

基于自适应谐波消除的 Hexapod 平台 微振动激励控制

周世骥, 黄海

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘要: 针对空间微振动环境模拟的需求, 以 Hexapod 平台为对象, 进行正弦振动激励控制的研究。当 Hexapod 平台工作在共振频段时, 其输出的振动信号中因含有谐波成分而产生了显著的控制误差。为此, 提出了一种自适应谐波消除算法。该算法以 LMS 滤波器为基础, 将与谐波同频率的正弦信号和余弦信号作为滤波器的基底信号, 将平台实际的输出响应作为滤波器的误差信号, 以此实现谐波分量的自适应消除。将基于该算法的控制回路引入传统的控制器, 进行了共振频段的单输入单输出和多输入多输出的微振动激励试验, 结果表明, 该算法可有效地消除谐波失真, 大幅提高了 Hexapod 平台在共振频段的控制精度。

关键词: 振动激励; Hexapod 平台; 自适应控制; 共振; 谐波消除

中图分类号: TB534

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2016)01-0089-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2016.01.016

Control of micro-vibration generation using Hexapod platform based on adaptive harmonic cancellation

Zhou Shiji, Huang Hai

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A Hexapod platform driven by voice coil motors is used to simulate the micro-vibration environment in space. The response signal of the Hexapod platform contains harmonics when it works at resonance frequencies, resulting in a significant error between the actual output and the desired output. To reduce the harmonic distortion and improve the control performance of the Hexapod platform, an adaptive harmonic cancellation (AHC) algorithm based on the LMS filter is developed. The reference signals of the LMS filter are a sine signal and a cosine signal with the same frequency of the harmonics. Meanwhile, the output signal is directly used as the error signal of the LMS filter. Experimental results show that the proposed approach can efficiently eliminate the harmonic distortion and greatly enhance the control accuracy in both SISO and MIMO cases.

Key words: vibration excitation; Hexapod platform; adaptive control; resonance; harmonic cancellation

0 引言

随着星载高精度成像设备的分辨率不断提高及其尺寸和焦距的不断增大, 由各种内外部因素导致的航天器微振动对成像质量的影响尤为突出^[1]。因此, 在模拟空间微振动环境中进行航天器有效载荷抗干扰检定变得不可或缺。但是由于微振动的频率较高且振动的加速度量级一般不超过 10 mg, 传统的低频、大加速度量级的振动台无法满足微振动

激励的要求。此外, 多轴振动试验虽然是更有效的评价手段, 但我国由于缺少系统的试验设备、试验技术和方法以及试验规范, 尚未将多轴振动试验纳入航天器设计和验证流程^[2]。因此, 研制满足航天应用的多轴微振动激励平台并研究相应的振动激励控制算法具有重要意义。

Hexapod 平台是一种六自由度并联机构^[3], 具有定位精度高、刚度大、结构稳定、承载能力强、运动惯量小、动态特性好等特点, 被广泛应用

于主动振动控制领域,如美国海军研究生院的 PPH 平台^[4], Honeywell 公司的 VISS^[5]、ULB 的主动隔振平台^[6]等。同样,许多振动激励装置也采用了 Hexapod 平台的构型,如美国空军实验室的高频振动台^[7]及 MTS 公司的 Model 353 振动台^[8]等。这类平台不仅具有多轴运动的能力,而且其工作频率和精度都能满足多轴微振动激励的要求。

目前在单输入单输出(SISO)系统的正弦振动激励的控制策略中主要采用了基于 LMS (Linear Minimum Square) 滤波器的自适应控制技术^[9-10]。对于多输入多输出(MIMO)系统的振动激励控制,需先对控制对象进行解耦,再转化为对多个 SISO 系统的自适应控制^[11]。但是,由于 LMS 滤波器是一种线性滤波器,当共振等因素激发了系统非线性响应并产生谐波失真时,采用单一频率基底信号的 LMS 滤波器不能消除该谐波失真,使所产生的控制误差显著增加。为此,本文基于 LMS 滤波器的传统控制方法,提出一种自适应谐波消除(Adaptive Harmonic Cancellation, AHC)算法,并进行 SISO 系统和 MIMO 系统的振动激励试验,以研究所提出算法的有效性。

