

# 压电主动振动控制系统受噪声影响时域仿真研究

范勇军<sup>1</sup>, 黄文超<sup>1</sup>, 王巍<sup>2</sup>

(1. 中国飞机强度研究所, 西安 710065; 2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 目的 基于逆压电效应的热弹性比拟原理, 提出压电主动振动控制系统噪声时域的研究方法。方法 首先建立压电结构系统的状态空间模型, 选择一定的控制策略设计控制器, 然后考虑压电控制系统噪声干扰问题进行控制系统闭环仿真, 考察不同测试噪声水平对振动控制效果的影响。结果 算例结果表明, 采用神经网络(NNP)控制策略实施振动控制时, 50 Hz工频噪声对控制效果影响不大。结论 该方法可方便地考虑各种实际噪声情况, 快速直观地给出噪声对控制效果的影响。

**关键词:** 压电主动振动控制; 系统噪声; 时域仿真; 控制效果

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.06.008

**中图分类号:** TJ02; TN924.6 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)06-0048-05

## A Time Domain Method for Noise Impact Study of Piezoelectric Active Vibration Control System

FAN Yong-jun<sup>1</sup>, HUANG Wen-chao<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

(1. Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**ABSTRACT: Objective** To develop a time domain method for the study of measurement noise impact on the control efficiency of piezoelectric vibration control system based on thermal analogy method. **Methods** The state-space model of the piezoelectric structure was established firstly and certain control strategy was selected to design the controller, then the close-loop stimulation of the control system was made considering the issue of interruption of the control system by noise to investigate the influences of different noise levels on the piezoelectric vibration control system. **Results** Simulation results demonstrated that 50 Hz industrial frequency noise had little influence on the control effect when the neural network control strategy was used to implement vibration control. **Conclusion** The method can deal with various noises, and rapidly and visually show the noise influence on control effect.

**KEY WORDS:** piezoelectric actuator; systematic noise; time-space stimulation; control effect

控制系统中信号在测试时难免混有一定程度的噪声信号, 测试噪声会污染真实的有用信号, 影响控制效果。在振动控制系统等电路中, 电动力所引起的

50 Hz工频噪声是非常普遍的一类噪声信号。此外, 电磁辐射、电子装置中电子器件的热噪声, 对模拟信号采样时所产生的量化噪声, 有限位运算时所产生的

收稿日期: 2015-06-26; 修订日期: 2015-07-22

Received: 2015-06-26; Revised: 2015-07-22

作者简介: 范勇军(1978—), 男, 陕西人, 工程师, 主要研究方向为环境振动工程。

**Biography:** FAN Yong-jun(1978—), Male, from Shannxi, Engineer, Research focus: environment vibration engineering and research.

舍入误差噪声等都是测试系统中测试噪声的来源<sup>[1-4]</sup>。一般测试系统中的噪声按其与被污染信号的关系可以分为加法噪声和乘法噪声两大类,实际中大多数情况下的噪声为加法噪声<sup>[5]</sup>。

压电主动振动控制系统中,使用压电或其他类型的传感器来测试结构振动响应,为控制器提供反馈信号,控制信号经过功率放大后,驱动压电作动器对结构振动响应进行抑制<sup>[6]</sup>。对采用主动控制方法的振动控制系统,往往需要实时测试系统的输入及输出信号,来对系统进行在线参数识别,以实时更新系统及控制器参数。因此,输入及输出信号的质量直接影响着系统参数识别的精度,从而也影响振动控制的效果<sup>[7]</sup>。实际的振动控制中,测试的系统输入、输出信号难免受到噪声信号的污染。文中针对压电控制系统测试噪声对控制效果的影响问题,基于热弹比拟建模方法提出了一种时域仿真研究方法。以悬臂梁的第一阶弯曲模态响应控制中,建立了压电控制系统的状态空间模型,采用正位移(PPF)和神经网络(NNP)两种控制策略设计了控制器。通过控制系统闭环仿真,研究了不同能量水平的50 Hz工频噪声及白噪声信号对采用新型压电作动器和两种控制策略的压电主动振动控制系统控制效果的影响情况。涉及的噪声均为加法噪声,分别考虑50 Hz工频噪声和窄带白噪声两类噪声信号<sup>[8]</sup>。

