

文章编号:1006-1355(2009)05-0001-03

微振动平台振动控制的仿真与实验研究

李 平, 王 迅, 李 增, 张志谊

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室 200240)

摘要:通过对称布置的电磁作动器实现微振动平台的微振动控制。建立微振动平台的数学模型,采用自适应方法对平台的振动控制进行数值仿真,并用实验控制微振动平台的振动。仿真与实验结果表明能够抑制平台微振动。

关键词:振动与波;微振动平台;自适应控制;电磁作动器

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Simulation and Experiment Study on Vibration Control of a Micro-Vibration Testing Platform

LI Ping, WANG Xun, LI Zeng, ZHANG Zhi-yi

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A micro-vibration testing platform with symmetrically placed electromagnetic actuators for the control of micro-vibration is presented. At first, a mathematical model of the micro-vibration platform is established for the simulation of micro-vibration control with an adaptive method. Then, an experiment is conducted to verify the control effectiveness. Both the simulation and the experiment demonstrate that the micro-vibration of the platform can be suppressed.

Key words: vibration and wave; micro-vibration platform; adaptive control; electromagnetic actuator

在生物科学、电子光学、精密机械、理化实验中,高精密仪器设备的微振动控制平台设计一般需要考虑各种复杂的微振动环境干扰,主要包括基础振动、平台仪器引发的干扰以及设备自身的直接干扰^[1-4]。微振动环境干扰主要包括:0~1 Hz的低频振动,如地面振动;由人员活动、通风设备和发动机运转引起的振动,在6~65 Hz之间;建筑物自身振动,一般在10~100 Hz之间。因此,在设计微振动控制平台时往往需要考虑频率范围为0~100 Hz的微振动。

针对微振动平台的振动控制,提出并设计了一种微振动平台,对该微振平台的控制进行了动力学分析与实验验证。

收稿日期: 2009-02-26

作者简介: 李平(1983-),男,安徽省舒城县人,上海交通大学机械与动力工程学院硕士研究生。

E-mail: chychang@sjtu.edu.cn

1 平台设计与建模

1.1 平台设计

一般来说,微振动平台应该具备这些功能:可以实现作动力的自动调节;工作频带宽,频率连续可调;激振力方向性好;可靠性好,寿命长。根据这些功能要求,所设计的平台的机械结构如图1所示。



图1 微振动平台结构图

1.2 系统建模

为简化计算,将构件连续分布的质量集中于若干点,并用无质量的弹簧来连接集中质量,用无质量、无弹性的阻尼元件表示系统阻尼,从而把连续体简化为由若干无弹性的集中质量和无质量的弹簧以及阻尼元件组成的有限自由度系统。

将图1所示的模型离散化为单边具有14个自由度的集中参数模型,其中作动器看成一个质量-弹簧组件,对应的多自由度动力学模型如图2所示。

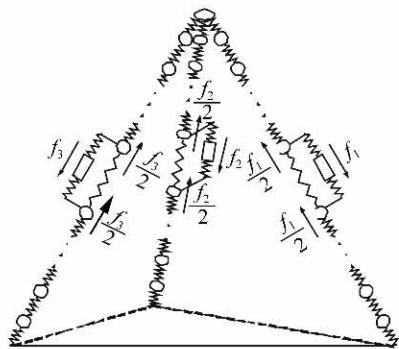


图2 微振动平台的有限自由度模型

由于振动平台的三根连杆在空间对称布置,因而可以将系统进一步简化,只取一根连杆进行分析,构成一典型的质量-弹簧-阻尼系统,如图3所示。根据振动理论,建立系统的振动方程。