1 SISO 系统的振动激励控制方法

1.1 基于 LMS 滤波器的振动激励控制

在 SISO 系统中进行正弦振动激励所使用的基于 LMS 滤波器的控制方法如图 1 所示。

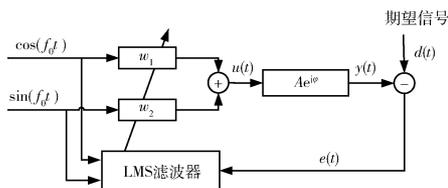


图 1 基于 LMS 滤波器的振动激励控制

Fig. 1 Control of vibration excitation based on LMS filter

在图 1 中, $Ae^{j\omega}$ 为控制对象在频率 f_0 处的传递函数值,为了使系统输出正弦振动 $d(t)=\sin(f_0 t)$,则输入信号应满足

$$u(t) = \frac{1}{A} \sin(f_0 t - \varphi) = w_1 \sin(f_0 t) + w_2 \cos(f_0 t), \quad (1)$$

其中:系数 w_1 、 w_2 为

$$\begin{cases} w_1 = \frac{1}{A} \cos \varphi \\ w_2 = -\frac{1}{A} \sin \varphi \end{cases}. \quad (2)$$

可见,只需用相同频率的正弦和余弦信号作为基底信号并乘以合适的系数后输入系统,便可获得期望的输出信号。但由于系统传递函数往往是不可确切获知的,所以 w_1 、 w_2 不能由式(2)直接确定,而需要根据 LMS 算法进行迭代求解,即

$$\begin{cases} w_{1,k+1} = w_{1,k} + \mu e_k \sin(f_0 t_k) \\ w_{2,k+1} = w_{2,k+1} + \mu e_k \cos(f_0 t_k) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: e_k 是实际输出信号 y_k 与期望信号 d_k 之间的误差; μ 是迭代增益,为确保控制收敛, μ 须满足^[4]

$$|1 + \mu A e^{j\varphi}| < 1. \quad (4)$$

只要选取合适的迭代增益 μ , LMS 算法可最终使 $e_k \rightarrow 0$, 即 $(y_k - d_k) \rightarrow 0$, 那么实际输出信号即为期望信号。

当系统工作在线性状态时,上述控制方法可以达到较高的控制精度。但在试验中发现,当系统在共振等因素的作用下工作在非线性状态时,输出信号中除了含有与基底信号同频的成分外,还会混叠有频率为基底信号倍频的谐波成分 $r(t)$, 即 $r(t) = \sum_{n=2}^m B_n \sin(nf_0 t + \theta_n)$, 如图 2 所示。

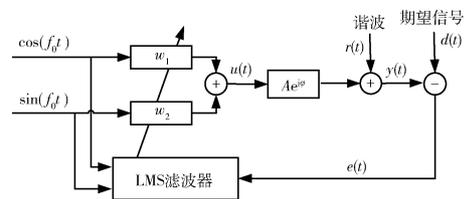


图 2 含有谐波扰动的情况

Fig. 2 The case with harmonic distortion

在这种情况下,因为采用的参考信号与谐波的频率不同,所以并不能消除谐波的影响,输出信号始终存在谐波失真。为此,需要在控制回路中增加谐波消除回路来减小由谐波失真产生的控制误差。

1.2 SISO 系统的自适应谐波消除

当参考信号为正弦信号时,LMS 算法可以通过在线迭代将误差信号中与参考信号同频率的部分削减到 0。考虑到谐波的频率是可知的,本文利用 LMS 算法的特点,提出一种自适应谐波消除算法:即将与谐波同频率的正弦信号和余弦信号作为 LMS 滤波器的参考信号,以实际的输出响应作为 LMS 滤波器的误差信号,通过 LMS 算法在线更新

