

# 风洞悬臂杆结构主动减振系统的研究\*

沈 星, 涂凡凡, 陈金金, 雷文彬

(南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室 南京, 210016)

**摘要** 风洞测试时悬臂杆振动会影响测试数据的准确性, 为了抑制悬臂杆振动, 设计了基于压电驱动器的主动减振系统, 提出了将人工神经网络与传统比例积分微分(proportion integration differentiation, 简称 PID)相结合的智能控制算法, 实现了控制参数在线实时调整。对该控制系统的减振性能分别进行了地面试验和风洞试验, 并与采用传统 PID 控制的试验结果进行对比。结果表明, 神经网络 PID 控制下的振动收敛时间比传统 PID 缩短了 50%, 而且在不同风速和攻角下, 悬臂杆系统的 1 阶模态振动均得到了有效衰减(衰减幅度 > 19 dB), 表现出良好的鲁棒性。

**关键词** 压电驱动器; 智能结构; 振动主动控制; 神经网络; PID 控制

**中图分类号** TB535.1; TP273.2; TH113

## 引 言

风洞试验时, 被测模型、应变仪天平、尾支杆及其固定装置构成了一个悬臂杆系统。当该悬臂杆系统被放置在风洞气流中时, 由于气流含有固有宽频带的扰动, 导致作用在模型上的载荷在原有静载荷基础上产生波动, 从而引起模型和尾支杆的振动。这种振动不仅影响了风洞测试数据的准确性, 还阻碍了航空事业的发展; 因此, 抑制风洞模型尾支杆振动已成为亟待解决的关键课题。

早期的风洞研究者主要采用被动控制的方法来抑制悬臂杆系统的振动, 即在模型内部放置调谐被动阻尼器, 但是这种方法的效果非常有限<sup>[1]</sup>。压电材料由于具有动作响应快、频率范围宽和驱动力大等许多优点, 在振动主动控制领域得到了广泛研究, 主要包括压电智能结构的动力学建模<sup>[2-4]</sup>和控制算法<sup>[5-11]</sup>的研究, 如正向位置反馈(positive position feedback, 简称 PPF)控制<sup>[5-8]</sup>、自适应控制<sup>[9]</sup>、滑模控制<sup>[10]</sup>和改进的最小控制器合成(improved minimal controller synthesis, 简称 IMCS)控制<sup>[11]</sup>等。基于模态空间的控制要求准确建立被控结构的力学模型, 自适应控制要求参考信号与外扰信号具有线性相关性, 导致这些算法在工程应用中存在一定的局限性。欧美国家率先对压电材料在风洞减振系统

中的工程应用展开研究。Gregory 等<sup>[12]</sup>采用压电材料控制飞行器垂尾及其附体结构的振动。Fehren 等<sup>[13]</sup>利用大驱动力的压电元件作为驱动器, 为全跨度模型风洞测试开发了主动减振系统。Balakrishna 等<sup>[14-16]</sup>设计了亚声速风洞主动减振系统, 他们在模型与支杆的连接处对称安装了两对压电驱动器, 在控制器的作用下, 支杆在  $y$  和  $z$  方向上的 1 阶模态振动得到有效衰减。陈仁文等<sup>[17]</sup>设计了基于压电智能结构的垂尾减振系统, 却没有进行风洞测试。

笔者以控制悬臂杆系统  $z$  方向 1 阶模态为主要目标, 采用神经网络 PID 控制算法, 选取压电陶瓷叠堆作为驱动器设计了风洞主动减振系统, 对风洞振动主动控制进行了基础性研究, 通过地面试验和风洞试验, 研究了神经网络参数对控制器性能的影响, 对比了神经网络 PID 与传统 PID 在相同初始参数下的减振效果。

## 1 控制原理

风洞悬臂杆系统所受弯矩如图 1 所示。模型受到的气动载荷  $F$ (包括静载荷和扰动载荷)作用在压力中心, 载荷在沿着尾支杆的任意截面处产生动态弯矩。该系统可以被看成是一个多自由度低阻尼的质量弹簧系统, 其在气动载荷  $F$  作用下的振动方程可表示为

