

抑制光束抖动的压电倾斜镜高带宽控制

凡木文 黄林海 李梅 饶长辉

High-bandwidth control of piezoelectric steering mirror for suppression of laser beam jitter

Fan Mu-Wen Huang Lin-Hai Li Mei Rao Chang-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024209 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非均匀采样的功率谱反演大气湍流相位屏的快速模拟

Fast simulation of atmospheric turbulence phase screen based on non-uniform sampling

物理学报.2015, 64(22): 224217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224217>

基于粒子谱的多波长激光雷达近场大气光学参数校正方法

Correction to near-range multiwavelength lidar optical parameter based on the measurements of particle size distribution

物理学报.2015, 64(12): 124208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124208>

变形镜高斯函数指数对迭代法自适应光学系统的影响

Influence of Gaussian function index of deformable mirror on iterative algorithm adaptive optical system

物理学报.2015, 64(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094207>

多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析

Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar

物理学报.2014, 63(24): 244206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244206>

Mach-Zehnder 干涉仪条纹成像多普勒激光雷达风速反演及视场展宽技术

Wind velocity retrieval and field widening techniques of fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer for Doppler lidar

物理学报.2014, 63(22): 224205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224205>

## 抑制光束抖动的压电倾斜镜高带宽控制

凡木文<sup>1)2)3)†</sup> 黄林海<sup>1)2)</sup> 李梅<sup>1)2)</sup> 饶长辉<sup>1)2)</sup>

1)(中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

2)(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2015年7月16日收到; 2015年10月15日收到修改稿)

提出了一种抑制光束平台抖动和压电倾斜镜机械谐振的方法从而提高系统校正带宽和跟瞄精度. 通过分析双二阶滤波器参数对频率特性的影响, 提出了一种双二阶滤波器的设计方法, 并把这种设计方法结合比例积分 (PI) 控制算法用于抑制光束平台抖动和压电倾斜镜机械谐振. 最后, 对经典 PI 控制算法和增加了双二阶滤波器的 PI 控制算法进行了实验比较, 在相同的条件下, 增加了双二阶滤波器的 PI 控制带宽比经典 PI 控制带宽提高了近 1 倍, 对平台抖动控制精度提高了 5 倍以上. 实验结果表明: 增加了双二阶滤波器的 PI 控制算法对抑制光束平台抖动和压电倾斜镜机械谐振简单有效, 可以提高系统校正带宽和跟瞄精度.

**关键词:** 自适应光学, 光束抖动, 压电倾斜镜, 滤波器**PACS:** 42.68.Wt, 95.75.Qr, 07.05.Tp**DOI:** 10.7498/aps.65.024209

## 1 引言

光束稳定系统采用快速反射镜实时的校正各种扰动, 使得到达目标靶面中心的光束指向漂移和抖动最小, 因此在自适应光学<sup>[1]</sup>、高能激光传输<sup>[2]</sup>、星地激光通信<sup>[3]</sup>, 甚至激光加工等<sup>[4]</sup>领域都获得了广泛的应用. 引起光束指向漂移和抖动的原因主要是光束传输过程中的大气湍流和光束平台的机械振动. 其中, 大气湍流引起的光束抖动一般符合科尔莫戈罗夫 (Kolmogorov) 统计的时间功率谱特性, 属于宽谱扰动; 而由各种电机运转造成的光束平台扰动, 因为其机械重复性使得光束抖动是一到两个窄带扰动<sup>[5]</sup>. 事实上, 快速反射镜本身的驱动器弹性结构引起的机械谐振<sup>[6]</sup>也会造成光束抖动甚至系统的不稳定. 光束稳定系统中一般根据图像传感器探测到的光束指向误差信号, 采用比例积分 (proportional-integral) 控制率来控制快速反射镜角度偏转进行实时校正. 经典 PI 控制方法设计简单, 在抑制能力范围内对宽带扰动和窄带扰动都

有很好的抑制效果, 其抑制能力取决于系统伺服带宽. 然而, 由于图像传感器的噪声、图像计算处理延时和光能量的有限等因素限制了系统闭环校正带宽, 一般误差抑制带宽只能做到十几赫兹到一百多赫兹. 这样的抑制能力对 30 Hz 以下大气的扰动具有较好抑制效果, 然而对于 50 Hz 以上的高幅值扰动、如平台 60 Hz 抖动却无法达到要求. 例如冷却电机产生的机械振动可达 50 Hz, 反力轮引起的机械振动可达 100 Hz. 根据 NASA 发布的卫星振动功率谱<sup>[7]</sup>, 如果采用经典 PI 闭环校正, 对 60 Hz 高达 22  $\mu\text{rad}$  的扰动抑制到 2.2  $\mu\text{rad}$ , 需要在 60 Hz 处达到 20 dB 的校正量, 其抑制带宽需要达到 600 Hz. 这样的高速带宽对于 200 mm 以上大口径倾斜镜校正系统还是相当难的.