权系数,最终消除输出响应中的谐波。假定输出信号仅含有 n 倍频谐波,即

$$r(t) = B_n \sin(nf_0 t + \theta_n), \quad (5)$$

则加入谐波消除回路后的 SISO 系统振动激励控制框图如图 3 所示。该控制回路包括振动信号生成回路和谐波消除回路两部分。

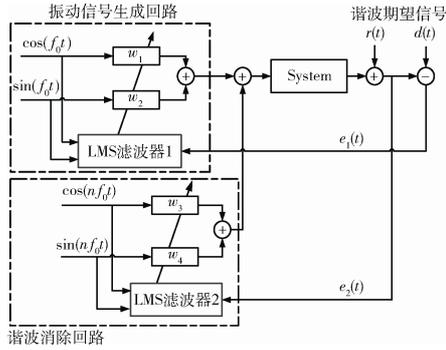


图3 含自适应谐波消除的微振动激励控制
Fig. 3 Control of micro-vibration excitation with adaptive harmonic cancellation

若系统在频率 nf_0 处的响应为 $A_n e^{j\theta_n}$, 与式(3)类似,自适应谐波消除回路中的权系数 w_3 、 w_4 的迭代公式及收敛条件为:

$$\begin{cases} w_{3,k+1} = w_{3,k} + \mu_2 e_{2,k} \sin(nf_0 t_k) \\ w_{4,k+1} = w_{4,k} + \mu_2 e_{2,k} \cos(nf_0 t_k) \end{cases}, \quad (6)$$

$$|1 + \mu_2 A_n e^{j\theta_n}| < 1. \quad (7)$$

2 MIMO 系统的振动激励控制方法

MIMO 系统的振动激励控制包括前馈解耦和自适应控制两部分^[11],如图 4 所示。其中,对 MIMO 系统进行解耦需先通过辨识获取系统的频响矩阵,并进一步根据其逆矩阵构造 FIR 滤波器进行前馈补偿。

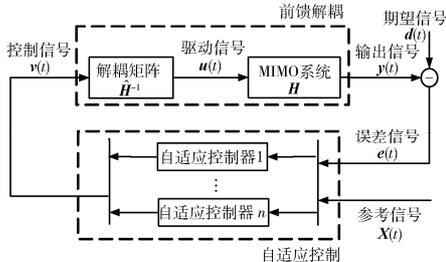


图4 MIMO 系统的微振动激励控制
Fig. 4 Control of micro-vibration excitation in MIMO system

2.1 频响函数估计与 FIR 滤波器构造

系统频响函数的辨识可采用 H1 估计方法,该

方法假设辨识时的测量噪声主要来源于输出噪声,见图 5。图中: $H(f)$ 为系统的频响函数; $X(f)$ 为输入信号的频谱,在进行辨识时,输入信号常选用高斯白噪声信号以获得系统较宽频带上的频率响应; $N(f)$ 为噪声频谱; $Y(f)$ 为测量信号的频谱; $F(f)$ 是线性系统的输出谱,其无法直接测得。

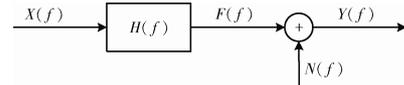


图5 含有输出噪声时的系统模型
Fig. 5 System model with output noise

设共进行了 k 次辨识试验,则利用 H1 方法求解系统估计频响函数 $\hat{H}(f)$ 的公式为

$$\hat{H}(f) = \frac{\sum_{k=1}^N Y_k(f) \bar{X}_k(f)}{\sum_{k=1}^N X_k(f) \bar{X}_k(f)}, \quad (8)$$