\* 中央高校基本科研业务费资金资助项目(NS2013010); 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目; 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfj130105); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 2014 年度高校“青蓝工程”资助项目

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2013-12-05

$$M\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = F \quad (1)$$

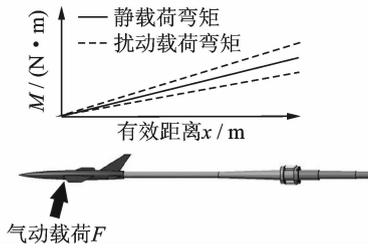


图 1 悬臂杆系统图

Fig. 1 Wind tunnel cantilever sting system

其中： $M$ 、 $C$  和  $K$  分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $\theta$  和  $F$  分别为系统的位移向量和作用力向量。

采用压电驱动器实现减振的原理，如图 2 所示。在尾支杆根部以上下对称的方式安装一对压电驱动器，通过外加电压使得驱动器交替伸长，产生  $z$  截面的反力矩来抵消气动载荷  $F$  在该处产生的弯矩，从而抑制悬臂杆系统  $z$  方向的 1 阶模态振动。

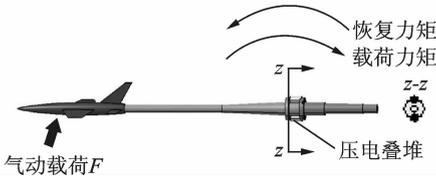


图 2 压电驱动器减振原理

Fig. 2 Principle of piezoelectric damper

振动控制系统如图 3 所示。将滤波后的振动信号对时间进行微分后再反馈到闭环控制器中，采用速率反馈的方法确保该减振系统能抑制悬臂杆系统受到的扰动载荷弯矩，不会抵消静载荷弯矩。

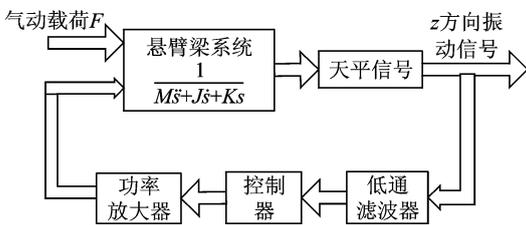


图 3 振动控制系统

Fig. 3 Diagram of vibration damping system

## 2 控制器设计

PID 控制结构简单，在很多复杂工况下都有很强的鲁棒性，是工业中理论最成熟、使用最广泛的控制方法之一。准确整定 PID 控制参数是获得良好

控制性能的关键。工程中有很多参数整定的方法，如经验法和 Z-N 整定法，但是这些都建立在有一定工程经验或者能准确建立被控系统数学模型的基础上。对于未知的复杂线性系统，由于系统的不确定性和时变性，固定参数的 PID 控制反而会降低其控制性能，这就对实现 PID 控制器参数在线实时调整来获取最优参数提出了更高的要求。神经网络具有强大的自适应学习能力和辨识能力，被认为是解决复杂未知系统控制问题最有前景的方法之一。神经网络 PID 控制器结构如图 4 所示。

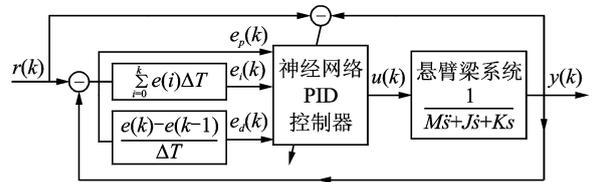


图 4 神经网络 PID 控制器结构图

Fig. 4 Structure of neural network PID controller

神经网络 PID 原理如图 5 所示。该网络是一个典型的含有 3 个输入端和 1 个输出端的前向网络， $e_p$ 、 $e_i$  和  $e_d$  分别为悬臂杆系统实际输出与参考输出之间的误差、误差积分和误差微分； $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  分别为比例、积分和微分数。神经网络的训练采用误差反向传播算法。

