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¹² 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]

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

$$\vec{x} \oplus \dot{\omega} = \sqrt{\frac{k}{m}} \xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}},$$

令式(1)中的 $x_1 = y_0$ $x_2 = y_1$ $x_3 = y_1$,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 2 主动抗振控制系统模型图

图 2 所示为相应的主动抗振控制系统模型,图中 P(s)为外部振动力f到传感器的传递函数,e是传感 器测得的系统对外部振动的响应,Y是系统受控时传 感器的输出,I(s)是控制器, $\mu(t)$ 是控制力,Q(s)是控 制通道的传递函数。

这样本文要解决的问题可描述为:设计输出反馈 控制器 K(s): u = K(s)Y,使得它在模型不确定性 $\Delta Q(s)$ 的影响下,依然能保持闭环系统稳定且对外部 扰动 e 的衰减程度满足 $|||_{T_{Ye}}(s)||_{\infty} \leq \gamma, \gamma$ 是控制指 标,可以等效地取 $\gamma = 1$,其中

$$T_{Y_e}(s) = \frac{1}{1 + \alpha(s)(1 + \Delta\alpha(s))K(s)}, \quad (3)$$

是 *e* 到 *Y* 的传递函数 ,显然 ,无控制时 ,外部扰动 *e* 到 *Y* 的传递函数是 1^[6]。一般地 ,为了重点抑制某些 频段的外部振动 *f* ,设计控制器时 ,还需对 *Y* 加权。引 入性能加权函数 $W_p(s)$ 和受控输出 $z = W_p(s)Y$,则控 制器 *K*(s)应使得 *e* 到 *z* 的传递函数满足

$$\|T_{ze}(s)\|_{\infty} = \|\frac{W_{p}(s)}{1+O(s)(1+\Delta O(s))K(s)}\|_{\infty} \leq \gamma_{o}$$
(4)

2 鲁棒控制器设计

采用传统的控制设计方法时,常常在实际控制时 产生被截断模态溢出现象,导致控制系统稳定性变差, _{欢迎访问重庆大学期刊网} 有时甚至失稳。究其原因是在设计过程中没有考虑设 计模型与真实系统间的模型不确定所致(由被截断模 态所构成的未建模动态特征所致)。为了避免模态溢 出的发生,使振动控制系统具有较好的鲁棒稳定性,必 须在设计过程中考虑这种模型不确定因素^[7]。记 P(s)为真实结构的传递函数($u \rightarrow y$), $P_0(s)$ 表示截断 模型的传递函数($u \rightarrow y$),则由被截断模态所构成的模 型不确定 $\Delta P(s)$ 可用下式表示

$$P(s) = P_0(s) + \Delta P(s)_0 \tag{5}$$

由于模型加性不确定 $\Delta P(s)$ 是频域上增益有界的,存在一个函数 $f(s) \in RH_{\infty}$,使得

 $\| r(s)M(s) \|_{\infty} < 1$, (7)

式中 M(s)是参考输入 v 到控制输入 u 的标称闭环传 递函数

M(s) = K(s) [I + P₀(s)K(s)]⁻¹。 (8) 其中 v 是一个虚构的参考输入信号,可用来表示传 感器的噪声。选取加权函数矩阵 W₂(s)并使其满足

σ[W₂(jω)]≥ | t(jω)| ;∀ω∈R。 (9) 则鲁棒稳定条件可转化为

$$\| W_2(s) M(s) \|_{\infty} < 1_{\circ}$$
 (10)

为了同时保证控制系统具有较好的振动抑制性能, 考虑干扰 ω 到输出 γ 的标称闭环灵敏度传递函数 λ(s)

 $N(s) = [I + P_0(s)K(s)]^{-1}P_{\omega}(s)_{0} \quad (11)$

显然它包含了干扰传递特性和被控结构的动力学 特性,并准确表征了外界扰动对结构响应的实际影 响^[8]。因为外界干扰激励多是低频的 结构的高频模态 采用被动控制的方法已能得到较好的抑制,主动控制设 计的目标主要是控制结构的低频模态,即主要抑制干扰 灵敏度函数 N(s)在低频域模态处的峰值大小,而对 N(s)的高频域幅值大小不予考虑。为此引入加权函数 $W_1(s) \in RH_s$ 将上述控制设计问题可以表述为

$$\min \parallel W_1(s)N(s) \parallel_{\infty} \circ (12)$$

这里加权函数 *W_i(s)*应在欲控制的模态频率处具 有较大的幅值,并且是低通的。

综合考虑鲁棒稳定设计指标式(10)与灵敏度性 能设计指标式(12),由于直接状态空间法给出的是 H_a次优控制问题的解,首先在式(12)中引入一个正 的实可调参数 y,再将其转化为如下的次优设计问题

$$\| \gamma W_{1}(s) N(s) \|_{\infty} < 1_{\circ}$$
 (13)

则不确定 H_a鲁棒控制设计问题可用图 1 表示。 通过调整参数 γ,实现控制系统鲁棒稳定性与振 动抑制性能的综合最优。



图 3 频域不确定 H_w 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40s,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 $k = 2 \times 10^3$ N/m ,m = 15 kg $c = 10^2$ N · 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 μm 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 μm减小到0.15 μm 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。

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 H2 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∞/µcontrol 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.

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 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