

# 拼接主镜主动控制实验研究

于文豪<sup>1,2,3</sup>, 李斌<sup>1,2,3</sup>, 陈莫<sup>1,2,3</sup>, 鲜浩<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** 对分块拼接主镜实现主动控制是拼接镜技术的难点之一。建立了拼接主镜主动控制系统的模型,采用静态解耦的方式,将传递函数矩阵对角化,系统从多输入多输出的形式简化为单输入单输出的形式,并且建立了简化后的控制系统模型。在此基础上,完成了控制系统的控制器设计。为了实现拼接镜的主动控制,在实验室中搭建了由四块正六边形子镜组成的拼接镜实验系统,由三个驱动器来控制每块子镜的倾斜和平移误差。结果表明,单位倾斜误差校正时间为 2.6 s,分析子镜倾斜的功率谱密度可知,动态倾斜误差校正带宽达到了 0.34 Hz,实现了静态拼接误差的高效快速校正和动态误差的实时有效校正。

**关键词** 成像系统; 拼接镜; 共焦; 控制; 扰动抑制; 带宽

**中图分类号** TH751; TK323 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.101101

## Active Control Experiment of the Segmented Primary Mirror

Yu Wenhao<sup>1,2,3</sup>, Li Bin<sup>1,2,3</sup>, Chen Mo<sup>1,2,3</sup>, Xian Hao<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 and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

**Abstract** It is difficult to realize the active control of block segmented primary mirror for splicing technique. The model is established based on the active control system of segmented primary mirror. The single-input single-output systems are obtained after the diagonalization of transfer function matrix of a multi-input multi-output system using the static decoupling. And the simplified control system model is designed. On this basis, the controller design of the control system is completed. We set up an experimental system of segmented mirror in the laboratory with four hexagonal mirrors to implement the active control technology. Three actuators control the tip and tilt error of each sub-mirror. The results show that the correction time of unit tilt error is 2.6 s. According to the power spectral density analysis of the tip of sub-mirror, the correction bandwidth of dynamic tilt error reaches 0.34 Hz. The efficient fast correction of static splicing error and the real-time effective correction of dynamic error are realized.

**Key words** imaging systems; segmented mirror; co-focus; control; disturbance rejection; bandwidth

**OCIS codes** 110.6770; 010.1080; 150.5495

## 1 引言

目前,实现大口径主镜主要有以下三种技术路线:蜂窝夹芯结构轻质镜、分块拼接镜、能动薄主镜。其中 8 m 级以下口径的主镜通常采用蜂窝夹芯结构轻质镜和能动薄主镜等单块镜面,超过 10 m 级口径的主镜通常采用分块拼接镜。凯克望远镜(KECK)是世界上第一座采用拼接技术的望远镜<sup>[1]</sup>,其主镜口径长达 10 m。下一代超大型的望远镜,比如三十米望远镜(TMT)和欧洲极大望远镜(E-ELT)等,均采用拼接镜面作为主

**收稿日期:** 2017-02-14; **收到修改稿日期:** 2017-03-17

**作者简介:** 于文豪(1991—),男,硕士研究生,主要从事主动光学技术方面的研究。E-mail: ioeywh@163.com

**导师简介:** 鲜浩(1969—),男,硕士,研究员,主要从事自适应光学和光机系统设计方面的研究。

E-mail: xianhao@ioe.ac.cn(通信联系人)

镜。拼接主镜的主动控制可以有效地降低温度、重力、风载和振动对拼接望远镜成像质量的影响<sup>[2]</sup>,实现主镜共焦与共相。KECK<sup>[2]</sup>、TMT<sup>[3]</sup>和E-ELT<sup>[4]</sup>拼接主镜主动控制分为两个阶段:1) 主动保持,首先利用边缘传感器测量子镜拼接误差,然后利用驱动器实时校正子镜拼接误差;2) 主动调整,边缘传感器数值会随着环境和时间变化发生一定的电子漂移,为避免导致不可接受的拼接误差,KECK每3~4周进行一次主动调整,主动调整是一个准静态的过程<sup>[5-9]</sup>。为了避免边缘传感器电子漂移带来误差,本文应用光学方法检测拼接误差作为拼接主镜主动控制系统的反馈信号,实现拼接主镜的实时闭环控制,不再区分主动保持和主动调整的概念。拼接误差检测方法很多<sup>[10-12]</sup>,如哈特曼传感器<sup>[13]</sup>配合双波长方法<sup>[14]</sup>可以实现拼接误差的实时检测。本文针对该误差检测方法实现拼接主镜主动控制,并且完成了倾斜误差校正,实现了拼接镜共焦。

