

# 基于压电驱动的微振动主动减振控制系统研究

刘仁洪<sup>1,2</sup>, 余洁冰<sup>1,2</sup>, 王广源<sup>1,2</sup>, 康玲<sup>1,2</sup>, 陈佳鑫<sup>1,2</sup>, 张俊嵩<sup>1,2</sup>, 刘磊<sup>1,2</sup>, 黄良生<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803)

**摘要:** 本文以压电陶瓷促动器构建并联六自由度减振平台, 采用 NI Compact-RIO 实时控制系统和 Fx-LMS 自适应控制算法进行振动主动控制, 对次级通道辨识方法和主动控制算法进行了模拟仿真, 并搭建主动减振控制系统进行实验验证。仿真与实验结果表明, 设计的主动减振控制系统对于 7~50 Hz 范围内的低频微振动有很好的控制效果。

**关键词:** 低频微振动; 主动减振控制系统; Fx-LMS 自适应控制算法; 次级通道辨识

中图分类号: O328; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)10-1940-07

doi: 10. 7538/yzk. 2019. youxian. 0757

## Study of Micro-vibration Active Control System Base on Piezoelectric Driver

LIU Renhong<sup>1,2</sup>, YU Jiebing<sup>1,2</sup>, WANG Guangyuan<sup>1,2</sup>, KANG Ling<sup>1,2</sup>,  
CHEN Jiixin<sup>1,2</sup>, ZHANG Junsong<sup>1,2</sup>, LIU Lei<sup>1,2</sup>, HUANG Liangsheng<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. *Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China*)

**Abstract:** A parallel 6-DOF vibration isolation platform was built with piezoelectric ceramic actuators. And the NI Compact-RIO real-time control system and Fx-LMS adaptive filtering control algorithm were used for active vibration control. The secondary channel identification method and active control algorithm were simulated, and the active vibration control system was built for experimental verification. The simulation and experimental results show that the designed active vibration control system has a good control effect on the low-frequency micro-vibration at the range of 7 Hz to 50 Hz.

**Key words:** low frequency micro-vibration; active vibration control system; Fx-LMS adaptive control algorithm; secondary channel identification

随着先进同步辐射光源的发展, 国内外同步辐射光源加速器储存环中的高精度 BPM 支撑系统和光束线站中的光学系统、实验样

品台等精密设备对抗振性能要求很高, 各零部件之间的微位移和微小变形, 均会影响设备的总体性能<sup>[1-3]</sup>。欧洲同步辐射光源(ESRF)、

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11905231); 中国科学院粒子加速物理与技术重点实验室资助项目(JSQ2019ZZ03)

作者简介: 刘仁洪(1985—), 男, 四川德阳人, 工程师, 博士, 加速器精密机械工程专业

网络出版时间: 2020-03-03; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200302.1722.016.html>

美国先进光子源(APS)、上海同步辐射光源(SSRF)等同步辐射光源对设备的微振动研究表明,5~20 Hz频域段的外界振动干扰对精密设备的微振动幅值影响最大。低频微振动由于具有微小性、固有性和难控性等特点,分析与振动控制难度均较大,对低频微振动的控制已成为先进同步辐射光源和自由电子激光等大科学装置发展不可忽略的关键技术之一<sup>[4-5]</sup>。根据控制原理的不同,减振主要可分为被动减振技术和主动减振技术及半主动减振技术<sup>[6]</sup>,像 ESRF、APS、SSRF 等同步辐射光源对微振动的隔离主要采用附加高性能阻尼材料方法,使振动传递率接近 1,这种被动减振方式结构简单,不需额外提供能源,对高频振动抑制效果较好,但对低频振动减振效果不佳,且适应性较差,同时阻尼材料长期受辐照易老化<sup>[7]</sup>。随着科学技术的发展,被动减振方法在很多方面无法满足高能同步辐射光源等设备对减振性能的工程需要,主动减振越来越受到重视,主动减振控制由于促动器的存在,具有低频减振性能好、可靠性高、易于扩展及易于实现多机分布并行处理等优势,核心控制器也从 PID、鲁棒性控制逐步向模糊控制、自适应控制等方向发展<sup>[8]</sup>。紧凑型直线对撞机(CLIC)研发的主动减振控制系统,通过 PID 控制算法实现特殊主四极磁铁对地基与磁铁冷却水流激振影响的抑制,取得了一定的减振效果<sup>[9-10]</sup>。美国 TMC 公司生产的压电式主动六自由度隔振平台,其最大减振振幅为 24  $\mu\text{m}$ ,减振频率范围为 0.5~250 Hz,国内并联平台的制造工艺和减振效果与国外还存在一定差距,大部分停留在实验室阶段,尚未达到产品化和产业化应用。目前国内同步辐射装置主要是购买国外的主动减振平台,采购成本较高<sup>[11]</sup>。