其中, $\bar{X}_k(f)$ 为 $X_k(f)$ 的共轭。

对于 MIMO 系统,需要分别辨识每个输入输出间的频响函数再组集成频响函数矩阵 $\hat{H}(f)$,从而利用其逆矩阵 $\hat{H}^{-1}(f)$ 进行解耦。但是, $\hat{H}^{-1}(f)$ 不能在控制器中直接应用,而要通过具有相同频率响应的传递函数实现。对于指定的频率,通过构造有限冲激滤波器(FIR 滤波器)来得到这个传递函数最为简便,且得到的传递函数不含极点,可以保证控制系统的稳定。

记 $M = \hat{H}^{-1}(f_0) = [m_{ij}]$, 则复数 m_{ij} 对应的 FIR 滤波器的传递函数为

$$F_{ij}(z) = a_{ij} + b_{ij} z^{-1}. \quad (9)$$

若控制系统的采样时间间隔为 δ , 则式(9)中的参数 a_{ij} 和 b_{ij} 的求解公式为

$$\begin{cases} b_{ij} = -\frac{\text{imag}(m_{ij})}{\sin(2\pi f_0 \delta)} \\ a_{ij} = \text{real}(m_{ij}) - b_{ij} \cos(2\pi f_0 \delta) \end{cases}. \quad (10)$$

2.2 MIMO 系统的自适应谐波消除

图 4 所示的控制结构中的自适应控制器仅采用了基于 1.1 节所述的 LMS 控制,因此无法消除 MIMO 系统的谐波失真。为此,本文将自适应谐波消除控制引入 MIMO 系统的振动激励控制,以消除进行多自由度激振时产生的谐波,如图 6 所示。首先通过逆频响函数矩阵进行前馈解耦,将

MIMO 系统的控制转化为对多个 SISO 系统的控制，然后在每个 SISO 控制回路中应用图 3 的控制方法，从而在产生振动信号的同时消除谐波扰动。值得注意的是，谐波消除回路中需要使用与谐波频率相同的逆频响函数矩阵 $\hat{H}^{-1}(nf_0)$ 进行解耦。

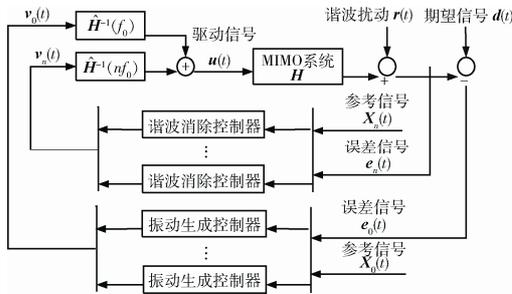


图 6 MIMO 系统的自适应谐波消除
Fig. 6 Adaptive harmonic cancellation in MIMO system

3 试验结果

为验证所引入的 AHC 算法的效果,在 Hexapod 平台上进行了单输入单输出和多输入多输出的振动激励控制试验。

3.1 试验系统

图 7 为所搭建的振动激励系统,包括 Hexapod 平台和电控系统。

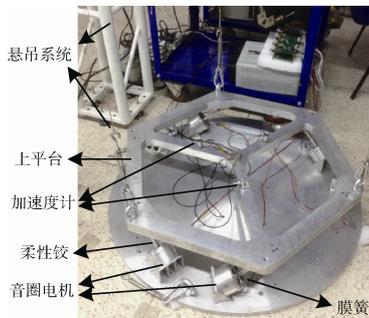


图 7 基于 Hexapod 平台的微振动激励系统
Fig. 7 Micro-vibration generation system based on Hexapod platform

Hexapod 平台主要包括上平台、下平台和 6 个作动器。其中,以作动器的控制电压作为输入信号,以上平台的加速度作为输出信号。作动器中的主动元件为直线音圈电机。作动器与上平台通过柔性铰链连接,作动器的定子与转子之间通过膜片弹簧连接。上平台上方安装了 3 根悬吊弹簧以抵消上平台的重力。

