

文章编号 1004-924X(2015)10-2803-08

压电倾斜镜的高压驱动及高速控制

凡木文^{1,2,3}, 黄林海^{1,2}, 李梅^{1,2}, 饶长辉^{1,2*}

(1. 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川成都 610209;

2. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 由于压电倾斜镜的机械谐振会降低自适应光学伺服控制系统的校正带宽, 本文研究了补偿压电倾斜镜谐振特性的方法。根据压电倾斜镜机械谐振频率特性的动态模型和实测数据, 提出了利用压电倾斜镜高压驱动器中现有的可编程逻辑门阵列(FPGA)设计多阶双二次型数字滤波器来优化系统的动态频率响应特性。基于多阶双二次型数字滤波器, 高压驱动器能实时补偿驱动对象的频率特性, 完成压电倾斜镜的正谐振和反谐振的同时补偿。将其与压电倾斜镜作为一体, 可实现平坦的幅频特性, 从而避免机械谐振, 提高伺服控制带宽。实验结果表明: 相对于传统的高带宽高压驱动器, 提出的具有频率特性补偿功能的高带宽高压驱动器可在同样超调量下使系统误差带宽从 56 Hz 提高到了 80 Hz, 并且低频抑制能力也得到提高。实验显示提出的具有频率特性补偿功能的高带宽高压驱动器更适合压电倾斜镜的高速动态应用。

关键词: 自适应光学; 压电倾斜镜; 高压驱动器; 高速控制; 机械谐振; 特性补偿

中图分类号: TN384; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2803

High-voltage drive and control for piezoelectric fast steering mirror

FAN Mu-wen^{1,2,3}, HUANG Lin-hai^{1,2}, LI Mei^{1,2}, RAO Chang-hui^{1,2*}

(1. Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: chrao@ioe.ac.cn

Abstract: As the mechanic resonance of Piezoelectric Fast Steering Mirror (PFSM) degrades the correction width of an adaptive optics servo loop, this paper explores the method to improve the performance of the fast steering mirror in high-speed applications. On the basis of the dynamic model and measured data of the PFSM, a multi-order two-second digital filter was embedded in the Field Programmable Gate Array (FPGA) of the high-voltage driver. The digital filter could suppress or compensate the resonance point and the anti-resonance point at the same time. As a whole with the PFSM, the optimized frequency response of the high-voltage driver flattens the magnitude response, avoids undesired resonance behavior and improves the control bandwidth. As compared with that of traditional high-voltage drivers, experimental results with the proposed high-voltage driver show that the control bandwidth of the system is effectively improved from 56 Hz to 80 Hz at the same overshoot,

收稿日期: 2015-03-23; 修订日期: 2015-06-05.

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金资助项目 (No. 11178004)

and also the error rejection at low frequency is enhanced. The high bandwidth high-voltage driver with a plant characteristic compensator is more attractive to drive the PFSM in high-speed applications.

Key words: adaptive optics; piezoelectric fast steering mirror; high-voltage driver; high speed control; mechanical resonance; characteristic compensator

1 引言

压电倾斜镜(Piezoelectric Fast Steering Mirror, PFSM)利用分辨率达纳米量级、响应速度达毫秒量级的压电驱动器驱动一块反射镜,通过高压驱动器(High-Voltage Driver, HVD)输出的电压使得光束受控地产生高速的两维偏转,从而在自适应光学、光束控制、精密跟踪等领域获得了广泛应用^[1-2]。HVD不仅需要为压电陶瓷驱动器提供上千伏的驱动电压,在频率特性上还要具有平坦的幅频特性和最小的相位延迟,以实现控制信号的无失真的线性放大^[3-5]。PFSM需要HVD提供能量才能工作,两者不可分割,它们的动态性能直接决定了光束稳定系统的响应速度和校正带宽。