## 1 压电作动器PISA

压电作动器PISA采用II型设计,主要由金属底座和压电堆两部分组成。通过螺杆装配,并向压电堆提供预紧力。压电作动器通过底座与被控结构进行结合,对其输出弯矩<sup>[9]</sup>。PISA的原理和结构设计如图1所示。

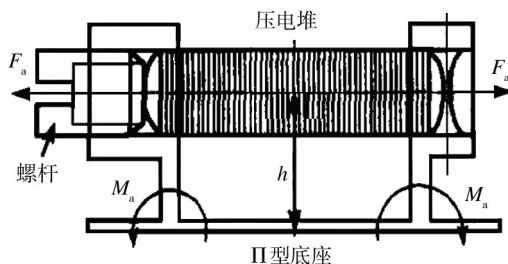


图1 PISA的原理和结构设计

Fig.1 Principle of PISA and its structural design

将PISA应用于悬臂梁振动控制系统中,悬臂梁的尺寸为300 mm × 20 mm × 1.5 mm,PISA中使用的压电堆尺寸为30 mm × 10 mm × 10 mm。PISA安装于梁的

根部表面,与梁的相对关系如图1所示。取PISA的高度,即压电堆轴线到其底面的距离 $h=10$  mm。建立了安装有PISA的悬臂梁有限元模型如图2所示,基于热弹比拟原理建立了该压电主动振动控制系统的状态空间模型。

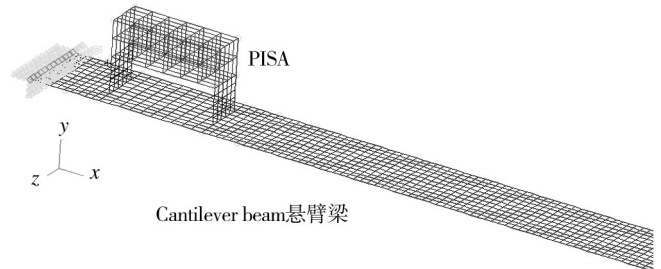


图2 安装有PISA的悬臂梁有限元模型

Fig.2 The finite element model of cantilever beam with PISA

## 2 加法及乘法噪声定义

假设测试得到的信号为 $x(t)$ ,并设其中的真实信号为 $r(t)$ ,测试噪声为 $n(t)$ 。如果三者的关系可表示为:

$$x(t)=r(t)+n(t) \quad (1)$$

则称测试信号中含有加法噪声。类似的,若三者关系满足:

$$x(t)=r(t) \cdot n(t) \quad (2)$$

则称测试信号中含有乘法噪声。工程测试中的噪声大部分情况都属于加法噪声<sup>[10]</sup>,因此文中仅考虑加法噪声的情况。

## 3 测试噪声的影响仿真研究

考虑的测试噪声主要有三种,即系统有输入噪声(如测试噪声或外部随机干扰)的情况<sup>[11-12]</sup>,作为控制反馈信号中存在噪声信号(如传感器测试噪声)的情况以及同时存在前述两种噪声的情况。考虑的噪声类型包括50 Hz工频噪声和窄带白噪声,两种噪声均以加法噪声的形式出现。为了保证结果的可比性,不同控制方法对应的噪声信号能量水平是相同的<sup>[13]</sup>。

对比研究的方法为:各噪声情况中设置的控制仿真时间为15 s,在 $t=5$  s时控制器自动打开, $t=10$  s时加入噪声信号,即不考虑测试噪声与考虑测试噪声的仿真时间长度相同<sup>[14]</sup>。特殊的在图5所对应的仿真中,为了确定响应是否有发散趋势将仿真时间进行了适当延长。

