

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.018

# 音圈电机型快速反射镜的驱动控制系统设计

王 帅 曹玉岩

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘要:** 针对一种两轴四音圈电机驱动的快速反射镜,提出了一种驱动控制方法。该方法为每个电机配置一个高带宽的电流环,通过控制电流给定量符号和大小,实现同一轴上两台电机的同步推挽运动;为了改善系统阻尼,抑制谐振,提高响应频率,基于快速傅里叶变换(FFT)谱分析的方法,精确测量了快速反射镜传递函数,并引入一个双二阶校正函数,对快速反射镜的开环响应特性进行改善。实际测试结果表明:快速反射镜高达20 dB的谐振峰得到有效抑制,-3 dB响应带宽由校正前的118 Hz提高到177 Hz,稳定时间由原来的151 ms降低到3.5 ms,超调量由原来的83.3%降低到1.51%,快速反射镜的动态响应得到明显改善,证明了该方法的有效性。

**关键词:** 快速反射镜;音圈电机;电流环;频率特性测试;谐振抑制

**中图分类号:** TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Design of control system for fast steering mirror driven by voice coil actuator

Wang Shuai Cao Yuyan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Aiming at the fast steering mirror driven by four voice coil actuators, a drive control method was proposed in this paper. The high bandwidth current loop was designed for each motor, and the push-pull motion was realized by changing the current direction and magnitude. In order to improve the system damping and suppress the mechanical resonance, accurate transfer function was identified based on FFT analysis, and then a compensator with a biquad filter was introduced. The test results show that the 20 dB resonance peak is effectively suppressed, -3 dB bandwidth is increased from 118 Hz to 177 Hz, the setting time is reduced from 151 ms to 3.5 ms, the overshoot is reduced from 83.3% to 1.51%. And the dynamic response of the fast steering mirror is improved obviously, which proves the validity of this method.

**Keywords:** fast steering mirror; voice coil actuator; current loop; frequency response measurement; resonance suppression

## 1 引 言

快速反射镜作为一种光束控制装置,具有谐振频率高、响应速度快、控制灵活等特点,在天文望远镜<sup>[1-3]</sup>、激光通信<sup>[4-5]</sup>、自适应光学<sup>[6]</sup>、精密跟踪控制<sup>[7]</sup>等领域得到了广泛应用。

快速反射镜的动态校正范围与响应速度直接影响着整个系统的性能。按驱动元件划分,主要有压电陶瓷型和音圈电机型两类。相比压电陶瓷驱动器,音圈电机驱

动的快速反射镜具有行程大、驱动电压低等优点,但因其惯量大、谐振频率低,控制带宽受到一定限制。为了提高响应速度,在驱动方式上,常采用双电机推拉驱动控制,这种驱动方法使得快速反射镜的机械系统受力均匀,工作的稳定性和环境适应性较好,同时对控制系统也提出了较高要求,要求一个轴上的两个电机出力大小相等、方向相反,实现同步运动;在结构设计上,常采用柔性无轴式支撑单元,具有结构简单、无摩擦力矩、响应速度快等优点,但柔性支撑单元与镜座、音圈电机共同构成了一个欠阻尼系统,虽然系统阶跃响应的上升时间较快,但是系

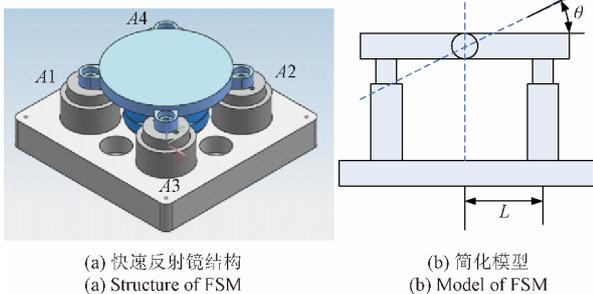
统超调量大、振荡次数多、建立时间长<sup>[8-9]</sup>。为了解决这个问题,有文献引入一种闭环校正的方法,对快速反射镜的响应特性进行改善<sup>[10]</sup>,如文献[8-9]通过位移传感器作为反馈,采用不完全微分 PID 控制算法,通过合理选择 PID 参数,可以将谐振峰抵消,从而改善系统的响应特性。文献[11]引入电涡流位移传感器,同时采用 LQG/LTR 控制算法,抑制了谐振峰,并提高了快速反射镜的响应带宽。上述闭环校正方法需要配置额外的位置传感器作为反馈元件。