PFSM固有的弹性结构使得倾斜镜在高频段会产生机械谐振现象,这种谐振现象在倾斜镜结构确定后不会发生明显变化^[4]。基于这样的控制对象特性以及受幅值裕量和相位裕量的影响,自适应光学伺服控制环增益一般都比较低,从而限制了光束稳定系统的校正带宽。解决这个问题的主要思路有:从机械运动学考虑提高PFSM自身的机械谐振频率^[6-7],例如采用SiC等轻质镜面材料来减轻转动惯量,或者增加驱动器结构刚度以及优化结构参数;但这种从源头上提高自身机械谐振频率的方法难度相当大。更为广泛的方法是从控制电路角度来抑制PFSM的机械谐振,具体体现在两个方面:(1)设计控制器,运用不同的控制算法来实现谐振抑制,例如运用速度环反馈控制来抑制伺服系统谐振^[8],或者运用加速度反馈控制增加负载扰动的鲁棒性从而实现谐振抑制^[9-10];(2)设计数字补偿器,运用不同的滤波器抑制谐振,例如采用一阶或高阶低通滤波抑制高频成分^[11],或者采用陷波器等方法直接抑制谐振点^[12-14]。运用不同的控制算法能得到较好的效果,但控制器依赖于反馈,其设计过程繁琐;而运用不同的数字滤波器则相对简单易实现,也能取得较好的效果。

当机械谐振驱动的PFSM应用于高速光束稳定系统时,除考虑静态指标外,还需要优化HVD的动态频响,因为一味地追求HVD的高带宽不能进一步提高系统的控制带宽。本文将HVD和PFSM作为一个整体,利用HVD的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)设计数字补偿器。针对实测的PFSM的谐振和反谐振频率特性,在研究理想高带宽HVD和低通滤波型HVD动态频响的基础上,对输入的控制信号进行多阶双二次型滤波处理,使得HVD实际输出给PFSM的驱动信号不再产生谐振,实现了两者一体平坦的幅频特性,从而提高了光束稳定系统的稳定性和控制带宽。

2 压电倾斜镜动态频响特性分析

二维PFSM由直角正交对称分布的4个压电陶瓷驱动器和1个位于中心的固定支点组成,每个轴由2个压电驱动器对以推拉方式实现X/Y向的转动^[1],如图1所示。由于结构上进行了严格的正交化处理,二维压电倾斜镜的机械部分在一维的情况下为1个单自由度振动系统,在不存在谐振的情况下,可以近似等效为1个二阶振动系统。而压电陶瓷驱动器呈强容性,HVD采用线性电压放大驱动,可以等效为1个RC电路,其中R是HVD的等效内阻,C是压电陶瓷驱动器的等效电容。因此,忽略数模转换的延迟,从HVD的控制电压输入U到倾斜镜输出角度偏转 θ 的传递函数为一个三阶系统,如下:

$$G_0(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = G_{\text{PFSM}}(s)G_{\text{HVD}}(s) = \frac{k}{(s^2 + as + b)(RCs + 1)} \quad (1)$$

在高频段,当PFSM产生机械谐振时,其频率特性上会表征为倾斜镜偏转量与控制信号不再呈线性关系,其实际响应量比相应的控制信号放大或缩小很多,并且正谐振与反谐振模式成对出现,以对应频率响应特性上的峰谷值。根据文献[4]分析和频率响应实测数据可知,每个正谐振与

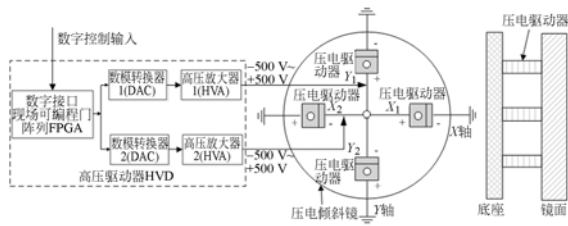


图 1 高速压电倾斜镜及高压驱动器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PFSM and HVD

