

文章编号 1004-924X(2007)10-1602-07

差动电磁作动器的超大型光学仪器 隔振基础的主动控制机理

刘彦, 谭久彬, 王雷

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:提出了一种基于差动电磁作动器的超大型光学仪器隔振基础的主动控制机理。该控制机理采用差动布置方案,使电磁作动器变为输出力和控制电流呈线性关系的线性作动器,再利用小阻尼条件下,绝对速度反馈与 Skyhook 控制方法性能接近且易于工程实现的特点,采用了绝对速度反馈的控制方法,可在不改变中/高频隔振性能的前提下大幅提高谐振区隔振性能。实验结果表明:利用所提出的控制机理,在时域上, z 、 θ_x 和 θ_y 三个自由度的速度(角速度)均方根值分别由 $10.06 \mu\text{m/s}$ 、 $4.16 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 和 $4.65 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 降至 $3.38 \mu\text{m/s}$ 、 $1.76 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 和 $1.49 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$;在频域上,三个自由度谐振区隔振性能均有约 10 dB 的提高。

关键词:超大型光学仪器隔振基础;主动控制;差动电磁作动器

中图分类号:TH74;TH161.6;TP211.53 **文献标识码:**A

Control mechanism based on differential electromagnet actuator for a room-sized optical instrument vibration isolation foundation

LIU Yan, TAN Jiu-bin, WANG Lei

(*Institute of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: In order to improve further vibration isolation performance, a new active vibration control mechanism based on differential electromagnet actuator is presented for room-sized vibration isolation foundation. By using the differential scheme, the output force of the actuator is linear with control current. Because absolute velocity feedback method and Skyhook method have the similar performance in the weak damping conditions and the former method is more easier to realize, the absolute velocity feedback method is selected as the control strategy. The control strategy can efficiently improve the performance in resonance area without losing the performance of high frequency area. Experiment results show that by using the proposed mechanism, the mean square roots of velocity or angle velocity at the three degree-of-freedom z , θ_x and θ_y fall to $3.38 \mu\text{m/s}$, $1.76 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ and $1.49 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ from $10.06 \mu\text{m/s}$, $4.16 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ and $4.65 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ in time domain, and the vibration isolation performance in resonance area improves 10 dB in frequency domain.

收稿日期:2007-07-03;修订日期:2007-08-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50675052)

Key words: room-sized optical instrument vibration isolation foundation; active vibration control; differential electromagnet actuator

1 引言

随着光学加工与测量技术的不断发展,对环境振动隔离提出了越来越高的要求^[1-3],例如在激光直写领域,LumArray 公司的并行激光直写设备 ZP150A 可加工的最小特征尺寸为 150 nm,因此由一般振动所引起的直写头位移变化必须 < 15 nm^[4]。同时这类大型精密光学仪器除对隔振性能提出较高要求之外,还由于其自身质量和体积较大,对隔振基础的工作空间和承载能力提出了额外的要求。因此,质量几十吨的乃至几百吨的大型、超大型隔振基础越来越受到人们的重视,如美国 NIST 为其高级测量实验室(AML)建造了尺寸为 4 m×10 m,重约 62 t 的大型空气弹簧隔振基础^[5],哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所研制了三套重量为 70~180 t 的超大型光学仪器隔振基础。

然而被动控制式超大型隔振基础由于低频隔振性能差,很难满足现代精密光学仪器对低频微幅振动的隔振要求,而国内到目前为止尚未在主动控制式超大型隔振基础研究方面取得进展。为此,本文提出了一种基于差动电磁作动器的超大型光学仪器隔振基础主动控制机理。该控制机理首先采用差动布置方案,使电磁作动器变为输出力和控制电流呈线性关系的线性作动器,然后利用小阻尼条件下绝对速度反馈与 Skyhook 控制方法性能接近的特点,采用绝对速度反馈控制方法,在不改变中/高频隔振性能的前提下大幅提高谐振区隔振性能。最后在超大型光学仪器隔振基础 TanLY-A2 上进行了实验验证。