目前, 国内外对于光束稳定系统快速反射镜的控制主要集中在反馈控制和前馈控制. 不管是反馈控制还是前馈控制, 都需要执行机构快速反射镜动态响应速度快, 因此在光束稳定系统中越来越多的采用压电驱动的快速反射镜. 例如文献<sup>[8]</sup>就采用了高机械谐振频率的压电倾斜镜 (piezoelectric fast

† 通信作者. E-mail: fanmuwen@ioe.ac.cn

steering mirror) 代替音圈电机驱动的快速反射镜, 利用高性能高速四象限探测器构建精跟踪闭环系统使得平台抖动的大部分频率带都包含在系统的校正带宽内, 获得了较好的效果. 文献[9]则利用不完全微分PI实现倾斜镜的高带宽控制. 而针对高带宽控制带来容易导致系统不稳定的问题, 文献[10]利用加速度反馈来增加负载扰动的鲁棒性, 同时实现机械谐振的抑制. 这些方法依然是通过将误差进行反馈控制, 利用新器件或改进算法以大幅度提高系统校正带宽使得大幅值高频窄带扰动也在校正范围内, 这些系统实现难度较大, 成本较高. 文献[11]则增加额外的探测器通过探测窄带扰动频谱特点进行前馈补偿, 实现对大幅值高频窄带扰动的抑制. 这其中又发展了最小均方误差(LMS)的自适应滤波前馈控制[12]和递推最小二乘(RLS)的自适应滤波前馈控制[13]. 这些方法都不再把误差直接经过控制器产生控制信号, 而是通过自适应算法改变自适应前馈控制器参数, 使得误差依据某个原则收敛到最优. 自适应滤波算法对压电倾斜镜本身的机械谐振和外部窄带扰动都有较好的抑制效果, 从而获得了很高的关注. 但是其额外增加的探测器硬件成本和算法本身收敛速度限制了其在某些场合的应用.

文献[14]提出了利用双二阶滤波的方法实现了压电倾斜镜机械谐振的抑制, 取得了较好的效果, 但是文献没有讨论双二阶滤波器参数对性能的影响. 为了更好地使用双二阶滤波器, 本文详细分析了双二阶滤波器参数对性能的影响, 提出了一种双二阶滤波器的设计方法. 并且, 把这种设计方法结合PI控制算法进一步用于实现光束平台的大幅值高频段窄带扰动的抑制中, 从而实现压电倾斜镜的高带宽闭环控制. 一方面根据压电倾斜镜本身机械谐振频率响应特性, 利用双二阶滤波器改变输出控制命令的某些频率段下的响应增益, 以避免压

电倾斜镜产生机械谐振, 从而保证系统高增益高带宽闭环下的稳定性. 另一方面根据光束平台窄带扰动的频率响应特性, 利用双二阶滤波器改变输入误差信号的某些频率段下的响应增益, 从而获得对窄带扰动频率点的高增益抑制. 结果表明: 在不需要额外增加探测器的情况下, 双二阶滤波器结合PI控制方法不仅抑制了压电倾斜镜机械谐振, 提高了系统误差抑制带宽, 还对窄带扰动获得了大幅度抑制, 提高了跟瞄精度.

## 2 压电倾斜镜控制系统及算法

### 2.1 典型压电倾斜镜控制系统

图1给出了典型的激光通信平台的压电倾斜镜控制系统及扰动源. 图2给出了相应的反馈控制框图. 控制器根据目标指向角度和探测器探测到的

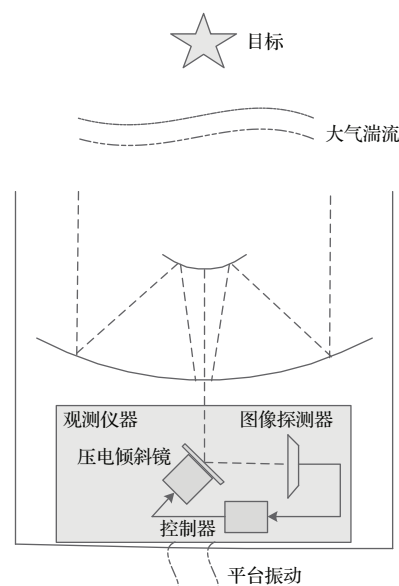


图1 卫星平台压电倾斜镜跟踪系统及扰动源

Fig. 1. Overview of satellite telescope system with PFSM and disturbance sources.

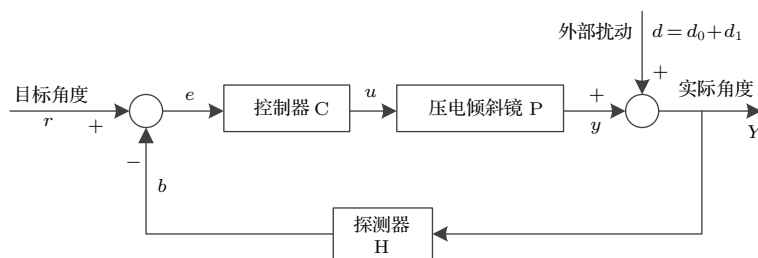


图2 典型压电倾斜镜反馈控制系统

Fig. 2. A typical feedback control system for piezoelectric fast steering mirror.

