

文章编号 1004-924X(2023)17-2493-12

自适应光学千单元级高压驱动系统的设计和性能分析

邵 蒙, 李洪文, 王建立, 杨乐强*, 姚凯男, 邓永停
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 自适应光学技术可以对大气湍流造成的波前误差进行实时校正, 是实现大型地基望远镜高分辨率成像的关键技术。随着望远镜口径不断增大, 自适应光学系统的校正单元数达到千单元量级。首先从自动控制角度建立了自适应光学系统各电控环节的等效模型, 分析了系统延时对控制环节性能的影响。然后介绍了自适应光学电控环节中高压驱动系统的设计问题, 从自动控制角度分析了自适应光学系统对高压放大器闭环带宽的需求, 给出了分析结果。最后报道了千单元级自适应光学高压驱动系统的集成和测试工作。实验结果表明: 本文所设计的高压放大器可以实现 120 V 输出, -3 dB 带宽达到 5 000 Hz, 所设计的高压驱动系统经过集成后, 利用湍流屏等效模拟 60 Hz 格林伍德频率, 校正后的波前残差均值为 0.16λ , 可以实现千单元级压电变形镜的校正控制。

关键词: 自适应光学; 望远镜; 自动控制; 高压放大器

中图分类号: TH743; TM133 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233117.2493

Design and performance analysis of high-voltage drive system for thousand-element adaptive optics

SHAO Meng, LI Hongwen, WANG Jianli, YANG Leqiang*, YAO Kainan, DENG Yongting

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

* Corresponding author, E-mail: yanglq@126.com

Abstract: Adaptive optics technology can correct the wavefront error caused by atmospheric turbulence in real time and is the key technology to achieve high-resolution imaging of large ground-based telescopes. As the diameter of a telescope increases, the number of correction elements in the adaptive optics system can reach the order of one thousand. This paper first establishes the equivalent model of the control link of the adaptive optics system from the perspective of automatic control and analyzes the influence of the system delay on the performance of the control link. Then, it discusses the design of the high-voltage drive system in the control link of adaptive optics, analyzes the demand of the adaptive optics system for the closed-loop bandwidth of the high-voltage amplifier from the perspective of automatic control, and provides the analysis results. Finally, it describes the integration and test of the high-voltage drive system of the thousand-element adaptive optics system. The experimental results show that the designed high-volt-

收稿日期: 2023-01-15; 修订日期: 2023-03-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11973041, No. 12122304); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2020YFA0406502); 天文联合基金资助项目 (No. U2031126)

age amplifier can achieve 120 V output, and the bandwidth of -3 dB can reach 5 000 Hz. After the integration of the designed high-voltage drive system, the turbulence screen is used to simulate the equivalent 60 Hz Greenwood frequency, and the corrected mean residual error of the wavefront is 0.16λ . The designed high-voltage drive system can achieve calibration control of the thousand-element piezoelectric deformable mirror.

Key words: adaptive optics; telescopes; automatic controls; high-voltage amplifiers

1 引言

自适应光学是一门集合了光学、电子学、机械学和控制学等多种学科的新兴技术。它能够主动补偿大气扰动,已成为大口径地基望远镜高分辨率成像的重要手段^[1]。自适应光学技术主要通过波前传感器、波前校正器、波前控制器和高压驱动系统等装置来完成大气扰动补偿。随着望远镜口径的增大,自适应光学系统的规模(波前子孔径数和波前校正器单元数)也在不断的扩大^[2]。目前,国内的大口径高分辨成像望远镜自适应光学系统已达到千单元量级。这对自适应光学系统的各环节的开发研制、控制方法和电控集成等方法带来了新的挑战。

目前,国外研制团队在大口径天文观测的自适应光学成像领域处于领先地位。Hale, VLT, LBT, MMT, 以及未来 TMT, ELT 等望远镜均采用自适应光学系统^[3-8]。从大口径自适应光学技术方向来看,法国 CILAS 公司研制的自适应光学系统已经达到 5 000 余单元规模,处于国际领先水平^[8]。

我国的天文望远镜自适应光学高分辨力成像技术也处于蓬勃发展阶段。在波前校正器研制方面,陈俊杰、林旭东等^[9-10]分析比较了各类型变形镜的结构形式、驱动方式和性能,论述国内变形镜技术的发展现状;然后,林旭东等报道了 137 单元和 961 单元压电变形镜的研制工作^[11-12]。

在波前控制器研制方面,文献[13]-[15]分别报道了 349 单元和 961 单元波前处理器的研制工作。文献[16]-[18]报道了基于 GPU 并行计算的自适应光学波前控制方法。文献[19]报道了一种桌面 97 单元自适应光学系统的性能测试情况。

在控制方法方面,文献[20]对自适应光学系统中的鲁棒性控制技术开展研究,期望同时提升

系统的稳定性和校正性能。文献[21]基于变量带误差模型的子空间辨识方法,建立了自适应光学系统的状态空间模型,以提高自适应光学系统的控制性能和稳定性。

在高压放大器电路设计方面,文献[22]设计了一种基于分立功率元件的压电陶瓷驱动器线性放大电路。文献[23]设计了一种解耦补偿压电陶瓷驱动器,以减少驱动电路的非线性滞后。

自适应光学系统压电变形镜的物理驱动装置——高压驱动系统,随着自适应光学系统规模的不断增大和观测需求的不断提高,其设计和开发难度也不断提升,主要体现在高压驱动系统规模庞大、驱动信号精度要求高、响应速度快、驱动电压高、功耗大等。同时在研制时需要兼顾高压驱动系统的设计指标与性能、体积,系统元器件和功耗、成本,系统布局布线与可靠性、实用性等。该系统的开发往往需要从小规模系统经研制和使用反复迭代。但目前针对自适应光学高压驱动系统的研制和自适应光学系统的集成方面的报道却较少。本文主要讨论了自适应光学系统的驱动集成,尤其是高压驱动系统的研制和测试问题,并从自动控制角度分析自适应系统各环节等效模型对控制性能的影响,从而完成高压驱动系统的设计。