2 超大型光学仪器隔振基础隔振模型

2.1 系统隔振模型

超大型光学仪器隔振基础 TanLY-A2 台体与负载重约 90 t,由 10 个并行布置直径为 Φ600 空气弹簧所支撑。其布置方式如图 1 所示,图中

“□”表示作动器(A₁~A₄),“○”表示传感器(S₁~S₄)。

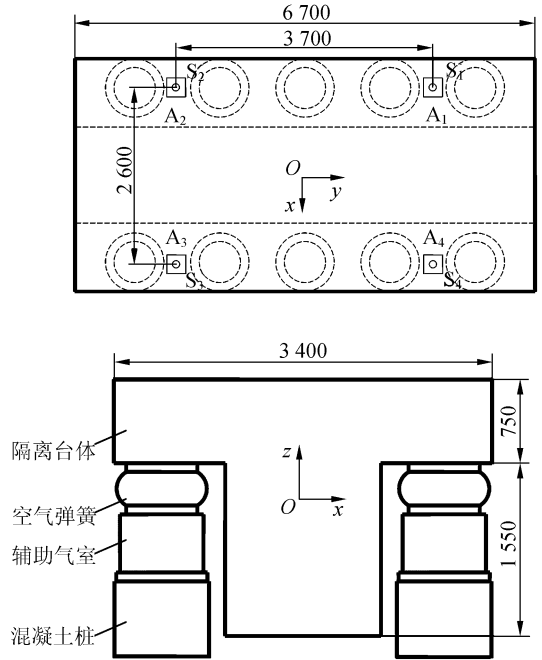


图 1 超大型光学仪器隔振基础结构图

Fig. 1 Structure chart of room-sized optical instrument vibration isolation foundation

本文主要对 z, θ_x 和 θ_y 这三个自由度施加主动控制,由运动学相关知识可得隔振系统运动方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = C\dot{z}_0 + Kz_0 + f_d + Tu \quad (1)$$

其中:

$$M = \begin{bmatrix} m & & \\ & J_x & \\ & & J_y \end{bmatrix} \text{ 为隔振基础质量矩阵,}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_z & & \\ & c_{\theta_x} & \\ & & c_{\theta_y} \end{bmatrix} \text{ 为隔振基础阻尼矩阵,}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_z & & \\ & k_{\theta_x} & \\ & & k_{\theta_y} \end{bmatrix} \text{ 为隔振基础刚度矩阵,}$$

$x = (z, \theta_x, \theta_y)^T$ 为台体广义位移矩阵, $z_0 = (z_d,$

$z_{\theta_x}, z_{\theta_y}$)^T 为地面直接扰动位移矩阵, $f_d = (f_z, f_{\theta_x}, f_{\theta_y})^T$ 为台体直接扰动矩阵, $u = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T$ 为作动器控制信号矩阵,

$$T = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 3.7/2 & -3.7/2 & -3.7/2 & 3.7/2 \\ 2.6/2 & 2.6/2 & -2.6/2 & -2.6/2 \end{bmatrix} \text{ 为作}$$

动器转换矩阵。

对于空气弹簧按照对称方式布置的隔振系统, z, θ_x 和 θ_y 这三个自由度是相互解耦的, 因此可以对每个自由度单独控制^[6]。由于转动自由度振动信号很难直接测量, 考虑到隔振基础在工作状态时振动的幅值在微米量级, 为此本文在台面上四个作动器同心的位置处布置四个 z 向加速度传感器以间接获取被控的三个自由度振动信号。即,

$$x = (z, \theta_x, \theta_y)^T = T_s (s_1, s_2, s_3, s_4)^T, \quad (2)$$

式中: s_i 为第 i 个传感器获得的振动信号, $T_s =$

$$\begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 1/7.4 & -1/7.4 & -1/7.4 & 1/7.4 \\ 1/5.2 & 1/5.2 & -1/5.2 & -1/5.2 \end{bmatrix} \text{ 为传感}$$