## 2 拼接主镜主动控制系统

### 2.1 拼接主镜主动控制系统介绍

不同于单块镜面,分块拼接主镜由多块子镜拼接而成,比如KECK主镜有36块正六边形子镜、TMT主镜有492块正六边形子镜。通常,在每块子镜背后安装三个正三角形分布的位移驱动器来实现子镜三个自由度的主动控制。这三个主动控制的自由度分别是:沿 $z$ 轴平移、绕 $y$ 轴倾斜和绕 $x$ 轴倾斜。与主动自由度对应的拼接误差分别是平移误差和倾斜误差。当所有子镜不存在倾斜误差时,拼接镜面共焦;当所有子镜不存在倾斜误差和平移误差时,拼接镜面共相。

### 2.2 控制系统模型

控制系统模型如图1所示。机械响应矩阵 $M$ 由主镜机械支撑结构决定,其对角元素表征了主镜的驱动器响应,非对角元素表征了驱动器之间的位移耦合作用。根据文献[14]的表述,针对E-ELT中的机械支撑结构,在带宽远低于机械谐振(10 Hz左右)的条件下,机械响应矩阵 $M$ 为常数阵。此时,同一块子镜三个驱动器的耦合作用为驱动器位移量的1/30,子镜间驱动器的耦合作用更小。因此,在控制带宽远远小于机械谐振频率的条件下,可以忽略非对角元素,机械响应矩阵为常数对角阵。

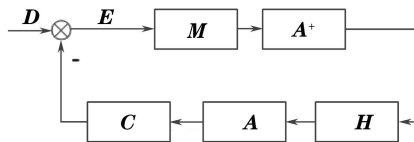


图1 系统控制框图

Fig. 1 Block diagram of control system

控制矩阵 $A$ 由驱动器的位置关系决定,其主要作用是获得驱动器的期望位移; $A^+$ 为控制矩阵的最小二乘逆。

传感器 $H$ 为哈特曼传感器或者双波长检测用的相机。 $T_s$ 为二者的最大采样时间, $I$ 为单位矩阵。其可以表示为

$$H = \frac{1 - \exp(-T_s)}{T_s} I. \quad (1)$$

控制器 $C$ 在理想条件下为对角阵,且对角元素均相同。 $D$ 为外部扰动, $E$ 为系统误差信号。

系统控制对象为

$$W = M \times A^+. \quad (2)$$

系统的开环传递函数为

$$W_k = C \times A \times H \times A^+ \times M = C \times H \times M. \quad (3)$$

拼接主镜的每块子镜上都由三个驱动器来校正倾斜和平移误差。如果主镜由 $N$ 块子镜拼接而成,那么拼接主镜主动控制系统就是具有 $3N$ 个输入和 $3N$ 个输出的系统。在控制带宽远远小于机械谐振频率的条件下,系统控制对象是一个常数阵,但是 $A^+$ 的存在使得控制对象并不是一个对角阵。为了将传递函数矩阵简化为对角阵,引入矩阵对角化的方式。矩阵对角化的方式在KECK、TMT和E-ELT中均得到了应用。矩阵对角化主要思想是先建立控制矩阵 $A$ ,然后求得控制矩阵最小二乘逆 $A^+$ ,使得系统传递函数矩阵变成

对角阵,之后按照单输入单输出的形式进行控制系统的分析设计。矩阵对角化的方式将多输入多输出系统简化为单输入单输出系统,计算简单、控制稳定可靠。在实验室阶段,选择了传递函数矩阵对角化的思想进行控制系统的设计。

### 2.3 控制矩阵

控制矩阵是传递函数矩阵对角化思想的重要内容。目前,在国内外的文章中<sup>[15-16]</sup>,基本都采用了根据几何关系确定控制矩阵的方法,因此,考虑利用几何关系确定控制矩阵。控制矩阵的主要作用是获得驱动器的期望位移。