2 自适应光学系统的组成

根据光学衍射理论,望远镜的衍射极限下理论角分辨率 θ 为:

$$\theta \approx 1.22 \lambda / D, \quad (1)$$

其中: λ 为波长, D 为望远镜口径。为了提高光电望远镜的角分辨率,需要进一步增大望远镜的口径。但是大气湍流会使光波的位相和振幅发生畸变,使得望远镜的成像质量变差。自适应光学技术可以实时地测量并补偿畸变的光学位相波

前,改善光波品质,提升成像质量。

典型的自适应光学系统主要由波前传感器、波前校正器、波前控制器和高压驱动系统等部分组成,如图 1 所示。其中,高压驱动系统主要由多通道 DA 转换卡和高压放大器等装置组成。波前传感器主要用于实时探测动态波前误差。波前控制器将根据波前传感器测量得到的波前误差,经过控制运算后得到波前校正的电压控制量。高压驱动系统接收波前控制器输出的数字形式的电压控制量,经过 DA 转换和高压放大,输出功率驱动信号作用于波前校正器。波前校正器受高压放大器驱动进行波前校正,波前传感器继续进行波前误差实时探测,最终完成闭环控制,提升成像质量^[7]。

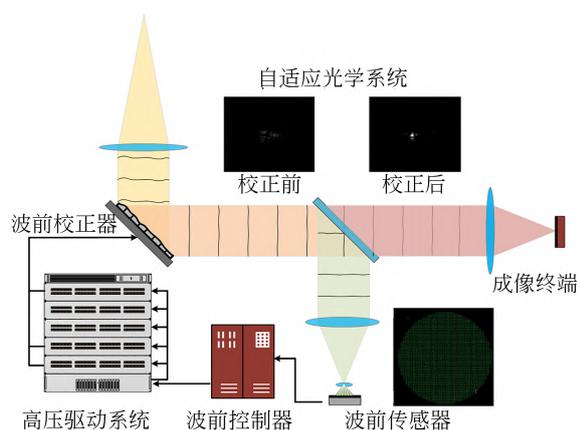


图 1 典型自适应光学系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of typical adaptive optics system

2.1 波前校正器

波前校正器是自适应光学系统中的关键部件,不仅要有足够大的行程及足够数量的执行单元数,还要具有较高的快速响应能力以满足对大气扰动实时校正的要求。

根据自适应系统的空间采样分布与系统等效斯特列尔比的关系^[15],波前校正器的执行单元数量可估计为:

$$N \approx (D/r_0)^2, \quad (2)$$

其中 r_0 为大气相干长度。对于 4 m 口径的望远镜,若 $r_0=10$ cm,波前校正器的执行元件单元数量约为 1 600;若 $r_0=15$ cm,波前校正器的执行元件单元数量约为 710^[14]。因此,4 m 口径光电望远镜系统的自适应系统规模在千单元量级。

波前校正器的行程也会随着望远镜口径的增大而增大^[24],即有:

$$\delta = \frac{3\lambda}{2\pi} \sqrt{L} \left(\frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{6}}, \quad (3)$$

其中 L 为系数。波前校正器行程的增大意味着压电陶瓷需要更多的叠层,从而增大了高压放大器负载的等效容值,这对系统驱动端高压放大器的驱动能力提出更高的要求。

961 单元变形镜采用分离促动器连续镜面结构^[12],促动器采用压电陶瓷(PZT)促动器变形镜在单个促动器作用下的最大面形校正量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 。

2.2 波前传感器

目前,波前传感器主要有棱锥波前传感器、剪切干涉仪和夏克-哈特曼(Shack Hartmann, SH)波前传感器等。其中,SH 波前传感器在天文望远镜中的应用最广泛^[1]。SH 波前传感器通常由子透镜阵列和高速 CCD 探测器两个部分构成。波前经子透镜阵列分束后聚焦到 CCD 探测器上,经过计算质心偏移量及波前复原算法可以得到误差向量。其采样频率和读出方式在很大程度上决定了系统的控制带宽。

2.3 波前控制器

波前处理器的任务是将传感器探测到的具体畸变信息,经过控制运算转换为可以作用于校正器的电压信号。由于转换过程涉及大规模的数据运算,因此是整个自适应光学系统的运算核心部分。传感器采样频率不变时,系统的运算延时直接关系到控制带宽。

3 自适应光学系统控制环路模型和分析

在高分辨率成像领域,自适应光学系统的采样频率只有达到 1 000~2 000 Hz,才能保证波前校正控制带宽在 100 Hz 以上^[14]。

典型的自适应光学系统控制环路框图如图 2 所示,其主要环节将由波前传感器、波前控制器、DA 板卡、高压放大器和压电变形镜组成。

根据系统控制环路框图,自适应光学系统控

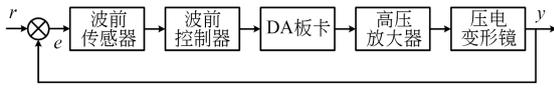


图 2 自适应光学系统控制环路框图

Fig. 2 Control loop block diagram of adaptive optics system

制环路的开环传递函数可以表示为:

$$G_{AO}(s) = \frac{K_{AMP}}{T_1s + 1} \cdot \frac{K_{DM}}{T_2s + 1} \cdot \frac{K_i}{s} \cdot \frac{1 - e^{-T_{s1}s}}{T_{s1}s} \cdot e^{-\tau_c s} \cdot \frac{1 - e^{-T_{s2}s}}{s} \cdot e^{-\tau_0 s}, \quad (4)$$

