

# 基于两级高速倾斜镜闭环控制的光束稳定技术研究

周睿<sup>1,2,3</sup> 李新阳<sup>1,2</sup> 沈锋<sup>1,2</sup> 李梅<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在光束稳定系统中,受到传输介质和平台振动等因素的影响,通常同时存在能量与频率成反比特性的宽带扰动和平台机械谐振引起的在某个特定频率点出现的窄带扰动。为了解决光束稳定系统中由大幅度、高频率窄带扰动和宽带扰动引起光束抖动的问题,设计了基于两级高速倾斜镜串联控制的光束稳定系统,提出了利用前级光束稳定系统校正窄带扰动,后级光束稳定系统校正宽带扰动的控制算法,实现了对大幅度高频率窄带扰动和宽带扰动的同时抑制。在相同条件下,对比了传统的控制方法和两级高速倾斜镜联合校正控制系统的残余误差。仿真和实验表明,提出的系统结构和控制方法能够有效地抑制光束稳定系统中存在的扰动。

**关键词** 激光光学; 光束稳定; 光束抖动; 串联控制; 高速倾斜镜; 窄带扰动; 宽带扰动

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1214002

## Laser Beam Stabilizing System Based on Close Loop Control of Two Fast Steering Mirrors in Series

Zhou Rui<sup>1,2,3</sup> Li Xinyang<sup>1,2</sup> Shen Feng<sup>1,2</sup> Li Mei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>2</sup>Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In the laser beam stabilizing system, there are the broadband disturbance where energy is inversely proportional to the frequency and the narrowband disturbance at a particular frequency because of the transfer medium and vibration of the optical platform. In order to reduce the laser beam jitter caused by both kinds of disturbance, the control structure of fast steering mirrors (FSM) in series was put forward, and the control algorithm was presented, in which the first laser beam stabilizing system aimed to the narrowband disturbance, and the second laser beam stabilizing system resolved the broadband disturbance. So the disturbance can be restrained at the same time. The residual errors are compared between the proposed method and the classic control algorithm, and the simulation results and experimental results verify the availability of the proposed method.

**Key words** laser optics; laser beam stabilizing; laser beam jitter; control in series; fast steering mirrors; narrowband disturbance; broadband disturbance

**OCIS codes** 140.3425; 140.1550; 140.3330

## 1 引 言

在天文观测、星地激光通信、高能激光传输、激光加工等应用场合,光束在传输的过程中受大气湍流等传输介质及平台振动等因素的影响,使得到达目标靶面中心的光束发生了漂移和抖动,导致目标靶面的光强低于可探测阈值,或到达目标靶面的能量严重下降,甚至使光斑脱离靶面,这些效应对众多应用产生了严重的影响<sup>[1]</sup>。其中,大气湍流等传输介质引起的光束抖动一般符合能量与频率成反比的特性,属于宽带扰动;而

**收稿日期:** 2016-05-17; **收到修改稿日期:** 2016-07-01

**作者简介:** 周睿(1979—),男,博士研究生,副研究员,主要从事自适应光学信号处理方面的研究。

E-mail: zhouruihello@163.com

**导师简介:** 李新阳(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

平台振动的机械重复性使得光束抖动是特定频率的窄带扰动<sup>[2]</sup>。基于高速倾斜镜(FSM)的光束控制系统采用分辨率达纳米量级的压电驱动器驱动一块小面积的反射镜,能使光束产生快速、小角度的倾斜变化。与传统的电机驱动机构相比,高速倾斜反射镜具有运动惯性小、响应速度快、角分辨率高等显著优点,因此在光束稳定控制系统中得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。

目前,国内外对于光束稳定系统的控制方法主要集中在反馈控制和前馈控制方法。文献[2]采用比例积分(PI)结合二阶滤波器的方法对光束抖动进行抑制,该方法对于低于系统抑制带宽的窄带频率能够起到很好的抑制效果,但是对于接近或高于系统抑制带宽的大幅度、高频率的窄带扰动无能为力;文献[4]采用提高系统控制带宽的方法同时抑制宽带和窄带扰动,但是不完全微分的方法在实现倾斜镜的高带宽控制的同时,也造成了控制器设计比较复杂,容易导致系统不稳定等缺点;文献[5]采用前馈的控制方法来实现,前馈方法要求干扰与控制通道的动态模型已知而且较为准确,因此对于系统辨识精度有较高的要求;文献[6]采用前馈控制与自适应控制相结合的算法对系统中存在的扰动进行抑制,但是该方法受限于控制对象的辨识精度和自适应算法的收敛速度,同时算法复杂度较高;文献[7]采用嵌套的控制系统结构抑制大气湍流引起的外扰动和内部通道气流引起的内扰动,但是其控制算法仍然是基于传统的PI控制方法,对于内部通道存在高频窄带扰动的情形校正能力有限;文献[8]采用频域分离的方法,针对大行程低时间频率和小行程高时间频率的扰动分别设计控制器,利用变形镜和倾斜镜实现对扰动的控制,但主要是针对宽带扰动的情况考虑的,未提及大幅度、高频率的窄带扰动;文献[9]采用自适应滤波方法对外部扰动进行控制,能够对系统扰动进行很好的抑制,但是算法本身的收敛速度及算法复杂度等原因限制了其在某些场合的应用。

本文主要针对大幅度、高频率的窄带扰动和宽带扰动同时存在的情况,提出一种用两级高速倾斜镜控制系统串联校正的方法,分别校正光束稳定系统中存在的宽带扰动和窄带扰动,并分析了这种串联校正方法的控制性能和噪声传递特性。结果表明,该方法在对宽带扰动进行有效抑制的同时,对大幅度、高频率的窄带扰动也有较好的抑制效果。

