匹配、微小卫星定姿, E-mail: xznuaa@nuaa.edu.cn.