考虑到信噪比是用噪声信号能量与被污染信号能量的比值来定义的<sup>[15]</sup>,因此这里直接按噪声能量与被污染测试信号能量的比值来衡量测试噪声的能量水平。

### 4 NNP控制的噪声影响仿真

输入信号混有白噪声信号、反馈信号中混有白噪声信号(反馈信号和响应信号有差别)、输入及反馈信号混入工频噪声和系统输入、输出反馈均混有白噪声等四种情况对NNP控制的噪声影响进行仿真比较<sup>[6]</sup>。

1) 输入信号混有白噪声信号。由图3可得,控制系统输入信号中混有白噪声信号对NNP控制器的控制效果有一定的不利影响。随着噪声信号水平的增加,控制效果的降低程度也很明显。

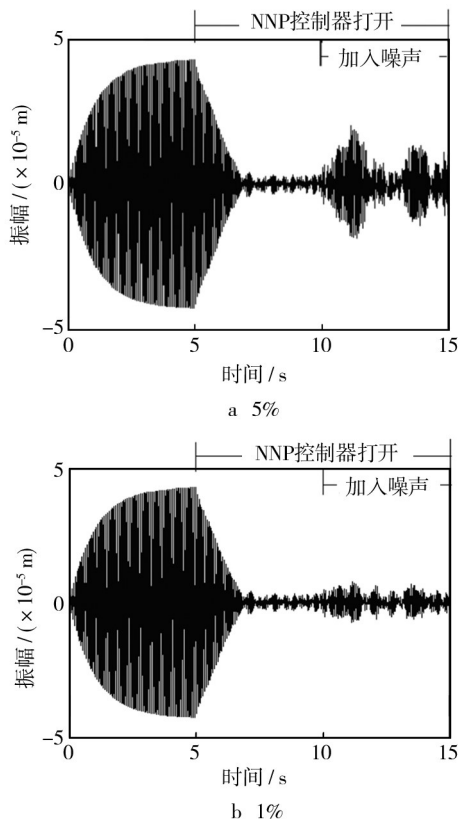


图3 输入信号中混入窄带白噪声信号  
Fig.3 Narrow band white noise added in the input signal

2) 反馈信号中混有白噪声信号。由图4可得,响应信号中加入噪声信号后,NNP控制的效果会有明显的降低,但控制器并没有完全失效。说明NNP控制对响应信号测试噪声具有一定的抗噪能力,但这一能力仍然有限,如果测试噪声水平超过5%,控制器也会失效。

3) 输入及反馈信号混入工频噪声的情况。由图5可得,50 Hz工频噪声加入输入信号或响应信号中对NNP控制效果均没有影响。分析其原因是由于结构滤波作用,无论是加入输入信号还是响应信号后反馈