电控系统由加速度计、信号调理器、实时控制器、A/D 和 D/A 卡、电源和功率放大器组成。其中,安装于上平台的 6 个压电加速度计可用于采

集上平台各自由度的振动加速度并转化为电压信号;该信号经过信号调理器和 A/D 卡后进入实时控制器,然后通过所设计的控制方法编写的控制程序得到控制电压;控制器输出的电压信号分别经过 D/A 卡和功率放大器后驱动作动器运动,最终使上平台产生振动,如图 8 所示。

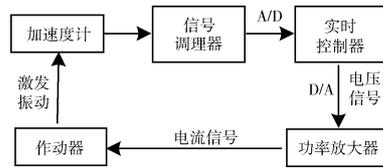


图 8 电控系统构架
Fig. 8 Structure of electricity-control system

3.2 频率响应辨识

通过 H1 方法对试验平台各输入输出间的频率响应函数进行了辨识,所得的幅频曲线如图 9 所示。由图可知,平台存在多个共振频段,激振试验可在这些频段中选取某个固定频点进行,本文选取了 146 Hz。

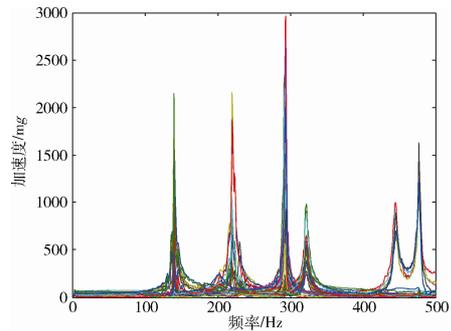


图 9 平台的幅频曲线
Fig. 9 Amplitude-frequency curves of the platform

3.3 单输入单输出激振试验

分别以 Hexapod 平台中的 1 号作动器和 1 号加速度计作为输入和输出进行振动激励试验,期望响应为幅值 5 mg、频率 146 Hz 的正弦振动。图 10 为期望信号波形与未采用谐波消除时的实际响应信号波形。可见,输出信号并不是一个规则的正弦信号,并且其幅值超过了期望的 5 mg,接近 10 mg。对响应信号做傅里叶变换可得到其频谱,如图 11 所示。由图可知:虽然响应信号在 146 Hz 的分量已经很好地控制在了期望的 5 mg,但是其中混叠了 2 倍频的谐波成分,这个 292 Hz 的谐波的幅值已超过 5 mg,因此实际响应信号的误差很大。

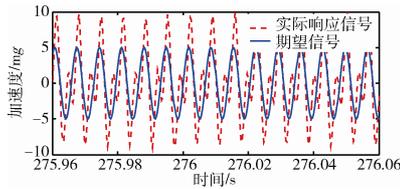


图 10 无自适应谐波消除时的响应波形 (SISO)
Fig. 10 Response waveform without AHC(SISO)

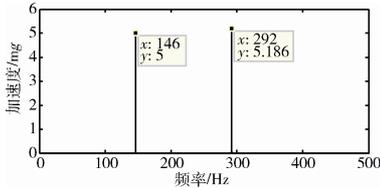


图 11 无自适应谐波消除时的响应频谱 (SISO)
Fig. 11 Response spectrum without AHC(SISO)

图 12 为引入了 AHC 控制后的实际响应信号波形与期望信号波形, 两者几乎重合, 说明经振动控制后, 理论值与试验值基本吻合。图 13 所示的响应信号频谱也进一步表明原有的 2 倍频谐波已被有效消除。可见, 在单输入单输出振动激励试验中引入 AHC 控制后, 控制精度的提升十分显著。

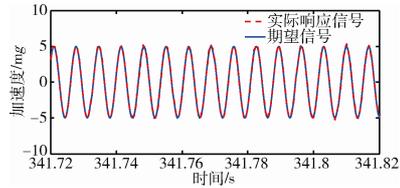


图 12 引入自适应谐波消除后的响应波形 (SISO)
Fig. 12 Response waveform with AHC(SISO)