其中:将高压放大器传递函数等效为一个惯性环节 $\frac{K_{AMP}}{T_1s + 1}$, K_{AMP} 为高压放大器增益, $\frac{1}{T_1} = 2\pi f_1$, f_1 为高压放大器的闭环带宽;变形镜传递函数等效为一个惯性环节 $\frac{K_{DM}}{T_2s + 1}$, K_{DM} 为压电变形镜增益, $\frac{1}{T_2} = 2\pi f_2$, f_2 为压电变形镜的闭环带宽;控制器一般采用积分环节 $\frac{K_i}{s}$, K_i 为积分增益;波前传感器的传递函数等效为 $\frac{1 - e^{-T_{s1}s}}{T_{s1}s} \cdot e^{-\tau_c s}$, T_{s1} 为波前传感器的采样周期, τ_c 为传感器采样延时; DA 板卡传递函数等效为 $\frac{1 - e^{-T_{s2}s}}{s}$, T_{s2} 为 DA 板卡零阶保持器周期;计算延时、传输延时传递函数统一等效为 $e^{-\tau_0 s}$, τ_0 为系统延时。

将 $e^{-T_s s}$ 因子利用泰勒级数展开,并忽略二阶以上高次幂项,将采样和保持传递函数积分性质部分等效为一个纯延时环节,即有:

$$\frac{1 - e^{-T_s s}}{T_s s} \approx e^{-T_s s/2}. \quad (5)$$

由于变形镜传递函数的闭环带宽远大于系统带宽,分析时将它等效为一个比例增益环节。因此,自适应光学系统控制环路的开环传递函数可以近似表示为:

$$G_{AO}(s) = K_{AO} \cdot \frac{e^{-\tau s}}{sT_1s + 1}, \quad (6)$$

其中: $K_{AO} = K_{AMP} \cdot K_{DM} \cdot K_i / T_{s2}$ 为系统开环增益, $\tau = T_{s1}/2 + \tau_c + T_{s2}/2 + \tau_0$ 为系统开环等效延时。如图 3 所示,首先模拟 2 kHz 波前传感器的采样频率, 500 μ s 系统延时, 高压放大器的闭环带宽为 5 kHz 时,通过调整积分环节增益 K_i , 获得

一组闭环频率特性曲线,随着系统延时增加到 1 000 μ s, 或者波前传感器采样频率下降到 1 kHz, 由于延时作用增大了系统的相位滞后, 降低了系统的开环相位裕度, 系统闭环系统可能会不稳定或时域响应变慢。

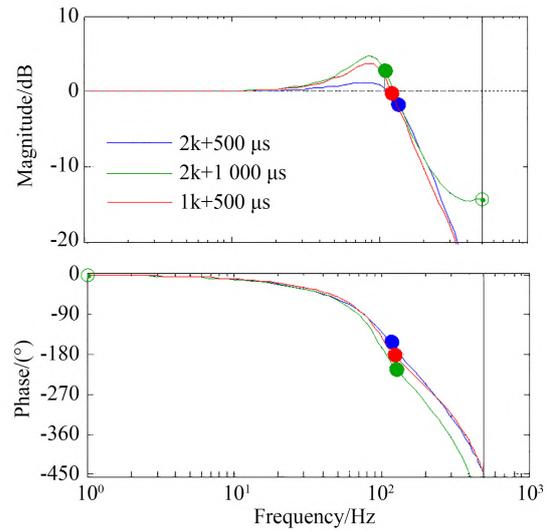


图 3 控制环路闭环频率特性曲线

Fig. 3 Closed loop frequency characteristic curves of control loop

从自动控制角度来看,自适应光学系统是一个受纯延时限制的控制系統,其系統闭环带宽主要由其等效保持器的采样周期和系統延时决定。

为了保证自适应光学系統控制环节稳定,需要重点考虑系統延时对系統相角滞后的影响。自适应光学系統控制环节的相频特性为:

$$\varphi(\omega) = -90^\circ - \frac{360^\circ}{2\pi} \omega\tau - \arctan T_1\omega. \quad (7)$$

自适应光学系統控制环节的相位裕度 γ 可以表示为:

$$\gamma = \varphi(\omega) + 180^\circ = 90^\circ - \frac{360^\circ}{2\pi} \omega\tau - \arctan T_1\omega. \quad (8)$$

为了保证系統稳定,设计控制环节的開环传递函数的相位裕度为 60°。根据式(8)可以计算系統的開环截止频率 ω_c 。

自适应光学系統控制环节的幅频特性可以表示为:

$$L(\omega) = 20\lg K_{AO} - 20\lg\omega - 20\lg\sqrt{T_1^2\omega^2 + 1}. \quad (9)$$

令式(9)等于零,并将根据式(8)求得的开环截止频率 ω_c 带入可以得到:

$$20\lg K_{AOc} - 20\lg \omega_c - 20\lg \sqrt{T_1^2 \omega_c^2 + 1} = 0, \quad (10)$$

其中: K_{AOc} 为对应控制环节开环传递函数的相位裕度为 60° 时系统的增益,在其他增益已知情况下即可获得积分环节增益 K_i 。

仿真中,令系统采样和保持环节的等效延时为 $1\ 000\ \mu\text{s}$,计算和传输延时从 $500\ \mu\text{s}$ 扩大到 $1\ 000\ \mu\text{s}$ ($100\ \mu\text{s}$ 步进),得到系统的开环频率特性曲线,如图 4 所示。