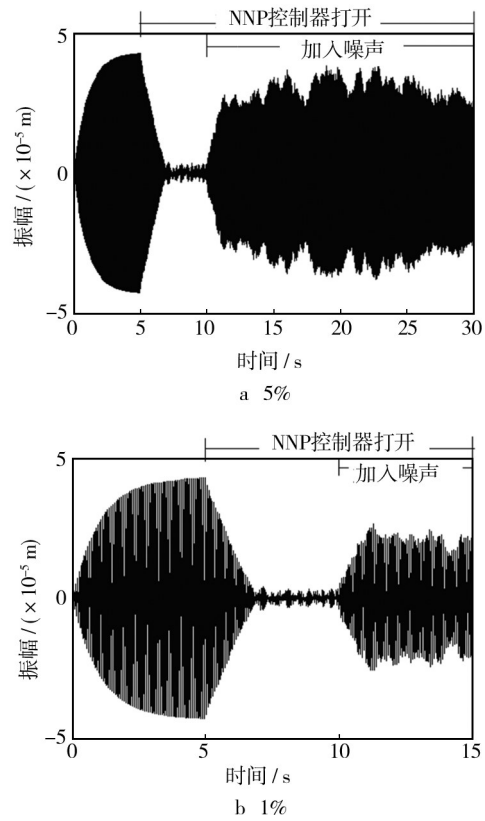


图4 响应信号中加入窄带白噪声信号  
Fig.4 Narrow band white noise added in the feedback signal

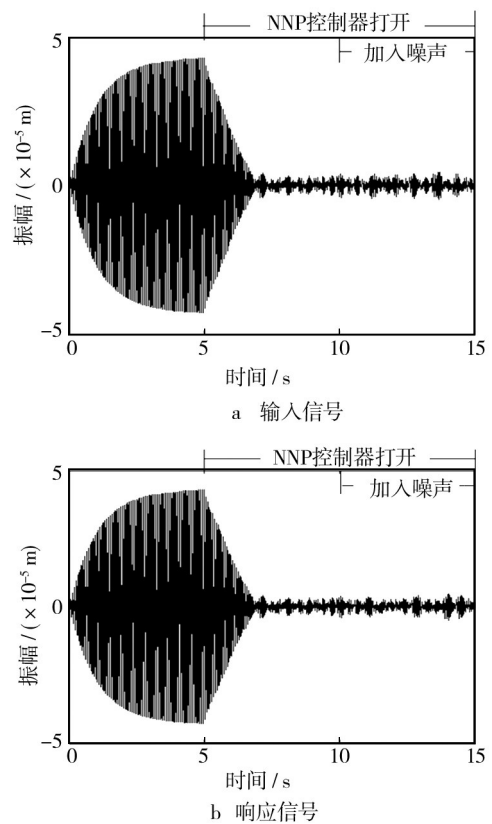


图5 输入及响应信号中加入10%的50 Hz工频噪声信号  
Fig.5 10% 50 Hz sine noise added in the input signal

给NNP控制器(内部有一个相当于结构的神经网络模型),50 Hz工频噪声信号都不会激励结构产生明显响应,因而NNP控制器也不会明显受其影响。

4) 系统输入、输出反馈均混有白噪声的情况。如图6所示,NNP控制中输入及反馈信号中均混有白噪声信号时,控制效果的降低主要是由于反馈信号中的噪声引起。

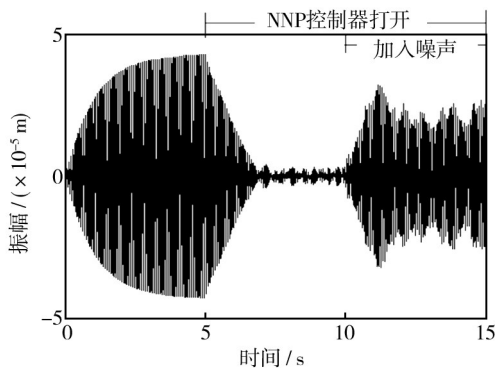


图6 输入及响应信号中加入能量为被污染信号的能量1%的白噪声信号

Fig.6 1% band limited white noise added in the input and feedback signal

## 5 结论

通过对采用压电作动器PISA的压电主动振动控制系统的闭环仿真研究可以看出:

1) 作为控制器反馈信号的响应信号存在测试噪声时,对控制效果的不利影响强于系统输入信号有噪声的情况。

2) 工频噪声对NNP控制均没有明显的不良影响。

研究表明,对于NNP控制作为反馈信号的响应信号,质量对控制效果有很大影响,因此在实际中使用这类控制策略时一定要注意对传感器测试噪声水平的控制。

### 参考文献:

[1] 丁永平,党丽,刘超,等.一种识别低压电力线载波通信系统中随机脉冲噪声的新方法[J].装备环境工程,2014,11(5):103—106.  
DING Yong-ping, DANG Li, LIU Chao, et al. A Novel Method for Recognizing Asynchronous Impulsive Noise in Power Line Communication Systems[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 103—106.