实际指向获得残差  $e$ , 输出控制电压  $u$  直接控制压电倾斜镜指向目标角度, 然而大气湍流扰动  $d_0$  和平台机械扰动  $d_1$  降低了光束最终指向精度. 一般设定目标指向角度为光轴的中心, 即目标角度  $r$  为零, 此时, 可以得到实际指向角度  $Y$  与外部扰动  $d$  之间的抑制关系为

$$Y = (1 + CPH)^{-1}d, \quad (1)$$

其中  $C$ ,  $P$ ,  $H$  分别代表控制器、压电倾斜镜、探测器的传递函数. 经典压电倾斜镜反馈控制系统中采用 PI 控制器, 此时控制器  $C$  的传递函数为

$$C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}, \quad (2)$$

其中,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数. 在设计 PI 控制器时, 一般先测得系统实际开环传递函数  $G = CPH$ , 调节控制器参数使得系统幅值裕度和相位裕度满足系统稳定的需要. 然而压电倾斜镜固有的弹性结构, 使得倾斜镜在高频段会产生机械谐振现象, 此时, 其频率特性上会表征为倾斜镜偏转量与控制电压  $u$  不再成线性关系, 而是其实际响应量比相应控制信号放大或缩小很多. 此时高频噪声很容易激发谐振, 从而导致指向控制精度降低, 甚至造成系统不稳定. 谐振频率主要与压电倾斜镜的口径、镜面厚度、行程等有关, 口径越大, 谐振频率越低, 对系统的影响也越大 [5]. 文献 [14] 通过滤波的方法改变控制电压频率特性, 避免了压电倾斜镜机械谐振, 取得了较好的效果. 同样, 本文试图通过滤波的方法进一步改变对输入误差量  $e$  的频率特性, 以期控制器的灵敏度在光束平台抖动频率点大幅增加, 最后通过压电倾斜镜校正, 从而提高跟瞄精度.

## 2.2 双二阶滤波器分析及设计

在过去优化控制的文献中, 滤波器通过改变不同频率点的增益响应实现某些优化, 主要用于优化闭环控制系统的频率响应 [15]. 双二阶滤波器是其中常用的一种滤波器, 其传递函数为

$$F(s) = \frac{\omega_p^2 s^2 + 2\xi_z \omega_z s + \omega_z^2}{\omega_z^2 s^2 + 2\xi_p \omega_p s + \omega_p^2}, \quad (3)$$

其中,  $\omega_z$  和  $\omega_p$  分别对应零点频率和极点频率,  $\xi_z$  和  $\xi_p$  分别对应零点阻尼系数和极点阻尼系数. 事实上,  $F(s)$  可以看成是一个二阶低通滤波器  $G_p(s)$  和另一个二阶低通滤波器  $G_z(s)$  的倒数的串联. 为了

便于分析, 首先分析二阶低通滤波器的振荡特性, 其表达式为

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad 0 < \xi < \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (4)$$

其中,  $\xi$  是阻尼系数,  $\omega_n$  是自然谐振频率. 容易得到二阶低通滤波器谐振峰值  $M_r$  为

$$M_r = \left(2\xi\sqrt{1-\xi^2}\right)^{-1}, \quad 0 < \xi < \sqrt{2}/2. \quad (5)$$

此时, 谐振频率  $\omega_r$  与自然谐振频率  $\omega_n$  的关系为

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1-2\xi^2}, \quad 0 < \xi < \sqrt{2}/2. \quad (6)$$

另外, 在滤波器设计的时候, 还需要确定频带宽度  $B_w$ , 也就是其谐振点附近增益大于某个特定值的频率范围. 设特定增益为  $N$ , 容易证明, 当  $\xi$  远小于 1 时, 频带宽度  $B_w$  近似为:

$$B_w = \frac{\sqrt{M_r^2 - N^2}}{M_r N}, \quad N \leq M_r. \quad (7)$$

从相位角度讲, 还可以得出, 其相位从谐振前的 0 一直到谐振点的  $-\pi/2$ , 再到谐振后的  $-\pi$ , 且其相位过渡频率范围  $B_\theta$  约为  $\pi\xi$ .

显然,  $\xi$  越小, 谐振峰值  $M_r$  越大, 谐振频率  $\omega_r$  越接近自然谐振频率  $\omega_n$ , 幅值相位变化也越陡峭, 相位过渡频率范围也越窄, 当  $N$  一定后, 频带宽度  $B_w$  也越窄. 为了保证一定的滤波增益,  $\xi$  取值较小, 但是为了保证一定的频带宽度,  $\xi$  不能取得太小.

因此, 从二阶低通滤波器的模型上可以看出: 在低频段, 幅值响应近似 0 dB, 相位基本不变; 在发生谐振处, 增益相位剧烈变化; 之后幅值近似以  $-40$  dB/dec 衰减, 相位接近  $-\pi$ . 容易想到, 当用一个幅值特性与之相反的“反”二阶系统相串联的时候, 就可以任意获得只在谐振处的幅值相位变化, 而在低频段和高频段都基本不变的频率特性, 如图 3 所示. 这也正是双二阶滤波器用于本文的基础.

双二阶滤波器中  $G_p(s)$  和  $G_z(s)$  都是相同的二阶低通滤波器结构, 合成双二阶滤波器  $F(s)$  后, 它们各自对应的  $\xi_p$  和  $\xi_z$  分别调节波峰和波谷的幅值及陡峭程度. 显然, 当  $\omega_p > \omega_z$  时, 先出现波峰, 再出现波谷; 当  $\omega_p < \omega_z$  时, 先出现波谷, 再出现波峰; 而当  $\omega_p = \omega_z$  时, 波峰波谷有一定的抵消作用, 此时根据  $\xi_z$  和  $\xi_p$  的大小决定是波峰还是波谷, 一般当两者取值是 10 倍左右时, 其谐振特性就基本由占优的滤波器 (小阻尼系数的占优) 决定. 在设计双二阶滤波器的时候, 一般采用  $\omega_p = \omega_z$  的结构从



而减小影响的频率范围. 双二阶滤波器参数物理意义直观, 只需要确定阻尼系数和自然谐振频率. 此时, 其设计步骤为: 1) 根据需要抑制的谐振点增益值决定占优滤波器的频带宽度  $B_w$  和需要达到的增益  $N$ , 根据 (7) 式计算滤波器谐振峰值  $M_r$ , 然后根据 (5) 式滤波器阻尼系数  $\xi$ ; 2) 再根据 (6) 式计算自然谐振频率  $\omega_n$ .