为了解决上述问题,本文提出一种快速反射镜的驱动控制方法,该方法为每个电机配置一个电流环,通过控制电流给定量的符号和大小,可以实现同一轴上两台电机的同步推挽运动;为改善系统阻尼,抑制谐振,并提高响应速度,在精确测量快速反射镜传递函数的基础上,在电流环的输入端引入一个由双二阶环节构成的谐振峰校正函数,对快速反射镜的响应特性进行改善,满足无位置传感器的位置开环控制要求。

## 2 系统组成及工作原理

以天文望远镜应用为例,由快速反射镜(FSM)构成的精密跟踪系统,其工作模式主要分为两种:一种是基于光闭合的位置控制模式,当目标进入跟踪探测器视场后,由跟踪探测器提取目标脱靶量,然后进行闭环校正,保证目标稳定地跟踪在视场中心,该种模式要求快速反射镜响应速度快、带宽高,最大限度降低自身响应带来的延迟;另一种是非光闭合下的位置控制,主要用于摆扫和搜索,在这种工作模式下,要求快速反射镜跟随给定信号,反复摆动,并迅速“归零”,要求系统的响应快速无超调,一般采用自身配置的位置传感器进行闭环控制,或者位置开环控制。

针对上述应用需求,本文对一款快速反射镜进行了驱动控制系统设计。该快速反射镜采用两轴四驱动器结构,如图 1(a)所示,主要由机座、镜框、反射镜、4 个音圈电机及柔性支撑结构 5 部分组成。音圈电机采用移动音



(a) 快速反射镜结构  
(a) Structure of FSM

(b) 简化模型  
(b) Model of FSM

图 1 快速反射镜结构图及简化模型

Fig. 1 Structure and simplified model of FSM

圈的方式,这样可减小整个系统的转动惯量。4 个音圈电机呈正交分布,通过同一轴上 2 个音圈电机推拉作用,来实现快速反射镜的偏转控制。另外,为降低成本及设计复杂度,该型快速反射镜本身不带位置传感器,其自身位置控制通过电控系统的开环控制来实现。

在一维方向上反射镜可看作单自由度的扭转系统,系统的简化模型如图 1(b)所示。根据运动原理,其力矩平衡方程可表示为:

$$M = (J + 2m_c L^2) \ddot{\theta} + 2bL^2 \dot{\theta} + K_\theta \theta \quad (1)$$

式中:  $J$  为镜片的转动惯量,  $m_c$  为音圈电机线圈的质量,  $b$  为快速反射镜的阻尼系数,  $K_\theta$  为柔性支撑单元的转动刚度,  $L$  为电机作用点到转轴的距离,  $M$  为音圈电机施加的合力矩。

音圈电机的运动主要由电流来驱动产生,其电磁力矩方程及其作用快速反射镜时的力平衡方程如式(2)所示,其中  $i_c$  为机电枢电流,  $K_T$  力矩系数。

$$M = 2i_c K_T L \quad (2)$$

联合式(1)、(2),可以获得快速反射输出角度与输入电流之间的关系,如式(3)所示,忽略电流响应时间以及系统高阶谐振,这是一个二阶系统。

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{2K_T L}{(J + 2m_c L^2) s^2 + 2bL^2 s + K_\theta} \quad (3)$$

