

文章编号 :1000-582X(2007)11-0023-04

光学超精密抗振系统的鲁棒控制

陆振宇^{1,2}, 朱日宏¹, 陈磊¹, 高志山¹

(1. 南京理工大学 电光学院, 江苏 南京 210094 2. 南京信息工程大学 信息与控制学院, 江苏 南京 210044)

摘要 :将鲁棒控制技术应用于主动抗振控制系统中,并用于解决光学超精密抗振系统的不确定性
问题,其中采用小波分析方法将随机振动信号进行时频分析后得到低频全局信息,随后设计鲁棒控制
器对低频振动进行抑制,该方法克服了由模型自身和外部干扰所引起的不确定性,使得控制系统能够有
效地抑制抗振模型的不确定性和外部振动的干扰,同时也具有很高的控制精度和灵敏度。仿真结果表
明,该方法使光学测量设备在外部振动的干扰下具有较好的鲁棒稳定性和控制精度,同时也能较好的抑
制低频振动。

关键词 :光学超精密抗振系统 ;鲁棒控制技术 ;主动振动控制 ;小波分析

中图分类号 :TH744. 3

文献标志码 :A

光学测量设备是一种对外界环境的干扰十分敏感的设备,微弱的环境振动会影响光学测量的准确^[1]。随着光学测量应用场合的拓展以及测量精度要求的提高,除了必要的抗振措施外,要求设计的抗振系统对外部振动扰力具有良好的抗振效果,并进行有效隔离^[2-3],其中中高频振动可由被动抗振系统进行有效隔离。笔者提出了对低频振动进行有效隔离的鲁棒控制技术,该技术已经成功的应用在微型硬盘磁头的抗振定位控制上。本文是基于使用状态空间模型的频率设计方法,运用小波分析方法将随机振动信号进行时频分析后得到低频全局信息,随后设计鲁棒控制器对低频振动进行抑制,从根本上解决外界振动对光学测量的影响^[4]。

1 光学超精密抗振控制系统模型

光学超精密抗振系统结构图如图1所示,其中将空气弹簧作为被动抗振元件,将压电作动器(PZT)作为主动抗振元件。空气弹簧具有一般弹性支承的低通滤波特性,其主要作用是隔离中高频率的振动,并支承平台,而采用鲁棒 μ 控制器控制由压电陶瓷片组成的晶体堆作动器,容易保证获得所需要的电致位移量,其

主要作用是有效隔离较低频率振动。主被动抗振系统相结合可有效地隔离整个频率范围内的振动^[5]。

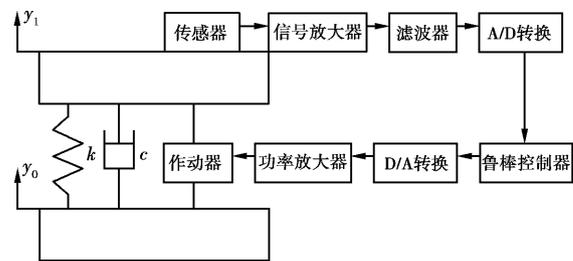


图1 光学超精密抗振控制系统的结构图

图1所示为质量为 m 的抗振系统,受到作动器的力为 F ,系统的位移为 y_1 ,底座的运动位移为 y_0 , k 为刚度, c 为阻尼, f 是振动力,则光学超精密抗振系统的动力学方程为^[6]

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y}_1 + \omega^2 y_1 = 2\xi\omega\dot{y}_0 + \omega^2 y_0 + \frac{F-f}{m}, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}}.$$

令式(1)中的 $x_1 = y_0$, $x_2 = \dot{y}_1$, $x_3 = y_1$, 则可得状态空间表达式为:

收稿日期 2007-06-29

基金项目 国家自然科学基金资助项目(60678048)