针对高能同步辐射光源和南方先进光源对主动减振技术的需求,本文以压电陶瓷驱动的并联六自由度平台为基础开展低频微振动主动减振控制技术研究,研究适应性强且不需被控系统数学模型的 Fx-LMS 自适应控制算法,以 NI Compact-RIO 构建主动控制单元,实现系统次级通道辨识和主动减振控制功能,并进行实验测试验证。

## 1 低频微振动主动控制原理

在实际控制工程中,被控系统的数学模型很难事先通过机理建模来确知,尤其是数学模型的某些参数或结构处于变化之中。面对这些未知与变化情况,如何设计合理的控制系统,是自适应控制算法所需解决的问题。

### 1.1 Fx-LMS 主动控制原理

Fx-LMS 自适应控制算法原理如图 1 所示。其中,  $x(n)$  为滤波器输入信号,即减振系统中外界基础激励信号;  $P(z)$  为未知对象模型,在主动减振控制系统中,它是外界振动基础激励到等效负载的传递函数;  $W(z)$  为数字滤波器的权向量;  $d(n)$  为没有滤波器时系统的输出信号(也称期望信号);  $y(n)$  为控制滤波器输出,即促动器产生的振动控制信号;  $e(n)$  为系统等效负载的振动响应信号。在实际应用中,  $e(n)$  并不是滤波器输出  $y(n)$  与期望信号  $d(n)$  的简单叠加。在  $y(n)$  与  $e(n)$  之间存在一次级通道传递函数  $S(z)$ ,  $S(z)$  是促动器到等效负载的传递函数,表示促动器的动力学特性。次级通道  $S(z)$  在物理上的影响主要包括 D/A、功率放大器、主动执行机构、被控系统、误差传感器和 A/D 等环节,针对以上误差影响, Morgan 等<sup>[12]</sup>提出了 Fx-LMS 自适应控制算法可有效地消除次级通道的误差影响。

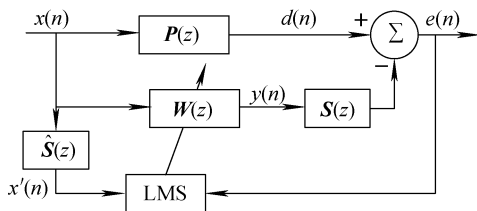


图 1 Fx-LMS 自适应控制算法

Fig. 1 Fx-LMS adaptive control algorithm

Fx-LMS 自适应控制算法的具体实现为:定义长度为  $L$  的控制器参考输入向量为  $\mathbf{X}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T$  和滤波器的权向量  $\mathbf{W}(n) = [\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{L-1}]^T$ ;次级通道用长度为  $H$  的 FIR 滤波器表示,则  $\mathbf{S}(n) = [s_0, s_1, \dots, s_{H-1}]^T$ 。图 1 中  $W(z)$  和  $S(z)$  分别表示滤波器权向量  $\mathbf{W}(n)$  和次级通道滤波器  $\mathbf{S}(n)$  的  $z$  变换。令次级通道的相关输入为  $x'(n) =$

$\sum_{h=0}^{H-1} s_h x(n-h)$ , 它是基础激励信号  $x(n)$  通过次级通道传递函数  $S(z)$  后得到的信号, 则响应信号  $e(n)$  为:

$$e(n) = d(n) - \mathbf{S}^T \mathbf{Y}(n) = d(n) - \sum_{l=0}^{L-1} w_l x'(n-l) \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{Y}(n)$  为输出向量。

定义输入滤波后的参考向量为  $\mathbf{X}'(n) = [x'(n), x'(n-1), \dots, x'(n-L+1)]^T$ , 则误差信号可写成如下形式:

$$e(n) = d(n) - \mathbf{X}'^T(n) \mathbf{W}(n) \quad (2)$$

取性能函数  $J$  为:

$$J = E\{d^2(n) - 2d^T(n) \mathbf{X}'^T(n) \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{X}'(n) \mathbf{X}'^T(n) \mathbf{W}\} \quad (3)$$