二阶系统具有两个重要参数: 谐振频率  $\omega_n$  和阻尼系数  $\xi$ 。谐振频率决定响应速度,其值越高,响应速度越快,而阻尼系数决定着系统响应的稳定性。

## 3 驱动控制系统设计

### 3.1 柔性支撑结构设计

柔性支撑结构是快速反射镜的重要单元,通过该结构实现驱动电机直线运动到镜面的转动。

本文采用如图 2 所示的柔性支撑单元。该柔性支撑具有三环结构,下环与底座相连接,起固定承载作用,中环承接下环和上环,负责 X 轴方向转动,上环与镜室连接,负责 Y 轴方向转动。柔性支撑单元的转动刚度  $K_\theta$  是

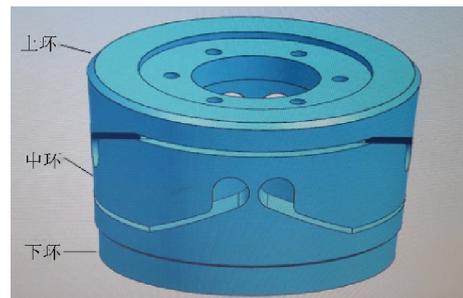


图 2 柔性支撑结构

Fig. 2 Structure of flexible support

其重要指标,其值与铰链的宽度成正比例关系<sup>[12-13]</sup>。由式(3)可得:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_\theta}{J + 2m_c L^2}} \quad (4)$$

转动刚度  $K_\theta$  越大,系统的谐振频率  $\omega_n$  就越高,但带来的问题是音圈电机的驱动力要更大,这也是采用双电机推拉驱动的重要原因之一。

### 3.2 双电机推拉驱动设计

双电机推拉驱动控制,可以有效提高快速反射镜的响应能力。已有的双电机控制中,常将两台电机反向并联或者依次串联进行驱动,其优势是两台电机只用一个驱动器,但是也存在弊端:对于反向并联接法,驱动器采集的是总的输出电流,无法对每台电机的电流进行精确控制;对于串联接法,虽然可以保证两台电机流过大小相

等的电流<sup>[14]</sup>,但是电机串联后,系统的反电动势系数加倍,那么驱动器的供电电压势必提高,另外,两台电机的参数也可能会有差别。

针对上述问题,本文采用一种双电机的并联控制方法:每台音圈电机对应一个驱动器,每个驱动器通过一个电流环对电机的电流进行控制,这样可以降低单个驱动器的功率要求和电压要求。图3所示给出了其中一个轴的驱动架构,另外一个轴的控制结构与此相同。为了保证同一轴上两台电机的同步推拉运动,该方法引入两个符号相反的比例控制器,电流的给定量经过这两个比例控制器后,输出两个符号相反的电流设定量,这样就保证同一轴上的两个音圈电机的电流是相反的,从而实现两台电机的推拉运动。另外,如果两台电机的参数不一致,可以通过调整比例系数,来弥补扭力的不一致。