作者简介 陆振宇(1976-),男,讲师,南京理工大学博士研究生,主要从事智能控制和光电系统集成研究,

(E-mail)Luzhenyu76@163.com。

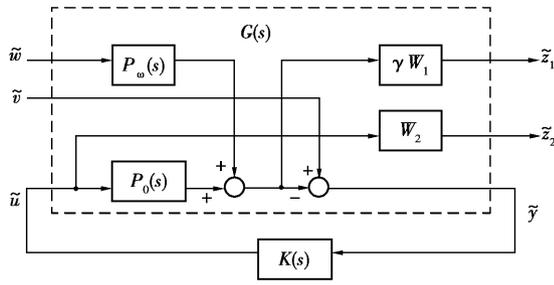


图 3 频域不确定 H_∞ 控制设计框图

以上控制设计方法考虑了干扰/被控结构的动力学特性,因此更加适合于实际振动控制系统的不确定性鲁棒控制设计。

3 随机振动信号的小波分析

小波变换是一种信号的时间—尺度分析方法,其具有多分辨率分析的特点,而且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,是一种窗口大小固定不变但其形状可变,时间窗和频率窗都可变的时频局部化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,很适合探测正常信号中夹带的瞬态反常现象并展示其成分,所以被誉为分析信号的显微镜。小波分析是把信号 a_0 分解成低频 a_1 和 高频 d_1 两部分,在分解中,低频 a_1 中失去的信息由高频 d_1 捕获。在下一层的分解中,又将 a_1 分解成低频 a_2 和 高频 d_2 两部分,低频 a_2 中失去的信息由高频 d_2 捕获,如此类推下去^[9]。

现有一随机振动信号,如图 4 所示,其频率范围为 0.5 ~ 100 Hz, 时间长度为 40 s, 最大幅值为 1.1 μm , 本文采用 db5 小波对该随机振动信号进行小波分解, 得到如图 5 所示的该随机振动信号的低频部分, 可以看出通过小波分解获得了振幅小于 0.3 μm 的低频振动信号,而这部分低频信号正是本文需要应用主动抗振系统进行低频振动抑制的主要信号成分。而其余的高频振动信号则由被动抗振系统进行抑制。

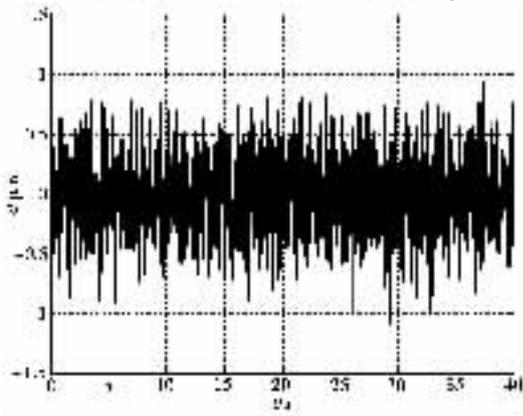


图 4 随机振动信号

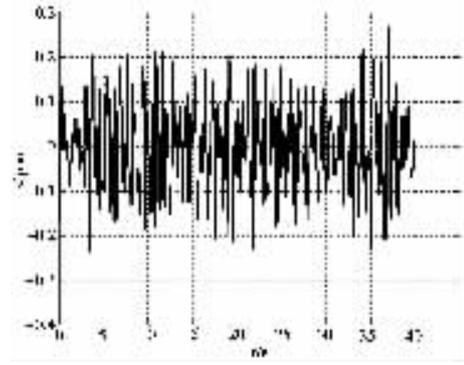


图 5 小波分解后的随机振动信号的低频部分

因此,对于随机振动信号可以运用小波分析将其分解成低频和高频两部分,其中的高频部分可由被动抗振系统抑制,而最主要的低频部分由主动抗振系统抑制,所以在图 1 中的鲁棒控制器前端加入小波分析环节,使得鲁棒控制器只需对主要低频振动信号进行抑制即可。同时小波分析对信号变化具有很高的灵敏度,因此可以使得鲁棒控制器对低频振动信号的抑制具有更高的精度和更快的灵敏度。

4 光学超精密抗振鲁棒控制器仿真

结合实际系统的情况,选取系统各参数,由于主动抗振采用的是压电陶瓷堆作动器,所以选用小位移振动的情况下的各参数 $k = 2 \times 10^3 \text{ N/m}$, $m = 15 \text{ kg}$, $c = 10^2 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