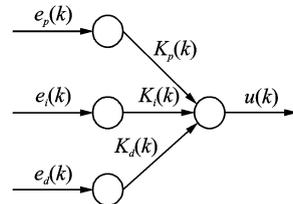


图 5 神经网络 PID 原理图

Fig. 5 Schematic diagram of neural network PID

输入层的激活函数为比例函数，且比例系数为 1，输出层的激活函数为求和函数，其输出为  $u(k)$ ，则  $u(k)$  可以表示为

$$u(k) = K_p(k)e_p(k) + K_i(k)e_i(k) + K_d(k)e_d(k) \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} e_p(k) = r(k) - y(k) \\ e_i(k) = \sum_{i=0}^k e(i)\Delta T \\ e_d(k) = (e(k) - e(k-1))/\Delta T \end{cases} \quad (3)$$

其中： $\Delta T$  为系统采样周期； $k$  为离散信号序列； $r(k)$  和  $y(k)$  分别为参考输出和悬臂梁系统的实际输出。

误差反传算法是常用的神经网络训练算法之一，训练学习的目标是使悬臂梁系统的输出误差绝

对值为最小,即目标函数

$$E(k) = [r(k) - y(k)]^2 / 2 \quad (4)$$

取得最小值。采用最抖下降法来实时调整 PID 控制器参数,计算公式为

$$\begin{cases} K_p(k+1) = K_p(k) - \alpha_p \partial E(k) / \partial K_p \\ K_i(k+1) = K_i(k) - \alpha_i \partial E(k) / \partial K_i \\ K_d(k+1) = K_d(k) - \alpha_d \partial E(k) / \partial K_d \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\alpha_p, \alpha_i, \alpha_d$  为学习率,其决定了网络收敛的快慢。

根据复合函数求导链式法则得

$$\begin{cases} \frac{\partial E(k)}{\partial K_p} = \frac{\partial E(k)}{\partial y} \frac{\partial y(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial K_p} \\ \frac{\partial E(k)}{\partial K_i} = \frac{\partial E(k)}{\partial y} \frac{\partial y(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial K_i} \\ \frac{\partial E(k)}{\partial K_d} = \frac{\partial E(k)}{\partial y} \frac{\partial y(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial K_d} \end{cases} \quad (6)$$

联立式(1)和式(4),可得

$$\begin{cases} \partial E(k) / \partial y = -(r(k) - y(k)) = -e_p(k) \\ \partial u(k) / \partial K_p = e_p(k) \\ \partial u(k) / \partial K_i = e_i(k) \\ \partial u(k) / \partial K_d = e_d(k) \end{cases} \quad (7)$$

为了简化计算,防止输出过载,系统输出对控制信号的偏微分用它们相对变化量的符号函数来代替,即

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u} = \operatorname{sgn} \left[ \frac{y(k) - y(k-1)}{u(k) - u(k-1)} \right] \quad (8)$$

联立式(2)~式(8),得

$$\begin{cases} K_p(k+1) = \\ K_p(k) + \alpha_p e_p^2(k) \operatorname{sgn} \left[ \frac{y(k) - y(k-1)}{u(k) - u(k-1)} \right] \\ K_i(k+1) = \\ K_i(k) + \alpha_i e_p(k) \operatorname{sgn} \left[ \frac{y(k) - y(k-1)}{u(k) - u(k-1)} \right] e_i(k) \\ K_d(k+1) = \\ K_d(k) + \alpha_d e_p(k) \operatorname{sgn} \left[ \frac{y(k) - y(k-1)}{u(k) - u(k-1)} \right] e_d(k) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)即为 PID 控制参数  $K_p, K_i$  和  $K_d$  的自调整算法。

### 3 试验验证

采用 LMS 模态分析系统对风洞悬臂杆系统进行模态测试。综合考虑悬臂杆系统的有限元计算结果和尺寸因素,测试时选取 7 个测量点(支杆上 5 个、模型上 2 个)粘贴小的加速度传感器,用力锤敲击模型和支杆的不同位置,经过 LMS 软件分析计