首先考虑单块子镜,

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{T}_i, \quad (4)$$

式中  $i$  为子镜编号;  $\mathbf{T}_i = [t_{\text{tip}i}, t_{\text{tilt}i}, p_i]^T$  为第  $i$  块子镜的拼接误差列向量,  $t_{\text{tip}i}$  和  $t_{\text{tilt}i}$  是矢量,图 2 所示为正方向,  $p_i$  是矢量,垂直纸面向外为正方向;  $\mathbf{P}_i = [p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}]^T$  为第  $i$  块子镜的驱动器位移列向量,位移是矢量,垂直纸面向外为正;  $\mathbf{A}_i$  为第  $i$  块子镜的控制矩阵,维度  $3 \times 3$ 。

图 2 是拟采用的驱动器布置方式,  $p_1, p_2, p_3$  是三个驱动器,均匀分布在以子镜中心  $O$  为圆心的圆上,令任意两个驱动器之间的距离为  $a$ ,以  $O$  点为中心建立笛卡尔直角坐标系,  $t_{\text{tip}}$  和  $t_{\text{tilt}}$  分别是绕  $X$  轴和  $Y$  轴的倾斜误差。

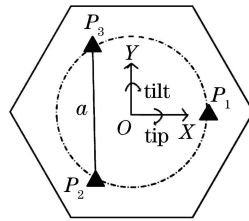


图 2 实验室采用的驱动器布置方式

Fig. 2 Arrangement form of actuator in the experiment

按照控制变量法,首先认为  $t_{\text{tip}}$  是变量,  $t_{\text{tilt}}$  和  $p_i$  为零,由此可以得到:

$$\begin{cases} p_{i1} = 0 \\ p_{i2} = -\frac{a}{2} \sin(t_{\text{tip}}) \\ p_{i3} = \frac{a}{2} \sin(t_{\text{tip}}) \end{cases} \quad (5)$$

同理,若  $t_{\text{tilt}}$  是变量,  $t_{\text{tip}}$  和  $p_i$  为零,可以得到:

$$\begin{cases} p_{i1} = -\frac{\sqrt{3}a}{3} \sin(t_{\text{tilt}}) \\ p_{i2} = \frac{\sqrt{3}a}{6} \sin(t_{\text{tilt}}) \\ p_{i3} = \frac{\sqrt{3}a}{6} \sin(t_{\text{tilt}}) \end{cases} \quad (6)$$

同理,若  $p_i$  是变量,  $t_{\text{tip}}$  和  $t_{\text{tilt}}$  为零,可以得到:

$$\begin{cases} p_{i1} = p_i \\ p_{i2} = p_i \\ p_{i3} = p_i \end{cases} \quad (7)$$

在小角度条件下,有以下近似:

$$\begin{cases} \sin(t_{\text{tip}}) \approx t_{\text{tip}} \\ \sin(t_{\text{tilt}}) \approx t_{\text{tilt}} \end{cases} \quad (8)$$

由(5)~(8)式可得:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3}a & 1 \\ -\frac{a}{2} & \frac{\sqrt{3}}{6}a & 1 \\ \frac{a}{2} & \frac{\sqrt{3}}{6}a & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

矩阵  $\mathbf{A}_i$  的条件数为 1.9, 是一个良态矩阵。假设固定子镜的底板为刚体, 即子镜之间的耦合为零, 对控制矩阵进行扩展用于多块子镜, 即:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{T}_n \end{bmatrix}, \quad (10)$$

(10)式可简写为

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{T}. \quad (11)$$

## 2.4 控制器设计

控制矩阵的建立意味着解耦的完成, 同时假定  $\mathbf{M}$  矩阵是一个常数矩阵。系统开环传递函数矩阵  $\mathbf{W}_k$  将会简化为一个对角阵, 即:

$$\mathbf{W}_k = h \times c \times \mathbf{I}. \quad (12)$$

该部分的主要工作围绕单输入单输出系统模型和控制器设计进行。单输入单输出系统开环传递函数  $w_k = h \times c$ , 除此之外系统存在着一定量的计算延时  $\tau_1$ , 即:

$$w_k = h \times c \times \exp(-\tau_1 s), \quad (13)$$

式中  $s$  为拉普拉斯算子。当相机采样频率远大于带宽时<sup>[17]</sup>, 可以得到:

$$\frac{1 - \exp(-T_s)}{T_s} \approx \exp\left(-\frac{T_s}{2}\right). \quad (14)$$