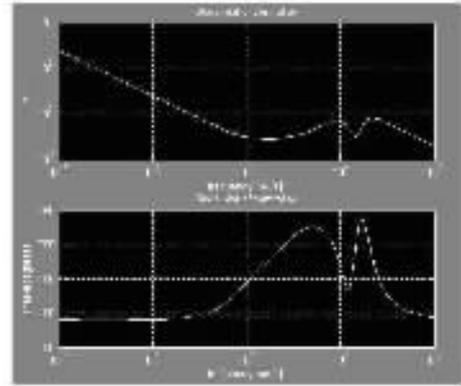


图 6 鲁棒控制器的幅频和相频响应

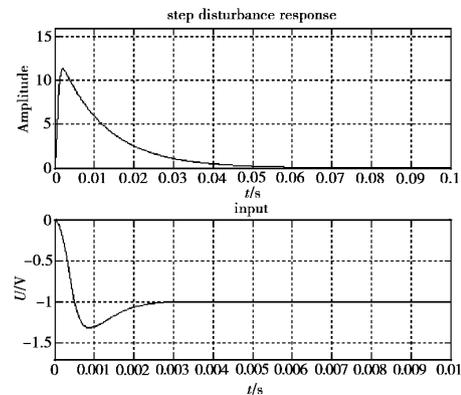


图 7 鲁棒控制器的干扰响应和鲁棒控制器的输入

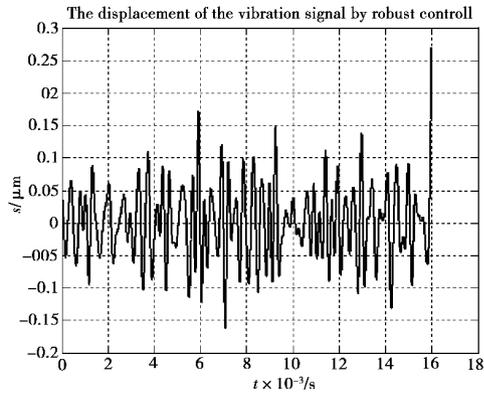


图8 鲁棒控制器作用下振动信号的位移

根据鲁棒控制理论算法设计出的控制器通过压电作动器输出控制,运用 MATLAB 软件得到仿真结果,图6所示为鲁棒控制器的幅频和相频响应,图7所示为鲁棒控制器的干扰响应和鲁棒控制器的输入,图8所示为鲁棒控制器作用下振动信号的位移,从仿真结果可见,最终低频振动信号的振幅被控制在 $0.15 \mu\text{m}$ 以内,因此应用鲁棒控制理论能使得光学超精密抗振系统取得令人满意的抗振控制效果。

4 结论

笔者提出了被动抗振和主动抗振相结合的混合抗振控制技术,其中主动抗振采用鲁棒控制理论,该方法使得光学超精密抗振控制系统能够有效地抑制模型的不确定性和振动的干扰。仿真结果表明,振动信号的振幅由 $1.1 \mu\text{m}$ 减小到 $0.15 \mu\text{m}$,系统取得令人满意的抗振控制效果,同时也具有较好的鲁棒稳定性和控制精度。

Robust Control System for the Optical Extra-precise Vibration Isolation System

LU Zhen-yu^{1,2}, ZHU Ri-hong¹, CHEN Lei¹, GAO Zhi-shan¹

(1. Department of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, P R China 2. Department of Information & Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P R China)

Abstract: The robust control theory is used to solve the uncertainty of the optical extra-precise vibration isolation system. The wavelet theory is used to analyze the random vibration signal in the time-frequency domain and get the low frequency signal from the random vibration signal. The robust controller designed by the robust control theory is used to restrain the low frequency vibration. The active vibration isolation exploits the theory of robust control, which overcomes the uncertainty of model and the disturbance, and makes the control system to restrain the uncertainty of the model and the disturbance of the vibration. The simulation results prove that this method has shown good robustness and control precision in the vibration isolation of the optical extra-precise instrument and have good performance on restraining the low frequency vibration.

Key words: optical extra-precise vibration isolation system; robust control theory; control of active vibration isolation; wavelet analysis

参考文献:

- [1] 吴栋,朱日宏,陈磊,等. 干涉仪环境振动的外差检测与自适应控制[J]. 光子学报, 2004, 12(12): 1493-1496
- [2] CUI W, Nonami K, Nishimura H. Experimental Study on Active Vibration Control of Structures by means of H^∞ Control and H_2 Control[J]. JSME Int J Series C, 1994, 37(3): 462-467.
- [3] SIDERIS A, ROTSTEIN H. Single-Input-Single-Output H^∞ Control with Time Domain Constrains [J]. Automatica, 1993, 29(4): 969-983.
- [4] 陆振宇,朱日宏,陈磊,等. 光学移相干涉仪抗振系统的鲁棒控制系统仿真分析[J]. 光子学报, 2007, 36(2): 332-334.
- [5] 陆伯印,赵美蓉,徐演申,等. 带三维激光干涉仪和压电位移传感器的新型主动隔振系统[J]. 仪器仪表学报, 1997, 17(2): 143-148.
- [6] BAI M R, LIN H H. Comparison of active noise control structures in the presence of acoustical feedback by using the H^∞ synthesis technique [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 206(4): 453-471.
- [7] NONAMI K, NISHIMURA H. H^∞/μ control based frequency shaped sliding mode control for flexible structures[J]. J SME International Journal Series C, 1996, 39: 493-501.
- [8] 肖冬荣,陆振宇. H^∞ 控制理论在大气污染控制系统中的应用[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2003, 26(3): 20-23.
- [9] 杨婷娅,陆振宇等. WK 混合滤波算法在雷达数据处理中的应用[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2005, 28(2): 59-61.

(编辑 张小强)