反谐振对都对应一个二阶振荡模型,第 k 个正谐振与反谐振模式的传递函数为:

$$G_k(s) = \frac{s^2 + 2\xi_{zk}\omega_{zk}s + \omega_{zk}^2}{s^2 + 2\xi_{pk}\omega_{pk}s + \omega_{pk}^2}, k=1,2,\dots, \quad (2)$$

式中:分子项对应反谐振的峰谷值,分母项对应正谐振的峰峰值。极点阻尼系数 ξ_{pk} 和零点阻尼系数 ξ_{zk} 越小,正谐振峰值和反谐振谷值越大。

因此,具有正谐振和反谐振的 PFSM 及其 HVD 是个复杂的多阶系统,其传递函数为:

$$G_p(s) = G_0(s)G_k(s). \quad (3)$$

图 2 中的实线给出了典型的具有正谐振和反谐振的 PFSM 的频率响应曲线。显然, $G_p(s)$ 频率特性不再平坦,具有正谐振和反谐振。

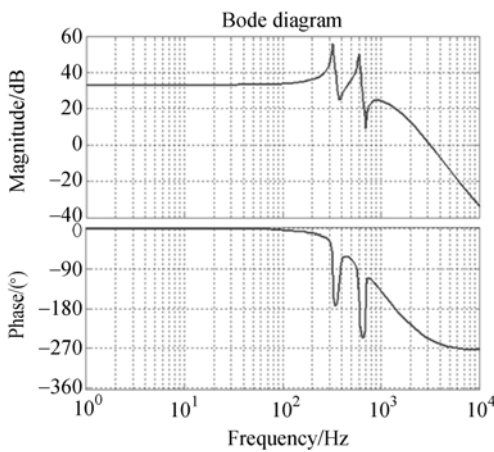


图 2 压电倾斜镜典型的频响特性

Fig. 2 Typical frequency response of PFSM

3 高压驱动器动态频响特性设计

HVD 直接驱动 PFSM 工作,因此,针对 PFSM 的谐振现象设计不同的 HVD 频响特性,能得到不同的抑制效果。

3.1 高带宽高压驱动器频响

在伺服系统中,一般希望 HVD 带宽非常高,且其增益在有效频率范围内无任何衰减,相位延迟最小。此时其频响曲线为一理想的固定增益曲线,如图 3 所示,其传递函数为: $G_{HV}(s) = 1$ 。

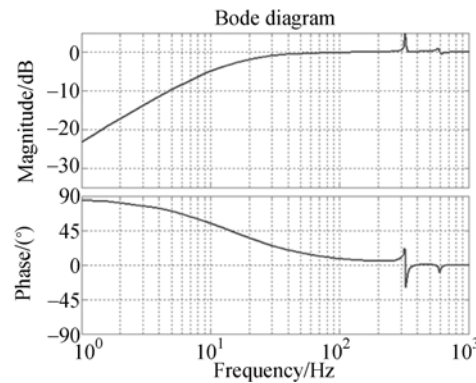
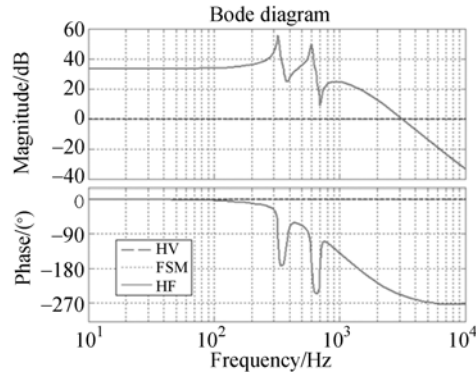


图 3 高带宽高压驱动器频响及系统误差抑制曲线
Fig. 3 Frequency responses of high bandwidth HVD and curves of system error rejection

