

文章编号 1004-924X(2022)23-2995-09

千单元自适应压电变形镜的高压放大器设计

邵 蒙, 李洪文, 姚凯男, 杨乐强, 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:为了满足大型地基望远镜高分辨率成像的需求,需要利用自适应光学技术对大气湍流造成的波前误差进行校正。压电变形镜是自适应光学系统的关键部件,针对大型地基高分辨率成像望远镜中千单元级压电变形镜的高压高速驱动问题,设计了高性能压电陶瓷高压放大器。该高压放大器采用基于高速低压运算放大器和分立功率器件构成两级放大结构,实现压电陶瓷的高精度大功率驱动。相比于集成运放器件构成的驱动系统,该高压放大器具有驱动能力更强、成本更低的优势,适用于驱动通道较多的自适应压电变形镜系统。实验结果表明:本文设计的高压放大器可以实现 120 V 输出,驱动 0.33 μF 容性负载时 -3 dB 带宽达到 5 000 Hz,输出响应时间 $\leq 100 \mu\text{s}$ 。该高压放大器能够满足千单元级压电变形镜的应用要求。

关键词:自适应光学;望远镜;压电变形镜;压电陶瓷;高压放大器

中图分类号:TH743;TM133 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223023.2995

Design of high voltage amplifier for thousand-element adaptive piezoelectric deformable mirror

SHAO Meng, LI Hongwen, YAO Kainan, Yang Leqiang, DENG Yongting*

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

* Corresponding author, E-mail: dyt0612@163.com

Abstract: In order to meet the high-resolution imaging requirements of large ground-based telescopes, adaptive optics technology needs to be used to correct the wavefront error caused by atmospheric turbulence. The piezoelectric deformable mirror is the key component of an adaptive optics system. Aiming at the high-voltage and high-speed driving of the thousand-element piezoelectric deformable mirror in a large ground-based high-resolution imaging telescope, a high-performance piezoelectric ceramic high-voltage amplifier was designed. The high-voltage amplifier adopts a two-stage amplification structure based on high-speed low-voltage operational amplifiers and discrete power devices to realize high-precision and high-power driving of piezoelectric ceramics. Compared with a driving system composed of integrated operational amplifier devices, the high-voltage amplifier has the advantages of a stronger driving capability and lower cost, and it is more suitable for piezoelectric deformable mirror systems with many driving channels. The experimental results show that the high-voltage amplifier designed in this paper can achieve a 120 V output, the -3 dB bandwidth can reach 5 000 Hz when driving a 0.33 μF capacitive load, and the output re-

收稿日期:2022-09-28;修订日期:2022-10-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11973041, No. 12122304);中国科学院青年创新促进会会员项目(No. 2019218)

sponse rise time is less than or equal to 100 μs . The high-voltage amplifier can meet the application requirements of a thousand-element piezoelectric deformable mirror.

Key words: adaptive optics; telescope; piezoelectric deformable mirror; piezoelectric ceramic; high-voltage amplifier

1 引言

自适应光学技术能够主动补偿大气扰动,是实现大口径地基望远镜高分辨率成像的关键技术。该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。在波前校正器中,由压电陶瓷驱动的压电变形镜是一个可以实现表面形状改变的反射元件,一般要具有足够多的校正单元数和快速响应能力,以满足校正畸变波前的高阶像差的需求^[1-2]。自适应系统的高压驱动系统主要由数模转换器和高压放大器等部件组成,用以完成压电变形镜中压电陶瓷的精密驱动。

压电陶瓷驱动连续镜面压电变形镜(简称压电变形镜)时,每一个压电陶瓷校正器都对应一路高压放大器,因此,高压放大器的结构尺寸、驱动能力、信号质量、价格成本都需要在压电变形镜系统设计过程中被充分考虑。根据工作原理,高压放大器电路可以分为线性功率放大电路和开关式功率放大电路。开关式功率放大电路具有功率损耗较小、发热较小,容易做到大电流输出等优点。但是,这种电路需要依靠脉冲宽度调制(Pulse-width Modulation, PWM)进行功率输出,调制信号需要通过滤波电路复原信号,输出电压纹波较大,频响特性较差,同时造成电路体积增大。相比开关式功率放大电路,线性功率放大电路由于其输出功率级晶体管处于线性放大区间,因此输出信号具有线性度好、稳定性强、纹波小和频响宽等优点,一直以来都是高精度压电陶瓷放大器的首选驱动方式^[3]。但是这类电路存在功耗较高、效率比较低的问题。

文献[4]采用基于 PA85 高压集成运放器件设计了一款压电陶瓷高压放大器,该高压集成运放输出电压达到 $\pm 225\text{ V}$,输出电流为 200 mA。文献[5]采用 PA79 高压集成运放为核心部件设计了一款双通道高压放大器,PA79 具有双通道输出,单端供电输出电压可达 350 V,连续输出电