器转换矩阵。

2.2 差动电磁作动器设计

由于空气弹簧工作行程较大, 且其工作高度是一个不感带范围内而不是某个确定值, 因此与其并联使用的作动器最好为非接触型作动器, 以避免受台体撞击造成作动器损坏。因而, 本文设计的差动电磁作动器为一非接触型作动器。

2.2.1 电磁铁设计

差动电磁作动器设计的关键在于电磁铁的设计, 为合理利用磁路, 减小自退磁效应对系统的影响, 电磁铁选择吸盘式结构, 如图 2 所示。

为了确保整个电磁回路的均匀性, 应让铁芯的截面积和铁轭的截面积相同。由磁路基本理论可得到电磁铁对衔铁的吸力以及气隙中的电磁感应强度^[7],

$$F = \frac{B^2 A}{\mu_0}, \quad B = \frac{\mu_0 NI}{2C_0}, \quad (3)$$

其中, F 为电磁铁对衔铁的作用力, B 为气隙中的电磁感应强度, A 为铁芯面积, NI 为电磁铁安匝数, C_0 为衔铁和电磁铁之间的间隙。

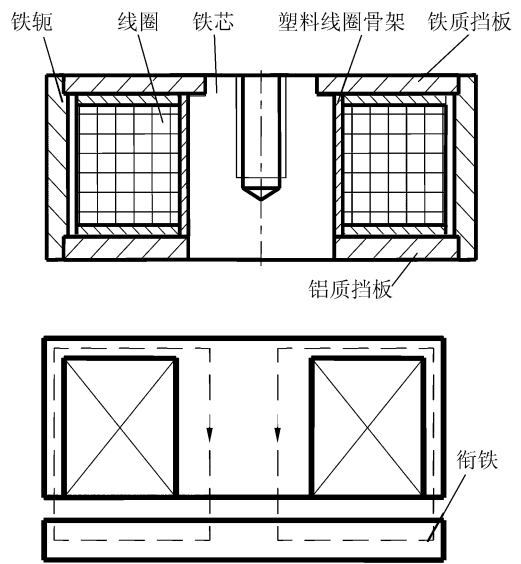


图 2 电磁铁结构图和磁路图

Fig. 2 Structure chart of electromagnet and its magnetic path

2.2.2 作动器设计

差动式电磁作动器原理简图如图 3 所示, 电磁作动器与空气弹簧并联支撑隔振台体。

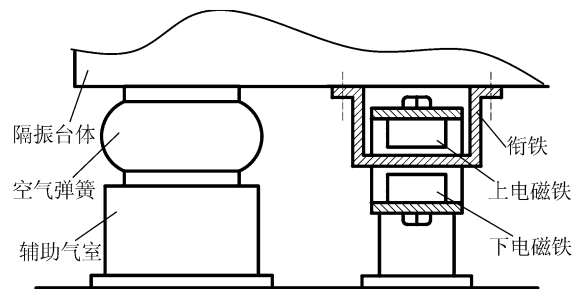


图 3 基于差动电磁作动器的主动控制机理原理图

Fig. 3 Diagram of active vibration control mechanism based on differential electromagnet actuator

电磁作动器由一对差动布置的电磁铁和衔铁组成。由电磁学基本原理可知, 电磁作动器对衔铁的作用力为^[7]:

$$F = k_0 \mu_0 N^2 A \left[\left(\frac{I_0 + i}{C_0 + y} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i}{C_0 - y} \right)^2 \right], \quad (4)$$

其中: N 为单个电磁铁的匝数, I_0 为基电流, i 为控制电流, C_0 为电磁铁与衔铁的初始间隙, y 为衔铁与台体的相对位移, k_0 为与电磁铁结构以及磁路有关的常数, 本文所设计的吸盘式电磁铁

$k_0=0.25$ 。

将 F 在 $i=i_0, y=y_0$ 处做 Taylor 展开,有:

$$F=F_0+\frac{\partial F}{\partial i}\Big|_{\substack{i=i_0 \\ y=y_0}}(i-i_0)+\frac{\partial F}{\partial y}\Big|_{\substack{i=i_0 \\ y=y_0}}(y-y_0), \quad (5)$$