自适应光学系统中的积分控制器用于实现闭环控制,其在低频段实现信号放大,保证校正性能;在高频段衰减抑制噪声,保证系统稳定工作。积分增益越高,闭环伺服控制带宽越高,系统校正性能越高^[14]。显然,这样的理想高带宽的 HVD 驱动 PFSM 后,其传递函数有 $G_{HF}(s) = G_{HV}(s)G_{FSM}(s)$,即依然保持 PFSM 的机械谐振特性。因此,对于具有这种谐振峰特性的伺服系统,只有降低系统积分控制器的增益以衰减机械谐振峰幅值,才能保证系统稳定,此时环路增益为:

$$K_1 < \frac{2\pi f_r}{M_r}, \quad (4)$$

其中: M_r 为谐振频率点处的系统增益幅值, K_1 是

积分增益系数, f_r 是谐振频率。显然, 机械谐振峰高, 积分增益低, 有益于保证系统稳定工作, 但这也降低系统在低频段的校正性能。因此, 对于存在机械谐振的 PFSM 控制系统, 一味地追求 HVD 的带宽已经没有任何意义; 另外增加自然谐振频率至工作频率范围外, 或者减小谐振峰值都能提高积分增益, 从而提高闭环伺服系统的校正带宽。这也是后续 HVD 动态频响优化的基础, 通过增加数字滤波器, 降低谐振频率点处的系统增益也能提高环路的积分增益, 从而增加系统的响应速度。

事实上, 式(4)可以进一步写成对数方程:

$$20\log(K_I) - 20\log\left(\frac{2\pi f_r}{M_r}\right) = 0. \quad (5)$$

因此, 谐振峰值 M_r 减小 3 dB, 积分增益就能增加 40%, 从而增加系统的校正带宽。

3.2 低通滤波型高压驱动器频响

具有谐振特性的 PFSM 中常用的 HVD 都设计成具有低通滤波特性的动态频响, 以滤除高频段才有的谐振峰的影响。如果设计成一阶低通滤波来抑制谐振峰, 此时其频响曲线如图 4 所示, 其传递函数为: $G_{HV}(s) = 1/(RCs + 1)$, 其频率为 $1/(2\pi RC)$, 低于此频率的控制信号基本没有衰减; 而高于此频率的控制信号则被衰减, 从而降低了谐振峰值。图 4 中的实线 HF 表示其谐振峰的衰减减小了机械谐振峰的影响。但是, 低通滤波型 HVD 的相位延迟特性降低了系统的相位裕量, 从而影响了系统控制的稳定性。显然, 如果 HVD 设计成二阶或高阶低通滤波器, 则对高频谐振峰的衰减更多, 抑制效果会更明显。

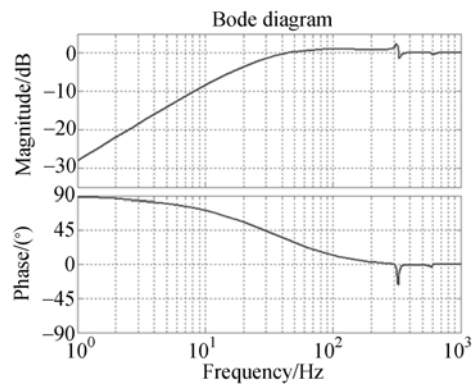
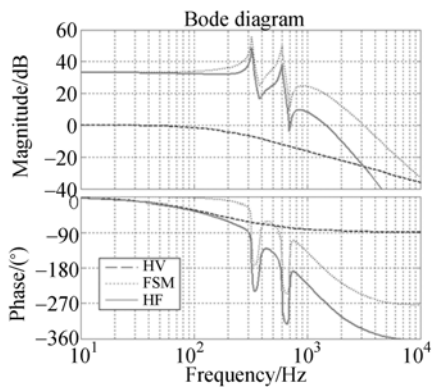


图 4 低通滤波型高压驱动器频响及系统误差抑制曲线
Fig. 4 Frequency responses of HVD with low-pass filter and curves of system error rejection