## 2 常规高速倾斜镜控制原理及性能分析

### 2.1 常规高速倾斜镜控制结构

典型的基于FSM光束稳定系统框图和控制系统结构框图如图1(a)所示,波前探测器探测的残余倾斜误差经过控制算法(CC)计算得到控制电压,控制电压经模数转换(A/D)、高压放大驱动(HVA)高速倾斜镜产生倾斜补偿信号,使得受到扰动干扰的光束保持在目标靶面中心位置。其控制结构框图如图1(b)所示,其中 $r(s)$ 为传输介质,平台振动等环境因素影响带来的倾斜扰动信号, $y(s)$ 为FSM补偿的倾斜量, $e(s)$ 为残余倾斜误差, $n(s)$ 为波前探测器的噪声信号, $s$ 为拉普拉斯算子, $\omega_n$ 为自然振荡角频率。在一般情况下,高压放大器的带宽远大于控制闭环带宽,对控制系统的动态性能不产生显著影响,可以近似看作放大环节 $K_{HV}$ ;根据文献[10],高速倾斜镜 $P(s)$ 可以被看作是质量,弹簧阻尼系统,其传递函数可以表达为二阶振荡环节;波前探测器(WFS)传递函数 $W(s)$ 和数模(DA)转换模块传递函数 $D(s)$ 表达成零阶保持器;控制器 $C(z)$ 通常采用积分控制器。在连续域中,光束稳定控制系统中各个部分的传递函数分别为

$$W(s) = \frac{1 - \exp(-Ts)}{Ts}, \quad (1)$$

$$D(s) = \frac{1 - \exp(-Ts)}{Ts}, \quad (2)$$

$$P(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (3)$$

$$C(z) = \frac{k}{1 - z^{-1}} \Big|_{z = \exp(-Ts)}, \quad (4)$$

控制回路的开环传递函数可以写为

$$G(s) = K_{HV}W(s)D(s)P(s)C(s)\exp(-\tau_0 s), \quad (5)$$

利用近似关系

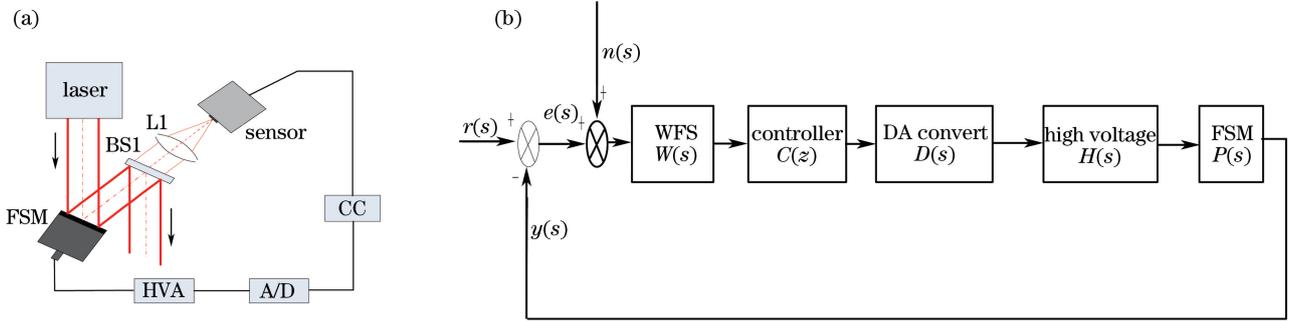


图 1 (a) 典型的高速倾斜镜光束稳定控制结构框图; (b) 典型高速倾斜镜控制系统结构图

Fig. 1 (a) Block diagram of a typical laser beam stabilizing system based on FSM;

(b) block diagram of a typical FSM control system

$$\frac{1 - \exp(-Ts)}{Ts} \approx \exp\left(-\frac{Ts}{2}\right), \quad (6)$$

系统的开环传递函数可以近似地表达为

$$G(s) = K_{HV} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \exp[-(T + \tau_0)s] C(s), \quad (7)$$

式中  $T$  为系统的采样周期,  $\tau_0$  为控制运算、数据传输等原因带来的时间延迟, 即光束稳定系统的被控对象可以被看作一个二阶延时环节。因此, 可以得到控制系统的闭环传递函数为

$$M(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)}, \quad (8)$$

误差传递函数为

$$E(s) = \frac{e(s)}{r(s)} = \frac{1}{1 + G(s)}, \quad (9)$$

残余的倾斜误差可以表示为

$$e(s) = E(s)r(s) - M(s)n(s), \quad (10)$$

控制系统对倾斜扰动校正的残余方差为

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} |E(j2\pi f)|^2 F_r(f) df + \int_0^{\infty} |M(j2\pi f)|^2 F_n(f) df, \quad (11)$$

式中  $f$  为频率,  $F_r(f)$  和  $F_n(f)$  分别为  $r(s)$  和  $n(s)$  的功率谱密度函数。

## 2.2 常规高速倾斜镜控制性能分析

由上述分析可知, 常规 FSM 控制光束稳定系统的性能主要取决于系统的误差传递函数和闭环传递函数。被控对象 FSM 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, 基于这样的控制对象特性, FSM 控制系统的增益受幅值裕度和相位裕度的影响, 一般都取得比较低, 从而限制了光束稳定系统的校正带宽, 在工程实践中, 通常在保证系统比较稳定的前提下, 系统闭环带宽  $\omega_c$  只能达到谐振频率  $\omega_L$  的  $1/10 \sim 1/8$ <sup>[11]</sup>。同时, 受到控制系统延迟和探测器采样频率的影响, 采用比例积分控制器, 系统的有效带宽只有探测器帧频的  $1/30 \sim 1/20$ <sup>[12]</sup>。

假设系统采样频率为 1000 Hz, 控制系统的等效时间延迟 0.0025 s, 从图 2 所示的控制系统 Bode 图和 (11) 式可以看出, 随着参数的增大, 误差带宽逐渐增大, 同时闭环也逐渐增大, 即控制系统对扰动抑制能力增大的同时, 对噪声的控制效果也会随着参数的增大而随之放大。