算得到系统的 1 阶模态为  $z$  方向的上下摆动,频率为 26 Hz。

为了验证神经网络 PID 控制器对悬臂杆系统的减振效果,对控制器分别进行了地面试验和风洞试验。试验采样频率设为 5 kHz,参考输出  $r(k) = 0$ ,学习率  $\alpha_p = \alpha_i = \alpha_d = \eta$ ,误差函数  $E(k)$  的目标值设为 0.02,即当  $E(k) \leq 0.02$  时,神经网络训练结束。

地面试验系统如图 6 所示,在模型的气动载荷中心处安装激振器,经扫频试验测出其 1 阶模态频率为 28 Hz,系统结构发生微小变化。以 28 Hz 的正弦信号激振模型来模拟模型在风洞中受到的气动载荷。

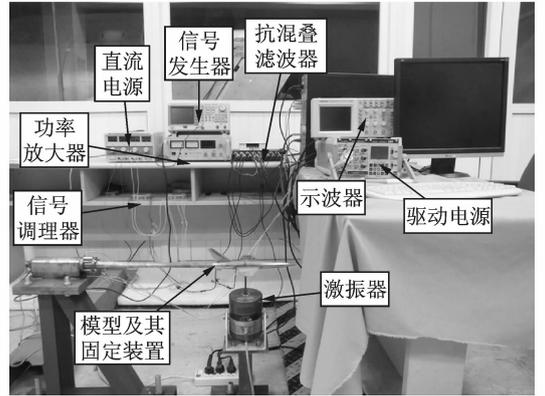


图 6 地面试验系统实物图

Fig. 6 Photograph of experimental setup for ground test

地面试验系统包括工业计算机、数据采集卡(NI, PCIe7841R)、应变调理仪(Advantech, ADAM3016)、直流电源、功率放大器、压电陶瓷驱动电源、抗混叠滤波器、激振器、模型尾支杆及固定装置。试验研究了神经网络 PID 控制器在两组不同初始参数( $K_p = 0.5, K_i = 0, K_d = 0.5$  和  $K_p = 0.5, K_i = 0.1, K_d = 0.5$ )以及 3 种学习率( $\eta = 1 \times 10^{-8}, 2 \times 10^{-8}$  和  $3 \times 10^{-8}$ )时控制系统的性能,并在相同初始参数条件( $K_p = 0.5, K_i = 0, K_d = 0.5, \eta = 5 \times 10^{-8}$ )下对传统 PID 与神经网络 PID 的控制性能进行了对比。

风洞试验模型及其固定装置如图 7 所示,扰流板用于产生扰流以引起支杆共振,模型和支杆安装在可以调节攻角的刚性支座上。选取地面试验的一组最优参数作为风洞试验的控制器初始参数,来验证神经网络 PID 在不同风速和模型攻角条件下的控制性能。风洞试验分为两步:第 1 步验证气流速度变化对控制系统的影响,固定模型的攻角  $\alpha = 0^\circ$ ,风速  $v$  分别为 15, 20, 25 和 30 m/s;第 2 步验证模型攻角变化对控制系统的影响,保持风速  $v = 30$  m/s 不变,模型攻角分别为  $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$  和  $20^\circ$ 。

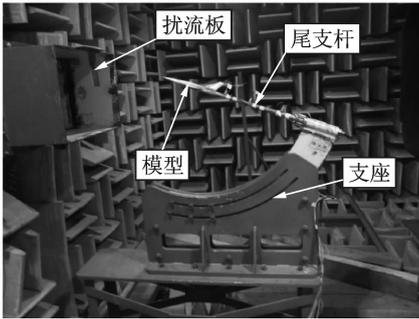


图 7 风洞测试模型及固定装置

Fig. 7 Photograph of model and support for wind tunnel test

## 4 试验结果及分析

### 4.1 地面试验

神经网络 PID 控制器在两组不同初始参数下的试验结果如图 8,9 所示,其中,图(a,b,c)分别对应  $\eta=1 \times 10^{-8}$ ,  $2 \times 10^{-8}$  和  $3 \times 10^{-8}$  时振动信号、目标函数以及 PID 控制器参数( $K_p$ ,  $K_i$  和  $K_d$ )的变化情况。