3.3 多阶双二次数字滤波器型高压驱动器频响

由于 PFSM 安装固定后其谐振和反谐振率特性相对固定, 通过精确测量其频率特性就可以通过与之互补的二阶滤波器来补偿抵消谐振和反谐振。如果倾斜镜含有多个谐振和反谐振振荡模式, 可以串联多个二阶滤波器使其对应补偿抵

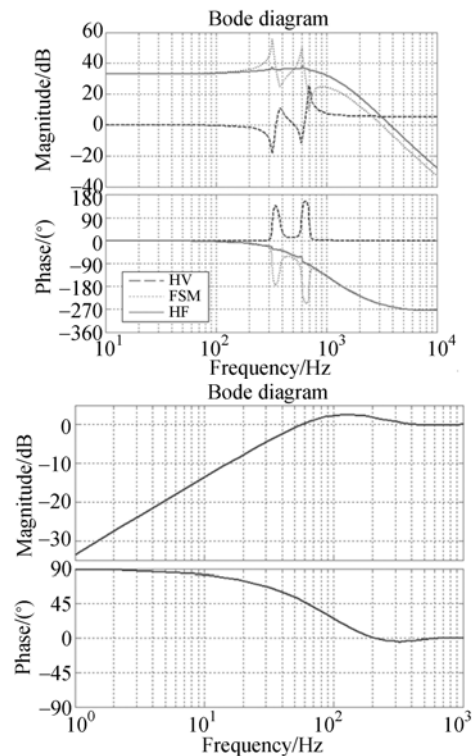


图 5 多阶双二次型高压驱动器频响及系统误差抑制曲线

Fig. 5 Frequency responses of HVD with multi-order two-second digital filter and curves of system error rejection

消。因此,在 HVD 中加入补偿器 $C(s)$,完全可以实现 PFSM 及其 HVD 的平坦的幅频响应,两者的频率特性依然为理想的三阶系统 $G_0(s)$ 。图 5 中的实线 HF 就是补偿后的理想 PFSM 和 HVD 的动态频响曲线,在谐振和反谐振处均实现了平坦的增益。

$$G_p(s) = G_{\text{FSM}}(s)G_{\text{HVD}}(s)C(s)G_k(s) = G_0(s) \quad (6)$$

其中补偿器 $C(s)$ 传递函数为:

$$C(s) = \frac{k}{G_k(s)} = k \frac{s^2 + 2\xi_{pk}\omega_{pk}s + \omega_{pk}^2}{s^2 + 2\xi_{zk}\omega_{zk}s + \omega_{zk}^2} \quad (7)$$

不同于一般的只补偿谐振峰的陷波器,利用双二阶振荡环节来补偿谐振和反谐振,不会为系统带来相位滞后,通过增益调整也不会改变系统原有的增益。此外,由于补偿器 $C(s)$ 针对控制信号进行补偿,通过降低谐振位置控制信号幅值可以消除谐振,因此不会牺牲倾斜镜原有的控制行程。事实上,由于 PFSM 先出现机械谐振再出现机械反谐振,导致 ω_{pk} 大于 ω_{zk} 。当阻尼系数相同时,双二次型滤波器实际上会为系统带来相角裕量,这正是采用低通滤波器相位延时的原因。

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{2\xi_{pk}\frac{\omega}{\omega_{pk}}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{pk}^2}}\right) - \arctan\left(\frac{2\xi_{zk}\frac{\omega}{\omega_{zk}}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{zk}^2}}\right) > 0, \quad \omega_{pk} > \omega_{zk} \quad (8)$$

从以上分析和仿真可知:PFSM 控制系统中,同样的超调量下,HVD 为理想的高带宽时,系统误差带宽约为 30 Hz(图 3);HVD 为低通滤波型时,系统误差带宽约为 40 Hz(图 4);HVD 为双二次型数字滤波器型时,系统误差带宽约为 50 Hz(图 5)。显然,具有机械谐振的 PFSM 中 HVD 的动态频响并不是越高越好,一阶低通滤波器能部分消除机械谐振的影响,也可以推论二阶或多阶低通滤波器以及陷波器都能较好地消除机械谐振;而多阶双二次滤波器既能补偿正谐振,又能补偿反谐振,并且不会带来相位延迟,对机械谐振的抑制效果最好。