通常情况下, 光束在传输过程中会受到大气湍流等传输介质的影响而发生抖动, 这类扰动属于宽谱扰动, 一般符合能量与频率成反比的特性; 同时也会受到平台振动和其机械重复性带来的特定频率的窄带扰动。根据典型光束传输过程中扰动的功率谱特征, 模拟产生了一组包含宽带扰动和窄带扰动的信号, 其功率谱如图 3(a) 所示, 可以看出光束传输系统中除了存在功率谱密度 (PSD) 满足  $k/f^2$  的宽带扰动外, 还存在以 136 Hz 为中心的窄带扰动。为了便于比较不同控制参数对光束稳定系统的控制效果, 定义系统的控制

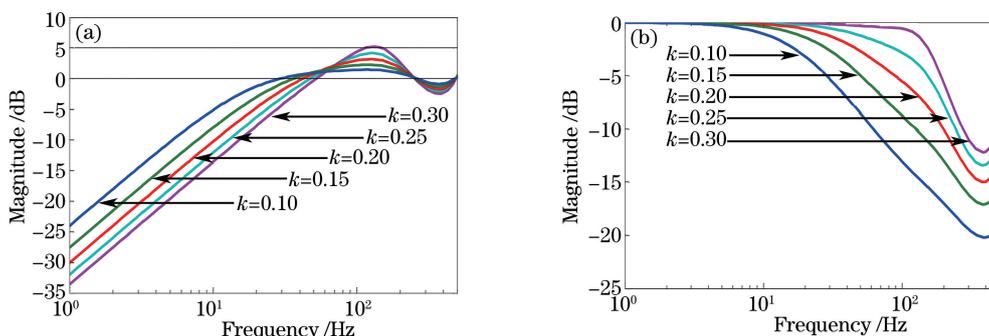


图 2 传统 FSM 控制系统 Bode 图。(a)误差传递函数 Bode 图;(b)闭环传递函数 Bode 图

Fig. 2 Bode diagram of the classical FSM control system. (a) Bode diagram of error transfer function; (b) Bode diagram of close transfer function

效率为

$$\eta = \sigma_{\text{output}}^2 / \sigma_{\text{input}}^2 \quad (12)$$

由图 3(b)可以看出当系统不存在窄带扰动时,随着控制参数的增大,即误差带宽逐渐增大的同时,系统的残余误差逐渐减小,而当系统存在如图 3(a)所示的窄带扰动时,控制参数增大,系统的残余误差未出现随误差带宽增大而明显减小的趋势,整个控制系统的控制效率仅能达到 75%。若需要在抑制系统宽带扰动的同时,对 136 Hz 的窄带扰动达到 10 dB 以上的抑制能力,系统误差带宽需要大于 400 Hz,要达这样的抑制带宽,对于有限采样频率下大口径 FSM 校正系统是相当困难的。

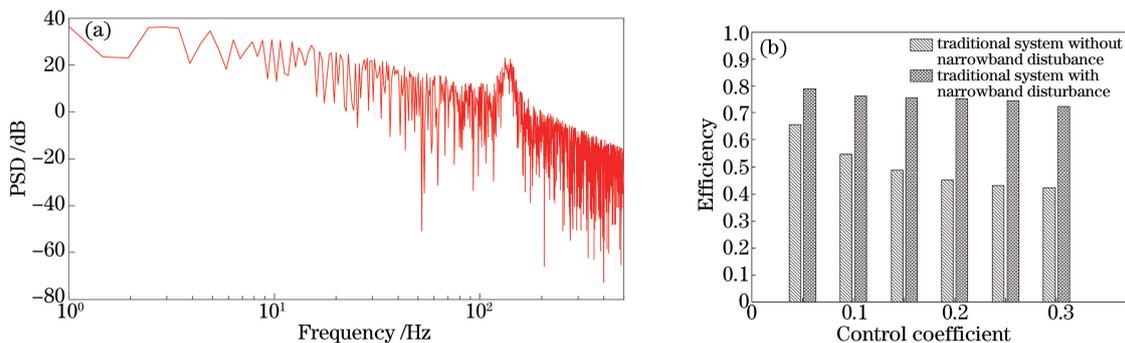


图 3 光束稳定系统输入信号功率谱密度和传统方法控制效率比较图

Fig. 3 PSD of laser stabilizing system input and control efficiency of the classical method

### 3 两级高速倾斜镜控制系统及控制算法分析

#### 3.1 两级 FSM 控制系统的结构

光束稳定系统的目标是减小光束抖动带来的误差,即控制系统对倾斜扰动校正的残余方差应尽可能小。通过第 2 节分析可知,在光束稳定系统中,基于 FSM 控制系统的控制对象可以等效为一个二阶延迟环节,受采样频率、延迟时间和倾斜镜谐振频率的影响,系统的有效控制带宽很难得到提高,通常只能做到谐振频率的 1/10;同时受到大幅度、高频率窄带扰动的影响,在保证系统的低频增益时,若需要同时保证系统残余方差尽可能小,就需要采用高阶的积分控制器。而在实际系统中高阶积分控制器会使系统的控制稳定性变差,同时由于数字控制计算机的累积误差效应,实际工作中理想的一阶积分控制器都很难稳定闭环<sup>[13]</sup>。

提出一种两级 FSM 串联的闭环控制系统,该系统由一套主要校正大幅度、高频率的窄带扰动的前级 FSM 控制系统与一套用于校正由传输介质带来的宽带扰动的后级 FSM 控制系统串联构成,前级 FSM 控制系统对窄带扰动进行校正,其校正的残余误差作为后级 FSM 控制系统的输入信号。这种两级 FSM 闭环控制的结构在实际光学系统中很容易实现,两套控制系统之间的耦合度较小,能够同时针对宽带扰动和窄带扰动的不同特性分别进行控制,从而实现大幅度、高频率的窄带扰动和宽带扰动同时校正。串联 FSM 光束稳定系统的结构如图 4 所示。