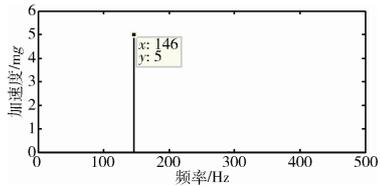


图 13 引入自适应谐波消除后的响应频谱 (SISO)
Fig. 13 Response spectrum with AHC(SISO)

3.4 多输入多输出激振试验

以 Hexapod 平台中的 6 个作动器和 6 个加速度计分别作为输入和输出进行激振试验。在试验中, 令 1 号加速度计的期望响应为幅值 5 mg、频率 146 Hz 的正弦振动, 其余加速度计处的期望响应为 0。图 14~图 17 分别为加入 AHC 回路前后的试验结果。

图 14 为未采用自适应谐波消除时各加速度计所测实际响应信号及期望信号的波形。由图可知, 除 3、4 号加速度计所测响应的幅值接近期望值外, 其余加速度计处的响应幅值都超过了期望

值, 其中 1 号加速计约为 20 mg。图 15 所示为各响应信号的频谱, 该图反映了误差的主要来源仍为 292 Hz 的 2 倍频谐波。

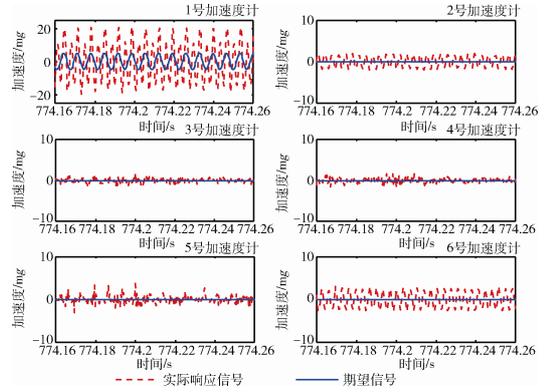


图 14 无自适应谐波消除时的响应波形 (MIMO)
Fig. 14 Response waveforms without AHC(MIMO)

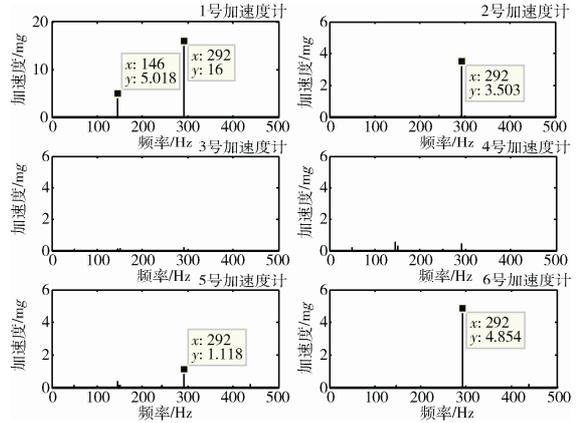


图 15 无自适应谐波消除时的响应频谱 (MIMO)
Fig. 15 Response spectrums without AHC(MIMO)

图 16 为在 MIMO 系统中引入了 AHC 控制后各加速度计所测的实际响应信号和期望信号的波形。其中, 1 号加速度计所测的响应波形几乎与期望的 5 mg 的波形重合, 且其余加速度计的响应信号仅为噪声水平, 满足所期望的控制目标。

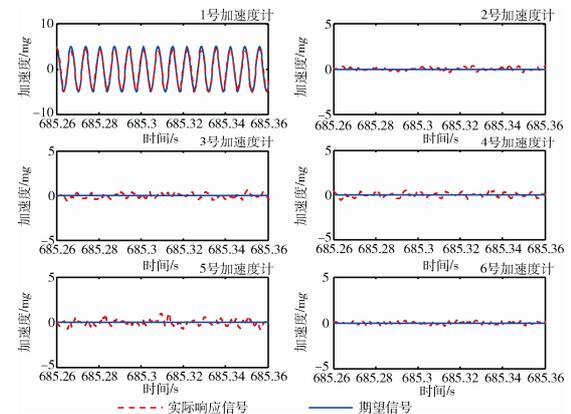


图 16 引入自适应谐波消除后的响应波形 (MIMO)
Fig. 16 Response waveforms with AHC(MIMO)