4 实验

4.1 压电倾斜镜动态频响实验测量

为了测试 HVD 的动态补偿性能,实验搭建了一个 PFSM 光束稳定控制系统,如图 6 所示。

工作时标准 Shack-Hartmann 波前传感器探测波前残余像差,经波前重构得到残余整体倾斜像差,再经控制计算得到控制信号输出给 HVD 后驱动 PFSM 对整体倾斜像差进行高速闭环补偿。其中 HVD 除了含数模转换模块、高压放大器之外,还增加了数字补偿器(DC)。

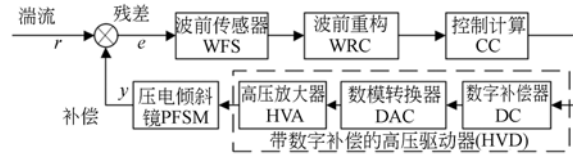


图 6 压电倾斜镜控制系统框图

Fig. 6 Block diagram of PFSM control system

实验中 HVD 的控制对象是口径为 200 mm,行程为 ± 1 mrad 的二维压电倾斜镜。利用 Photon+ 频率响应动态分析仪从高压放大器处输入正弦扫描频率,经高压放大器后驱动压电倾斜镜产生偏转。基于 CCD 的波前传感器的采样率为 1 500 Hz,经采样和复原计算后得到倾斜像差,再经 DA 转换后送给频率响应动态分析仪,得出倾斜镜控制系统的开环频率响应特性曲线。考虑采样保持器和数模转换器及计算延时 τ ,其传递函数为 $G_p(s)\exp(-\tau s)$ 。图 7 中短虚线 FSM 给出了 PFSM y 轴实测的频率响应特性曲线。从图中可以看出,在 750 Hz 频段范围内,倾斜镜包含多对机械谐振与反谐振,其中有两个谐振点和反谐振点对系统影响最大:一点位于 326 Hz 处,其谐振峰值达到 19 dB,对应的反谐振频率为 383 Hz;另一点位于 593 Hz 处,其谐振峰值达到 9 dB,对应的反谐振频率为 659 Hz。

4.2 双二次数字滤波器型高压驱动器补偿结果

高压驱动器中一般利用 FPGA 实现数字通信接口和数模转换接口。事实上,FPGA 的速度快、功耗低、通用性好,能重复编程等特点同样适合实现数字滤波器。另外,数字滤波器改写成差分方程后,就只有常数乘法和加法,这正是 FPGA 结构的特长。因此,利用现有的 FPGA 实现数字滤波器不需要额外增加元器件;而且,HVD 能够通过数字通信接口方便地在线修改滤波器参数,以补偿不同 PFSM 的频率特性,提高其工程实用性。在设计双二次滤波器时,直接根据测量到的开环频率特性中的谐振频率点和反谐振频率点首先给出 ω_{pk} 和 ω_{zk} ,然后手动调整阻尼系数 ξ_{pk} 和 ξ_{zk}

使其幅值与开环频率特性中的谐振幅值相等,最后调整增益 k 使得设计的滤波器在低频段的增益不变(0 dB)。实验采用两级双二次数字滤波器级

联的方式,只对系统闭环影响大的两对谐振和反谐振进行补偿,因此,其数字滤波器对应 s 域的表达式为:

$$G_{DC}(s) = 1.6819 \times \frac{s^2 - 2 \times 0.0144 \times 2048.3s + (2048.3)^2}{s^2 - 2 \times 0.0271 \times 2406.5s + (2406.5)^2} \times \frac{s^2 - 2 \times 0.0198 \times 3725.9s + (3725.9)^2}{s^2 - 2 \times 0.0283 \times 4140.6s + (4140.6)^2} \quad (9)$$