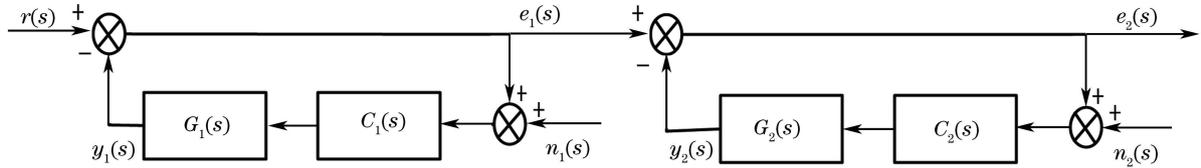


图 4 两级 FSM 控制系统串联结构框图

Fig. 4 Block diagram of two FSM control system in series

图 4 中原始的扰动信号为  $r(s)$ , 最终的校正残余信号为  $e_2(s)$ ,  $n_1(s)$ 、 $n_2(s)$  分别为前后两级探测的噪声信号,  $G_1(s)$ 、 $C_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $C_2(s)$  分别为前、后两级控制系统的被控对象和控制器的传递函数。

### 3.2 前级高速倾斜镜校正系统控制器设计与分析

根据第 2 节的分析可知, 若前级 FSM 校正系统对窄带扰动能够有效抑制, 即后级 FSM 校正系统的输入为宽带扰动时, 采用经典的 PI 控制方法即可达到较好的抑制效果, 因此对后级校正系统的控制器设计不再赘述。由于前级 FSM 控制系统的主要目的是为了抑制大幅度、高频率的窄带扰动, 而影响前级 FSM 控制系统性能的因素主要包括 FSM 机械谐振, 窄带扰动频率附近的系统增益, 系统延迟及控制算法的选择等几个方面。

为了抑制或消除机械谐振的影响, 通常采用在控制回路中串联双二阶滤波器的方法来消除或减低机械谐振的影响, 同时滤波器在谐振点引起的衰减或超调应尽量等于谐振的峰值, 且相频特性满足系统稳定性的需求。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, 双二阶滤波器的传递函数为

$$F_r(s) = \frac{F_a(s)}{F_b(s)} = \frac{\omega_p^2 s^2 + 2\xi_z \omega_z s + \omega_z^2}{\omega_z^2 s^2 + 2\xi_p \omega_p s + \omega_p^2}, \quad (13)$$

式中  $\omega_p$ 、 $\omega_z$  分别为极点频率和零点频率,  $\xi_p$  和  $\xi_z$  分别为极点阻尼系数和零点阻尼系数。根据高速倾斜镜的谐振, 反谐振的频率点及其谐振峰值, 就可以确定(13)式中的  $\omega_p$ 、 $\omega_z$ 、 $\xi_p$ 、 $\xi_z$  等参数, 从而消除机械谐振。利用该方法将双二阶滤波器串联到前级控制系统后的 Bode 图如图 5 所示。

由图 5 可知, 经过滤波后, 高速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, 在谐振点附近存在的相位反转也得到了很好的改善, 使用双二阶网络的方法能够对高速倾斜镜的谐振取得较好的抑制效果。

双二阶滤波器可以用于抑制 FSM 的机械谐振, 还可以利用该方法增强信号某些频率点处的响应灵敏度, 从而在闭环控制系统中减弱光束平台中的窄带扰动的影响。为了简化控制的设计, 可以将(13)式简化为

$$F_s(s) = \frac{s^2 + 2\xi_1 \omega_s s + \omega_s^2}{s^2 + 2\xi_2 \omega_s s + \omega_s^2}, \quad (14)$$

式中  $\omega_s = \omega_p = \omega_z$ 。利用  $k_1 = \xi_1 / \xi_2$  调节窄带频率点的增益,  $k_2 = \xi_1 - \xi_2$  调节滤波器的滤波宽度, 从而设计出满足系统需要的滤波器。二阶滤波器随参数变化的频率响应如图 6 所示, 二阶滤波器在窄带扰动中心频率附近的增益, 随着  $k_1 = \xi_1 / \xi_2$  的增加而增大, 受影响的相位也随着  $k_1$  的增加而增大; 滤波器的有效宽度随着  $k_2 = \xi_1 - \xi_2$  的增加而变宽, 受影响的相位也随着  $k_2$  的增加而增大。因此可以根据窄带扰动的特点, 通过选择适当的参数, 使其在窄带扰动的中心频率附近, 系统的响应明显增强, 同时该滤波器的宽度能够适应扰动频率点发生偏移的情况。

高速倾斜镜控制回路的控制对象可以等效为一个二阶延迟环节, 影响系统带宽的因素除了倾斜镜的谐振外, 延迟时间同样也是影响系统带宽的重要因素, 根据文献[10]的分析, 在积分控制的作用下, 即使将被控对象视为理想的纯延迟环节时, 系统的控制带宽也只能做到采样频率的  $1/30 \sim 1/20$ 。因此, 若需要前级校正系统对窄带扰动达到更好的校正效果, 保证系统的稳定裕度, 必须对系统的延迟进行补偿, 工程上最常用的方法是使用超前校正环节进行补偿, 其传递函数为

$$L(s) = \alpha \frac{\tau_L s + 1}{\alpha \tau_L s + 1}, \quad \alpha < 1, \quad (15)$$