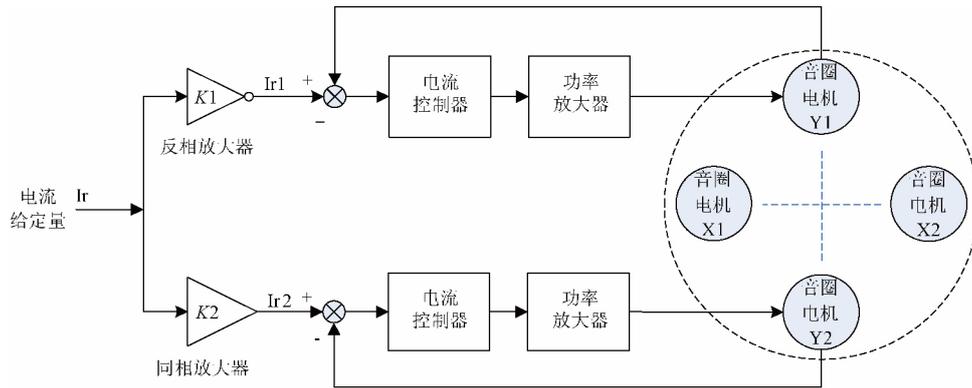


图 3 快速反射镜单轴驱动原理

Fig. 3 Schematic diagram of FSM driver

同一轴上的两个电流环单独进行设计,要保证两个电流环具有相同的带宽。电流环采用 PI 控制器,按照 I 阶系统设计<sup>[15]</sup>。

对于两个比例放大器的系数  $K1$  和  $K2$ ,可以通过分别标定单台电机作用下系统的刚度系数来确定,如果刚度系数基本一致,可以取  $K1 = 1$   $K2 = -1$ ,如果刚度系数有差异,可以通过两个系数进行补偿。

### 3.3 谐振峰补偿器设计

受限于结构设计和电机驱动能力,快速反射镜的谐振频率  $\omega_n$  不能无限提高。另外,由于快速反射镜的柔性支撑单元与镜座、音圈电机共同构成了一个欠阻尼系统,使得二阶振荡环节的谐振峰较高,系统超调量大、振荡次数多、建立时间长,难以满足快速反射镜开环状态下的位置控制要求。

为了解决上述问题,在电流环的输入端引入一个谐振峰校正函数,为便于分析,将快速反射镜的传递函数简化,如下:

$$G_{FSM}(s) = \frac{k}{(T_1 s)^2 + ps + 1} \quad (5)$$

本文设计的校正函数由一个二阶微分环节和一个二阶振荡环节组成,其具体表达公式如下:

$$G_C(s) = \frac{(T_1 s)^2 + ps + 1}{(T_n s)^2 + 2\xi_2 T_n s + 1} \quad (6)$$

在设计校正函数时,选取分子上的二阶微分环节与快速反射镜传递函数分母中的二阶环节一样,而对于校正函数分母上的二阶环节,通过对参数  $T_n$  和  $\xi_2$  进行选择和设计。

对于参数  $T_n$ ,其值越小,系统响应速度越快,但一个重要约束是不能超过实际驱动器的物理限制,根据式(7)所示的拉氏变化初值定理。

$$\lim_{t \rightarrow 0} g(t) = g(0_+) = \lim_{s \rightarrow \infty} s G_C(s) \quad (7)$$

式中:  $G_C(s)$  是谐振峰校正函数,  $g(t)$  是其时域表达式,那么有:

$$g(0_+) = \frac{T_1^2}{T_n^2} \quad (8)$$

由于校正函数放在电流环的输入端,其输出值就是电流环的输入值。假设校正函数的输入信号为  $r$ , 电流环的最大输入范围为  $[-I_N, I_N]$ , 那么要满足式(9)所示条件,才能保证谐振峰校正函数的输出不超出实际驱动器物理限制。

$$|r| g(0_+) \leq I_N \tag{9}$$

综合式(8)和式(9),有:

$$T_n \geq T_1 \sqrt{|r| / I_N}$$

对于参数  $\xi_2$ , 可以按照一般二阶系统的响应特性进行设计。适当增加阻尼系数  $\xi_2$ , 可以保证系统快速响应的同时,降低系统的超调量,减少稳定时间。

综上,校正后的快速反射镜传递函数如式(10)所示,这是一个可控的二阶振荡环节,通过合理的选择  $T_n$  和  $\xi_2$  就可以获得满足需要的响应特性。

$$G(s) = G_{FSM} G_C = \frac{k}{(T_n s)^2 + 2\xi_2 T_n s + 1} \tag{10}$$

### 3.4 传递函数辨识

设计谐振峰补偿器的关键是获得快速反射镜准确的传递函数<sup>[16]</sup>。本文采用基于快速傅里叶变换(FFT)谱分析的方法进行快速反射镜传递函数辨识。该方法利用信号发生器产生正弦扫频信号,作为电流环的输入信号,激励快速反射镜运动,同时,利用辅助的位移测量装置测量快速反射镜的位移响应,最后采用FFT谱分析方法,对采集的扫频数据处理,通过计算傅里叶系数  $a_n$  和  $b_n$ , 即可求出任一谐波的幅度和相位,而对于快速反射镜传递函数辨识而言,对输入的电流扫频信号和输出的位移响应信号进行同步采集,然后分别对两路信号作FFT变换,算出其对应的傅里叶系数与相位值,就可以求出输入信号和输出信号的幅度比和相位差,进而获得快速反射镜的频率特性数据。其原理如下。

在有限区间  $(t, t + T)$  内,绝对可积的任一周期函数  $x(t)$  可以展开成傅里叶级数:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \phi_n) \tag{11}$$

式中:  $T$  为信号  $x(t)$  的周期,角频率  $\omega = 2\pi/T$ ,  $a_n$ 、 $b_n$  为傅里叶系数,  $\phi_n$  为  $n$  次谐波的初相位,且有:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} x(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} x(t) \sin(n\omega t) dt$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2},$$

$$\phi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}$$

根据快速反射镜的模型进行传递函数辨识,辨识数

据既可以采用幅频数据,也可以采用相频数据,本文采用幅频数据,考虑到电流环的一阶响应时间  $T_c$ , 将式(10)转换为式(12)形式:

$$|G_{FSM}| = \frac{k}{\sqrt{[1 - (2\pi f T_c)]^2 + (2\pi f p)^2} \sqrt{1 + (2\pi f T_c)^2}} \tag{12}$$

采用上述公式以及测量得到的幅频特性数据,利用曲线拟合,就可以获得快速反射镜的传递函数。

## 4 实验结果

针对研制的一款口径为 90 mm、行程为  $\pm 5$  mrad 的快速反射镜样机,进行了驱动控制系统的设计与验证。首先针对单个音圈电机进行了电流环的设计与测试,然后借助电涡流位移传感器,进行了单音圈电机作用下系统刚度系数的标定,从而确定电流环中两个比例放大器的系数,再次通过扫频法,对包含电流环的快速反射镜进行了传递函数辨识,在此基础上,设计了谐振峰补偿器,对快速反射镜的动态性能进行改善。

构建的试验系统如图 4 所示。DSP 伺服控制器用来实现本文提出的谐振峰补偿器,它通过 4 路 DA 转换器发出 4 路电流设定命令,4 台音圈电机驱动器实现电流环,用来驱动快速反射镜两轴推拉运动,电涡流位移传感器作为辅助测量工具,用来系统刚度标定与传递函数测试,其输出的位移信号与电流给定信号一起进入数据采集系统,最后给上位机进行数据处理。

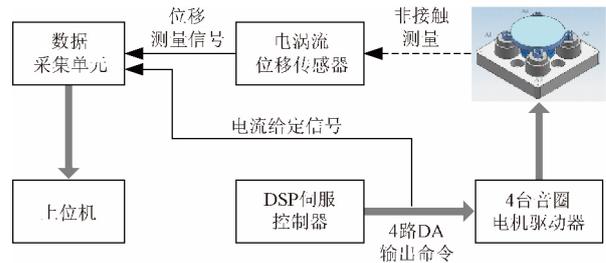


图 4 实验测试系统组成

Fig. 4 Block diagram of experiment system

快速反射镜的两个轴正交分布,理论上不存在耦合关系,因此每个偏转轴可以单独控制,限于篇幅,本文给出其中一个轴的测试结果。

### 4.1 电流环结果

本文所选音圈电机型号为 VCAR33-99,线圈电阻  $R_s$  为 4.2  $\Omega$ ,线圈电感  $L$  为 1.2 mH,力矩系数  $K_T$  为 5.9 Nm/A,最大工作电压 24 V,最大推力为 33 N,最大工作电流 5.6 A。电机驱动器的型号为 Copley4212Z,具有模拟电压输入接口,它通过改变电阻电容的方式进行电

流环参数设定,本系统将电流环带宽设计为 500 Hz,按照前面给出的设计方法,选取控制器参数  $T_1 = 0.0003$ ,考虑到功率放大器本身的放大倍数为 1.2 倍,因此,选取控制器比例系数  $K_p = 4$ 。

图 5 所示为 X 轴上两台音圈电机分别作用下,测试获得的输入电流与快速反射镜输出位移之间的关系,即系统的转动刚度。由测试结果可知,二者基本一致,因此,选取电流环输入端的两个比例系数  $K1 = 1$  和  $K2 = -1$ 。

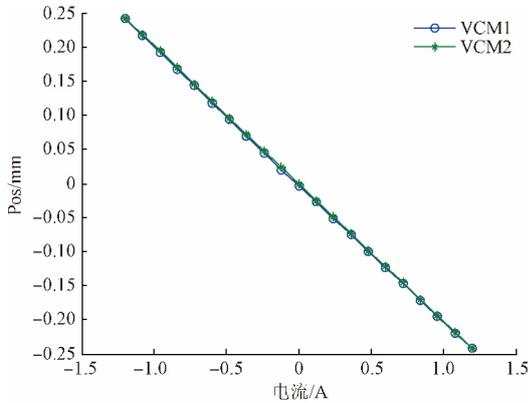


图 5 刚度测试结果  
Fig. 5 Test result of stiffness

4.2 传递函数辨识

试验系统的 DSP 伺服控制器通过 DA 输出电流扫频信号  $I_r$ ,并通过电涡流位移传感器测量快速反射镜的响应信号,输入输出信号通过双通道 16 bit、51.2 kHz 采样频率的数据采集系统进行同步采集。扫频信号采用线性扫频,初始频率为 1 Hz,终止频率为 500 Hz,扫频时间为 20 s。通过前文所述 FFT 分析的方法,获得快速反射镜 X 轴的频率特性曲线如图 6 所示。

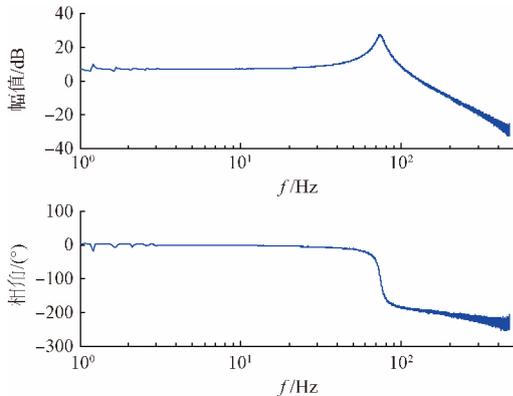


图 6 位置开环频率特性曲线  
Fig. 6 Open-loop frequency response of position

利用式(12)给出的拟合公式,并基于最小二乘算法进行数据处理,得到快速反射镜 X 轴的传递函数如下:

$$G_x(s) = \frac{3.09}{[(0.00205s)^2 + 0.00022s + 1](0.00032s + 1)} \quad (13)$$

由拟合结果可知,快速反射镜 X 轴的谐振峰出现在 77.4 Hz,阻尼系数为 0.054,谐振峰高度近 20 dB,一惯性环节的时间常数为 0.00032,与电流环 500 Hz 设计带宽相吻合。

4.3 谐振峰补偿器设计结果

按照式(9)给出的参数设计原则,综合快速反射镜  $\pm 5$  mrad 的运动范围,以及驱动器  $\pm 10$  V 的输入范围限制,实际选取  $T_n = 0.0005$ ,  $\xi_2 = 1$ ,这样保证快速反射镜在全行程范围都对谐振峰进行补偿,又不超出驱动系统的极限。校正函数如下:

$$G_c(s) = \frac{(0.00205s)^2 + 0.00022s + 1}{(0.0005s)^2 + 2 \times 1 \times 0.0005s + 1} \quad (14)$$

图 7 所示为实际测试获得的校正后快速反射镜的频率特性曲线,与校正前相比,快速反射镜在 77.4 Hz 处高达 20 dB 的谐振峰基本消除。

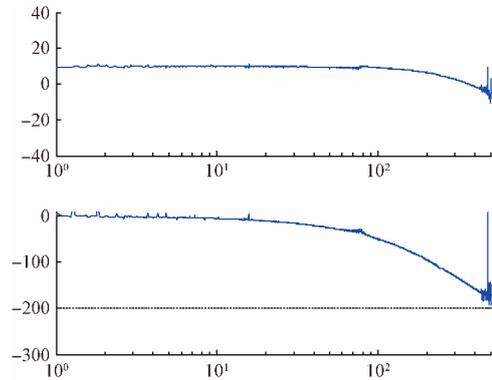


图 7 校正后的 BODE 图  
Fig. 7 BODE after correction

图 8 所示为通过电涡流位移传感器,测试获得的 X 轴校正前后的阶跃响应对比曲线,由于校正函数的阻尼

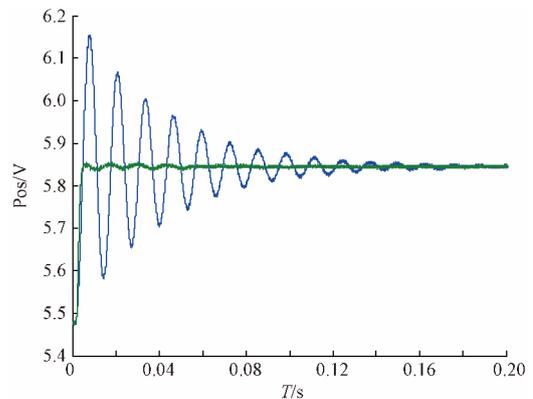


图 8 校正前后阶跃响应对比曲线  
Fig. 8 Comparison of step response before and after correction

系数取值较大,系统阶跃响应的超调量很小,并且振荡的幅度和次数明显减小,系统很快进入稳定状态。

表1所示为快速反射镜校正前后的参数对比结果。由结果可知,除了谐振峰被抑制,-3 dB 响应带宽由校正前的118 Hz 提高到177 Hz,稳定时间由原来的151 ms 降低到3.5 ms,超调量由原来的83.3% 降低到1.51%,快速反射镜的动态信号得到明显改善,这一方面降低了后期光闭环控制的延迟,另一方面,满足摆扫和搜索模式下的位置开环控制要求。

表1 快速反射镜校正前后性能对比

Table 1 Performance comparison of FSM before and after correction

	-3 dB 带宽/ Hz	上升时间/ ms	稳定时间/ ms	超调量/ %
校正前	118	2.3	151	83.3
校正后	177	2.0	3.5	1.51

## 5 结论

本文针对一款两轴四音圈电机驱动的快速反射镜,进行了驱动控制系统设计,给出了一种双电机控制方法,满足同一轴上两台音圈电机的同步推拉运动要求,通过FFT分析的方法,精确辨识了快速反射镜的传递函数,在此基础上,构建了双二阶补偿器,串联在电流环的输入端,对快速反射镜的谐振峰和阻尼系数进行改善,并给出了参数设计原则。该补偿器可以作为电流环的一部分,方便外环光闭环位置控制器的设计,另外,无须配置本地位置传感器,可以实现快速反射镜位置开环状态下的快速摆动控制要求。试验结果表明:快速反射镜在77.4 Hz 处高达20 dB 的谐振峰基本消除,并且响应带宽提高到177 Hz,稳定时间降低到3.5 ms,超调量仅为1.51%,快速反射镜的动态性能得到明显改善,可以满足系统实际应用要求。

### 参考文献

[1] CHO M, CORREDOR A, DRIBUSCH C, et al. Performance prediction of the fast steering secondary mirror for the giant Magellan telescope [C]. SPIE, 2012: 173-181.

[2] 徐飞飞, 纪明, 赵创社. 快速偏转反射镜研究现状及关键技术 [J]. 应用光学, 2010, 31(5): 847-850.

XU F F, JI M, CHAO CH SH. Status of fast steering mirror [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5): 847-850.

[3] 徐新行, 杨洪波, 王兵, 等. 快速反射镜关键技术研究 [J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1095-1103.

XU X X, YANG H B, WANG B, et al. Research on key technology of fast steering mirror [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10): 1095-1103.

[4] 任斌, 佟首峰, 宋延嵩, 等. 空间激光通信跟踪单元的高精度快速 PZT 驱动技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 420-425.

REN B, TONG SH F, SONG Y S, et al. Research on the driving technique of high precision and speedy piezo-electric ceramic transducer in fine tracking system of air laser communication [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 420-425.

[5] 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): 1991-1998.

DING K, HUANG Y M, MA J G, et al. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 1991-1998.

[6] 王玉坤, 胡立发, 王冲冲, 等. 液晶自适应光学系统中倾斜镜的建模与控制 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 771-779.

WANG Y K, HU L F, WANG CH CH, et al. Modeling and control of Tip/Tilt mirror in liquid crystal adaptive optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 771-779.

[7] 马佳光, 唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 218-227.

MA J, TANG T. Review of compound axis servomechanism tracking control technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 218-227.

[8] 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, 23(1): 53-61.

HEI M, LU Y F, ZHANG ZH Y, et al. Design of fast steering mirror based on dynamic model [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 23(1): 53-61.

[9] 鲁亚飞, 范大鹏, 范世珣, 等. 快速反射镜两轴柔性支承设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2574-2582.

LU Y F, FAN D P, FAN SH X, et al. Design of two-axis elastic support for fast steering mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(12): 2574-2582.

[10] 彭树萍, 于洪君, 王伟国, 等. 新型快速反射镜伺服系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1610-1615.

PENG SH P, YU H J, WANG W G, et al. Design of servo system for novel fast-steering mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1610-1615.

[11] Brown J M. Tracker development for the starfire optical range 3.5 meter telescope adaptive optics system [C]. SPIE, 2003: 240-249.

- [12] 周子云,高云国,邵帅,等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1547-1554.  
ZHOU Z Y, GAO Y G, SHAO SH, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1547-1554.
- [13] 徐新行,高云国,杨洪波,等. 车载大口径刚性支撑式快速反射镜[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 117-124.  
XU X X, GAO Y G, YANG H B, et al. Large-diameter fast steering mirror on rigid support technology for dynamic platform [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 117-124.
- [14] 李锦英,陈兴龙,杨涛,等. 一种驱动反射镜的控制系统[P]. 中国专利, CN103281018A, 2013.  
LI J Y, CHEN X L, YANG T, et al. Control system for driving fast steering mirror [P]. Chinese Patent, CN103281018A, 2013.
- [15] 王帅,阴玉梅,杨晓霞,等. 直流电机型力促动器的控制系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(1): 48-55.  
WANG SH, YIN Y M, YANG X X, et al. Design of the force actuator control system based on DC motor [J].

Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28(1): 48-55.

- [16] 时晶晶,姚佰栋,鲁加国,等. 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.  
SHI J J, YAO B D, LU J G. Modeling and transfer function identification of FSM system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2748-2752.

#### 作者简介



E-mail: wangxiaoshuai812@sohu.com

王帅,2005年于吉林大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要研究方向为光电望远镜精密跟踪和伺服控制技术。

**Wang Shuai** received B. Sc. from Jilin University in 2005 and Ph. D. from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, in 2010, respectively. Now he is associate researcher in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include fine tracking and servo control of telescope.