图 17 所示的各响应信号的频谱表明, 引入了 AHC 控制后, 原有的 2 倍频谐波已被消除。可见, 在 MIMO 系统中引入 AHC 控制后, 控制精度明显提高。

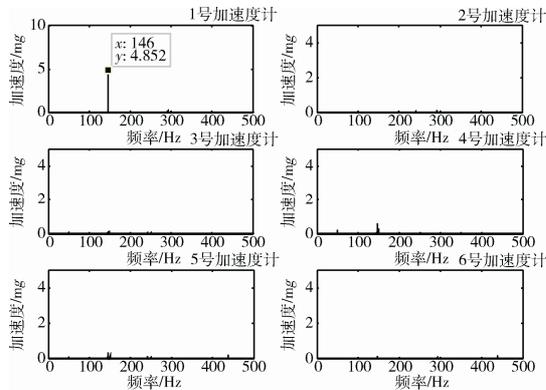


图 17 引入自适应谐波消除后的响应频谱 (MIMO)
Fig. 17 Response spectrums with AHC(MIMO)

4 结束语

为减小 Hexapod 平台在共振频段进行微振动激励时由谐波失真产生的控制误差, 分别在 SISO 系统激振和 MIMO 系统激振的传统控制方法中引入了一种自适应谐波消除算法。通过试验结果分析, 可得到以下结论: AHC 算法在 SISO 和 MIMO 系统的振动激励中均可以有效地消除输出响应中的谐波成分, 从而显著减少了振动误差, 使 Hexapod 平台产生的振动信号满足期望要求。

参考文献 (References)

- [1] 王红娟, 王伟, 王欣, 等. 航天器微振动对空间相机像质的影响[J]. 光子学报, 2013, 42(10): 1212
Wang Hongjuan, Wang Wei, Wang Xin, et al. Space camera image degradation induced by satellite micro-vibration[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(10): 1212
- [2] 次永伟, 邱大芦, 付乐平, 等. 航天器振动试验控制技术进展[J]. 动力学与控制学报, 2014, 12(3): 193
Ci Yongwei, Qiu Dalu, Fu Leping, et al. Progress in spacecraft vibration testing control technology[J]. Journal of Dynamics and Vibration, 2014, 12(3): 193
- [3] Stewart D. A platform with six degrees of freedom[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1965, 180(1): 371-386
- [4] Taranti C G. A computationally efficient algorithm for disturbance cancellation to meet the requirements for optical payloads in satellites[D]. CA: Research Office, Naval Postgraduate School, 2001
- [5] Foshage G K, Davis T, Sullivan J M, et al. Hybrid active/passive actuator for spacecraft vibration isolation and suppression[C]//SPIE's 1996 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. Denver, 1996
- [6] Hanieh A A. A stiff and soft stewart platforms for active damping and active isolation of vibrations[C]//8th International Conference on New Actuators. Bremen, 2002: 254-257
- [7] Ewing C M. The advanced guided weapon tested(AGWT) at the Air Force Research Laboratory Munitions Directorate[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Chicago, 2009
- [8] MTS Systems Corporation. MAST systems[OL]. [2015-09-30]. http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev_002251.pdf, 2015
- [9] 赵勇. 液压振动台高精度正弦振动的控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009
- [10] 沈刚. 三自由度电液振动台时域波形复现控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
- [11] Wang H. Multiple-degree-of-freedom sinusoidal vibration generation based on a Hexapod platform[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2015, 229(2): 139-148

(编辑: 肖福根)

作者简介: 周世骥 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为振动主动控制; E-mail: buaazsj@163.com。指导教师: 黄海 (1963—), 男, 博士学位, 教授, 研究方向为飞行器结构优化, 空间智能结构及其控制等; E-mail: hhuang@buaa.edu.cn。