由图 8 可以看出,随着学习率的增加,振动收敛的时间逐渐缩短。在参数自调整过程中,振动信号出现幅度波动, $K_i$  的变化量比  $K_p$  和  $K_d$  大。当目标函数值收敛到设定值以下时,参数调整至最优, $K_i$  值维持在 0.15 到 0.2 之间,而  $K_p$  和  $K_d$  均有所降低。

观察图 9 发现,各学习率下的振动收敛时间与图 8 中对应参数相比均有不同程度减小,收敛后的最优参数与图 8 中接近。这是因为该组试验的 PID 初始参数较接近最优参数,此时振动收敛速度对学习率变化的响应更为灵敏,若学习率选取不当,会使控制参数始终在最优值附近波动,甚至可能会导致系统无法收敛。

对比神经网络 PID 与传统 PID 的控制性能,如图 10 所示。结果表明,在相同的初始条件下,神经网络 PID 控制下悬臂杆振动较传统 PID 控制,收敛时间缩短了约 50%(0.2s),1 阶模态振动幅值降低了 56%。

### 4.2 风洞试验

图 11 为模型在攻角  $\alpha=0^\circ$  时,控制器开启前后模型振动信号三维频谱图。3 个坐标轴分别表示频率、风速和幅值。结果表明,控制器开启后悬臂杆系统的 1 阶模态振动得到了有效控制,各风速下对应 1 阶频率处幅值分别衰减了 36.8,48.6,25.3 和 19.4 dB。