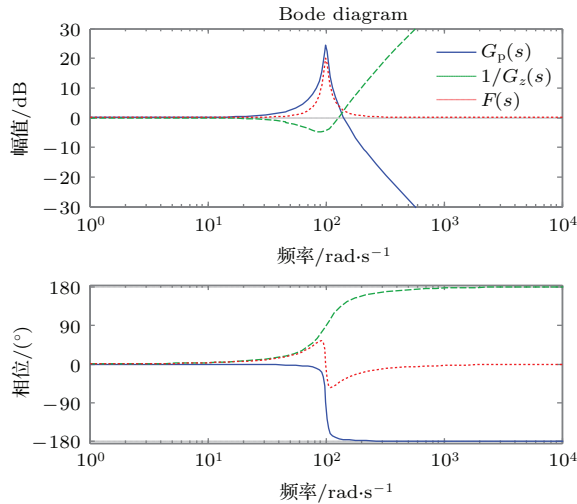


图3 二阶低通滤波器及双二阶滤波器频率响应曲线

Fig. 3. Frequency response of dual two-order filter and two-order low pass filter.

### 2.3 双二阶滤波器结合PI反馈控制的压电倾斜镜控制系统

利用双二阶滤波器抑制压电倾斜镜的机械谐振, 就是在控制器和压电倾斜镜中间串入双二阶滤波器, 如图4中的  $F_p$ . 此时输出的控制电压  $u'$  在压电倾斜镜机械谐振频率点增益很低, 以避免压电倾斜镜的机械谐振, 而在压电倾斜镜反谐振点<sup>[5]</sup>处增益变大, 以加强压电倾斜镜在此处的响应. 在设计  $F_p$  的时候, 还可以进行简化: 由于压电倾斜镜安装固定后, 其机械谐振峰值固定不变, 并能精确获得, 因此可以减小频带宽度, 直接采用  $N = M_r$ , 从

而直接利用 (5) 式计算阻尼系数  $\xi$ . 而针对压电倾斜镜机械谐振的反谐振点, 利用同样的方法可以计算另外一个双二阶滤波器的参数. 这样就利用了两个双二阶滤波器来分别抑制压电倾斜镜的谐振和反谐振. 事实上, 由于压电倾斜镜谐振和反谐振成对出现, 并且频率点非常靠近, 为了减少滤波器串联的个数, 降低系统复杂度, 可以利用一个双二阶滤波器同时对压电倾斜镜的谐振和反谐振进行抑制补偿, 此时双二阶滤波器向上的谐振峰  $G_p$  补偿压电倾斜镜的反谐振点, 向下的谐振峰  $G_z$  抑制压电倾斜镜的谐振点. 优化后, 两者一体的频率响应特性变为平坦的线性响应, 也相当于把压电倾斜镜改造成一个理想的执行机构, 因此, 不再影响校正倾斜镜的准确校正.

利用双二阶滤波器不仅可以用于阻止一些不期望的响应, 还可以进一步加强信号某些频率点处的响应灵敏度. 文中提出如图4中的双二阶滤波器  $F_d$  直接插入控制器前, 对误差信号  $e$  进行滤波, 使得控制器在光束平台窄带频率点处增加控制灵敏度, 最后通过控制压电倾斜镜抑制, 从而提高系统的指向精度. 在设计  $F_d$  的时候, 还需要特别注意: 由于光束平台窄带扰动频率存在漂移现象, 包含一定的宽度, 也就是需要一定的频带宽度  $B_w$  下确保增益  $N$ , 使得在这些频段范围内都可以获得额外的灵敏度. 显然, 设计双二阶滤波器只需要光束平台窄带扰动处的频率信息和幅值信息, 而不像前馈补偿<sup>[11]</sup>那样还需要知道详细的相位信息, 从而降低了系统对窄带扰动测量的复杂度.

图4就是本文提出的双二阶滤波器结合PI控制的压电倾斜镜反馈控制系统框图, 它一方面抑制压电倾斜镜机械谐振和反谐振, 另一方面抑制光束平台大幅值高频窄带扰动. 显然, 当滤波器  $F_p = 1$  和  $F_d = 1$  时, 即变成经典的PI反馈控制的压电倾斜镜控制系统.

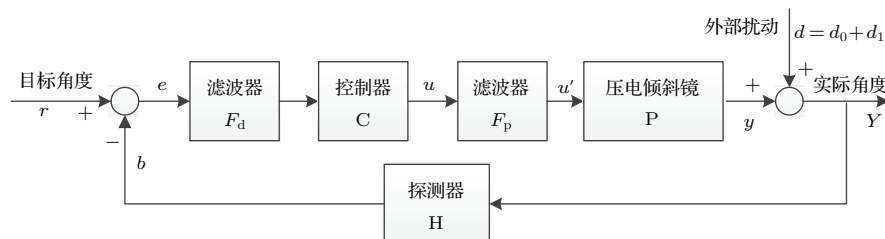


图4 提出的双二阶滤波器结合PI反馈控制的压电倾斜镜控制系统

Fig. 4. Proposed feedback control system with dual two-order filter for PFSM.