参照标准 LMS 算法的推导过程, 并进行归一化处理, 得到权向量更新公式:

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + 2\bar{\mu}e(n) \mathbf{X}'(n) \quad (4)$$

其中,  $\bar{\mu}$  为系统的收敛因子。

综上所述, 整个 Fx-LMS 自适应控制算法可简单地归纳如下:

$$\begin{cases} y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l x(n-l) \\ e(n) = d(n) - \mathbf{S}^T \mathbf{Y}(n) \\ \mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + 2\bar{\mu}e(n) \mathbf{X}'(n) \\ \mathbf{X}'(n) = [x'(n), x'(n-1), \dots, x'(n-L+1)]^T \\ x'(n) = \sum_{h=0}^{H-1} s_h x(n-h) \end{cases} \quad (5)$$

## 1.2 次级通道辨识原理

主动减振控制系统中次级通道的存在是影响控制系统性能的一个关键因素, 它直接影响控制系统的收敛性和控制的有效性。对次级通道的辨识过程可在线进行, 也可离线进行。但在线辨识实现过程比较复杂, 当滤波器阶数 ( $S(z)$  向量长度) 较高时, 计算量大, 辨识缓慢, 因此工程上通常对  $S(z)$  进行离线辨识<sup>[13-14]</sup>。

离线辨识原理如图 2 所示, 其原理是将基座输入  $x(n)$  置 0, 促动器产生振动控制信号  $u(k)$  使系统振动, 其中  $u(k)$  为简谐信号或白噪声信号,  $y(k)$  为促动器的控制输出引起的负载响应,  $y'(k)$  为滤波器  $\hat{S}(z)$  的输出信号, 两者相减得到偏差信号  $e'(k)$ , 当  $e'(k)$  趋于稳定,  $\mathbf{V}(k+1) =$

$\mathbf{V}(k) + 2\mu_1 e'(k) \mathbf{U}(k)$  将收敛于稳态解  $\mathbf{V} = [v_0, v_1, \dots, v_m]^T$ , 权向量  $\mathbf{V}$  为离线辨识出来的次级通道参数, 即模型参数, 其中  $\mathbf{U}(k) = [u(k), u(k-1), \dots, u(k-m)]^T$ ,  $\mu_1$  为系统辨识过程中的迭代因子。

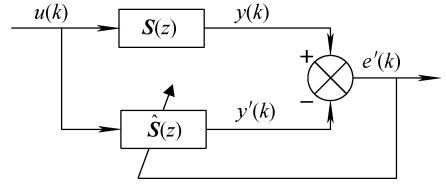


图 2 系统次级通道辨识框图

Fig. 2 System identification of secondary path

## 1.3 主动减振控制算法仿真研究

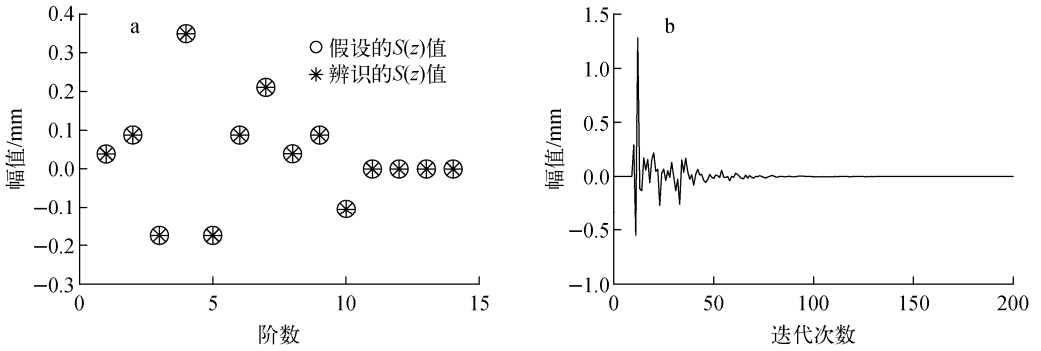
本文利用 Matlab 软件对主动减振控制算法进行仿真验证。首先假设要辨识的通道模型, 本文假设要辨识的通道模型为  $S(z) = [0.038, 0.0875, -0.175, 0.35, -0.175, 0.0875, 0.21, 0.0385, 0.084, -0.105]$ , 取促动器输出的振动信号  $u(k)$  为高斯白噪声, 幅值为 2 mm,  $\mathbf{V}$  的长度取 14, 迭代因子  $\mu_1 = 0.1$ , 辨识次数为 2 000 次, 仿真结果如图 3 所示, 可看出, 上述次级通道辨识算法可有效地辨识出系统模型参数。