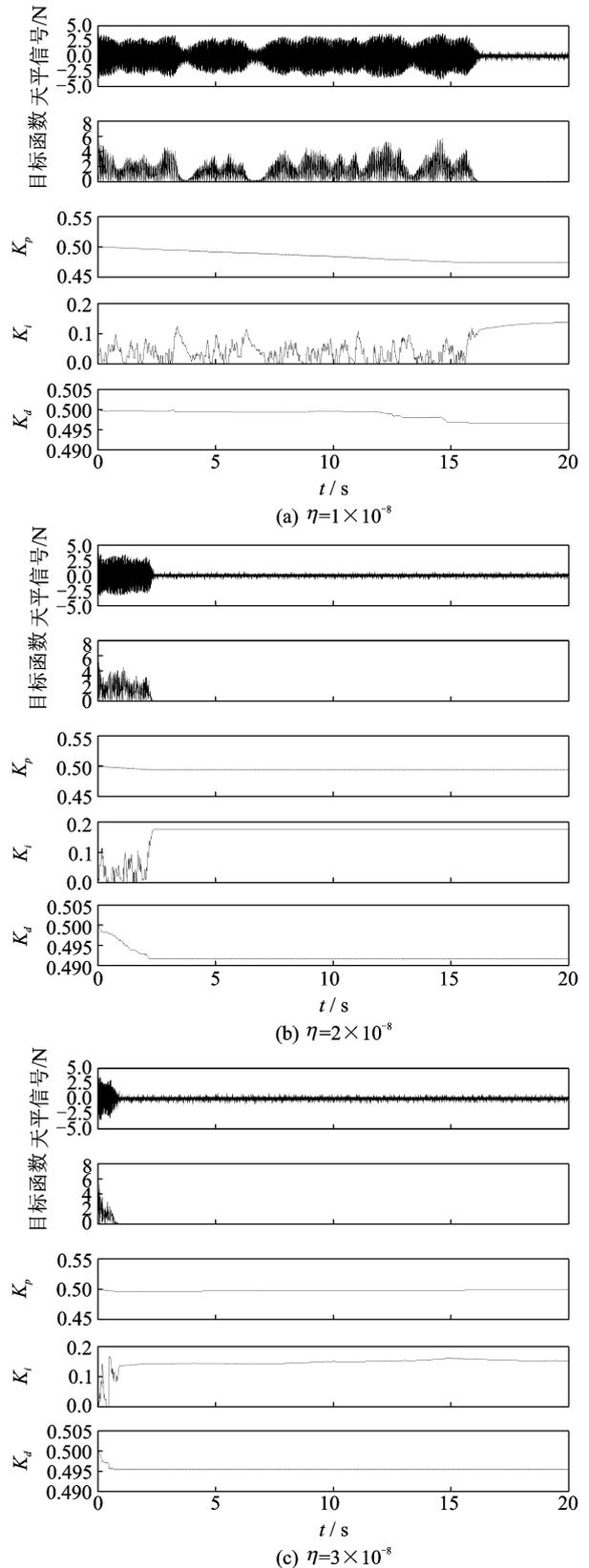
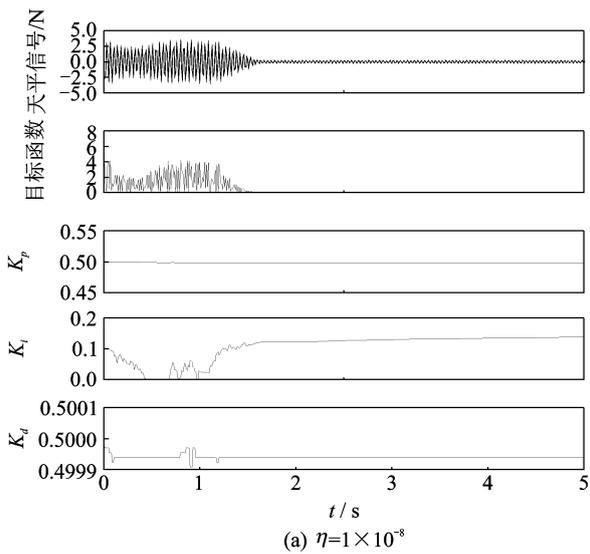
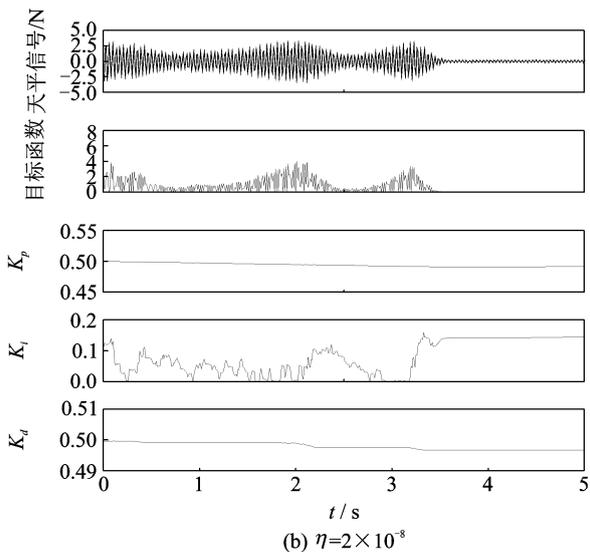


图 8 神经网络 PID 控制器在不同学习率  $\eta$  下的试验结果(初始参数  $K_p=0.5, K_i=0, K_d=0.5$ )

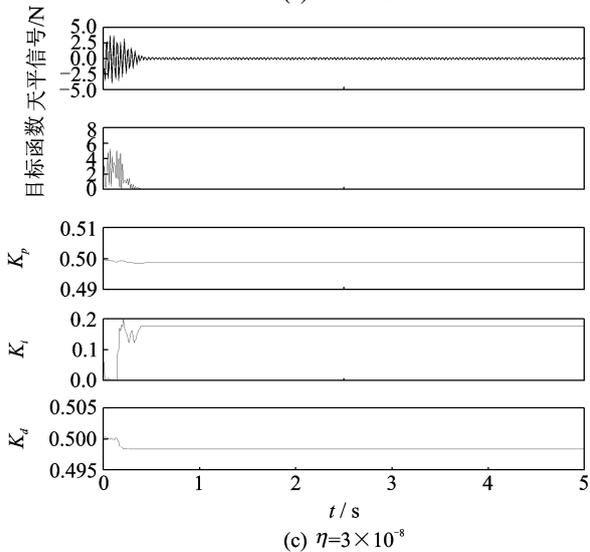
Fig. 8 Results of neural network PID controller with various learning rate  $\eta$ (initial parameter  $K_p=0.5, K_i=0, K_d=0.5$ )