单输入单输出控制系统控制对象为延时环节, 延时为  $\tau = \tau_1 + T/2$ 。单输入单输出系统采用积分控制器  $c$ , 积分增益为  $k_i$ 。

$$c = \frac{k_i}{s}, \quad (15)$$

$$w_k(s) = \frac{k_i \exp(-\tau s)}{s}, \quad (16)$$

$$w_k(j\omega) = \frac{k_i \exp(-j\tau\omega)}{j\omega}. \quad (17)$$

开环幅频特性和开环相频特性分别为

$$|w_k(j\omega)| = \frac{k_i}{\omega}, \quad (18)$$

$$\phi(\omega) = -90^\circ - \tau\omega \times 57.3^\circ. \quad (19)$$

相位裕度(PM)为

$$\begin{cases} |w_k(j\omega_c)| = 1 \\ M_{PM} = \phi(\omega_c) + 180^\circ = 90^\circ - \tau\omega_c \times 57.3^\circ \end{cases}, \quad (20)$$

式中  $\omega_c$  为开环穿越频率。按照 PM 设计方法, 首先应该给定系统的期望 PM, 一般应大于  $60^\circ$ , 根据(20)式可以得到开环穿越频率和积分增益。

单输入单输出系统误差传递函数为

$$w_e(s) = \frac{e}{d} = \frac{1}{1 + w_k} = \frac{s}{s + k_i \exp(-\tau s)}, \quad (21)$$

$$|w_e(j2\pi f_e)| = 1, \quad (22)$$

式中  $f_e$  为误差带宽。系统误差带宽的大小决定了系统对干扰的校正能力; 误差带宽越大, 系统对干扰的校

正能力越强。误差带宽是拼接主镜主动控制系统的重要性能指标。根据(16)、(21)和(22)式,对延时环节采用一阶近似,得到误差带宽的计算公式为

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_i}{\tau(2 - k_i\tau)}} \quad (23)$$

误差带宽和积分增益呈正相关,一阶近似延时环节是为了方便计算误差带宽,但是也带来了其他问题。比如,一阶近似误差传递函数分母上出现的延时环节忽略了延时环节导致的峰值,该峰值对干扰的校正非常不利,要求其值小于2,可以借助计算机仿真选择比较好的控制器。当延时时间为0.2 s时,根据图3的结果,积分器增益分别选择为1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,所对应的峰值分别为1.19,1.31,1.44,1.59,1.77。

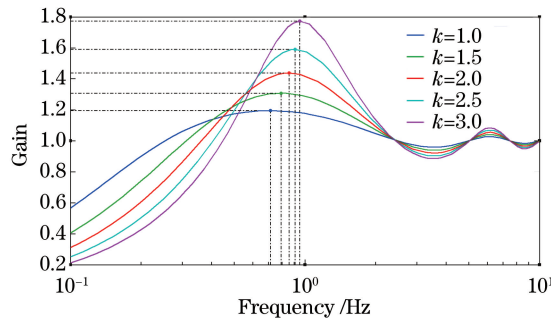


图3 积分增益对误差传递函数峰值的影响

Fig. 3 Effect of integral gain on the peak of error transfer function

系统闭环传递函数为

$$\omega_b = \frac{\omega_k}{1 + \omega_k} \approx \frac{k_i \exp(-\tau s)}{(1 - k_i\tau)s + k_i} = \frac{\exp(-\tau s)}{[(1 - k_i\tau)/k_i]s + 1} \quad (24)$$

根据(24)式可知,系统为一阶系统,阶跃响应调节时间为

$$t_s = \frac{4(1 - k_i\tau)}{k_i} \quad (25)$$

综上,积分器的设计需要兼顾PM、误差带宽、误差传递函数峰值增益和阶跃响应调节时间。足够的PM可以保证系统的稳定性和对延时不确定性的稳健性,积分增益越大PM越小。足够的误差带宽可以实现对动态拼接误差的实时有效校正,积分增益越大误差带宽越大。误差传递函数峰值会放大高频干扰,峰值与积分增益呈正相关。阶跃响应调节时间用来评价和设计系统对静态拼接误差的校正速度,校正速度和阶跃响应调节时间成反比。