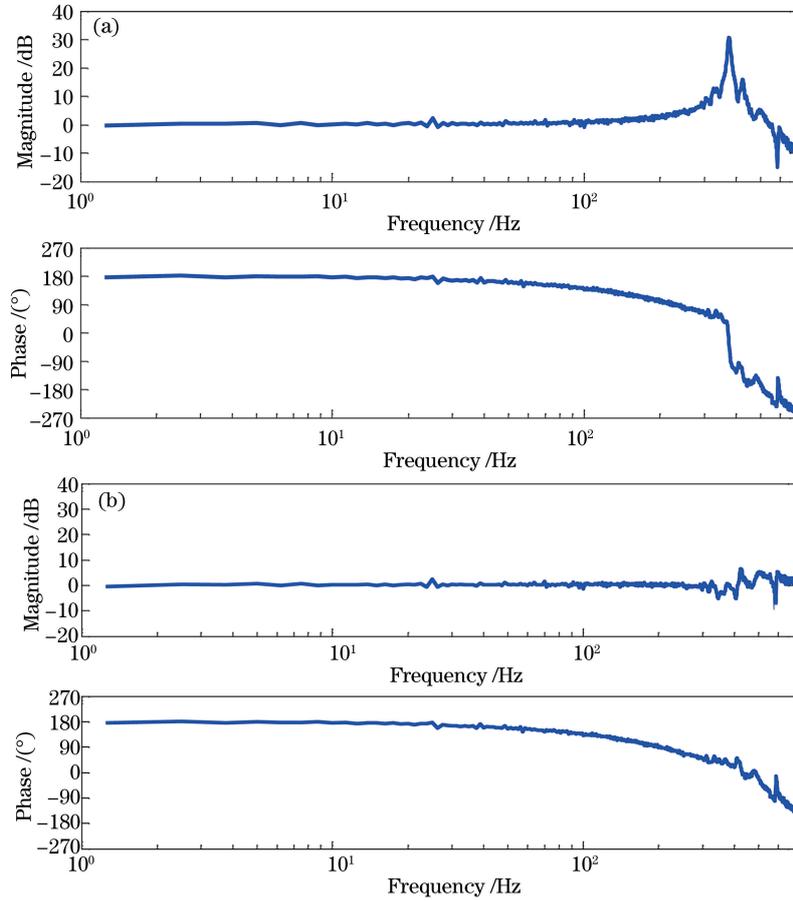


图 5 FSM 频率响应。(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 5 Frequency response of FSM. (a) Before filtering; (b) after filtering

其频率响应如图 7 所示。根据(15)式,容易得到超前校正环节的中心频率和超前相位为

$$\omega_m = \frac{1}{\tau_L \sqrt{\alpha}}, \quad \varphi_m = \arctan \frac{1 - \alpha}{2\sqrt{\alpha}}, \quad (16)$$

通过选择适当的参数,可以在窄带扰动频率附近提供大于  $20^\circ$  的相位补偿,能够有效地改善控制系统在窄带扰动频率点附近的动态性能。

在高速倾斜镜控制系统中,最常被使用的控制器是积分控制器,但是由于积分环节会带来  $\pi/2$  的相位滞后,而前级控制系统主要针对大幅度、高频率的窄带扰动,需要控制系统的误差带宽具有较高的过零频率。为了减小积分控制器相位滞后带来的影响,在前级控制系统中采用比例加惯性环节的控制器来减小相位滞后对高频扰动的控制效果的影响,其控制器的形式为

$$C_1(z) = \frac{K_1}{1 - K_2 z^{-1}} \Big|_{z = \exp(-T_s)}, \quad (17)$$

式中  $K_1, K_2$  为控制器参数。由上述分析,可以得到前级 FSM 控制系统的结构框图如图 8 所示。

根据上述分析,可以得到如图 9 中(a)、(b)所示的前级 FSM 控制系统的误差传递函数与闭环传递函数随控制参数变化的 Bode 图。从图中可以看出,前级 FSM 控制系统能够在低频段对宽带扰动达到 3 dB 的抑制能力,对系统中存在的 136 Hz 扰动,能够达到大于 10 dB 的抑制能力,同时控制器在窄带扰动附近有 20 Hz 的宽度;从图 9(c)、(d)校正前后的功率谱曲线可以看出,前级 FSM 系统能够有效抑制系统中存在的窄带扰动,当窄带中心频率发生偏移时,也有较好的抑制效果。

### 3.3 两级高速倾斜镜校正系统的性能分析

根据 3.2 节的分析和图 4 所示控制系统结构,容易得到最终校正残余信号为

$$e_2(s) = E_1(s)E_2(s)r(s) - M_1(s)E_2(s)n_1(s) - M_2(s)n_2(s), \quad (18)$$

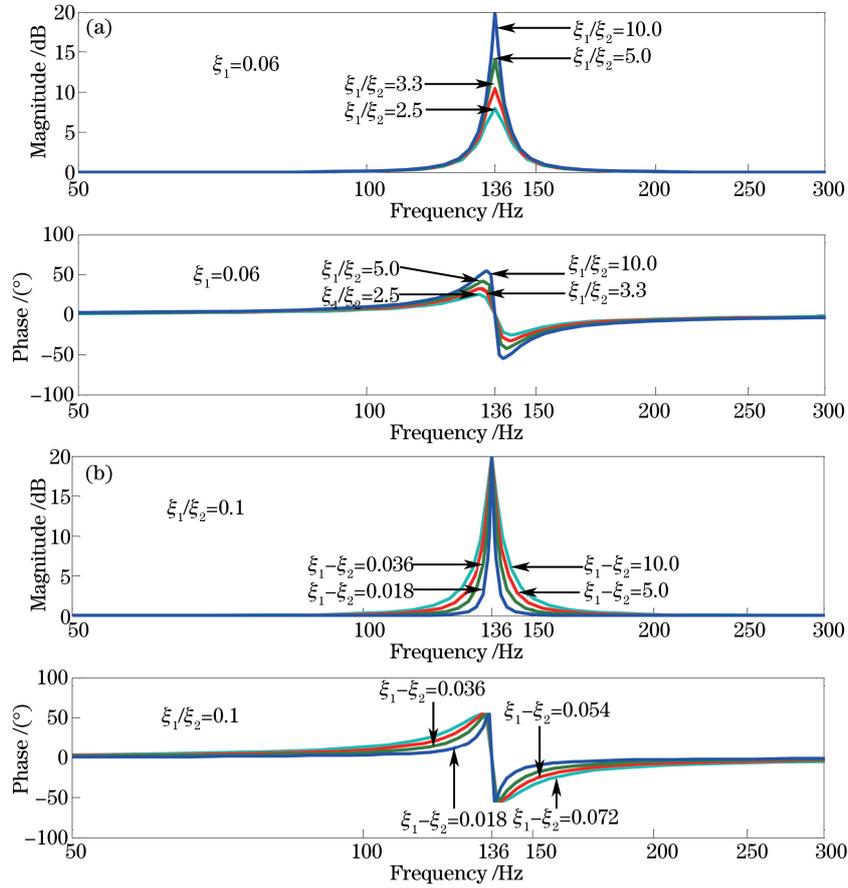


图 6 (a)不同  $\xi_1/\xi_2$  条件下二阶滤波器  $F_s(s)$  的频率响应;(b)不同  $\xi_1-\xi_2$  条件下二阶滤波器  $F_s(s)$  的频率响应  
Fig. 6 (a) Frequency response of  $F_s(s)$  with different  $\xi_1/\xi_2$ ; (b) frequency response of  $F_s(s)$  with different  $\xi_1-\xi_2$