### 3 实验及结果

#### 3.1 抑制光束抖动的实验平台

由于目前实验室还不能为整个光路提供振动, 因此提出了一种等效的抑制光束抖动的实验方案, 如图 5 所示. 实验中的主要光学器件包括: 激光器、扰动倾斜镜、校正倾斜镜及相机. 为了模拟某激光通信平台的实测的幅值为  $25\ \mu\text{rad}$ 、频率为  $60\ \text{Hz}$  窄带扰动, 试验中利用信号发生器模拟引入相当的窄带扰动结合宽谱噪声后驱动扰动倾斜镜工作, 产生模拟外部扰动. 相机探测到光束抖动残差后经处理机进行运算得到控制电压经高压放大器放大后驱动校正倾斜镜工作, 实现光束抖动抑制.

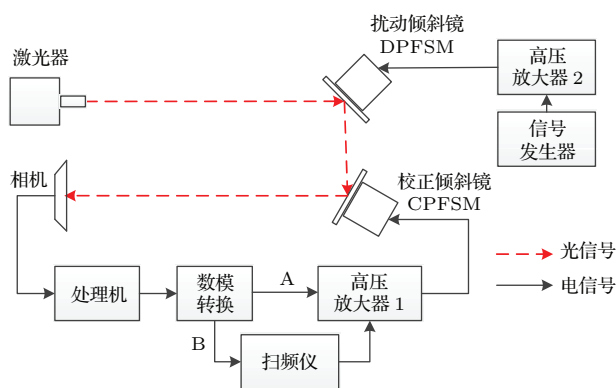


图 5 光束抖动抑制实验框图

Fig. 5. Block diagram of beam jitter control experiment.

#### 3.2 经典 PI 控制实验结果

为了优化经典 PI 控制的参数, 一般首先需要测量系统的开环传递函数. 既然压电倾斜镜有两个轴, 探测器测量其光斑水平位置和垂直位置, 因此其传递函数  $P$  是个  $2 \times 2$  的 MIMO 传递函数矩阵. 由于压电倾斜镜进行了严格的正交化处理, 其两个轴的耦合可以忽略不计, 因此把它等效成为两个独立的 SISO 系统<sup>[6]</sup>. 下文中均用垂直轴作为代表进行分析或实验. 用 Photon+ 扫频仪把  $1\ \text{Hz}$  到  $1500\ \text{Hz}$  的正弦扫频信号通过高压放大器后驱动校正压电倾斜镜, 采样率为  $3020\ \text{Hz}$  的相机探测到光斑质心经过处理机处理后得到控制电压, 再经数模转换后输出给扫频仪, 从而得到系统的开环频率响应曲线如图 6 所示. 此时, 由于扰动倾斜镜不工作, 得到的开环频率响应曲线主要是校正倾斜镜的频率响应特性. 图 6 中纵轴是校正倾斜镜响

应信号与驱动信号的幅值比后取对数, 横轴是驱动信号的频率变化. 实验中所用的校正倾斜镜口径为  $\Phi 250\ \text{mm}$ , 行程为  $\pm 1'$ , 因此, 其谐振频率比较低, 从图 6 中可以看出, 在  $750\ \text{Hz}$  频段范围内, 倾斜镜包含多对机械谐振与反谐振, 但是其中有两个谐振点和反谐振点对系统影响最大, 其中一点为  $326\ \text{Hz}$ , 其谐振幅值达到  $19\ \text{dB}$ , 对应的反谐振频率为  $383\ \text{Hz}$ , 另一点为  $593\ \text{Hz}$ , 其谐振幅值达到  $9\ \text{dB}$ , 对应的反谐振频率为  $659\ \text{Hz}$ . 需要注意的是, 压电倾斜镜的谐振频率和谐振峰值都会影响系统的误差校正带宽.

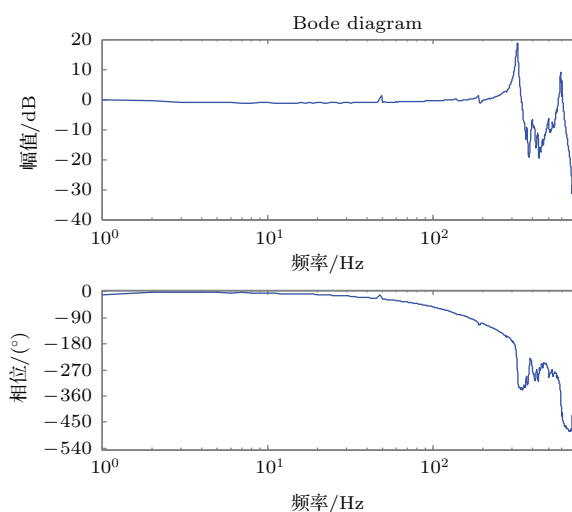


图 6 校正倾斜镜频率响应曲线

Fig. 6. Frequency response of the CPFSM.

利用开环频率响应曲线设计好 PI 控制参数, 扰动倾斜镜模拟产生扰动, 经过经典 PI 控制后, 其误差抑制曲线和光束抖动残差曲线如图 7(a) 中的实线所示. 从图中可以看出, 由于受控制系统延时和压电倾斜镜机械谐振的影响, 系统稳定控制下, 其误差抑制曲线过零点带宽约  $70\ \text{Hz}$ , 对幅值为  $25\ \mu\text{rad}$ 、频率为  $60\ \text{Hz}$  窄带扰动基本无能为力, 经 PI 校正后依然剩余  $23.8\ \mu\text{rad}$  的残差, 如图 7(b) 中的点线所示.