已知系统总延时为0.2 s,哈特曼相机采样频率为5 Hz。系统要求PM为60°,误差带宽大于0.3 Hz,误差传递函数峰值小于1.5,阶跃响应调节时间小于2 s。根据(20)、(23)、(25)式和图3可知,积分控制器增益必须满足以下条件:

$$\begin{cases} k_i \leq 2.6 \\ k_i > 1.3 \\ k_i \leq 2 \\ k_i > 1.05 \end{cases} \quad (26)$$

令积分增益为2。实际PM为67°,公式计算误差带宽为0.32 Hz,仿真分析得误差带宽为0.36 Hz,灵敏度函数峰值为1.44,阶跃响应调节时间为1.2 s。

实际系统为计算机控制系统,因此,必须对控制器离散化。控制器离散化的方式有前向差分、后向差分、双线性、零极点等,其中后向差分和双线性应用较普遍。文中采用后向差分对积分控制器离散化得到

$$x_{cd} = \frac{0.4}{1 - z^{-1}} \quad (27)$$

### 3 实验结果

在实验室搭建由四块正六边形球面镜组成的拼接镜面,每块子镜的对边长为 100 mm,如图 4 所示。每个镜面上装有三个压电陶瓷驱动器,行程为 100  $\mu\text{m}$ ,共 12 个驱动器。图 5 为得到的共焦结果。

基于远场理论,当拼接镜完全共焦时,远场点能量最大值等于所有子镜能量最大值之和。所以,四块子镜共焦时远场最大值能量( $F_{\max}$ )与四块子镜远场最大值能量和( $U$ )之间的比值可以用来评价子镜共焦的质量,即

$$s_{\text{SR}} = \frac{F_{\max}}{U} \quad (28)$$

$s_{\text{SR}}$ 用于评价成像质量,实际测量四块子镜的  $s_{\text{SR}} > 0.96$ ,则共焦效果已经非常理想。

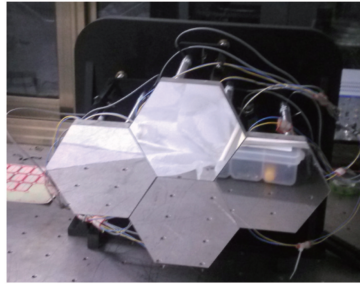


图 4 实验用拼接镜面

Fig. 4 Segmented mirror used in the experiment

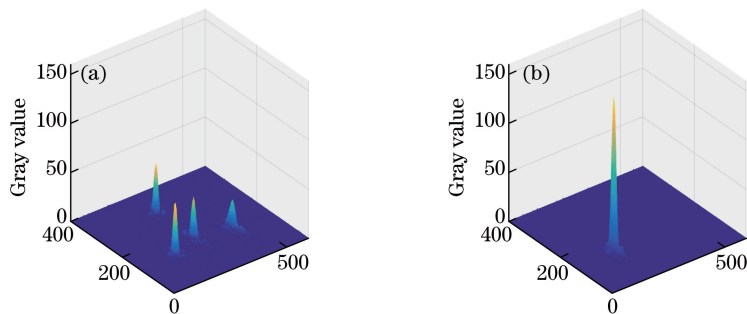


图 5 成像结果。(a)共焦前;(b)共焦后

Fig. 5 Results of Imaging. (a) Before co-focus; (b) after co-focus

基于解耦控制的四块子镜的静态倾斜误差校正如图 6 所示,黑色线为理论值,其他颜色曲线为四块子镜不同倾斜的校正曲线。解耦控制可以实现四块子镜的稳定控制,并且所有子镜的超调量不超过 10%,调节时间不超过 2.6 s。但是同样需要指出的是系统实际响应曲线和理论响应曲线有一定的差距,这说明系统模型有一定的偏差。