[2] 郭强岭,郭迅.内埋武器噪声环境试验方法探讨[J].装备环境工程,2014,11(1):93—96.

GUO Qiang-ling, GUO Xun. Discussion on Acoustic Noise Test Method of Internal Captive Weapon[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 93—96.

[3] 农绍宁,田光明,赵怀耘.多维激励下结构随机振动响应分析[J].装备环境工程,2013,10(2):124—128.  
NONG Shao-ning, TIAN Guang-ming, ZHAO Huai-yun. Random Vibration Response Analysis of Structures under Multi-dimensional Excitation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 124—128.

[4] 章新瑞.加速度计在振动试验中的应用[J].装备环境工程,2013,10(2):89—92.  
ZHANG Xin-rui. Application of Accelerometers in Vibration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 89—92.

[5] 胡广书.数字信号处理理论算法与实现[M].第2版.北京:清华大学出版社,2003.  
HU Guang-shu. Digital Signal Processing Algorithm and Its Implementation[M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University press, 2003.

[6] 王巍,杨智春,李斌,等.两种新型压电作动器在振动控制中的应用研究[J].压电与声光,2010,32(1):70—72.  
WANG Wei, YANG Zhi-chun, LI Bin, et al. Study on Application of Two New Types of Piezoelectric Actuators to the Vibration Control[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(1): 70—72.

[7] 王大钧,孙东昌.压电智能结构的一种模态控制新方法[J].振动工程学报,1997,10(3):281—286.  
WANG Da-jun, SUN Dong-chang. A New Modal Control Method for Smart Structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 1997, 10(3): 281—286.

[8] 路小波,陶云刚,何延伟.基于压电元件的振动主动控制[J].振动、测试与诊断,1999,19(2):92—95.  
LU Xiao-bo, TAO Yun-gang, HE Yan-wei. Active Vibration Control Based on Piezoelectric Elements. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1999, 19(2): 92—95.

[9] 孙东昌,宋珍,王大钧,等.用两种功能材料综合控制智能梁的振动[J].应用力学学报,1999,16(4):83—89.  
SUN Dong-chang, SONG Zhen, WANG Da-jun. Hybrid Control Method of Beams Using Two Kinds of Smart Material[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1999, 16(4): 83—89.

[10] 吴克恭,姜节胜, JANOCHA Hartmut.基于在线识别与全维状态观测技术的埋入压电片复合梁的振动主动控制研究[J].航空学报,2003,24(15):431—434.  
WU Ke-gong, JIANG Jie-sheng, JANOCHA Hartmut. Active Vibration Control of Composite Material Beam with Piezoceramics Embedded Using on-Line Self Identification and Full State Observer Technique[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(15): 431—434.

[11] 董卓敏,王永,孙德敏.大型柔性结构振动主动控制的实验研究[J].实验力学,2003,18(1):86—93.

- DONG Zhuo-min, WANG Yong, SUN De-min. An Experimental Investigation on the Active Vibration Control For Flexible structures[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(1):86—93.
- [12] SONG G, VLATTAS J, JOHNSON S E, et al. Active Vibration Control of a Space Truss Using a Lead Zirconate Titanate Stack Actuator. Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers[J]. Pro Quest Science Journal, 2001, 215(6):355—361.
- [13] GOH C, CAUGHEY T K. On the Stability Problem Caused by Infinite Actuator Dynamics in the Collocated Control of Large Space Structure[J]. Int J Control, 1985, 41:787—802.
- [14] GU H, SONG G. Active Vibration Suppression of a Composite I-beam Using Fuzzy Positive Position Control[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14:540—547.
- [15] 杨拥民, 张华, 胡政. 正位置反馈的多模态振动主动控制实验. 振动工程学报. 2005, 18(3):355—359.
- YANG Yong-min, ZHANG Hua, HU Zheng. Positive Position Feedback Based Active Vibration Control of Multiple Modes[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(3):355—359.
- [16] 蔡自兴. 智能控制——基础与应用[M]. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- CAI Zi-xing. Intelligent Control: Fundamentals and Applications[M]. First Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.