(a)  $\eta=1 \times 10^{-8}$



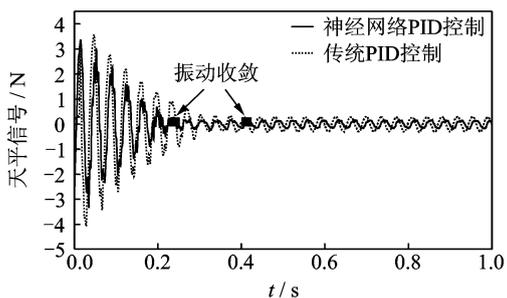
(b)  $\eta=2 \times 10^{-8}$



(c)  $\eta=3 \times 10^{-8}$

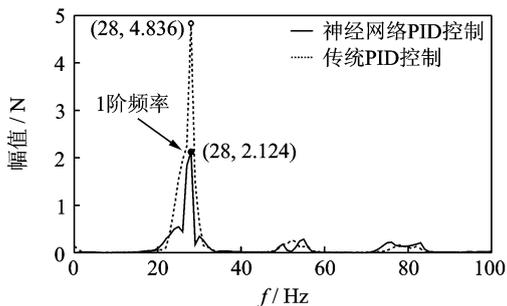
图9 神经网络PID控制器在不同学习率 $\eta$ 下的试验结果(初始参数 $K_p=0.5, K_i=0.1, K_d=0.5$ )

Fig. 9 Results of neural network PID controller with various learning rate  $\eta$  (initial parameter  $K_p=0.5, K_i=0.1, K_d=0.5$ )



(a) 时域对比

(a) Comparison in time domain



(b) 频域对比

(b) Comparison in frequency domain

图10 神经网络PID与传统PID控制效果比较

Fig. 10 Comparison of performance between conventional PID and neural network PID

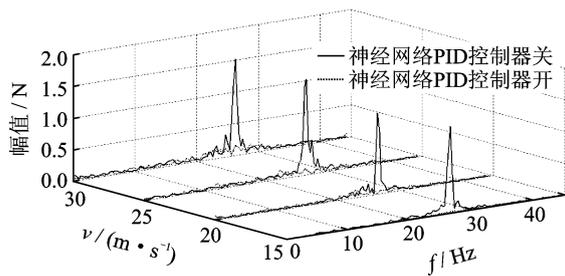


图11 4种风速下主动减振系统性能对比(攻角 $\alpha=0^\circ$ )

Fig. 11 Performance of the control system under four kinds of wind speed (while  $\alpha=0^\circ$ )

图12为模型分别在5个攻角下振动控制前后振动信号的三维频谱图。结果表明,在不同攻角下该减振系统对悬臂杆系统的1阶模态振动都起到了良好的抑制作用,对应1阶频率处幅值分别衰减了19.4、30.8、38.9、19.2和38.4 dB。风洞试验结果表明,神经网络PID控制器在不同风速和攻角下均能表现出很好的控制性能和较强的鲁棒性。

## 5 结束语

针对风洞测试时模型尾支杆系统的1阶振动,采用压电驱动器和神经网络PID控制算法,设计了振动主动控制系统,通过地面试验和风洞试验验证

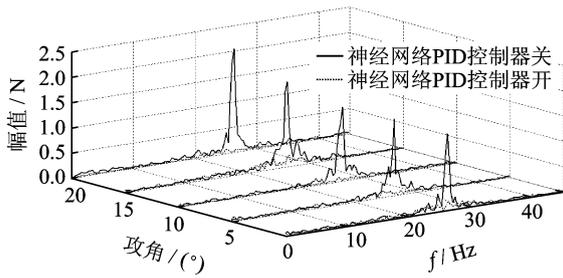


图12 5种攻角下主动减振系统性能对比( $v=30$  m/s)  
Fig.12 Performance of the damping system under five kinds of attack angle while ( $v=30$  m/s)