在开闭环条件下,系统分别在 400 s 的时间内采集 2000 组数据进行分析,图 7 为开环和闭环的倾斜误差均方根(RMS),其中黑色曲线代表开环数据,红色曲线代表闭环数据,光源波长  $\lambda = 650 \text{ nm}$ 。闭环倾斜误差均值几乎为 0,开环倾斜误差均值为  $-0.044\lambda$ 。闭环时倾斜误差峰谷值小于  $0.020\lambda$ ,开环时倾斜误差峰谷值为  $0.075\lambda$ ;闭环时倾斜误差标准差为  $0.002\lambda$ ,开环时倾斜误差标准差为  $0.009\lambda$ 。闭环 RMS 为  $0.002\lambda$ ,开环 RMS 为  $0.045\lambda$ 。根据上面的分析得到倾斜误差在 400 s 时间内均小于  $0.020\lambda$ ,扰动中的直流功率基本被完全校正,交流功率的 95% 以上被完全校正。

分别对开闭环倾斜误差时域离散数据进行功率谱估计得到图 8,图中黑色曲线表示闭环功率谱,红色曲线表示开环功率谱。由图 8 可知,两者的交点就是误差带宽。分别对开环和闭环功率谱部分曲线做直线拟合,由直线的交点得到系统的误差带宽为 0.34 Hz。图 9 是理论误差传递函数和实际误差传递函数的对比图。由图 9 可知,理论曲线和实际曲线基本相符,系统有关控制系统模型的论述是正确的。