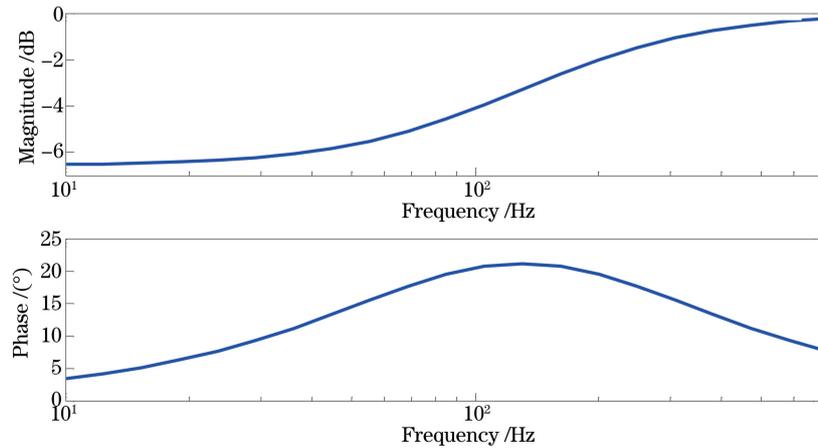


图 7 超前补偿环节  $L(s)$  的频率响应

Fig. 7 Frequency response of phase leading compensation  $L(s)$

式中  $E_1(s), M_1(s), E_2(s), M_2(s)$  分别为前、后级误差传递和闭环传递函数。系统总的残余方差信号为

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} |E_1(j2\pi f)|^2 |E_2(j2\pi f)|^2 F_t(f) df + \int_0^{\infty} |M_1(j2\pi f)|^2 |E_2(j2\pi f)|^2 F_{n1}(f) df + \int_0^{\infty} |M_2(j2\pi f)|^2 F_{n2}(f) df. \quad (19)$$

当串联 FSM 系统联合工作时,由(19)式可知,前级系统总的残余方差除了与系统的误差带宽有关外,

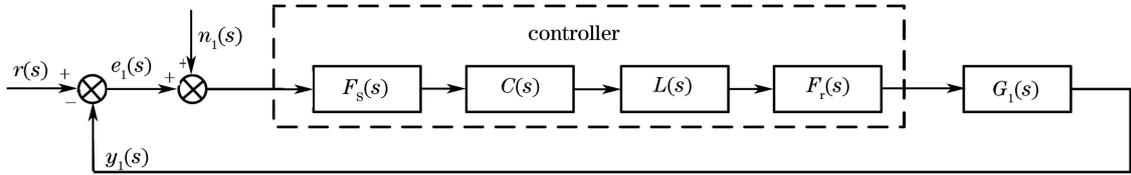


图 8 前级 FSM 控制系统方框图

Fig. 8 Block diagram of the first FSM control system

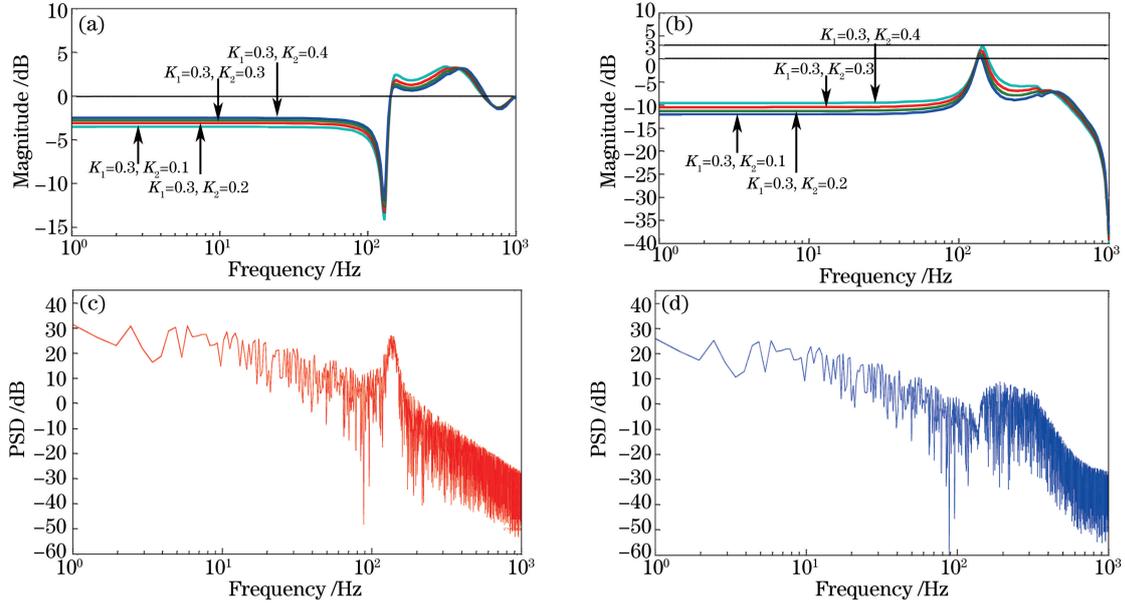


图 9 (a)前级 FSM 控制系统的误差传递函数 Bode 图;(b)前级 FSM 控制系统的闭环传递函数 Bode 图;  
(c)前级 FSM 控制系统的输入信号功率谱;(d)前级 FSM 控制系统的残余误差功率谱

Fig. 9 (a) Bode diagram of the error transfer function; (b) Bode diagram of the close loop transfer function;  
(c) PSD of input signal; (d) PSD of residual error signal