式中,

$$F_0=k_0\mu_0N^2A\left[\left(\frac{I_0+i_0}{C_0+y_0}\right)^2-\left(\frac{I_0-i_0}{C_0-y_0}\right)^2\right],$$

$$\frac{\partial F}{\partial i}=2k_0\mu_0N^2A\left[\frac{(I_0+i_0)}{(C_0+y_0)^2}+\frac{(I_0-i_0)}{(C_0-y_0)^2}\right],$$

$$\frac{\partial F}{\partial y}=-2k_0\mu_0N^2A\left[\frac{(I_0+i_0)^2}{(C_0+y_0)^3}+\frac{(I_0-i_0)^2}{(C_0-y_0)^3}\right].$$

由实际测量可知,超大型隔振系统 TanLY_A2 在工作过程中,基础与衔铁最大相对位移 $< 100 \mu\text{m}$ 远小于衔铁和电磁铁的初始间隙 C_0 (本文间隙设定为 3 mm),因此可以近似认为衔铁在工作过程中始终停留在初始位置处,即 $y_0=0$,将该条件带入式(5)后,可以得到:

$$F=F_0+4k_0\frac{\mu_0N^2A(I_0)}{C_0^2}i-4k_0\frac{\mu_0N^2A(I_0^2+i_0^2)}{C_0^3}y. \quad (6)$$

由上式可知,电磁作动器对衔铁的作用力与控制电流和衔铁与台体相对位移有关,当最后一项近似为零时,电磁作动器输出力与控制电流 i 成线性比例关系,比例系数与电磁铁的参数有关。

3 控制系统设计

目前隔振系统 z, θ_x 和 θ_y 这三个自由度的固有频率都在 1 Hz 左右,中、高频隔振性能良好。现在隔振基础的问题在于系统阻尼较小,导致系统在谐振区性能相对较差。而传统的添加阻尼方法,如添加油阻尼器或者改变空气弹簧阻尼孔大小都属于被动控制范畴,它们存在两个方面的问题:其一,以牺牲中、高频隔振性能为代价换取谐振区的隔振性能;其二,由于大型隔振基础所要隔离的振动主要为微幅低频振动,传统阻尼器会因脱离其正常工作条件而失效。因此,如何在保持高频隔振性能的基础上提高谐振区性能成为主动控制的主要任务。Skyhook 控制方法是实现该功能的常用控制方法^[8-9]。然而该方法同样存在两

方面的问题:一方面基于 Skyhook 的控制方法需要获取地面和台体之间的相对速度,这就需要两套传感器,从而增加了成本;另一方面,该方法需要在高阻尼和低阻尼两种控制策略下切换,会造成系统的颤振,这种现象在激励为随机振动情况时更严重。

对于单自由度系统,被动控制、绝对速度反馈和理想 Skyhook 控制方法的控制原理可以分别表示为,

$$m\ddot{x}+c(\dot{x}-\dot{u})+k(x-u)=-k_c(\dot{x}-\dot{u}), \quad (7)$$

$$m\ddot{x}+c(\dot{x}-\dot{u})+k(x-u)=-k_c\dot{x}, \quad (8)$$

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+k(x-u)=-k_c\dot{x}, \quad (9)$$

式中, m, c, k 分别为系统质量、阻尼和刚度, x, u, k_c 分别为系统位移、地面位移和反馈系数。

在 $k_c=5c$ 的条件下,三种控制方法的传递率对比曲线如图 4 所示。由图 4 可见,在小阻尼条件下,绝对速度反馈控制效果介于理想 Skyhook 方法和被动控制方法之间,且与理想 Skyhook 方法相接近。此外,绝对速度反馈方法只需要一套传感器,从而节约了成本。因此本文采用绝对速度反馈作为系统控制策略。