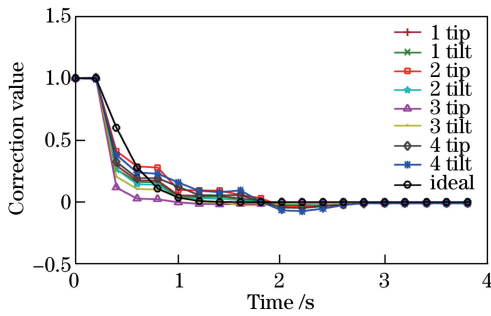


图6 四块子镜倾斜误差校正曲线

Fig. 6 Correction curves of tilt error based on four segments

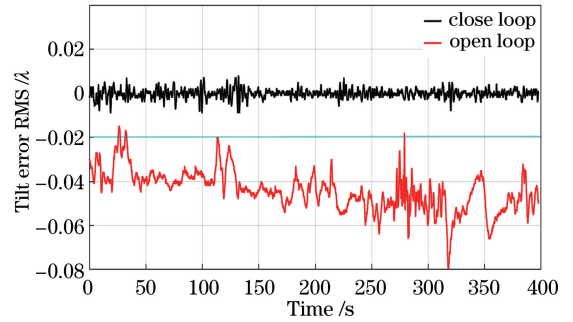


图7 开闭环倾斜误差时域变化图

Fig. 7 Time domain chart of tilt error in open and close loop

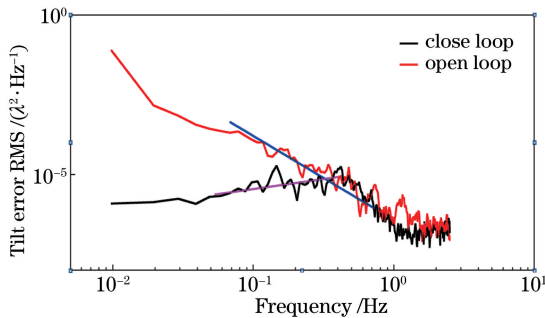


图8 开闭环倾斜误差频域变化图

Fig. 8 Frequency domain chart of tilt error in open and close loop

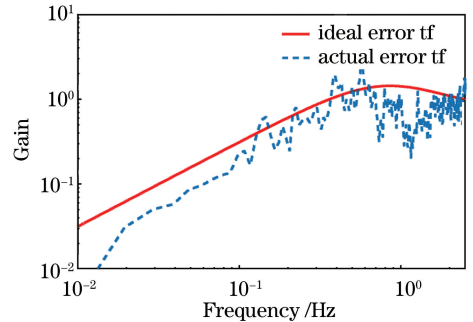


图9 误差传递函数

Fig. 9 Error transfer function

## 4 结 论

实现了拼接主镜主动控制,利用控制矩阵实现传递函数矩阵对角化和解耦,对单变量系统进行分析,并应用积分器改善系统性能。在实验室搭建由四块正六边形球面镜组成的拼接镜,完成了系统的主动共焦控制实验,验证了该方法的可行性。受限于相机速度和共相检测速度,并未完全实现平移误差的实时校正。但仍然可以从实验中得出以下有益结论:1) 主动共焦共相控制系统是一个纯延时环节,不同的实验系统延时不同,本文实验中延时为一个采样周期;2) 设计控制器还应考虑延时环节引起的相频特性峰值增益,该增益对控制系统对扰动的校正能力有非常消极的作用,因此其值必须小于2;3) 阶跃响应调节时间对静态拼接误差的快速校正有重要意义,阶跃响应调节时间越短,静态误差校正速度越快。

## 参 考 文 献

- [1] Jared R C, Arthur A A, Andreae S, *et al.* W. M. Keck Telescope segmented primary mirror active control system [C]. SPIE, 1989: 1-13.
- [2] Llacer J, Jared R C, Fuertes J M. Analysis of the W. M. Keck Telescope primary mirror control loop [C]. SPIE, 1990: 1024-1037.
- [3] Thompson P M, MacMynowski D G, Sirota M J. Control analysis of the TMT primary segment assembly [C]. SPIE, 2008, 7012: 70121N.
- [4] Dimmler M, Erm T, Bauvir B, *et al.* E-ELT primary mirror control system [C]. SPIE, 2008, 7012: 70121O.
- [5] Thompson P M, MacMynowski D G, Regehr M W, *et al.* Servo design and analysis for the Thirty Meter Telescope primary mirror actuators [C]. SPIE, 2010, 7733: 77332F.
- [6] Chanan G A. Design of the Keck Observatory alignment camera [C]. Conference on Precision Instrument Design in Conjunction with the Annual Meeting of the Optical Society of America, 1989, 1036: 59-69.

- [7] Zou W Y. New phasing algorithm for large segmented telescope mirrors[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(9): 2338-2344.
- [8] Lin Xudong, Chen Tao, Wang Jianli, *et al.* Co-focus experiment of segmented-mirror active optics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 563-569.  
林旭东, 陈涛, 王建立, 等. 拼接镜主动光学共焦实验[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 563-569.
- [9] Lin Xudong, Wang Jianli, Liu Xinyue, *et al.* Co-phase experiment of active optics for segmented-mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1520-1528.  
林旭东, 王建立, 刘欣悦, 等. 拼接镜主动光学共相实验[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1520-1528.
- [10] Wang Shanshan, Zhu Qidong, Cao Genrui. Cophasing methods of segmented space telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2435-2440.  
王姗姗, 朱秋冬, 曹根瑞. 空间拼接主镜望远镜共相位检测方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2435-2440.
- [11] Zhang Yong, Zhang Liang, Liu Genrong, *et al.* Experimental study of segmented mirrors co-phase using dispersed fringe sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0212004.  
张勇, 张靓, 刘根荣, 等. 基于色散条纹传感器的拼接镜面共相的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0212004.
- [12] Meng Yuhuang, Xu Shuyan, Xu Boqian. Method of segmented mirror co-phasing based on dispersed fringe sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0911006.  
孟玉凰, 徐抒岩, 许博谦. 基于色散条纹传感技术的拼接镜共相方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0911006.
- [13] Li B, Yu W H, Chen M, *et al.* Co-focus experiment of segmented mirror[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(6): 060706.
- [14] Li B, Yu W, Tang J, *et al.* Theory and experiment of phasing detection by use of two wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(1): 1-7.
- [15] Sedghi B, Müller M, Dimmler M, *et al.* Dynamical aspects in control of E-ELT segmented primary mirror (M1)[C]. *SPIE*, 2010, 7733: 77332E.
- [16] Lin Xudong, Chen Tao, Wang Jianli, *et al.* Active optics figure control of segmented mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 98-103.  
林旭东, 陈涛, 王建立, 等. 拼接镜的主动光学面形控制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 98-103.
- [17] Zou Weiyao. Figure control of segmented mirror in large astronomical telescope[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, National Astronomical Observatories, 1996.  
邹维耀. 大型拼接镜面天文望远镜的面形控制[D]. 南京: 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 1996.
- [18] 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.