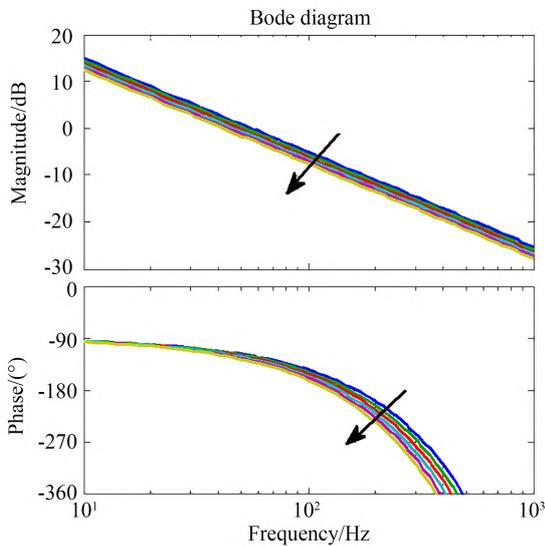


图 4 控制环路开环传递函数的频率特性曲线

Fig. 4 Frequency characteristic curves of open loop transfer function of control loop

系统闭环传递函数为 $H(s) = \frac{G_{AO}(s)}{1 + G_{AO}(s)}$,

得到系统闭环传递函数的频率特性曲线,如图 5 所示。系统误差传递函数为

$$E(s) = \frac{1}{1 + G_{AO}(s)}$$

得到系统误差传递函数的频率特性曲线,如图 6 所示。

分析结果表明,在自适应光学系统波前传感器曝光时间和帧频确定的情况下,应尽力缩短波前处理器的计算时间和电控系统的信号传输延时,并在高压放大器系统允许的情况下,尽量缩短数模转换时间,并减小高压放大器的响应时间,即一定程度上提高高压放大器的闭环带宽。

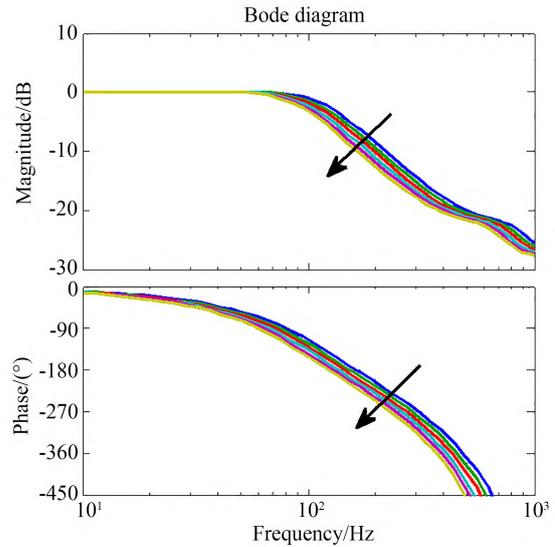


图 5 控制环路闭环传递函数的频率特性曲线

Fig. 5 Frequency characteristic curves of closed-loop transfer function of control loop

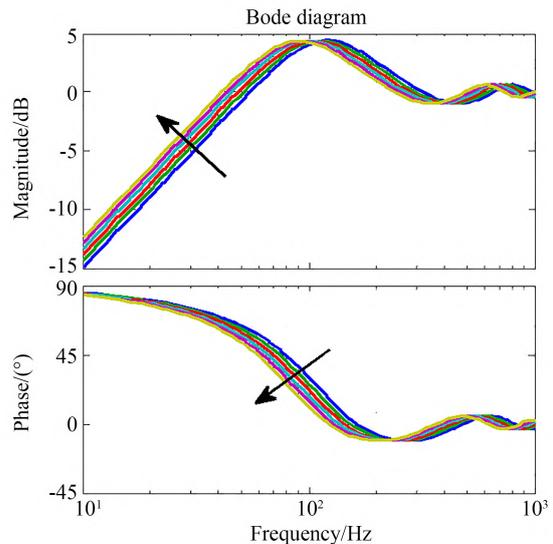


图 6 控制环路误差传递函数的频率特性曲线

Fig. 6 Frequency characteristic curves of control loop error transfer function

4 高压驱动系统设计

4.1 DA 转换板卡

自适应光学系统的高压驱动系统是实现自适应光学闭环校正的物理驱动环节,其控制性能对自适应光学系统功能实现起着至关重要的作用。高压驱动系统主要由 DA 转换卡和高压放大器部件组成。

DA 转换板卡通过网络交换机接收波前控制器输出的校正电压数字控制量,经过 DA 转换芯片完成数模转换,将模拟量信号输送到高压放大器完成高压驱动。DA 转换板卡在控制环节中可以等效为一个零阶保持器和一个较小的延时环节。根据前文分析,为了使自适应光学系统获得更好的校正性能,DA 转换板卡应选用高速嵌入式处理芯片和高速低延时 DA 转换芯片,以减小传输和等效延时。

DA 转换板卡主要由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)和多通道模数转换芯片构成。FPGA 采用 Xilinx 的 Virtex-5 系列,系统最高工作时钟达到 500 MHz。DA 芯片采用 AD5370,它具有 40 通道 16 位 $-4\sim 8\text{ V}$ 的模拟输出,建立时间不超过 $30\ \mu\text{s}$ 。FPGA 与 DA 芯片之间采用 SPI 总线通信,最高通信时钟可达 50 MHz,以满足自适应光学系统高速闭环校正的需求。DA 芯片各通道模拟量将通过高密度输出接口对外连接,经过合理的 PCB 布局一块 DA 转换板卡可实现 240 通道的模拟量输出控制。

4.2 高压放大器闭环带宽分析

高压放大器可以看作一个能量转换环节,将小幅度模拟信号放大为功率驱动信号,完成对波前校正器的高速高精度驱动。这里仍然从电控集成和自动控制角度对高压放大器的设计进行分析。

为了得到高压放大器性能对自适应系统控制环节的影响,应该考虑高压放大器闭环带宽 f_1 和自适应系统控制环节闭环带宽和误差带宽的关系。系统闭环带宽与系统开环截止频率正相关。为了更加直观,利用系统开环截止频率与高压放大器闭环带宽的关系说明高压放大器闭环带宽对自适应系统控制环节的影响。理想情况下,假设高压放大器为一个比例放大环节 K_{AMP} ,设定系统的开环相位裕度为 60° ,且系统延时为 $500\ \mu\text{s}$,分别设定波前传感器的采样频率为 2 kHz 和 1 kHz,利用式(10)计算系统理想的开环截止频率。仿真中将高压放大器等效为 $\frac{K_{AMP}}{T_1s+1}$,令其闭环带宽从 1 000 Hz 扩大到 6 000 Hz(1 000 Hz 步进)。仿真分析结果如图 7 和图 8 所示。