双二次数字滤波器型 HVD 的频率特性曲线见图 7 中的长虚线 HV。图中的实线 HF 则是双二阶数字滤波器型 HVD 和 PFMS 的频率一体化后实测的响应特性曲线,可以看出,谐振和反谐振基本被抑制掉了,而其它频率特性被保留了下来。事实上,如果增加数字滤波器的级数即滤波器的阶数,可以补偿更多的谐振和反谐振点,补偿后的频率特性曲线也会更平坦。

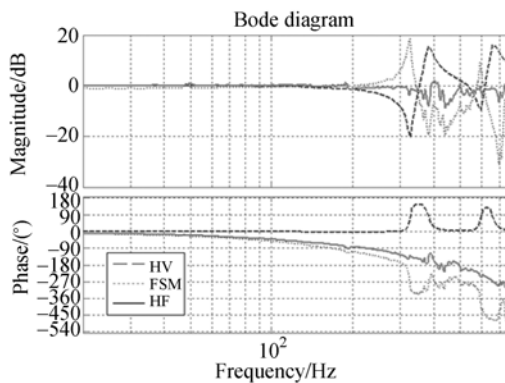


图 7 双二次型高压驱动器及压电倾斜镜的实测频响
Fig. 7 Frequency responses of HVD with 2-order two-second digital filter and PFMS in test

HVD 增加双二次滤波器后,压电倾斜镜及其 HVD 幅值频率的响应曲线变得更平坦,系统的开环幅值裕量和开环相位裕量同时得到了提高,从而可以增加闭环伺服的积分增益,提高系统误差的校正带宽。图 8 给出了双二次数字滤波器型 HVD 和传统低通滤波器型 HVD 用在同样的 PFMS 控制系统中的系统误差抑制曲线。

参考文献:

- [1] 凌宁, 陈东红, 官春林, 等. 两维高速压电倾斜反射镜[J]. 光电工程, 1995, 22(1): 51-60.
LING N, CHEN D H, GUAN C H L, et al.. Two-dimension piezoelectric fast steering mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, 22(1): 51-60. (in Chinese)

可以看出,同样超调量下,系统误差带宽从 56 Hz 提高到了 80 Hz,其低频抑制能力也得到了提高。

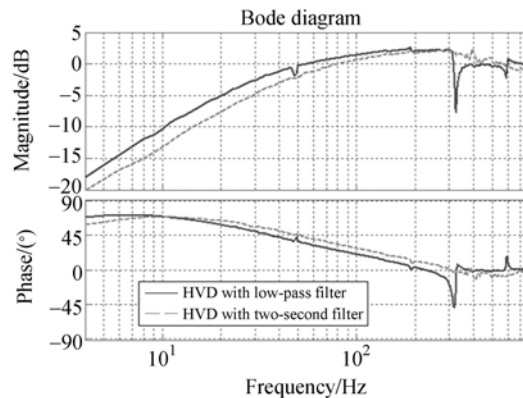


图 8 不同高压驱动器下系统误差抑制曲线
Fig. 8 Curves of system error rejection with different HVDs

5 结 论

为了进一步提高 PFMS 自适应光学伺服系统的校正带宽,本文在 HVD 中增加数字滤波器,优化其动态频率的响应特性,以实时补偿 PFMS 的谐振特性,并得到了较好的效果。实验结果表明,这种多阶双二次型 HVD 能补偿 PFMS 的正谐振和反谐振;相比于低通滤波器型 HVD,PFMS 获得了两者一体的平坦的幅频响应特性,提高了系统的积分增益,使得系统误差带宽从 56 Hz 提高到了 80 Hz。该多阶双二次滤波器型 HVD 更适合 PFMS 的高速动态应用。