在上述辨识结果  $S(z)$  的基础上, 假设激励源是 5、15、20 Hz 幅值为 2 mm 的正弦波并叠加幅值为 0.1 mm 的高斯白噪声的多频干扰信号,  $\mathbf{W}(z)$  的阶数取 16 阶, 收敛因子  $\bar{\mu} = 0.005$ 。仿真结果如图 4 所示, 可看出, 在无主动减振控制时, 仿真系统的最大振幅为 4.96 mm, 在有主动减振控制力作用时系统的最大振幅减小为 0.15 mm, 主动减振控制系统实现了 96.97% 的减振效果, 证明 Fx-LMS 算法在理论上可起到良好的低频减振效果。

## 2 主动减振控制系统

### 2.1 实时控制系统硬件设计

主动减振控制系统对控制系统硬件的响应速度和实时性有较高要求, 控制系统反应速度要求达到 0.05 ms 以下, 本文选择 NI 的分布式测量与控制系统 Compact-RIO 设备作为核心控制部件, 其固件主要包含: I/O 模块、可重



a——次级通道辨识结果;b——次级通道辨识过程中的误差

图3 次级通道辨识仿真测试

Fig. 3 Simulation test of secondary path identification

新配置的现场可编程门阵列(FPGA)的机箱、实时控制器。控制系统的处理器内核 667 MHz, 通信可配置 40 MHz, 最快处理速度可达到 40 ns, FPGA 处理能力和处理速度能有效满足主动减振控制系统对实时性的要求, 控制系统配置 1 个两通道的 NI-9250 A/D 采集输入模块实现基础激励和平台振动响应信号采集, 同时配备 2 个四通道的 NI-9263D/A 输出模块, 可实时输出主动控制量, 驱动压电促动器作用实现平台主动减振控制功能。

0~+120 V 的电压驱动压电陶瓷促动器动作, 实现实时驱动压电促动器对减振系统产生反作用力, 达到减振的效果。

### 2.3 控制系统设计

本文设计的主动控制系统的控制过程主要包括两部分: 次级通道辨识过程和主动减振控制过程, 估计次级通道传递函数的过程称为次级通道的建模过程, 在实际应用中, 首先关闭系统的外部干扰源, FPGA 控制器产生高斯白噪声电压信号输出给压电陶瓷控制器, 并将其作为次级通道建模的激励源信号, 通过次级通道辨识算法计算出系统  $V$ , 当辨识一定次数后,  $V$  趋于稳定, 从而分析得到减振系统的次级通道参数; 然后转而进入主动控制过程, 通过振动信号采集与主动控制算法( $F_x$ -LMS 自适应控制算法)的迭代计算控制, 实现自适应主动振动控制功能, 整个控制过程的流程如图 5 所示。主动减振控制系统软件架构如图 6 所示, 系统软件主要由上位机 RT 软件和下位机 FPGA 软件两部分组成, 上位机与下位机之间通过 FIFO 数据传输模块实现控制信号通信与过程数据传递。上位机软件主要由振动数据显示界面、次级通道辨识界面和主动减振控制界面组成, 作为人机交互界面主要实现振动数据实时显示、次级通道辨识参数结果及辨识误差和主动减振控制效果等数据的显示及其相关控制参数设定功能。下位机软件主要由振动数据采集模块、次级通道辨识算法模块、 $F_x$ -LMS 算法模块和六通道压电陶瓷驱动控制模块组成, 主要实现系统运行过程中的振动数据采集与传输、