(上接第35页)

- Comparison Study on Outdoor Exposure and Accelerated Tests of Organic Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2):14—17.
- [7] 于喜年. 金属防腐涂层附着力影响因素分析[J]. 大连铁道学院学报, 2006, 27(2):42—45.
- YU Xi-nian. Metal Anti-corrosion Coating Adhesion Factor Analysis[J]. Journal of Dalian Railway Institute, 2006, 27(2):42—45.
- [8] 丁云飞, 唐珊, 吴会军. 表面微结构对冰粘附强度的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(4):74—78.
- DING Yun-fei, TANG Shan, WU Hui-jun. The Influence of the Surface Microstructure of Ice Adhesion Strength[J]. Surface Technology, 2015, 44(4):74—78.
- [9] 王雷, 孙杰, 安成强. 粗糙度对彩色涂层与基体间附着力的影响[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(5):41—43.
- WANG Lei, SUN Jie, AN Cheng-qiang. Roughness Effect on Color Adhesion between Coating and Matrix[J]. Journal of Plating and Finishing, 2010, 32(5):41—43.
- [10] 王雷. 彩涂板涂层附着力时效性研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2009.
- WANG Lei. Caitu Coating Adhesion Timeliness Research [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [11] 闫斌, 陈宏霞, 陈嘉宾. 功能性有机硅烷膜对金属腐蚀防护的研究现状及展望[J]. 材料保护, 2009, 42(3):54—57.
- YAN Bin, CHEN Hong-xia, CHEN Jia-bin. Current Status and Perspectives in Study of Organo-Functional Silane Films for Corrosion Prevention and Protection of Metals[J]. Materials Protection, 2009, 42(3):54—57.
- [12] JEGDI B V, BAJAT J B, POPI J P, et al. Corrosion Stability of Polyester Coatings on Steel Pretreated with Different Iron-phosphate Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 70(2):127—133.
- [13] 李红玲, 刘双枝. 金属表面无铬替代处理技术的研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(2):112—115.
- LI Hong-ling, LIU Shuang-zhi. The Research Progress of Metal Surface without Chromium Alternative Process Technology[J]. Surface Technology, 2013, 42(2):112—115.
- [14] BLUM F D, PERERA H, SEDAI B, et al. Development of Hydrophobicity in Silane-treated Diatomaceous Earth Coatings [C]// Abstracts of Papers of the American Chemical Society. Washington: Amer Chemical Soc, 2013.
- [15] 赵凯, 尹志民, 段佳琦, 等. 时效处理工艺对1975合金腐蚀性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(2):153—158.
- ZHAO Kai, YIN Zhi-min, DUAN Jia-qi, et al. Aging Treatment Process on the Properties of 1975 Alloy Corrosion Effect [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2013, 33(2):153—158.
- [16] 张树勋, 朱霞, 陈俊斌, 等. 基于模糊聚类分析的军用附属油料包装规格优化研究[J]. 包装工程, 2014, 35(11):28—32.
- ZHANG Shu-xun, ZHU Xia, CHEN Jun-bin, et al. Optimization of Packaging Specifications for Military Auxiliary Oil Based on Fuzzy Clustering Analysis[J]. packaging engineering, 2014, 35(11):28—32.
- [17] 房振乾, 陈群志, 董兵, 等. 飞机结构表面涂层体系改进研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5):102—107.
- FANG Zhen-qian, CHEN Qun-zhi, DONG Bing, et al. Improvement of Aircraft Structure Surface Coating System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5):102—107.