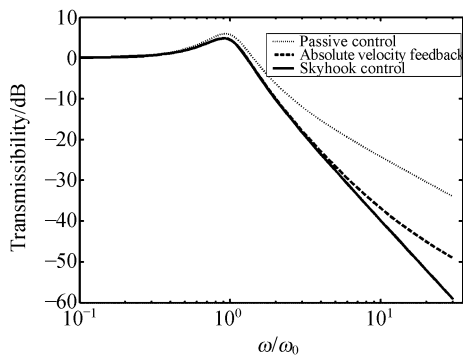


图 4 三种控制策略传递率对比曲线

Fig. 4 Transmissibility of three kinds of control strategy

本文所研究的超大型光学仪器隔振基础 TanLY_A2 质量约为 90 t ,绕 x, y 轴的转动惯量分别约为 $3.6 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 和 $1.0 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;每个空气弹簧的纵向刚度约为 $6 \times 10^5 \text{ N/m}$,阻尼约为 $1.5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}$;横向刚度约为 $1.4 \times 10^6 \text{ N/m}$,阻尼约为 $2.2 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。地面随机振动信号可用白噪声信号来近似, z 向速度均方根

值约为 $40 \mu\text{m/s}$, θ_x 和 θ_y 角速度均方根值约为 $20 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 。

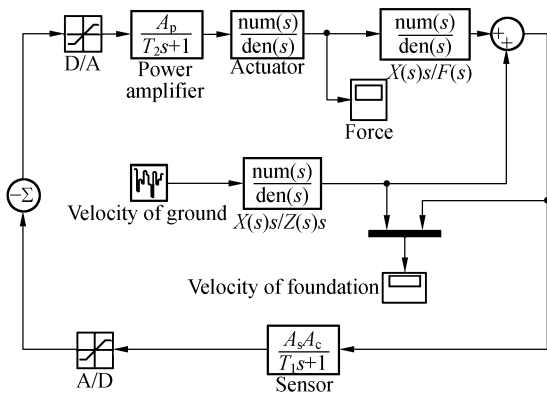
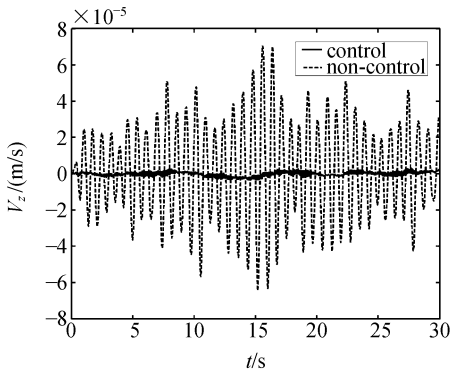


图 5 z 向自由度主动控制仿真框图

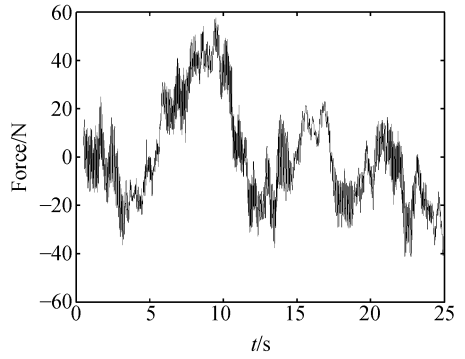
Fig. 5 Block diagram of active control at z-DOF

由此可获得三个自由度的主动控制仿真框图,图 5 为 z 向自由度主动控制仿真框图。图中 T_1 和 T_2 分别为传感器和功率放大器的时间常数,均取 0.002。 A_s 、 A_c 和 A_p 分别为传感器、传感器配套放大器和功率放大器的放大倍数,分别为 23、2 000 和 90。

利用 Matlab 的 Simulink 工具箱,可以获得随机激励下 z 向自由度主动控制施加前后隔振性能对比曲线以及所需要的作动器输出力,如图 6 所示。由图 6 可知,对应的单个作动器需要的最大作用力为 15 N。同理可获得其他两个自由度上,单个作动器需要的最大作用力分别约为 15 N,所以每个作动器至少需要有 45 N 的输出力。



(a)



(b)

图 6 z 向自由度主动控制仿真结果

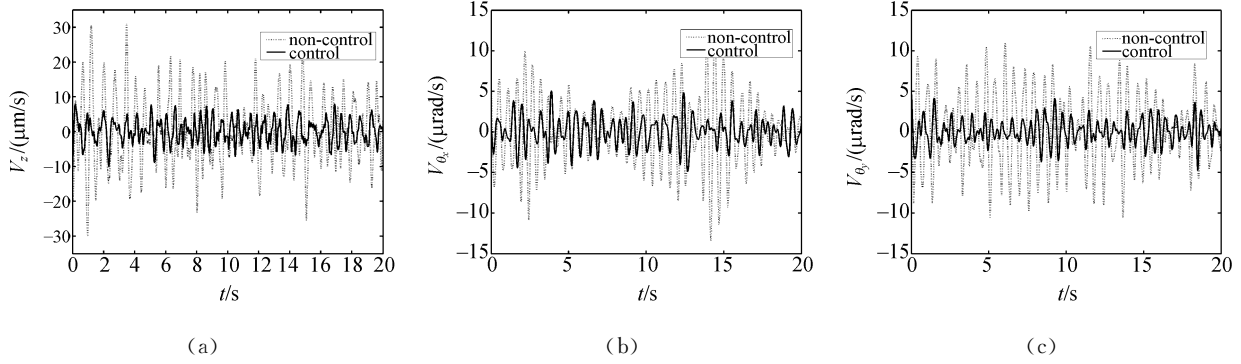
Fig. 6 Simulation results of active control at z-DOF

为此,本文自行研制了差动电磁作动器,其基本参数为:线圈匝数为 1 000,线圈电阻为 20Ω ,铁芯直径为 38 mm,基电流为 0.6 A,电磁铁与衔铁之间的初始间隙为 3 mm。由式(6)可以计算出电流项输出力最大值为 57 N,而位移项输出力最大值 $< 4 \text{ N}$,故后者可以近似忽略。此时差动电磁作动器变为输出力与控制电流成正比的线性作动器。

4 实验验证

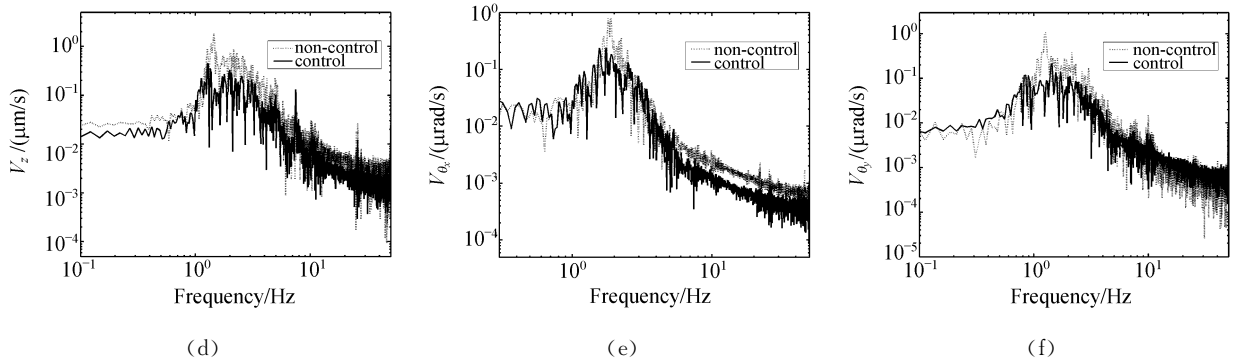
为验证本文所提控制机理的有效性,用本所自行研制开发的差动电磁作动器对超大型光学仪器隔振基础 TanLY_A2 进行主动控制,控制前后性能对比如图 7 所示。图中(a)~(c)分别为 z , θ_x , θ_y 三自由度时域主动控制施加前后隔振效果对比图;(d)~(f)分别为 z , θ_x , θ_y 三自由度频域主动控制施加前后隔振效果对比图。

由时域图可见, z 、 θ_x 和 θ_y 三个自由度的(角)速度均方根值分别由 $10.06 \mu\text{m/s}$ 、 $4.16 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 和 $4.65 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 降至 $3.38 \mu\text{m/s}$ 、 $1.76 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 和 $1.49 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 。从频域图可知,三个自由度谐振区隔振性能均有约 10 dB 的提高,而中、高频隔振性能几乎保持不变,从而证明了本文所提机理的可行性。



(a)~(c)分别为 z, θ_x, θ_y 三自由度时域主动控制施加前后隔振效果对比图

(a)~(c) Vibration isolation performance comparison before and after active control at z, θ_x, θ_y DOF time domain, respectively



(d)~(f)分别为 z, θ_x, θ_y 三自由度频域主动控制施加前后隔振效果对比图

(d)~(f) Vibration isolation performance comparison before and after active control at z, θ_x, θ_y DOF frequency domain, respectively

图 7 主动控制施加前后隔振基础隔振性能对比曲线图

Fig. 7 Vibration isolation performance comparison of vibration isolation foundation before and after active controls

5 结论

本文提出一种基于差动电磁作动器的超大型光学仪器隔振基础的主动控制机理。该控制机理首先采用差动布置方案,使电磁作动器变为输出力和控制电流呈线性关系的线性作动器,然后利

用小阻尼条件下,绝对速度反馈与 Skyhook 控制方法性能接近的特点,控制方法采用绝对速度反馈,可在不改变中/高频隔振性能的前提下大幅提高谐振区隔振性能,并节约了成本。实验结果证明了本文所提控制机理的正确性。本文可为超大型隔振基础主动控制提供一种行之有效的方法。

参考文献:

[1] 郭隐彪,郑琳,王振忠. 高精度非球面加工双轴动平衡监控技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 434-438.
 GUO Y B, ZHENG L, WANG ZH ZH. Study on single-plane biaxial balance monitor system in ultra precision aspheric grinding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 434-438. (in Chinese)

- [2] 欧阳渺安. 超精密非球面镜面模具直轴磨削的研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 545-552.
OUYANG M A. Study of ultra-precision vertical grinding for aspheric lens mould [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 545-552. (in Chinese)
- [3] 马冬梅, 孙军月, 张波, 等. 高精度大口径平面镜面形角差法测试探究[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(增): 121-126.
MA D M, SUN J Y, ZHANG B, *et al.*. High precision large flat mirror measurement by angle difference testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 121-126. (in Chinese)
- [4] DARIO G, MENON R, SMITH H I. The promise of diffractive optics in maskless lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 73(6): 35-41.
- [5] AMICK H, SENNEWALD B. Analytical/experimental study of vibration of a room-sized air spring-supported slab [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 1998, 46(2): 39-47.
- [6] 丁文镜. 减振理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
DING W J. *Theory of Vibration Isolation*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese)
- [7] 虞烈. 可控磁悬浮转子系统[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
YU L. *Active Magnetic Bearing System*[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2003. (in Chinese)
- [8] YOSHIDA H, NAGAI M. Sky-hook model following control of vehicle suspension using an ER damper [J]. *JSME*, 1998, 64 (625): 172- 178.
- [9] LIU Y, WATERS T, BRENNAN P, *et al.*. Comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 280: 21-35.

作者简介: 刘彦(1979—), 男, 哈尔滨工业大学博士研究生, 主要研究方向为超大型隔振基础振动的主动控制和振动信号处理; E-mail: liuyanhit@gmail.com

谭久彬(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 现任哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长, 中国计量测试学会副理事长, 中国计量测试学会计量仪器专业委员会主任委员, 国际测量与仪器委员会委员, 中国仪器仪表学会理事等职务, 主要研究方向为超精密测量技术与仪器工程, 光机电一体化技术等。

(本栏目编辑 李树军)