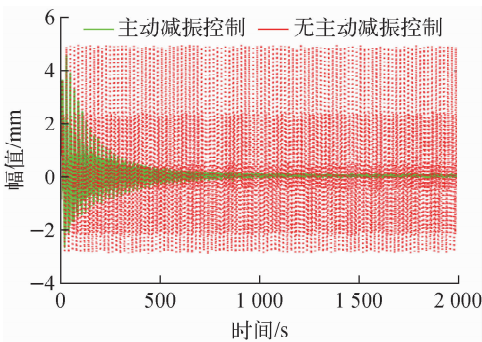


图4 主动减振控制算法仿真

Fig. 4 Simulation of active vibration control algorithm

### 2.2 压电驱动单元设计

压电陶瓷驱动装置是主动减振控制系统中的核心部件之一, 本文压电促动器控制方式, 将控制器  $F_x$ -LMS 算法解算出来的反馈电压控制量( $\pm 5$  V 范围内), 通过 Compact-RIO 中的 D/A 板卡输出, 并实时输入给压电陶瓷驱动器, 通过驱动模块的偏置调节, 将电压转换成 0~10 V, 然后通过控制器的 12 倍放大器输出

闭环控制信号输出控制和主动减振控制等功

能。整个控制系统软件是在 NI 的 FPGA 与 RT 实时环境下实现。

### 3 主动减振控制实验研究

本文是在并联六自由度平台上搭建单方向主动减振控制系统,主要用于控制平台垂直 Z 方向的低频微振动。控制系统中的振动采集模块实时采集并联平台上下平面 Z 方向的加速度信号,信号通过 Compact-RIO 的电荷放大调理,然后将系统激振信号和平台响应信号实时传递给 FPGA 处理器,FPGA 中的 Fx-LMS 模块对控制目标信号进行分析处理,得到实时反馈控制量,并通过输出模块发出控制信号,经压电控制器驱动压电陶瓷促动器产生反作用力作用于并联平台上平面,达到减振的效果。

主动减振控制实验主要分为次级通道辨识与主动减振控制两部分。次级通道辨识实验首先通过 FPGA 控制系统产生一定长度的高斯白噪声信号,使并联平台的 6 支压电促动器振动,通过次级通道辨识算法模块将主动减振控制系统结构的次级误差参数辨识出来。本文采用白噪声信号驱动压电陶瓷促动器来辨识并联平台 Z 方向的次级通道参数,辨识结果如图 7 所示,可看出,系统辨识的结果清晰明了,且系统的通道参数主要集中在前 80 阶,呈现衰减趋势,满足基本控制理论。同时本文采用 5 组不同大小的白噪声信号驱动压电陶瓷促动器,通过统计分析得到并联平台 Z 方向在不同白噪声驱动下次级通道参数的标准差分布图(图 8),由图 8 可看出,次级通道参数最大标准