仿真结果表明,随着高压放大器闭环带宽的

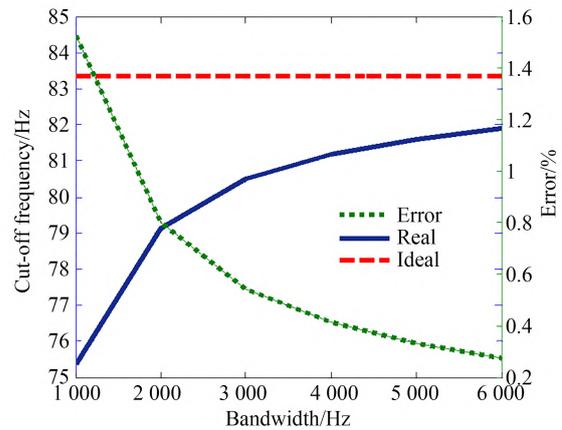


图 7 2 kHz 采样时高压放大器闭环带宽的影响曲线
Fig. 7 Influence analysis curves of closed-loop bandwidth of high voltage amplifier during 2 kHz sampling

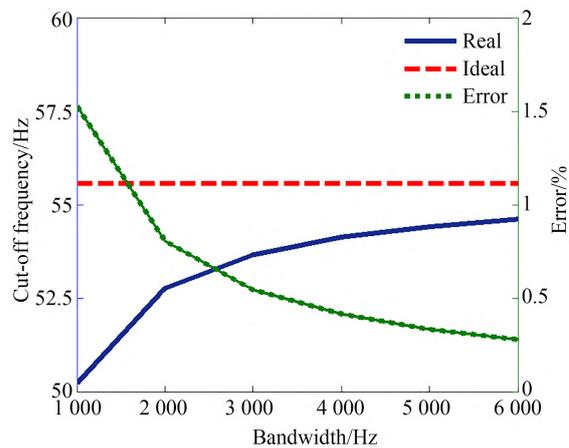


图 8 1 kHz 采样时高压放大器闭环带宽的影响曲线
Fig. 8 Influence analysis curves of closed-loop bandwidth of high voltage amplifier during 1 kHz sampling

增大,系统的开环截止频率越来越接近理想的开环截止频率,当高压放大器闭环带宽大于 3 000 Hz 时,增益误差已经小于 1%。理论上提高高压放大器的闭环带宽能够提高自适应系统控制环节对误差的抑制能力。实际上,为了保证系统稳定,避免高频噪声的影响,同时考虑高压放大器对容性负载驱动能力的限制,高压放大器闭环带宽过大会增大系统的尺寸和功耗,因此,高压放大器的闭环带宽设计在 3 000~5 000 Hz,能够满足工程需求^[25]。

4.3 高压放大器设计

已知变形镜压电陶瓷的最大驱动电压为 120 V,压电陶瓷的等效容值 C_1 约为 $0.3\ \mu\text{F}$,按

照前文分析,高压放大器输出的闭环带宽设为 5 000 Hz,输出信号的响应时间 T_p 小于 100 μ s。若保证高压放大器能够输出 5 000 Hz 的交流信号,高压放大器的最大输出电流为:

$$i_{pp} = \pi f C_L U_{pp} = \pi \times 5\,000\text{ Hz} \times 0.3 \times 10^{-6}\text{ F} \times 120\text{ V} \approx 0.57\text{ A} \quad (11)$$

计算电路响应阶跃信号输出电流至少为:

$$i_p \approx \frac{C_L U_{\max}}{T_p} \approx \frac{0.3 \times 10^{-6}\text{ F} \times 120\text{ V}}{100 \times 10^{-6}\text{ s}} \approx 0.36\text{ A} \quad (12)$$

本文所述的高压驱动系统采用的功率放大电路采用基于高速低压运算放大器和率器件构成两级放大结构。这种结构布局、驱动能力和功耗尺寸在千单元级自适应系统中具有更大优势。图 9 所示为高压放大器两级放大结构框图。

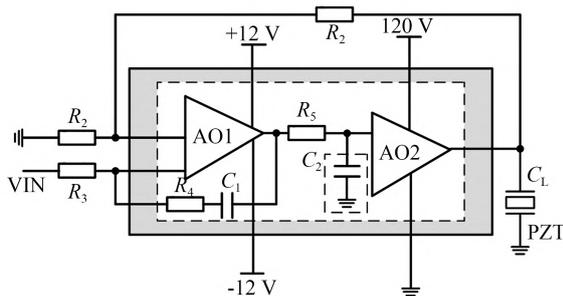


图 9 高压放大器的两级放大结构框图
Fig. 9 Block diagram of two-stage amplification structure of high voltage amplifier

反馈通道由电阻 R_1 和 R_2 构成,电路的放大倍数 F 为 $1 + R_2/R_1$ 。放大器的开环传递函数在低频段可以表示为:

$$A_o(s) = \frac{A_{oo}}{1 + T_{Ao}s} \quad (13)$$

电路的反馈增益 β 为放大倍数的倒数,因此放大电路的闭环传递函数可以表示为:

$$A_c(s) = \frac{A_{oo}}{1 + \beta A_{oo}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{T_{Ao}}{(1 + \beta A_{oo})} s} \quad (14)$$

放大电路的闭环传递函数在低频段的增益 A_{cc} 可以表示为:

$$A_{cc} = \frac{A_{oo}}{1 + \beta A_{oo}} = \frac{1}{\frac{1}{A_{oo}} + \beta} \approx \frac{1}{\beta} \quad (15)$$