#### 3.3 双二阶滤波器对压电倾斜镜机械谐振的抑制结果

利用两个双二阶滤波器分别针对实测的校正倾斜镜频率响应特性中两个谐振和反谐振点进行滤波. 通过 2.3 节中提出的降阶的方法设计滤波器  $F_p$  后得到其传递函数为

$$F_p(s) = 1.6819 \times \frac{s^2 + 2 \times 0.0144 \times 2048.3s + (2048.3)^2}{s^2 + 2 \times 0.0271 \times 2406.5s + (2406.5)^2} \times \frac{s^2 + 2 \times 0.0198 \times 3725.9s + (3725.9)^2}{s^2 + 2 \times 0.0283 \times 4140.6s + (4140.6)^2}. \quad (8)$$

双二阶滤波器  $F_p$  的频率响应曲线如图 8(a) 所示, 构建的 2 个串联的双二阶滤波器在压电倾斜镜机械谐振点处均获得了明显的幅值抑制能力, 并且对其反谐振点进行了放大. 经过滤波后, 压电倾斜镜频率响应曲线如图 8(b) 所示, 可以看出, 压电倾斜镜频率响应曲线幅值变得平坦, 不再影响校正倾斜镜的准确校正, 另外, 从滤波器相位上看, 只在谐振点附近存在相位改变, 对于影响系统性能的 0—200 Hz 区域, 相位延时只有  $4^\circ$ , 对系统影响很小.

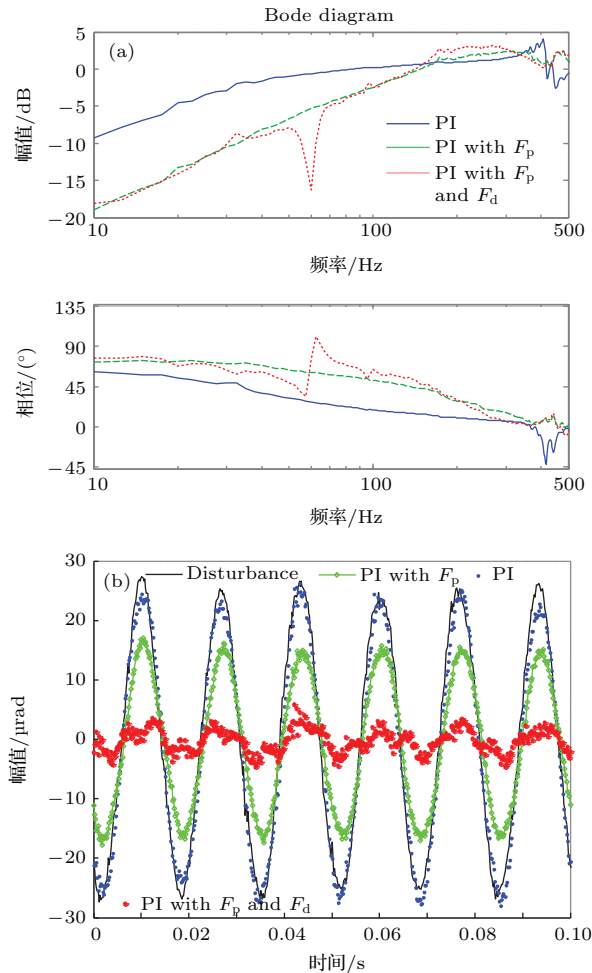


图 7 不同情况下的 PI 控制系统 (a) 误差抑制曲线; (b) 光束抖动输入及残差  
Fig. 7. PI control system under different filters: (a) error attenuation response; (b) disturbance and remained error.

利用双二阶滤波器抑制压电倾斜镜的机械谐振后, 在同样的超调量下, 系统误差抑制带宽得到

明显提高, 如图 7(a) 中的长虚线所示. 滤波前压电倾斜镜机械谐振对控制信号有激励效应, 系统增益提高将使系统无法稳定工作, 系统误差抑制带宽在 70 Hz 左右. 经  $F_p$  滤波后, 在压电倾斜镜机械谐振点的控制信号被大幅度抑制, 使得系统能够继续稳定工作, 系统误差抑制过零点带宽被大幅度提高至 148 Hz, 从而对 60 Hz 窄带扰动也带来约 5 dB 的校正量, 此时, 幅值为  $25 \mu\text{rad}$ 、频率为 60 Hz 的扰动经 PI 校正后剩余残差为  $15 \mu\text{rad}$ , 如图 7(b) 中的方形线所示.