还与系统的闭环传递函数相关,从图 9 可以看出,由于前、后两级 FSM 控制系统的误差传递函数为高通滤波器的形式,因此串联结构对外部扰动的校正能力得到了加强;而前级 FSM 控制系统的闭环传递函数对于噪声而言相当于一个带通滤波器,并且通带的宽度和峰值都很小,后级 FSM 控制系统的闭环传递函数为低通滤波器,噪声在前级带通滤波器和后级低通滤波器的作用下,可以被忽略,因此(18)式可近似地表达为

$$\sigma^2 \approx \int_0^{\infty} |E_1(j2\pi f)|^2 |E_2(j2\pi f)|^2 F_i(f) df + \int_0^{\infty} |M_2(j2\pi f)|^2 F_{n_2}(f) df = \int_0^{\infty} |E_{total}(j2\pi f)|^2 F_i(f) df + \int_0^{\infty} |M_2(j2\pi f)|^2 F_{n_2}(f) df, \quad (20)$$

式中  $E_{total}(j2\pi f)$  为两级高速倾斜镜控制系统联合工作时的误差传递函数。由(20)式可知,两级 FSM 控制系统对扰动的抑制效果由两级校正的误差传递函数的乘积决定,对系统噪声的抑制效果主要由后级 FSM 控制系统的闭环传递函数决定。

由图 10(a)可以看出,当光束稳定系统中存在图 3(a)所示的窄带扰动和满足功率谱密度和  $f^2$  成反比的宽带扰动时,利用两级 FSM 控制系统联合工作,能够对系统中同时存在的两类扰动进行有效抑制;由图 10(b)可以看出,即使存在窄带扰动,联合校正系统的效率也能够达到 40%;经典的控制方法为了提高系统性能,必须通过增大参数的方法提高系统误差带宽,而两级高速倾斜镜控制系统联合工作时,后级系统采用经典的控制方法,仅需要较低的误差带宽就能带来较好的系统收益,由于采用了较低的控制参数,后级系统的闭环带宽也较低,因此噪声的影响被减弱,提高了系统的稳定性和控制性能。

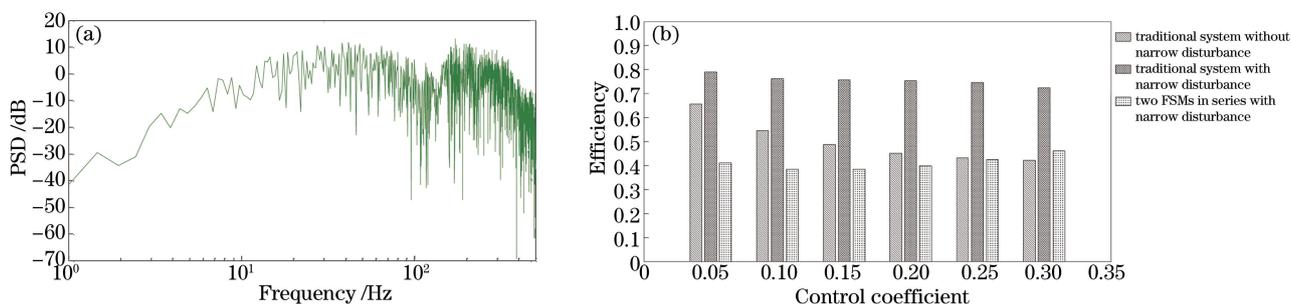


图 10 (a) 残余误差信号功率谱; (b) 不同条件下系统的控制效率

Fig. 10 (a) PSD of residual error signal; (b) control efficiency of different control methods

### 4 实验及结果

根据上述分析,提出了如图 11 所示串联 FSM 系统对光束抖动进行控制。整个系统由前级 FSM 控制系统和后级 FSM 控制系统串联组成,其中前级 FSM 控制系统包括口径 200 mm,谐振频率 400 Hz 的高速倾斜镜 TM1,帧频 2000 Hz 的探测器 Camera 1 和控制器 CC1,主要用来校正光束传输过程中的大幅度、高频率的窄带扰动;后级 FSM 控制系统包括口径 200 mm,谐振频率 210 Hz 的高速倾斜镜 TM2,帧频 1000 Hz 的探测器 Camera 2 和控制器 CC2,主要用来校正光束传输过程中的宽带扰动。

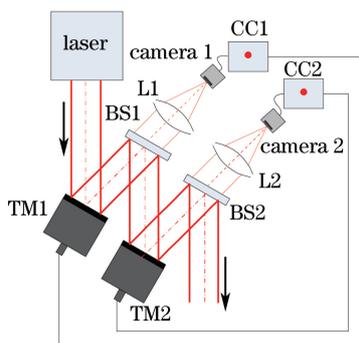


图 11 两级 FSM 闭环控制的光束稳定系统结构框图

Fig. 11 Diagram of a laser beam stabilizing system with two FSMs in series

针对如图 11 所示的光束稳定控制系统进行了测试,闭环前后的光束抖动的功率谱实验结果如图 12 所示,由图中抖动信号开、闭环 PSD 可以看出,两级 FSM 控制系统在 136 Hz 的窄带扰动处的抑制能力大于 10 dB,且在窄带扰动发生  $\pm 10$  Hz 偏移时也能做到有效控制;同时该系统对 20 Hz 以内的宽带扰动也有较好的抑制能力。闭环前后的光束抖动的时间序列如图 13 所示,在两级 FSM 控制系统工作的情况下,能够将光束抖动的能量由  $95.85 \mu\text{rad}^2$  抑制到  $44.54 \mu\text{rad}^2$ ,残余能量百分比能够达到 46%。实验结果表明,基于两级 FSM 闭环控制的光束稳定系统能够有效对系统中存在的宽带扰动和大幅度、高频率的窄带扰动进行抑制。