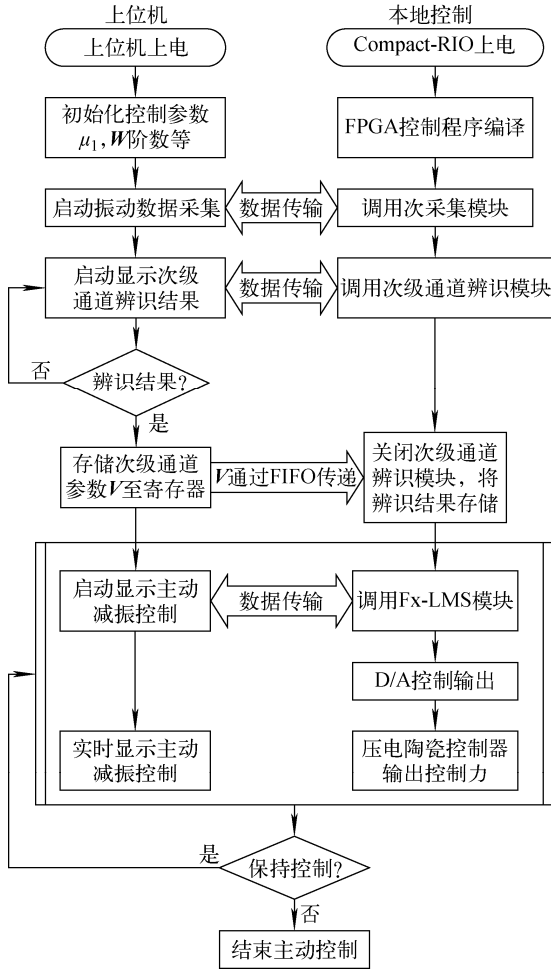


图 5 主动控制流程图

Fig. 5 Flow block of active control system

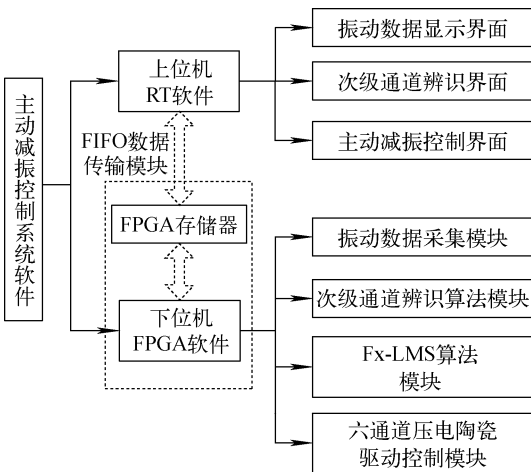


图 6 主动减振控制系统软件架构

Fig. 6 Software architecture of active vibration control system

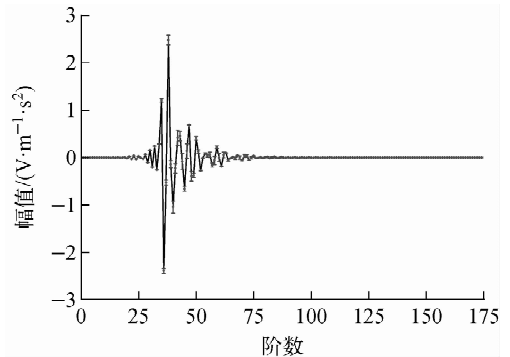


图 7 主动减振控制系统次级通道辨识结果

Fig. 7 Secondary channel identification result of active vibration control system

差为 0.175,不同大小的白噪声信号对次级通道参数的辨识影响较小。

主动减振控制实验,首先通过数据缓存器 FIFO 将辨识处理的 Z 方向次级通道参数传递给 Fx-LMS 模块中的存储器,然后开启激振器,使平台按设定的激振频率和振动幅值振动,最后开启主动减振功能,使系统实时反馈控制,减少平台上平面的振动幅值。本文对平台垂直 Z 方向进行了不同频率的激振与减振控制实验,来检验减振系统的低频减振效果,不同激振频率作用下的减振效果列于表 1。

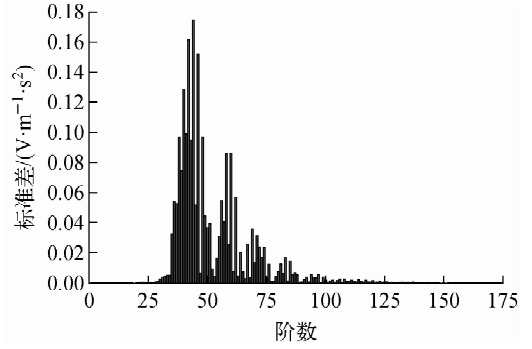


图 8 次级通道参数标准差分布  
Fig. 8 Standard deviation distribution of secondary channel parameter

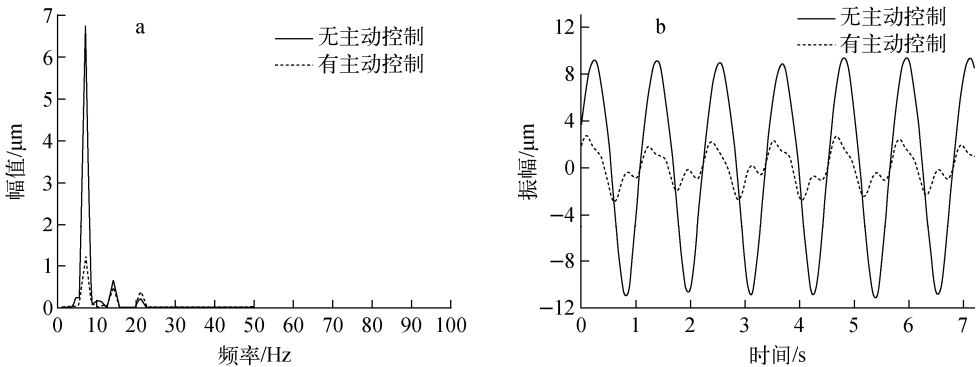
表 1 不同频率激振下的减振实验

Table 1 Vibration reduction experiment under different frequency exciting conditions