- [2] RAO C H, ZHANG A, FAN X L, et al.. Adaptive optics system based on deformable secondary mirror on 1.8-meter telescope [J]. *SPIE*, 2012, 8447: 844731-844740.
[3] RAO C H, JIANG W H, LING N, et al.. Spatial and temporal characterization of phase fluctuations in non-Kolmogorov atmospheric turbulence

- [J]. *J. Mod. Opt.*, 2001, 47(6): 1111-1126.
- [4] 张小军, 凌宁. 高速压电倾斜镜动态特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(10): 966-968.
ZHANG X J, LING N. Dynamic analysis of fast piezo steering mirror [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(10): 966-968. (in Chinese)
- [5] KIM B S, GIBSON S, TSAO T C. Adaptive control of a tilt mirror for laser beam steering [J]. *Proc. ACC*, 2004, 7803: 3417-3421.
- [6] 黑沫, 鲁亚飞, 张智永, 等. 基于动力学模型的快速反射镜设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 53-61.
HEI M, LU Y F, ZHANG ZH Y, *et al.*. Design of fast steering mirror based on dynamic model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 53-61. (in Chinese)
- [7] 周辉, 杨明冬, 贾建军, 等. 压电驱动 FSM 的动态性能分析[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(18): 5168-5171.
ZHOU H, YANG M D, JIA J J, *et al.*. Dynamic performance analysis of fast steering mirror actuated by piezoelectric stacks [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(18): 5168-5171. (in Chinese)
- [8] 徐向波, 房建成, 李海涛, 等. 控制力矩陀螺框架系统的谐振抑制与精度控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 305-312.
XU X B, FANG J CH, LI H T, *et al.*. Resonance elimination and precision control of CMG gimbal system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 305-312. (in Chinese)
- [9] KRZYSZTOF S, TERESA O K. Vibration suppression in a two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks-comparative study [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(2): 1193-1206.
- [10] 杨晓霞, 阴玉梅, 孟浩然, 等. 利用加速度反馈的大型光电设备主轴控制技术[J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(4): 421-424.
YANG X X, YIN Y M, MENG H R, *et al.*. Mount control for large optoelectronic equipment by using acceleration feedback [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(4): 421-424. (in Chinese)
- [11] 王利, 饶长辉, 饶学军. 压电陶瓷微动台的复合控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1265-1271.
WANG L, RAO CH H, RAO X J. Feed-forward control of piezoelectric ceramic positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1265-1271. (in Chinese)
- [12] 王国富, 余法山, 江旭东, 等. 机载光电转台的谐振分析及自适应滤波器设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1802-1808.
WANG G F, YU F SH, WANG X D, *et al.*. Analysis on resonance of air-borne opto-electronic tracking turntable and design of adaptive filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1802-1808. (in Chinese)
- [13] 杨明, 郝亮, 徐殿国. 基于自适应陷波滤波器的在线机械谐振抑制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(4): 63-69.
YANG M, HAO L, XU D G. Online suppression of mechanical resonance based on adapting notch filter [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(4): 63-69. (in Chinese)
- [14] 章家保, 刘慧, 贾宏光, 等. 电动舵机伺服系统的模型辨识及其校正[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1971-1976.
ZHANG J B, LIU H, JIA H G, *et al.*. Model identification and corrector design for servo system of electromechanical actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1971-1976. (in Chinese)
- [15] TYSON R K. *Principle of Adaptive Optics* [M]. San Diego: Academic Press INC, 1991.

作者简介:



凡木文(1977—),男,湖南郴州人,博士研究生,副研究员,2000年,2003年于四川大学分别获得学士、硕士学位,主要从事自适应光学电控方面的研究。
E-mail: fanmuwen@ioe.ac.cn

导师简介:



饶长辉(1971—),男,江西东乡人,博士研究生,研究员,博士生导师,1997年,2000年于中国科学院大学分别获得硕士、博士学位,主要从事自适应光学系统方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn