

# 用于快速反射镜的压电陶瓷驱动系统设计

王 帅 吴庆林 张 斌 刘 洋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘 要:** 设计了一种用于快速反射镜的压电陶瓷驱动系统,并进行了检测。首先分析了快速反射镜的驱动原理,并确定系统的主要设计指标;然后以 PA92 为驱动核心,分别进行输入级电路、滤波电路和高压放大电路的设计,该系统具有 3 路驱动通道:一路固定 100 V 输出;两路 0~100 V 可变输出,可实现快速反射镜的推拉驱动。实际测试结果表明:该系统输出电压的非线性度为 0.075%,最大纹波电压峰峰值为 8.2 mV,驱动 10  $\mu$ F 的等效负载时,100 V 大信号阶跃响应上升时间和下降时间约为 290  $\mu$ s,实际驱动 S340 型快速反射镜时,系统的一 3 dB 带宽达到 326 Hz,提高了快速反射镜的频率响应范围。

**关键词:** 快速反射镜;压电陶瓷;功率放大器;PA92

**中图分类号:** TN384 TN722.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Design of the PZT driver system for fast steering mirror

Wang Shuai Wu Qinglin Zhang Bin Liu Yang

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

**Abstract:** A PZT drive system for fast steering mirror was designed and tested. Firstly, the driving principle of fast steering mirror was analyzed, and the main design specifications were determined; then PA92 was taken the driving core, and the input stage circuit, filter circuit and the high voltage amplification were designed. The system has three driving channel, a fixed 100 V output and two 0-100 V variable output, can realize push-pull motion for fast steering mirror. The actual test results show that: the non-linearity of the output voltage is 0.075%, the maximum ripple peak voltage is 8.2 mV, for the equivalent of 10  $\mu$ F driving load, 100V large signal step response rise time and fall time is about 290  $\mu$ s, the actual driving S340 fast steering mirror, -3 dB bandwidth to achieve 326 Hz. The PZT drive system can improves the fast mirror frequency response range.

**Keywords:** fast steering mirror; piezoelectric ceramics; power amplifier; PA92

## 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、激光通信、自适应光学、精密跟踪控制等领域得到了广泛应用<sup>[1-9]</sup>。

一般,高带宽的快速反射镜多以压电陶瓷(简称 PZT)作为驱动器,它具有体积小、响应快、输出力大、发热量小、位置分辨率高等优点。从压电陶瓷驱动器的工作原理来说,有电压型驱动器和电流型驱动器 2 种,电压型驱动器利用 PZT 位移与其两端电压成近似线性关系的原理,控制其运动,电流型驱动器通过精确控制 PZT 的充电电流和时间来控制压电陶瓷的充电量,实现线性驱动<sup>[10-11]</sup>。相比较而言,电流型驱动器设计较为复杂,充电电流及时间较难控制,而电压型驱动器具有结构简单,易于实现等优点。另外,从快速反射镜的驱动结构上来说,为了保证系统的工作

稳定性和环境适应性,快速反射镜常采用双压电陶瓷驱动器,通过推拉运动方式,来控制反射镜在一维方向上的偏转,这种驱动方法使得快速反射镜的机械系统受力均匀,可靠性高,但对驱动控制系统也提出了较高要求,要求两个压电陶瓷实现同步运动。

针对两轴四 PZT 结构的快速反射镜,设计了一种电压型 PZT 驱动系统,它采用 3 路驱动器,可以实现两两 PZT 的推拉同步驱动,为快速反射镜的高带宽响应能力提供保障。

## 2 系统组成与工作原理

本系统以 PI 公司生产的 S340 型快速反射镜为驱动对象,其口径为 50 mm,空载机械谐振频率可达 900 Hz,其实物图如图 1 所示。



图 1 S340 型快速反射镜平台

S-340 平台采用 4 个压电陶瓷,每个轴上分布 2 个,两两推拉驱动,其驱动原理如图 2 所示。 $X$  轴和  $Y$  轴上的 2 个压电陶瓷串联起来工作,以  $X$  轴为例,压电陶瓷  $X_1$  的正端接固定的 100 V 电压, $X_2$  的负端接地,而  $X_1$  的负端和  $X_2$  的正端连接起来,并接入 0~100 V 可变电电压。实际工作时,当可变端输入电压为 50 V 时,使得每个压电陶瓷上的压降均为 50 V,压电陶瓷  $X_1$  和  $X_2$  的位移量相同,此时处于平衡状态;当可变端输入电压大于 50 V 时, $X_1$  上的压降小于 50 V,此时  $X_1$  的位移量减小,而  $X_2$  上的压降大于 50 V,其位移量增加,整体上而言,实现了  $X$  轴向左倾斜,同理而言,当可变端输入电压小于 50 V 时, $X$  轴向右倾斜。

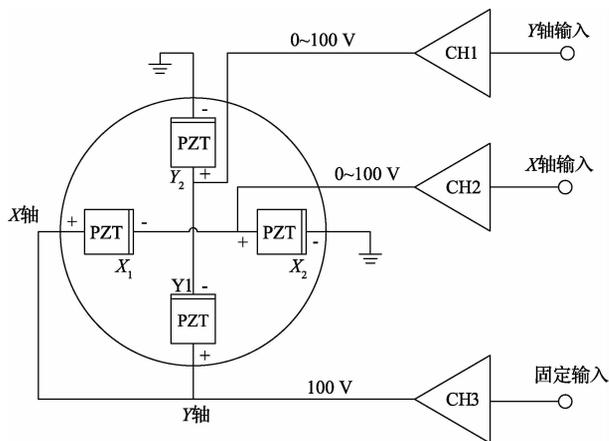


图 2 快速反射镜驱动原理

S340 虽然有 4 个压电陶瓷,但因为 2 个轴可以共用 1 个固定电压输入端,因此,只需要 3 个高压放大器。

压电陶瓷驱动的快速反射镜 S340 对驱动器的要求如下:

- 1) 3 路输出: 1 路固定 100 V, 2 路 0~100 V 可变输出;
- 2) 2 路 0~10 V 可变输入;
- 3) 驱动器响应频率大于 500 Hz;
- 4) 纹波电压 < 10 mV。

### 3 系统设计

#### 3.1 总体设计

鉴于压电陶瓷本身的特性和压电陶瓷驱动器的构造,使得其等效为一个大容量负载,能否快速地做到充放电,并保证系统的稳定性,是发挥其性能的关键<sup>[12]</sup>。一般,压电陶瓷的驱动电路有采用模拟功放驱动,也有采用 H 桥斩波驱动,H 桥斩波驱动具有效率高的优点,但是易产生谐波干扰,而模拟功放的优势在于线性度好,纹波电压低<sup>[13-14]</sup>,综合系统的精度要求,本系统采用模拟功放驱动。

对于快速反射镜的一个驱动轴来说,其等效模型如图 3 所示,其中, $V_1$  为所要设计的电压型驱动器,电容  $C_1$  和  $C_2$  分别等效为同一个轴上的两个压电陶瓷,根据 S340 手册,每个压电陶瓷的等效电容为  $4.6 \mu\text{F}$ ,那么每个驱动器的等效负载电容为  $9.2 \mu\text{F}$ 。

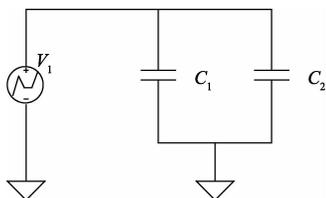


图 3 快速反射镜单轴等效模型

对于模拟功率放大器,负载特性直接决定着器件参数的选择。其中,压摆率  $SR$  和最大输出电流,直接决定系统指标能否实现。

根据压摆率  $SR$  的计算公式:

$$SR = 2\pi f V_{pp} (1 \times 10^{-6}) \quad (1)$$

根据设计要求,压电陶瓷静态工作电压点为 50 V,在 0~100 V 的范围内,其电压变化的最大幅度为 50 V,在 500 Hz 的频率下,算得  $SR = 0.16 \text{ V}/\mu\text{s}$ 。

功率放大器的电流输出能力直接决定着系统的响应速度。对于容性负载,其等效阻抗计算公式如下:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_L} \quad (2)$$

在上述公式中, $C_L = 9.2 \mu\text{F}$ ,  $f = 500 \text{ Hz}$ ,根据所给参数,算得  $X_c = 34.6 \Omega$ 。在最大电压幅度下,算得最大输出电流:

$$I_P = \frac{V_A}{X_c} = \frac{50 \text{ V}}{34.6 \Omega} = 1.45 \text{ A} \quad (3)$$

综合上述 2 个重要指标,选用 APEX 公司的模拟功率放大器 PA92,其最大输出电流可达 4 A,最大供电电压为 400 V,输出压摆率为  $50 \text{ V}/\mu\text{s}$ ,完全满足系统的指标要求,下面将针对该芯片展开系统设计。

整个驱动系统的组成如图 4 所示,主要包括输入源选择开关、缓冲电路、滤波电路、高压放大电路、供电电源等。

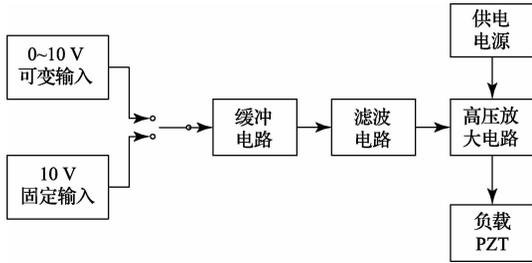


图 4 驱动器组成

### 3.2 输入级电路设计

整个系统包括 3 路驱动器, 其中的一路驱动器的原理图如图 5 所示。

驱动电路前端通过一个开关 J1 来选择输入源, 对于 0~10 V 可变输入, 由外部信号源给出, 对于固定信号输入, 则通过切换开关, 切换到固定电压输入端。

10 V 固定电压产生芯片采用 REF102, 其供电电压为 +15 V, 只需要外接几个电容, 就可产生高精度、高稳定度的 10 V 电压信号。

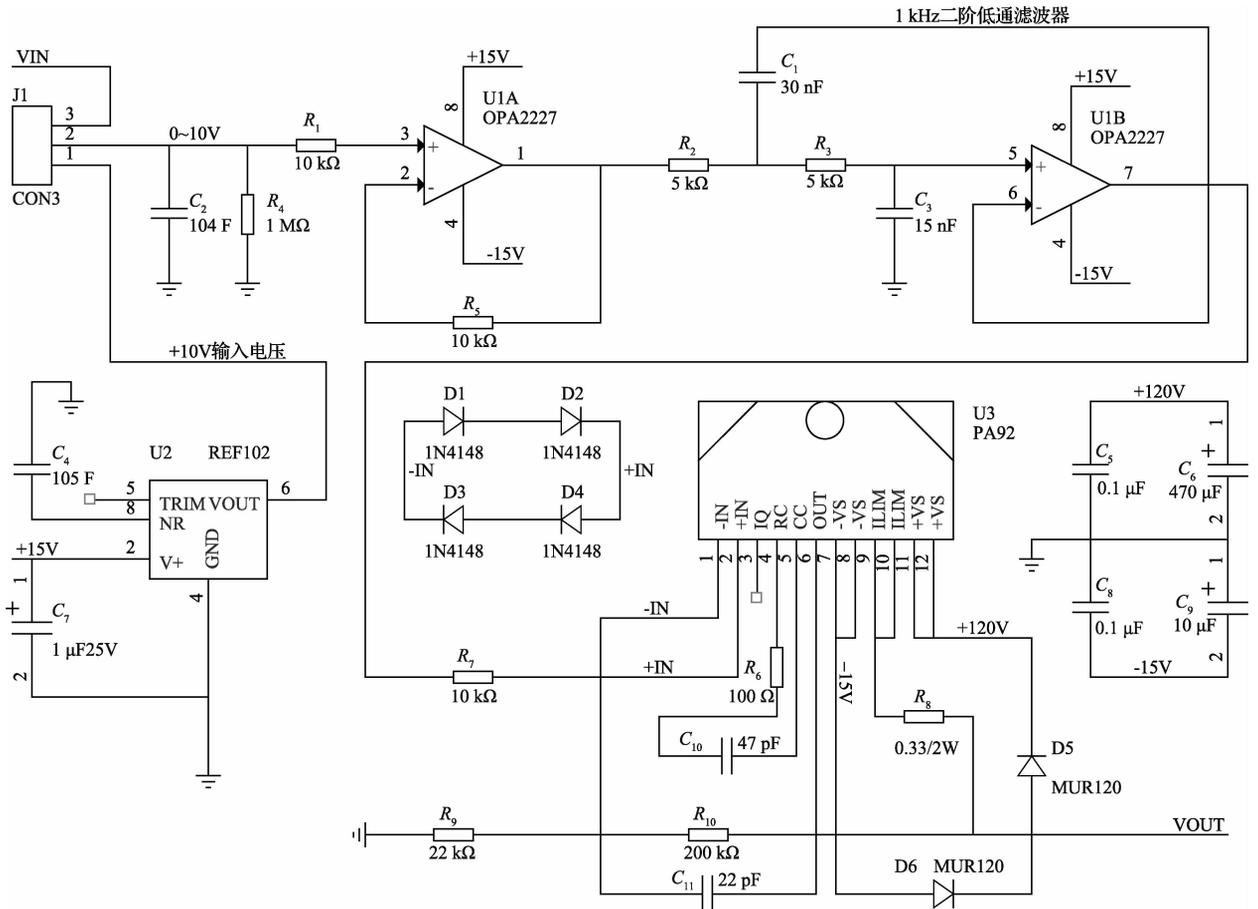


图 5 系统原理

输入端采用 OP4277 的一路运放, 构成一个电压跟随器, 具有很高的输入阻抗和很低的输出阻抗, 达到缓冲和隔离的作用, 以提高系统带载能力。

### 3.3 滤波电路设计

为保证输入信号的质量, 搭建了由运算放大器 U1B、电阻  $R_2$  和  $R_3$ 、电容  $C_1$  和  $C_3$  构成的二阶巴特沃斯低通滤波器, 其中, 选择  $C_1 = 30 \text{ nF}$ ,  $C_3 = 15 \text{ nF}$ ,  $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$ , 设计其 -3 dB 带宽为 1 kHz。

### 3.4 高压驱动电路设计

高压驱动电路是系统的核心, 通过对 PA92 配置合适的限流电阻、反馈电路、补偿电路、输入输出保护电路等, 就可以实现电压的稳定放大。

限流电阻: 理论上 PA92 可以最大输出 4 A 电流, 但输出电流越大, 器件的功耗也就越大, 为保护器件在正常范围内工作, 选择限流电阻为  $0.33 \Omega$ , 根据 PA92 手册可知, 其最大输出电流限制在 1.9 A, 满足 1.45 A 的设计要求。

反馈电路: 以 PA92 构成同相放大器, 具有输入阻抗高, 输出阻抗低, 带载能力强的优点, 根据设计要求, 放大倍率为 10, 因此, 选择  $200 \text{ k}\Omega$  和  $22 \text{ k}\Omega$  的反馈电阻;

补偿电路: PA92 放大器自身带有相位补偿接口, 通过接入特定的电阻和电容, 对相位损失进行补偿, 从而防止放大器产生自激振荡, 提高放大器的稳定性。根据 PA92 手册推荐, 接入  $47 \text{ pF}$  和  $100 \Omega$  的相位补偿电路。

输入输出保护:PA92 放大器的最大差分输入电压为 20 V,但为防止输入端反复施加电压产生过压现象,加入一组快速响应的二极管,将输入差分电压限制在 1.4 V,起到保护输入端的作用。另外,为了防止容性负载产生的高压直接打到 PA92 的输出端,造成器件损坏,将两个快速恢复二极管接到输出端和供电电源之间,使瞬态高压通过两个二极管从电源旁路到大地,达到保护器件的作用。

供电电源:PA92 在输出 4 A 最大电流时,管压降可达到 12 V,本系统要求输出 0~100 V 的可变电压,为保证系统的有效输出范围,选择非对称性供电方式,电源电压分别为 +120 V 和 -15 V。

散热性设计:压电陶瓷为容性负载,电源输出能量几乎全部消耗在放大器上,因此要进行合理的散热性设计,特别是选择合适的散热片,保证放大器的结点温度不超过 150℃,壳温不超过 85℃。

## 4 系统性能测试

系统完成设计、加工组装后,进行了一系列的测试,包括:线性度测试、静态纹波电压测试、动态响应能力测试,以及接入快速反射镜平台,进行了整个系统的实际驱动测试。

### 4.1 线性度测试

PZT 驱动器的电压线性度是描述系统精度的一个重要的指标,它反映的是驱动器的实际输出特性与理想直线间的最大误差。具体测试步骤:在输入端接入可变直流电源,在 0~10 V 的输入电压范围内,每隔 0.5 V 测量输出电压,将得到的结果利用最小二乘算法进行线性拟合,求得实际输出曲线和拟合曲线之间的偏差,其中,最大偏差与输出最大量程的比值就是系统的非线性度。

实测系统的线性度曲线如图 6 所示,其中最大偏差电压为 0.075 V,那么该驱动器输出电压的非线性度为 0.075%,由测试结果可知,该驱动器在 0~100 V 之间具有较好的线性度。

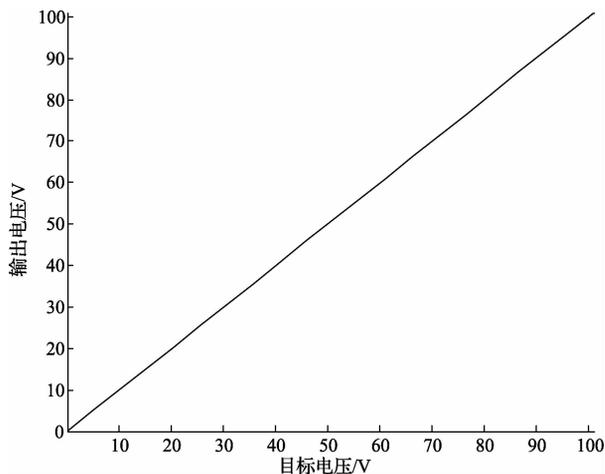


图 6 线性度测试曲线

### 4.2 静态纹波电压测试

输出纹波电压的大小反映了驱动器的稳态控制精度,要求纹波电压越小越好。该部分测试采用泰克示波器 TDS3012,将示波器设为交流耦合,开启 20 MHz 带宽限制,采用 10  $\mu$ F 电容作为模拟负载,分别测试输出端为 0 V、40 V、80 V、100 V 时的纹波曲线,测试结果如表 1 所示,最大纹波电压峰-峰值为 8.2 mV。

表 1 纹波电压测试结果

输出电压 $V_O$ /V	0	40	80	100
纹波电压 $V_{pp}$ /mV	2.6	8.2	8.2	8.2

### 4.3 动态响应能力测试

阶跃响应可以直接反映驱动系统的稳定性以及动态响应速度。当驱动器输入偏置电压为 5 V、幅值为 5 V 的方波信号时,对应输出 0~100 V 的阶跃信号(示波器衰减 10 倍),如图 7 所示带载 10  $\mu$ F 电容情况下获得的阶跃响应曲线,从图中可看出:100 V 大信号阶跃响应上升时间和下降时间约为 290  $\mu$ s,阶跃响应中没有出现过冲及振荡现象,说明驱动器具有足够的相位裕度,稳定性较好。

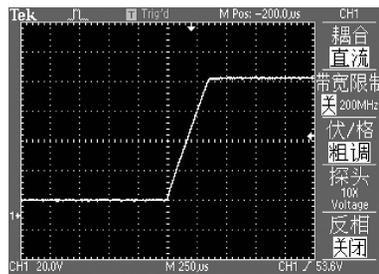


图 7 100V 阶跃响应曲线

如图 8 所示是正弦测试曲线,图中通道 2 为输入的正弦信号,其中偏置为 5 V,幅度为 5 V,而通道 4(示波器衰减 10 倍)为驱动器带载时的输出信号,其偏置为 50 V,幅度为 50 V,从测试结果可以看出:驱动器很好地将输入信号进行线性放大,波形失真小,说明驱动电源具有较强的动态跟随能力,满足 500 Hz 的频率响应要求。

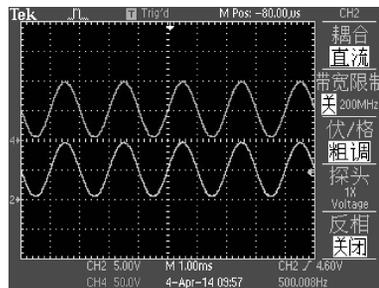


图 8 500Hz 正弦响应曲线

#### 4.4 系统整体性能测试

将所设计的驱动系统对快速反射镜 S340 进行了实际驱动测试,并和 PI 公司原配的驱动器进行了对比分析,实验测试系统如图 9 所示。

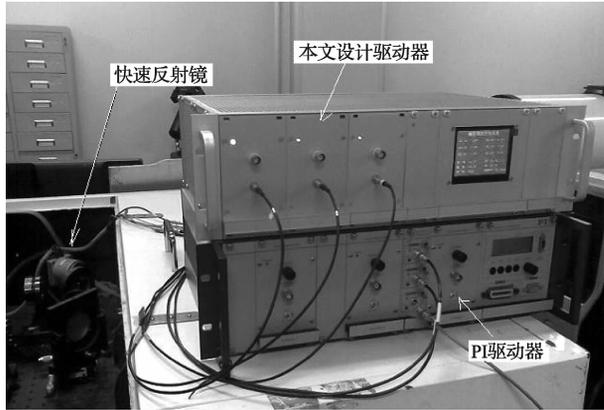


图 9 实验测试系统

测试过程中,信号源输出测试信号到驱动器,通过驱动器激励快速反射镜产生偏摆运动,在运动的过程中,同时记录快速反射镜内 LVDT 传感器发出的位移信息,通过扫频分析的方式,分别获得了 2 种驱动系统驱动 S340 时的响应能力。

由图 10 测试结果可知:采用连续输出电流为 300 mA 的 PI 标配驱动器,快速反射镜的-3 dB 带宽为 182 Hz,而采用本文设计的驱动器,由于驱动能力的提高,使得系统的-3 dB 带宽达到 326 Hz,大大提高了快速反射镜的响应能力。

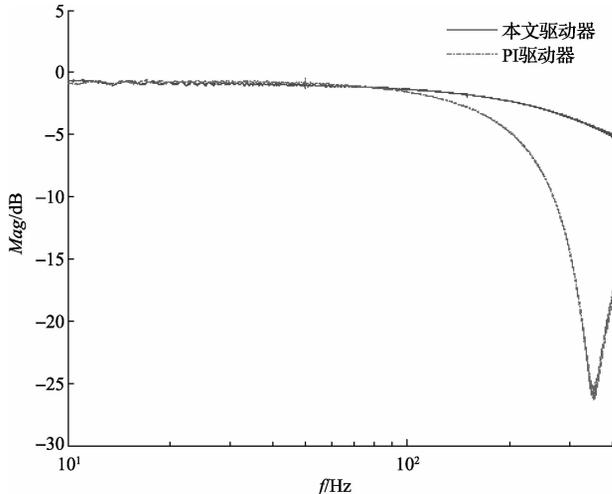


图 10 快速反射镜频率特性测试曲线

## 5 结 论

针对两轴四 PZT 驱动的快速反射镜,设计了一种压电陶瓷驱动系统,该系统采用 3 路压电陶瓷驱动器,1 路固定 100 V 输出,2 路 0~100 V 可变输出,可以实现快速反射镜的两轴推拉同步驱动控制,经测试表明:该系统输出电压的非线性度为 0.075%,最大纹波电压峰峰值为

8.2 mV,驱动 9.2  $\mu$ F 的等效负载时,100 V 大信号阶跃响应上升时间和下降时间约为 290  $\mu$ s,实际驱动 PI 公司的 S340 快速反射镜时,系统的-3 dB 带宽达到 326 Hz,大大提高了快速反射镜的高带宽响应能力。

## 参考文献

- [1] EATON D J, GAYHART A R. High speed pointing control system[J]. SPIE, 1992, 1697: 251-260.
- [2] AVICOLA K, WATSON J, BEEMAN B, et al. Design and performance of the Tip-Tilt subsystem for the KeckII telescope adaptive optics system [J]. SPIE, 1998, 3353: 628-637.
- [3] 饶长辉,姜文汉,张雨东,等. 云南天文台 1.2m 望远镜 61 单元自适应光学系统[J]. 量子电子学报,2006, 23(3):295-302.
- [4] LEE D, ELLERBROEK B, CHRISTOU J. First results of the Starfire Optical Range 3.5-m telescope adaptive optics system: point spread functions and tracking performance [J]. SPIE, 1998, 3353: 1080-1091.
- [5] FUGATE R Q. The Starfire Optical Range 3.5-m adaptive optical telescope[J]. SPIE, 2003, 4837:934-943.
- [6] STEIN J T, NEUFELD C. A fast steering tertiary mirror for the SOAR telescope[J]. SPIE, 2004, 5495:340-347.
- [7] 岳冰,杨文淑,傅承毓. 空间光通信中的快速倾斜镜跟踪实验系统[J]. 光电工程,2002,29(3):35-38.
- [8] 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.
- [9] 刘向东,傅强,赖志林. 多单元浮地级联式压电陶瓷执行器高压驱动电源[J]. 光学精密工程,2012, 20(3):597-606.
- [10] 荣伟彬,徐敏,张世忠. 基于电流与电压复合控制的压电陶瓷驱动器[J]. 压电与声光,2009,31(4):496-499,503.
- [11] 任斌,佟首峰,宋延高,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.
- [12] 龙传慧,凡木文,刘友,等. 多单元压电陶瓷类变形镜高压驱动电源[J]. 现代电子技术,2011,34(16):195-197.
- [13] 胡博,唐小萍,胡松,等. 用于光刻投影物镜微调的压电陶瓷驱动器设计[J]. 压电与声光,2013,35(2): 94-97.
- [14] 赵碧杉,尹达一,曾攀,等. 高精度大功率压电陶瓷驱动关键技术[J]. 压电与声光,2013, 35(6):853-857.

## 作者简介

王帅,1981 年出生,工学博士,助理研究员。主要研究方向为光电望远镜精密跟踪和控制技术等。

E-mail: wangxiaoshuai812@sohu.com