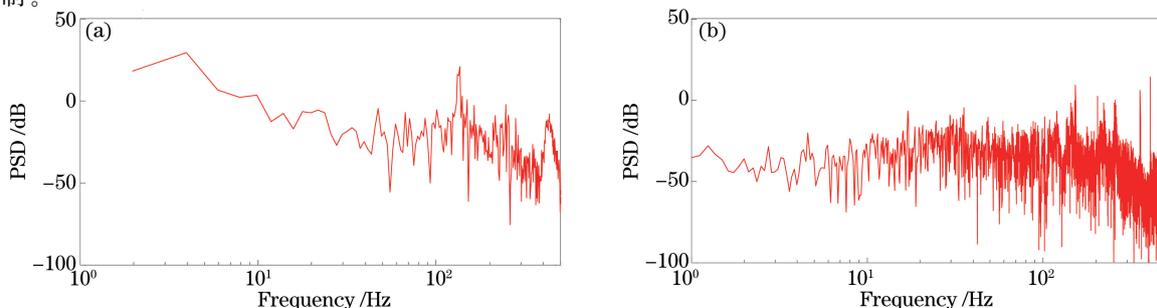


图 12 (a) 开环扰动功率谱; (b) 闭环残差功率谱

Fig. 12 (a) PSD of the disturbance signal; (b) PSD of the residual error signal

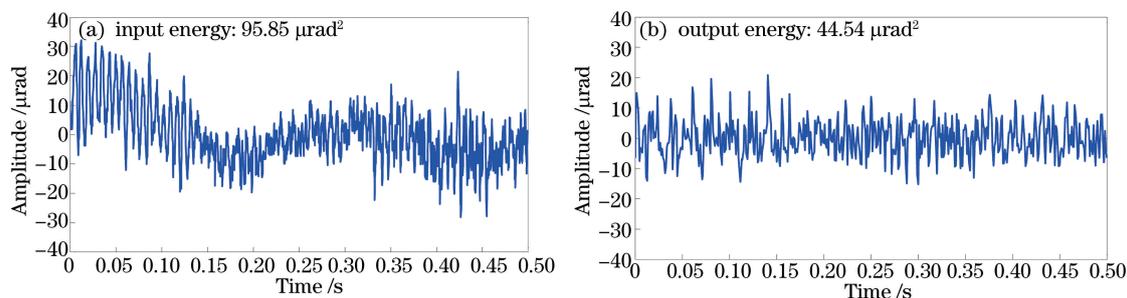


图 13 (a)校正前光束抖动的时域波形;(b)校正后光束抖动的时域波形

Fig. 13 (a) Time series of laser beam jitter before correction; (b) time series of laser beam jitter after correction

## 5 结 论

通过分析光束稳定系统中同时存在大幅度、高频率窄带扰动和宽带扰动的特点,针对典型光束稳定控制系统校正此类扰动残余误差百分比较大的情况,设计了基于两级 FSM 串联控制的光束稳定系统结构,提出了分别利用前级 FSM 控制系统抑制窄带扰动,后级 FSM 控制系统校正宽带扰动的控制算法,并且针对限制光束稳定控制系统性能提高的各个环节进行了分析,设计了相应的补偿器,分析了控制参数和探测器噪声对系统残余方差的影响,实现了对光束稳定控制系统中扰动的抑制,提高了系统的控制效果。仿真和实验表明,基于两级 FSM 串联控制的光束稳定系统结构和控制方法能够有效抑制光束稳定系统中存在的扰动。

## 参 考 文 献

- Huang Yinbo, Wang Yingjian. The effect of tracking jitter on the beam spreading induced by atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 152-156.  
黄印博, 王英俭. 跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 152-156.
- Fan Muwen, Huang Linhai, Li Mei, *et al.* High-bandwidth control of piezoelectric steering mirror for suppression of laser beam jitter[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 024209.  
凡木文, 黄林海, 李梅, 等. 抑制光束抖动的压电倾斜镜高带宽控制[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 024209.
- Li Xinyang, Ling Ning, Chen Donghong, *et al.* Stable control the fast steering mirror in adaptive optics system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(1): 31-36.  
李新阳, 凌宁, 陈东红, 等. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 31-36.
- Wu Qiongyan, Wang Qiang, Peng Qi, *et al.* Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(8): 15-18.  
吴琼雁, 王强, 彭起, 等. 音圈电机驱动的快速控制反射镜高带宽控制[J]. 光电工程, 2004, 31(8): 15-18.
- Ding Ke, Huang Yongmei, Ma Jiaguang, *et al.* Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 1991-1997.  
丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 1991-1997.
- Qin Hao, Fu Chengyu, Huang Yongmei. Adaptive composite control for jitter rejection of satellite in optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040606.  
覃浩, 付承毓, 黄永梅. 光通信中卫星振动抑制的自适应复合控制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040606.
- Luo Qi, Li Xinyang. Control performance analysis of a double overlap adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501002.  
罗奇, 李新阳. 嵌套双自适应光学系统的控制特性分析[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501002.
- Véran J P, Herriot G. Woofer-tweeter tip-tilt control for NFIRAOS on TMT[C]. SPIE, 2006, 6272: 62721R.
- Liu Y T, Gibson J S. Adaptive control in adaptive optics for directed energy systems[J]. Optical Engineering, 2007, 46(4): 046601.
- Shi Jingjing, Yao Baidong, Lu Jiaguo. Modeling and transfer function identification of FSM system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2748-2752.  
时晶晶, 姚佰栋, 鲁加国. 高速倾斜镜建模与传递函数辨识[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2748-2752.

- 11 Ma Jianguang. The basic technologies of the acquisition, tracking, and pointing systems[J]. Opto-Electronic Engineering, 1989(3): 1-42.  
马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989(3): 1-42.
- 12 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(12): 1697-1702.  
李新阳, 姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析[J]. 光学学报, 1997, 17(12): 1697-1702.
- 13 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Control performance analysis of the construction of two adaptive optics systems in series[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1059-1064.  
李新阳, 姜文汉. 两个自适应光学系统串联校正的控制性能分析[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1059-1064.
- 14 Jackson K, Conan R, Veran J P. Experimental validation of type II tip-tilt control in a woofer-tweeter adaptive optics system[C]. SPIE, 2010, 7736: 77364K.