电路中加入由 R_3, R_4 和 C_1 构成的校正环节,用以降低该级的高频增益,避免振荡,同时保证电路中频段相角裕度。DA 板卡的输出为 0~5 V,设计电路的放大倍数为 24,可以实现 120 V 的电压输出。

5 自适应光学系统电控集成

自适应光学系统电控部分集成框图如图 10 所示。其电控部分主要包括控制计算机、GPU 矩阵乘法处理计算机、终端成像相机、波前传感器相机、千兆网络交换机、DA 转换卡机箱、高压放大器机柜、可编程稳压电源和压电变形镜等装置。其中,波前传感器相机通过 CameraLink 接口完成图像采集卡之间的互联,一路信号送给主控计算机实现软件界面显示,一路信号送给 GPU 处理计算机。GPU 处理计算机在系统

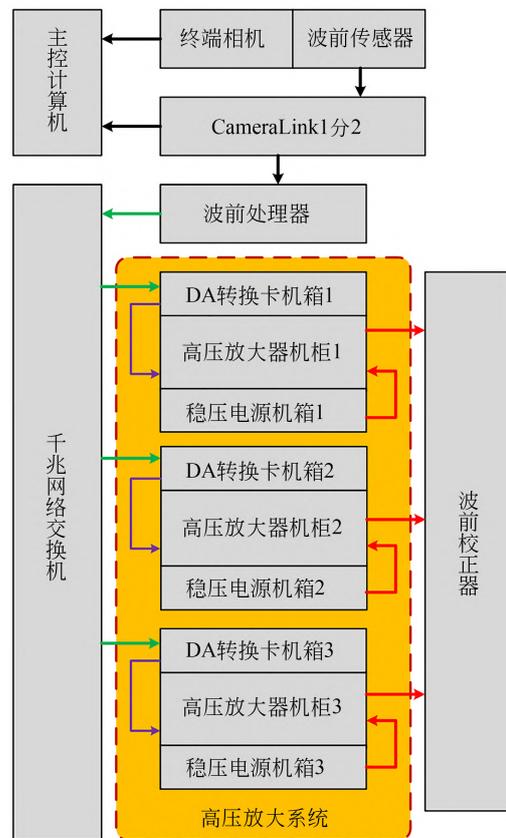


图 10 自适应光学系统电控部分集成框图
Fig. 10 Integrated block diagram of electric control part of adaptive optics system

中负责大规模的矩阵乘法并行计算,在完成控制运算后,将得到的校正电压控制量数字信号输出到千兆网络交换机上。千兆网络交换机通过网口将校正电压控制量的数字信号发送给 DA 转换卡机箱,一个 DA 转换卡机箱可以实现 480 通道的模拟量输出,3 个 DA 转换卡机箱可以实现千单元级压电变形镜的驱动。一个 DA 转换卡机箱和一组放大器机箱及其供电机箱集成在一个控制机柜中组成高压放大系统,由供电机箱中的可编程稳压电源对高压放大器进行功率端供电。本文所述的千单元级高压放大系统由 3 个控制机柜组成。高压放大系统的功率输出信号通过专业定制线缆与压电变形镜连接。

高压放大系统的高压放大器机箱实物如图 11 所示。千单元级自适应光学系统的高压放大系统实验样机布局如图 12 所示。



图 11 高压放大器机箱实物

Fig. 11 Physical drawing of high voltage amplifier cabinet



图 12 高压放大系统实验样机布局

Fig. 12 Physical layout of experimental prototype of high voltage amplification system

6 实验与结果

为了验证所设计的高压放大系统集成后的性能,采用集成驱动线缆和 $0.33 \mu\text{F}$ 电容模拟压电陶瓷,利用信号发生器作为放大器模拟源进行动态测试。令高压放大器跟踪输出 $5\,000 \text{ Hz}$ 正弦信号的驱动能力效果,如图 13 所示。通过图 13 可以看到,高压放大器在响应频率为 $5\,000 \text{ Hz}$ 的输入信号时输出信号峰峰值为 84.84 V 左右,输出衰减不超过 -3 dB ,满足设计要求。

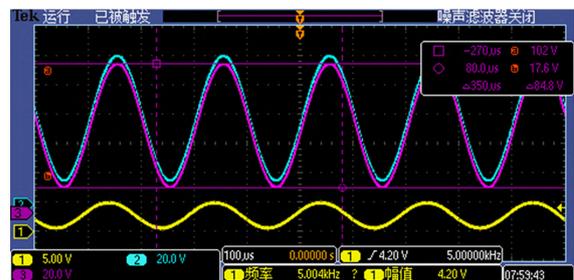


图 13 高压放大器正弦波信号响应曲线

Fig. 13 Sine wave signal response curves of high voltage amplifier

然后测试放大器的上升时间,结果如图 14 所示。测试结果显示,放大器输出信号的上升时间(90% 稳态)小于 $100 \mu\text{s}$,满足设计要求。

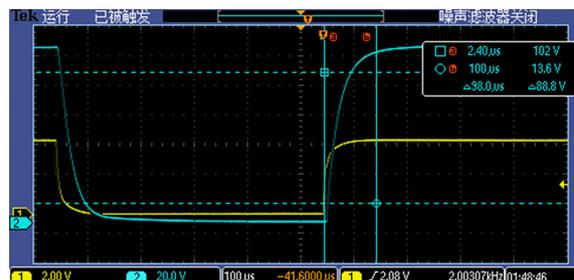


图 14 高压放大器放大信号的上升响应曲线

Fig. 14 Amplified signal rising response curve of high voltage amplifier

利用 DA 转换器作为放大器模拟源进行高压放大系统驱动链路测试,结果如图 15 所示。

最终所设计的高压放大系统经过组网集成后,在某型千单元级压电变形镜系统上进行验证。本系统采用 961 单元变形镜,其有效光瞳口

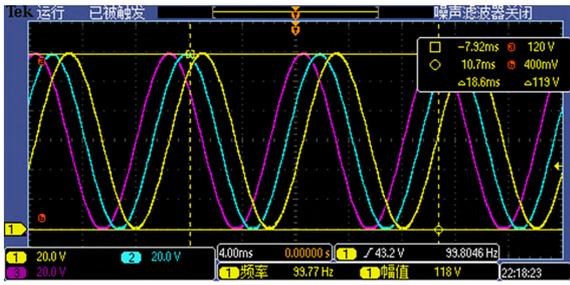


图 15 DA 转换器为模拟源的高压放大器响应曲线
Fig.15 Response curve of high voltage amplifier with DA converter as analog source