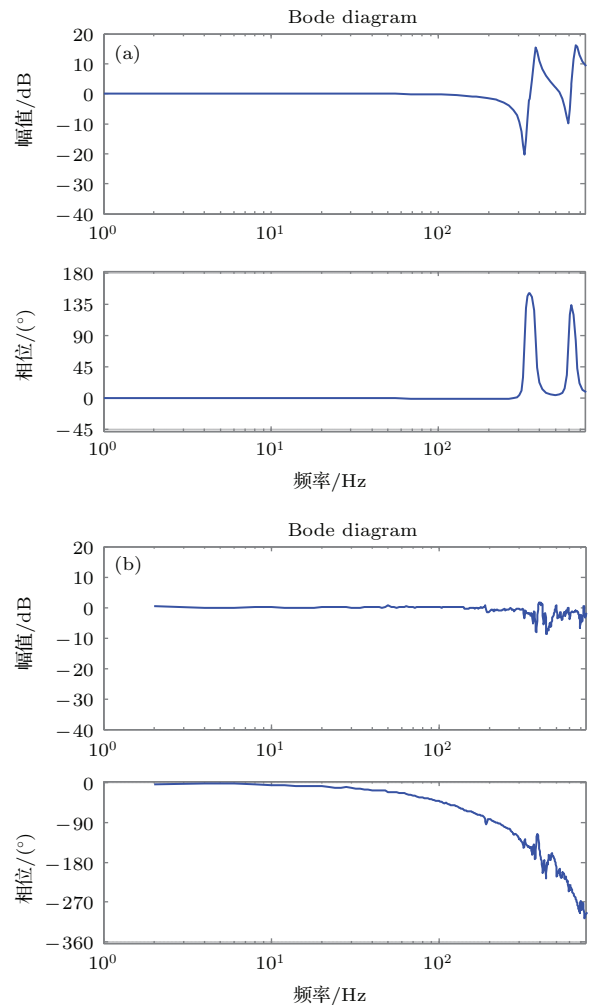


图 8 频率响应曲线 (a) 滤波器  $F_p$  频率响应; (b) 滤波后校正倾斜镜频率响应  
Fig. 8. Frequency response: (a) dual two-order filter  $F_p$ ; (b) CPFSM after filter.

### 3.4 双二阶滤波器对平台窄带抖动的抑制

当扰动倾斜镜施加窄带扰动后, 探测器测得的频率曲线就是窄带扰动频率曲线. 由电机等引起的光学平台窄带扰动存在一定的频率漂移, 漂移范围一般在 10 Hz 以内<sup>[16]</sup>, 因此设计双二阶滤波器的频

带宽度  $B_w$  为 10 Hz. 即在频带范围内都确保一定的增益, 从而即使窄带扰动频率漂移, 也能保证其校正能力. 此时, 构建的一个在 60 Hz 处产生了谐振峰的双二阶滤波器的传递函数为

$$F_d(s) = \frac{s^2 + 2 \times 0.3 \times 376.99s + (376.99)^2}{s^2 + 2 \times 0.03 \times 376.99s + (376.99)^2}. \quad (9)$$

设计的双二阶滤波器  $F_d$  的频率响应曲线如图 9 所示, 在 60 Hz  $\pm$  5 Hz 的频带范围内都保证有 15 dB 的增益, 以适应扰动频率点漂移的情况.

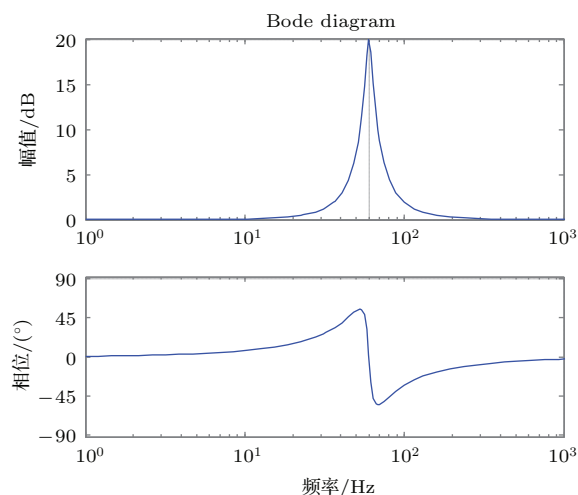


图 9 双二阶滤波器  $F_d$  频率响应

Fig. 9. Frequency response of the dual two-order filter  $F_d$ .

引入这个双二阶滤波器后, 就会使得控制器在 60 Hz 处增大灵敏度, 从而使得系统误差抑制曲线在 60 Hz 增加了额外的抑制能力, 如图 7(a) 中的短虚线所示. 从图中可以看出系统误差抑制曲线中在 60 Hz 处获得了约 15 dB 左右的抑制能力. 此时, 幅值为 25  $\mu$ rad、频率为 60 Hz 的扰动经 PI 校正后剩余残差约为 4  $\mu$ rad, 如图 7(b) 中的星号线所示, 与经典 PI 控制相比, 其对窄带扰动的控制能力提高了 5 倍以上.

## 4 结 论

本文通过分析双二阶滤波器的参数对频率特性的影响, 提出了一种双二阶滤波器的设计方法, 并把这种方法应用到压电倾斜镜的机械谐振抑制和光束平台窄带扰动抑制. 实验结果表明, 提出的双二阶滤波器的设计方法简单有效, 把双二阶滤波器加入经典 PI 控制环中不需要额外增加其他测量传感器, 就能简单有效地实现对光束平台窄带扰动

进行额外抑制和压电倾斜镜的高带宽控制, 从而提高系统的跟瞄精度.

双二阶滤波器参数的计算不需要精确的传递函数测量和识别, 设计好后, 参数固定, 有利于工程应用. 当平台抖动频率漂移时, 固定参数的滤波器由于有一定带宽, 对抖动仍然有抑制作用. 但当实际抖动频率超出滤波器频带宽度时, 抑制性能变差, 而增加滤波器频带宽度是以牺牲滤波增益为代价的, 此时需要重新修正滤波器参数. 事实上, 如果能够自动识别压电倾斜镜和反馈控制残差的传递函数, 就能推广成自适应的双二阶滤波器.