激振器 激振频率/Hz	无主动减振控制 振动幅值/ $\mu\text{m}$	有主动减振控制 振动幅值/ $\mu\text{m}$	振动幅值主动 减振效率/%	振动幅值主动 减振衰减量/dB
7	9.179	2.247	75.52	14.665
10	9.475	1.017	89.27	23.897
15	9.955	0.512	94.85	52.042
20	9.634	0.554	94.24	43.414
25	7.234	0.412	94.3	70.209
30	6.165	0.561	90.9	58.159
40	4.924	0.943	80.84	64.227
50	4.493	0.834	81.43	71.82

图 9 为主动减振实验结果,可看出,系统在激振器 7 Hz 的正弦干扰信号作用下,平台抑制低频振动的效果明显,控制后位移振动幅值从 9.179  $\mu\text{m}$  降低至 2.247  $\mu\text{m}$ ,减少 75.52%,在

主动减振控制前后平台的振动幅值衰减量达 14.665 dB。随激振频率的增大,主动减振控制系统主动减振效率和衰减量明显增大,减振效果较好。



a——7 Hz 激励振动测试对比(频域);b——7 Hz 激励振动测试对比(时域)

图 9 主动减振实验结果

Fig. 9 Experimental result of active vibration control

## 4 结语

本文在基于压电陶瓷促动器驱动的并联六自由度平台上设计了一套主动减振控制系统,采用Fx-LMS自适应控制算法作为系统控制方法。对平台进行了7~50 Hz的中低频激励测试,实现了垂直Z方向的低频微振动控制,尤其对7 Hz低频激励干扰下上平台在垂直Z方向取得了75.52%的良好减振效果,从而验证了本文设计的主动减振控制系统是可行的,该系统为未来南方先进同步辐射光源精密设备的低频微振动减振系统和多方向自适应主动控制打下了基础。

## 参考文献:

- [1] XU G, JIAO Y, PENG Y M. ESRF-type lattice design and optimization for the high energy photon source[J]. Chinese Physics C, 2016, 40(2): 027001.
- [2] KRISTIANSEN P, HORBACH J, DÖHRMANN R, et al. Vibration measurements of high-heat-load monochromators for DESY PETRA III extension[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2015, 22(4): 879-885.
- [3] WANG Xiao, CAO Yun, CHEN Liang, et al. Mechanical stability analysis of BPM support at SSRF[J]. Chinese Physics C, 2008, 32(3): 28-30.
- [4] GEMA M C, JULIE V, TUCOULOU R, et al. ID16B: A hard X-ray nanoprobe beamline at the ESRF for nano-analysis[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2016, 23(1): 344-352.
- [5] TANG Siwei, YIN Chongxian, LIU Dekang. Synchrotrons radiation stability measurement and improvement[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, 23(1): 7-9.
- [6] 顾仲权,马扣根,陈卫东. 振动主动控制[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
- [7] DOOSE C, SHARMA S. Investigation of passive vibration damping methods for the advanced photon source storage ring girders[C]. Chicago: [s. n.], 2002.
- [8] BRETON R L, DELEGLISE G, ALLIBE J, et al. Nanometer scale active ground motion isolator[J]. Sensors and Actuators A, 2013, 204: 97-106.
- [9] COLLETTE C, ARTOOS K, KUZMIN A, et al. Active quadrupole stabilization for future linear particle colliders[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010, 621: 71-78.
- [10] COLLETTE C, JANSSENS S, ARTOOS K, et al. Nano-motion control of heavy quadrupoles for future particles colliders: An experimental validation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, 643: 95-101.
- [11] 李乔博,王超新,黄修长,等. 基于 Stewart 平台微振动主动控制分析与实验[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(3): 214-218.  
LI Qiaobo, WANG Chaoxin, HUANG Xiu-chang, et al. Analysis and experiment of micro-vibration active control based on a stewart platform[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(3): 214-218(in Chinese).
- [12] MORGAN D R, SANFORD C. A control theory approach to the stability and transient analysis of the filtered-X LMS adaptive notch filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(9): 2 341-2 346.
- [13] KUO S M, MORGAN D R. Active noise control: A tutorial review[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(6): 943-947.
- [14] 杨铁军,靳国永,李玩幽,等. 舰船动力装置振动主动控制技术研究[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(增刊 2): 46-53.  
YANG Tiejun, JIN Guoyong, LI Wanyou, et al. Study on active control techniques for warship power plant[J]. Ship Science and Technology, 2006, 28(Suppl. 2): 46-53(in Chinese).