径为 235 mm。变形镜采用 PZT 型压电陶瓷促动器,单个促动器行程为 5 μm ,促动器间距为 7 mm,呈矩形排布方式。所使用的 SH 波前传感器的有效子孔径数为 1 020,波前传感器相机采用 FirstLight 公司 Ocam2 相机,相机靶面分辨率为 240 \times 240,像元尺寸为 24 μm ,最高采样帧频可达 2 000 Hz。SH 波前传感器的微透镜阵列排布为 37 \times 37,单个微透镜口径为 200 μm ,焦距为 7 mm^[18]。

利用桌面自适应光学系统对压电变形镜进行静态校正实验,得到系统校正前后的远场光斑图像如图 16 所示。可以看出,校正前远场光斑图像的灰度值峰值为 3 347,校正后的远场光斑图像灰度值峰值为 45 876,远场光斑的能量集中度

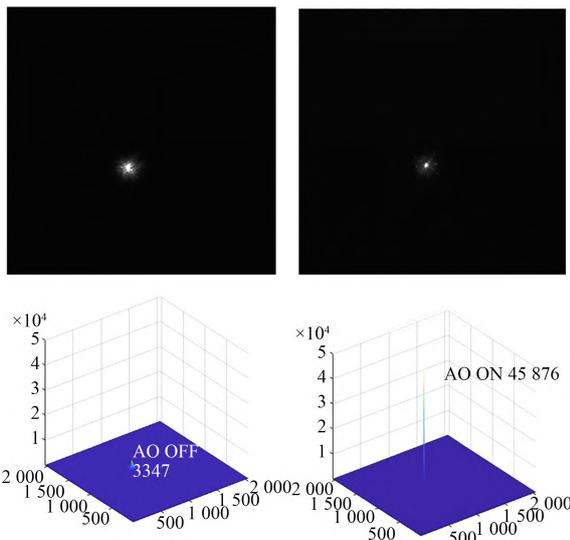


图 16 校正前(左)校正后(右)的光源成像效果对比
Fig.16 Contrast of light source imaging effect before (left) and after (right) aberration correction

明显提高。

利用湍流模拟器进行自适应光学动态像差校正实验,湍流模拟器等效模拟的大气相干长度为 11 cm,等效模拟的格林伍德频率为 60 Hz。为验证组网后高压放大器的动态驱动性能,使用压电变形镜进行所有像差的校正。按照文献[18]的动态像差测试方法,系统高阶像差均方根值校正前后的功率谱变化如图 17 所示,由图可以看出,系统的 0 dB 误差抑制带宽可以达到 100 Hz。

系统入射的波前高阶像差均方根值校正前后的变化如图 18 所示,校正前系统入射波前为 0.5 λ ~1.3 λ ($\lambda=600\text{ nm}$),均值为 0.83 λ ,校正后系统的波前残差明显降低,校正后的波前残差均

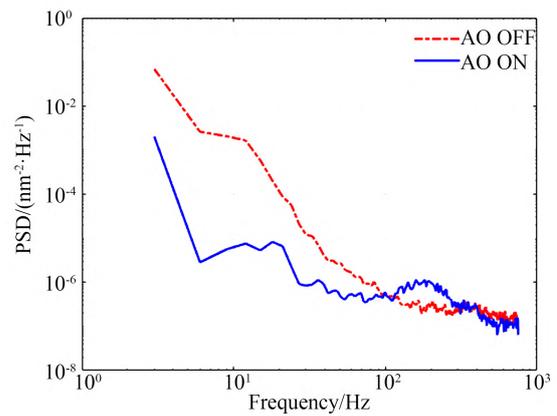


图 17 校正前后系统波前残差功率谱
Fig.17 Power spectra density of residual wavefront error before and after correction

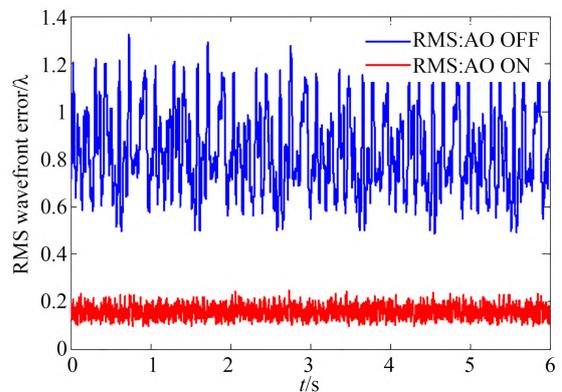


图 18 校正前后系统的波前残差曲线
Fig.18 Residual wavefront error before and after correction

值为 0.16λ , 约为 100 nm。因此, 本文分析和设计的高压放大系统可以满足千单元变形镜的高动态驱动性能要求。

7 结 论

本文完成了千单元自适应光学高压驱动系统的集成和测试工作, 从自动控制角度分析了电

控系统延时和放大器系统闭环带宽对自适应光学系统性能的影响, 并设计了千单元自适应光学高压放大系统。该系统能够实现千单元量级的高速校正信号高压驱动, 放大器 -3 dB 带宽达到 5 000 Hz。系统完成集成组网后进行静态和动态校正测试, 实验结果表明, 本文设计的千单元高压放大系统能够满足千单元自适应光学系统的应用要求。