了该减振系统的减振效果。地面试验表明,神经网络PID控制下的悬臂杆系统振动收敛时间相比传统PID缩短了约0.2 s(50%),振动幅值降低了56%;风洞试验表明,减振系统对悬臂杆系统在4种风速和5种攻角条件下的1阶振动均有不同程度的衰减( $>19$  dB)。

#### 参 考 文 献

- [1] Igoe W B, Capone F T. Reduction of wind tunnel model vibration by means of a tuned damped vibration absorber installed in a model [R]. [S. l.]: NASA TMX-1606, 1968.
- [2] Qiu Zhicheng, Zhang Xianmin. Optimal placement and active vibration control for piezoelectric smart flexible cantilever plate [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301:521-543.
- [3] Qiu Zhicheng, Wu Hongxin, Ye Chunde. Acceleration sensors based modal identification and active vibration control of flexible smart cantilever plate [J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13:277-290.
- [4] Qiu Zhicheng, Han Jianda, Zhang Xiamin, et al. Active vibration control of a flexible beam using a non-collocated acceleration sensor and piezoelectric patch actuator [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 326:438-455.
- [5] Fanson J L, Caughey T K. Positive position feedback control for large space structure [J]. AIAA Journal, 1990 28:717-724.
- [6] Song G, Schmidt S P, Agrawal B N. Experimental robustness study of positive position feedback control for active vibration suppression [J]. Journal of Guidance, 2001, 25(1):179-182.
- [7] Shan Jinjun, Liu Hongtao, Sun Dong. Slewing and vibration control of a single-link flexible manipulator by positive position feedback (PPF) [J]. Mechatronics, 2005, 15:487-503.
- [8] Mahmoodi S N, Ahmadian M, Inman D J. Adaptive modified positive position feedback for active vibration

- control of structures [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21:571-580.
- [9] 杨艳丽,张俊杰,唐建中,等.一种鲁棒自适应主动振动控制方法[J].西安交通大学学报,1997,31(7):7-11. Yang Yanli, Zhang Junjie, Tang Jianzhong, et al. A method of robust adaptive active vibration control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(7):7-11. (in Chinese)
- [10] Kim B, Washington G N. Active vibration control of a cantilevered beam using model predictive sliding mode control [C] // 49<sup>th</sup> Structures, Structural Dynamics, and Material Conference. Schaumburg: AIAA, 2008.
- [11] 马天兵,杜菲.基于LQR-IMCS算法的智能结构振动主动控制[J].华中科技大学学报,2012,40(3):72-76. Ma Tianbing, Du Fei. Active vibration control of smart structure using LQR-IMCS algorithm [J]. Journal of Huazhong University, 2012, 40(3):72-76. (in Chinese)
- [12] Gregory L B, Glaese R M, Anderson E H, et al. Damping and vibration control for aircraft fin and appendage structures [C] // 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno: AIAA, 2006:653.
- [13] Fehren H, Gnauert U, Wimmel R. Validation testing with the active damping system in the European Transonic Windtunnel [C] // Proceedings of 39<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno: AIAA, 2001:610.
- [14] Balakrishna S, Houlden H, Butler D H, et al. Development of a wind tunnel active vibration reduction system [C] // 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno: AIAA, 2007:961.
- [15] Balakrishna S, Butler D H, White R. Active damping of sting vibrations in transonic wind tunnel testing [C] // 46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno: AIAA, 2008:840.
- [16] Balakrishna S, Butler D H, Acheson M J, et al. Design and performance of an active sting damper for the NASA common research model [C] // 49<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando: AIAA, 2011:953.
- [17] 陈仁文,刘强,徐志伟,等.基于压电智能结构的垂尾减振系统[J].力学学报,2009,41(4):603-608. Chen Renwen, Liu Qiang, Xu Zhiwei, et al. The vibration suppression system for vertical tail based on smart piezoelectric structures [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(4):603-608. (in Chinese)



**第一作者简介:**沈星,男,1975年2月生,教授。主要研究方向为航空智能结构。曾发表《Study of a reduced and internally biased oxide wafer PZT actuator and its integration with shape memory alloy》(《Smart Materials and Structures》2006, Vol. 15, No. 4)等论文。  
E-mail: shenx@nuaa.edu.cn