## 参考文献

- [1] Guo Y M, Ma X Y, Rao C H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 069502 (in Chinese) [郭友明, 马晓燮, 饶长辉 2014 物理学报 **63** 069502]
- [2] Paul H M, John R A 2013 *Opt. Eng.* **52** 021005
- [3] Kemal D, Erman C, Mutlu K 2010 *Opt. Exp.* **18** 16618
- [4] Ye Z Y, Xia S Q, Song D H, Tang L Q, Lou C B 2014 *Chin. Phys. B* **23** 024211
- [5] Hardy J W 1998 *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* (New York: Oxford University Press) pp316–344
- [6] Zhang X J, Ling N 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 966 (in Chinese) [张小军, 凌宁 2003 强激光与粒子束 **15** 966]
- [7] Guwلمان M, Kogan A, Kazarian A 2004 *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.* **40** 1239
- [8] Yue B, Yang W S, Fu C Y 2002 *Opto-Electronic Engineering* **29** 35 (in Chinese) [岳冰, 杨文淑, 傅承毓 2002 光电工程 **29** 35]
- [9] Wu Q Y, Wang Q, Peng Q, Ren G, Fu C Y 2004 *Opto-Electronic Engineering* **31** 15 (in Chinese) [吴琼雁, 王强, 彭起, 任戈, 傅承毓 2004 光电工程 **31** 15]
- [10] Ken F, Susumu Y, Nobutaka B, Sakai S I, Tsuiki A, Hattori Y, Yano T, Yamada Y 2011 *Proc. Aero. IEEE Big Sky*, March 5–12, 2011 p1
- [11] Liu Y T, Gibson J S 2007 *Opt. Eng.* **46** 046601
- [12] Kim B S, Gibson J S, Tsao T C 2004 *Proceeding of the 2004 American Control Conference* Boston, June 30–July 2, 2004 p3417
- [13] Nestor O A, Chen N, Gibson J S, Tsao T C 2005 *Proceeding of the 2005 American Control Conference* Portland, June 8–10, 2005 p3586
- [14] Li X Y, Ling N, Chen D H, Yu J L 1999 *High Power-Laser and Particle Beams* **11** 31 (in Chinese) [李新阳, 凌宁, 陈东红, 于继龙 1999 强激光与粒子束 **11** 31]
- [15] Nestor O A, Gibson J S, Tsao T C 2007 *Proc. SPIE* **6709** 67090Q
- [16] Liu K C, Peiman M, Carl B 2008 *AIAA Guidance, Navigation and Control Conferenc* Honolulu, August 18–21, 2008, p7232



# High-bandwidth control of piezoelectric steering mirror for suppression of laser beam jitter

Fan Mu-Wen<sup>1)2)3)†</sup> Huang Lin-Hai<sup>1)2)</sup> Li Mei<sup>1)2)</sup> Rao Chang-Hui<sup>1)2)</sup>

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*)

( Received 16 July 2015; revised manuscript received 15 October 2015 )

## Abstract

Laser beam steering or pointing, which stabilizes the beam direction, is critical in many areas, such as optical communication systems, astronomy and directed-energy systems etc. However, the disturbances including atmospheric turbulence and mechanical jitter on platform may degrade the pointing accuracy. A proportional-integral (PI) feedback control commonly has been used in the track loop with a fast steering mirror. To compensate dynamic disturbance effectively, the laser beam steering control system must have a larger bandwidth than the disturbance bandwidth. But the control bandwidth is limited by the noise of the sensor, computing latency, and the light energy. So, a simple proportional-integral (PI) feedback controller of a piezoelectric fast steering mirror (PFSM) can only compensate the broadband disturbance of the atmospheric turbulence, but cannot effectively compensate a larger amplitude narrowband jitter because of the low control bandwidth. Moreover, when the control bandwidth is tuned to high, the mechanical resonance of the PFSM can cause the instability of the system. An improved dual two-order filter assisted high-bandwidth control algorithm to improve the pointing accuracy and error attenuation capability is proposed. This method can control a PFSM for suppression of laser beam jitter. The influence of filter parameters on frequency characteristics is analyzed, and then, a practical design method is proposed. The dual two-order filter can combine the characteristics of traditional notch filter and two-order low-pass filter, and can also obtain any desired amplitude in the interesting frequency region with little influence on the others. The principle of the proposed filter for suppressing the mechanical resonance of the PFSM and the narrowband disturbance is elaborated. And then, the different dual two-order filters are designed according to the frequency content of the PFSM and the narrowband disturbance. Finally, the proposed dual two-order filter assisted PI control algorithm and classic PI control algorithm are compared with each other. Experimental results show that, in the same conditions, the pointing accuracy of the proposed two-order filter assisted PI control algorithm is nearly 5 times better than that of the classic PI control algorithm, and the error attenuation bandwidth is one time higher. It also indicates that the proposed algorithm does not need an additional sensor; it is simple and effective for the suppression of the mechanical resonance of a PFSM and that of the narrowband disturbance, hence it improves the system error attenuation bandwidth and the beam pointing accuracy.

**Keywords:** adaptive optics, laser beam jitter, piezoelectric fast steering mirror, filter

**PACS:** 42.68.Wt, 95.75.Qr, 07.05.Tp

**DOI:** 10.7498/aps.65.024209

† Corresponding author. E-mail: fanmuwen@ioe.ac.cn