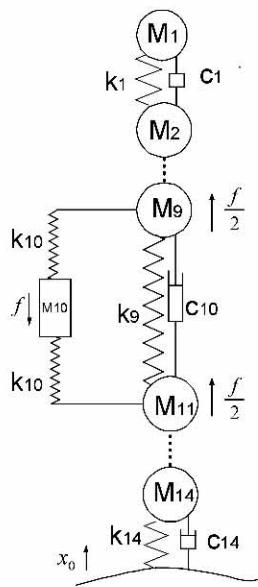


图3 单个连杆的简化模型

图中 M 、 C 、 K 分别表示质量阵、阻尼阵和刚度阵。在底座施加一个位移激励 x_0 ,系统的动态响应由其固有特性决定。

为便于进行计算分析,将简化后的多自由度系统的质量分别记为 m_1, m_2, \dots, m_{14} ,其中 m_{10} 为作动器的质量;弹簧刚度分别记为 k_1, k_2, \dots, k_{14} ,粘性阻

尼系数分别记为 c_1, c_2, \dots, c_{14} 。对于带有粘性阻尼的多自由度系统,在外力作用下的运动方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = NQ \quad (1)$$

其中, M 为质量矩阵, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵, Q 为作用于 m_{14} 的外力, $X = [x_1, x_2, \dots, x_{14}]^T$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_{14} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & \cdots & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c_{13} + c_{14} \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & \cdots & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_{13} + k_{14} \end{bmatrix},$$

$$N = [0, 0, \dots, 1]_{1 \times 14}^T.$$

设 $X_1 = \dot{X}$,由式(1)可得

$$\ddot{X} + M^{-1}C\dot{X} + M^{-1}KX = M^{-1}NQ \quad (2)$$

得到系统的状态空间表达式

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{X}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}N \end{bmatrix} Q \quad (3)$$

2 自适应算法在主动控制中的应用

2.1 自适应方法

自适应算法是使某个预先设定的目标函数达到最小而自动调整滤波器系数的方法,对控制具有决定性作用,直接关系到滤波和控制的性能。基于归一化LMS算法的控制器 $W(z)$ 的权系数调整式为

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu e(n)X(n)}{\gamma + X^T(n)X(n)} \quad (4)$$

其中 μ 为更新系数, $\gamma > 0$, w 为控制器系数, e 为误差, X 为参考信号。

2.2 仿真分析

利用MATLAB进行自适应控制的仿真,干扰力的频率为40 Hz,图4、图5分别对应时域、频域控制效果,可以看到质量 m_1 在施加主动控制后的位移明显衰减。图6是控制器权系数的变化过程。

3 实验研究

实验系统主要由作动器、加速度传感器、信号源、控制器、信号放大器、功率放大器和动态信号分析仪等组成,实验原理图如图7所示。

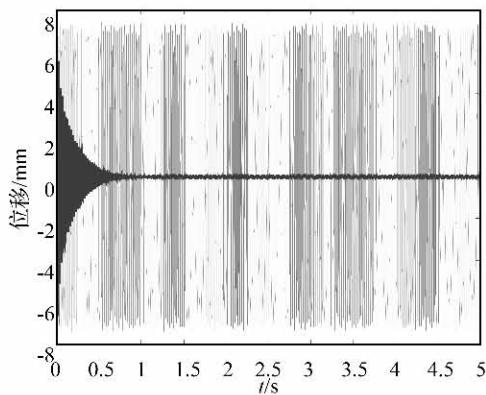


图 4 时域控制效果

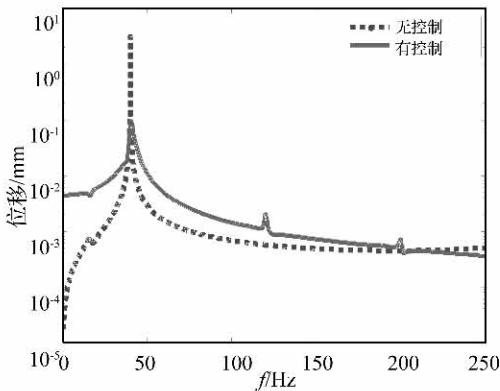


图 5 频域控制效果

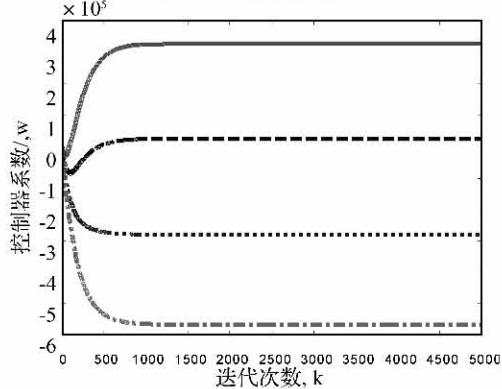


图 6 控制器的权系数

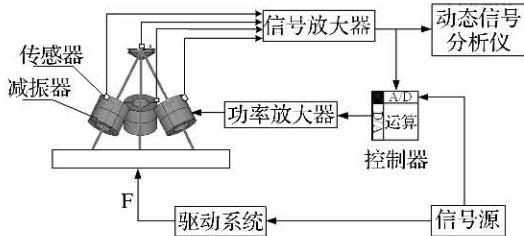


图 7 实验系统原理图

测试自作动器到微振动平台顶端的振动传递特性, 图 8 是测试的 FRF, 其中第一阶模态(约 17 Hz)对于作动器的纵向振动, 位于 140 Hz 左右的模态对于作动器的摆动。

控制算法由实时控制器实现。以 40 Hz 的简谐位移对平台下端进行激励, 同时对平台上端响应实施控制, 实际测得的响应如图 9 所示。

从图中可以看出, 控制之后, 幅值明显下降, 这说明自适应控制方法可以有效地降低平台振动。但是比较而言, 控制量不如仿真结果, 因为作动器的实际输出力受到限制。

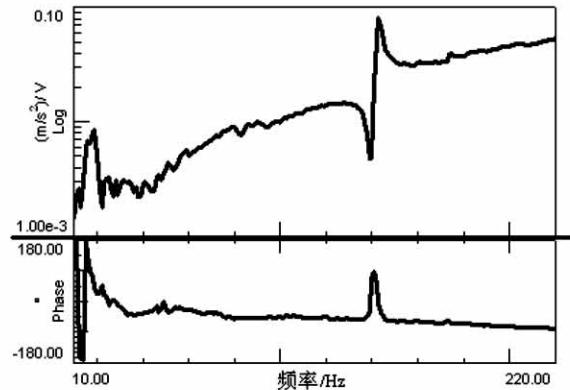


图 8 控制通道的频响特性

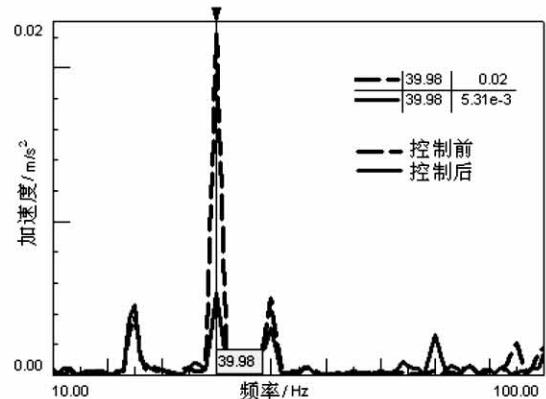


图 9 实验测得的频域响应

4 结语

精密加工、精密测量技术的发展对高精度隔振平台提出越来越高的要求, 而且微振动平台的工作环境又复杂多变, 因此, 微振动平台的振动控制还有许多工作要做。实现方案在仿真与实验中都取得了较好的效果, 研究结果对平台设计与应用具有一定的参考价值。然而, 在进一步研究中, 还有必要研究多向振动控制问题以及其它控制方法, 如智能控制方法。

参考文献:

- [1] 马小东, 张 涛. 高精密仪器平台振动控制的研究现状和发展[J]. 装备制造技术, 2008, (5): 119–120.
- [2] 王 战. 整星隔振平台的优化设计和设计过程研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2005.
- [3] 刘勺斌, 杨洪波, 刘 洋, 等. 基于 Stewart 平台的空间光学仪器主动隔振系统研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, (2): 10–14.
- [4] 王玲玲, 李耀刚, 陈冠国. 振动主动控制技术的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2005, (5): 30–32.