参考文献:

- [1] 董玉磊. 基于 GPU 的自适应光学系统波前处理算法实时性研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
DONG Y L. *Study of Real-time Wavefront Processing Algorithm for Adaptive Optics System Based on GPU*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [2] 贾建禄, 赵金宇, 王建立, 等. 机动式车载自适应光学波前处理器的设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 48-54.
JIA J L, ZHAO J Y, WANG J L, *et al.* Design of mobile vehicle-based adaptive optical wave-front processor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 48-54. (in Chinese)
- [3] ROBERTS J E, DEKANY R G, BURRUSS R S, *et al.* Results from the PALM-3000 high-order adaptive optics system [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III, Amsterdam, Netherlands.* 2012, 8447: 373-380.
- [4] FUSCO T, ROUSSET G, SAUVAGE J F, *et al.* High-order adaptive optics requirements for direct detection of extrasolar planets: application to the SPHERE instrument [J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7515-7534.
- [5] ESPOSITO S, TOZZI A, FERRUZZI D, *et al.* First-light adaptive optics system for large binocular telescope [C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4839, Adaptive Optical System Technologies II, Waikoloa, Hawai'i, USA.* 2003, 4839: 164-173.
- [6] MARTIN H M, CUERDEN B, *et al.* Deformable secondary mirrors for the LBT adaptive optics system [C]. *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 6272, Advances in Adaptive Optics II, Orlando, Florida, USA.* 2006, 6272: 274-283.
- [7] BENDEK E A, HART M, POWELL K B, *et al.* Status of the 6.5m MMT Telescope laser adaptive optics system [C]. *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 7736, Adaptive Optics Systems II, San Diego, California, USA.* 2010, 7736: 268-279.
- [8] SINQUIN J C, LURCON J M, GUILLEMARD C. Deformable mirror technologies for astronomy at CILAS [C]. *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 7015, Adaptive Optics Systems, Marseille, France.* 2008, 7015: 151-162.
- [9] 陈俊杰. 基于天文应用的大口径压电变形镜技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
CHEN J J. *Large Aperture Piezoelectric Deformable Mirror for Astronomical Application* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [10] 林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
LIN X D, XUE CH, LIU X Y, *et al.* Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics[J]. *Chinese Optics and Applied Optics Abstracts*, 2012, 5(4): 337-351. (in Chinese)
- [11] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 137 单元变形镜的

- 性能测试及校正能力实验[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 267-273.
- LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al.* Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 267-273. (in Chinese)
- [12] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 961单元变形镜研制及性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 1-6.
- LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al.* Development and performance test of the 961-element deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 1-6. (in Chinese)
- [13] 王建立, 董玉磊, 姚凯男, 等. 349单元自适应光学波前处理器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1007-1013.
- WANG J L, DONG Y L, YAO K N, *et al.* Three hundred and forty-nine unit adaptive optical wavefront processor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1007-1013. (in Chinese)
- [14] 贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 961单元自适应光学系统波前处理器[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1387-1393.
- JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, *et al.* 961-element adaptive optical wave-front processor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1387-1393. (in Chinese)
- [15] YANG L Q, YAO K N, WANG J L, *et al.* Performance analysis of 349-element adaptive optics unit for a coherent free space optical communication system [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 13150.
- [16] 章承伟. 基于GPU的自适应光学实时波前控制系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- ZHANG C W. *GPU-based Adaptive Optics Real-time Control System*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [17] LI D Y, HU L F, MU Q Q, *et al.* Wavefront processor for liquid crystal adaptive optics system based on Graphics Processing Unit [J]. *Optics Communications*, 2014, 316: 211-216.
- [18] 杨乐强, 王建立, 姚凯男, 等. 基于GPU的961单元自适应光学系统波前处理器设计及其动态性能[J]. 光学精密工程, 2022, 30(23): 3004-3012.
- YANG L Q, WANG J L, YAO K N, *et al.* Design and dynamic performance of wavefront processor for 961 element adaptive optics system based on GPU [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(23): 3004-3012. (in Chinese)
- [19] 林旭东, 刘欣悦, 王帅, 等. 桌面97单元自适应光学系统性能测试[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1272-1280
- LIN X D, LIU X Y, WANG SH, *et al.* Performance testing of a desk-top 97-element adaptive optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1272-1280 (in Chinese)
- [20] 宋定安. 自适应光学系统中鲁棒控制技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- SONG D A. *Robust Control in Adaptive Optics System*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [21] 林海奇. 基于模型辨识的自适应光学系统控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- LIN H Q. *Research on Adaptive Optics System Control Technology Based on Model Identification* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [22] XU L S, LI H W, LI P Z, *et al.* The application of classical control in the design and analysis of power amplifiers for driving piezoelectric stack actuators[J]. *Electronics*, 2021, 10(6): 720.
- [23] YANG C, LI C L, XIA F Z, *et al.* Charge controller with decoupled and self-compensating configurations for linear operation of piezoelectric actuators in a wide bandwidth [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(7): 5392-5402.
- [24] MADEC PP Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy[C]. *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III, Amsterdam, Netherlands.* 2012, 8447: 22-39.
- [25] 张雨东, 饶长辉, 李新阳. 自适应光学及激光操

控[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

ZHANG Y D, RAO CH H, LI X Y. *Adaptive*

Optics and Laser Manipulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)

作者简介:



邵 蒙(1992—),男,吉林长春人,博士,2020年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事望远镜光电跟踪控制及电子学设计方面的研究。E-mail: shaomeng0431@163.com

通讯作者:



杨乐强(1994—),男,吉林白山人,助理研究员,2015年于中国科学技术大学获得学士学位,2020年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事自适应光学波前处理技术方面的研究。E-mail: yanglq23@126.com