流为 150 mA,这些集成器件存在输出电流较小,在驱动大容量负载时,动态能力十分受限。文献[6]采用 PA92 高压集成运放为核心构成了一款高压放大器,该高压集成运放输出达到 390 V,输出电流达到 4 A,在驱动 0.35 μF 容性负载时效果很好,但 PA92 的体积较大,价格较高。文献[7]采用 PA89 高压集成运放并在后端增加功率放大级的方式来增强电流驱动能力,最终实现 $\pm 540\text{ V}$ 的输出电压,及 1 A 的最大瞬时充放电电流。文献[8]采用和文献[7]类似的结构,利用 PA341 作为高压前级运放并增加后端功率放大级,然后又设计了基于低压前级运放和功率放大级的分立式元件设计结构,采用分立式元件构成的放大器不仅可以取得较好的驱动效果,且成本大大减低。文献[9]采用全桥逆变电路,利用比例-积分控制正弦脉宽调制(SPWM)实现了高电压大功率的驱动输出。文献[10]采用低压运放和分立功率器件,构成两级误差放大结构,后级为伪互补对称的功率输出,实现了 $\pm 500\text{ V}$ 的高压输出,且通过合理的结构设计实现了高压放大器的高密度集成。另外,针对地基望远镜光学系统设计了多路复用压电驱动技术,以满足地基望远镜对压电驱动系统体积功耗等的严苛需求。

综合以上分析,本文设计了压电变形镜高压驱动系统,由于驱动单元较多,驱动信号动态频率和控制精度要求较高,采用基于分立元件构成功率驱动电路,该电路在结构布局、驱动能力和价格成本上具有更大优势。

2 大型地基高分辨率成像望远镜的自适应光学系统

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,使光束质量显著下降,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,改善光波的位相和振幅,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对应波前校正器校正单元数量的多通道数模转换器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。波前控制器主要根据波前传感器测量得到的波前误差,经过控制运算后输出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电压控制量,经过数模转换和高压放大,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^[11]。

在控制方面,自适应光学系统的控制环路如图 2 所示。根据控制环路框图,自适应光学系统的开环控制带宽 f_o 、误差控制带宽 f_e 和闭环控制带宽 f_{3db} 可以表示为^[12]:

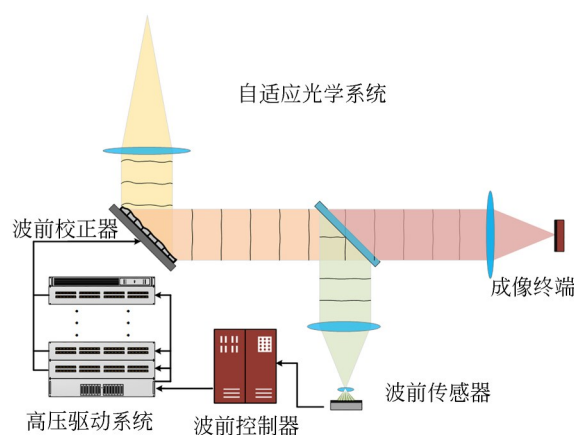


图 1 典型自适应光学系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of typical adaptive optics system

$$f_o \leq \frac{1}{12\tau}, f_e \leq \frac{1}{10.6\tau}, f_{3db} \leq \frac{1}{5.7\tau}, \quad (2)$$

其中 τ 为系统延时。根据波前传感器 CCD 相机的曝光、读出时间、波前处理器的计算时间,以及链路传输延时等,自适应光学校正环路的系统延时约为相机采样时间的 3 倍。因此,为保证波前校正控制带宽达到 100 Hz,自适应光学系统的采样频率需要达到 1 000~2 000 Hz 以上^[13-14]。为了良好地跟踪校正信号,高压放大器应有较高的设计带宽,同时为了避免高频噪声的影响,高压放大器增益应在高频段迅速衰减,因此,本系统放大器设计带宽为 5 000 Hz^[15]。

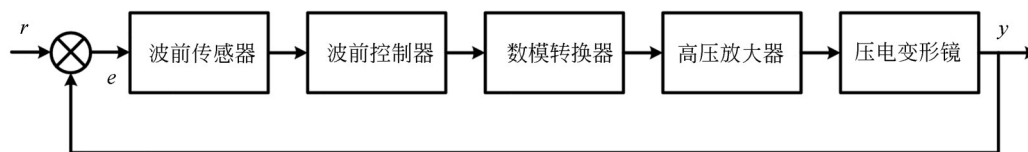


图 2 自适应光学系统控制环路框图

Fig. 2 Control loop block diagram of adaptive optics system

另一方面,大气相干长度决定了自适应光学系统的子孔径尺寸,自适应光学系统的子孔径单元数与波前校正器执行器单元数相当,即:

$$N \approx (D/r_0)^2, \quad (3)$$

其中 r_0 为大气相干长度。如果望远镜的口径达到 4 m, r_0 为 10 cm,波前校正器的执行单元数量应约 1 600; r_0 为 15 cm,波前校正器的执行单元数量约为 710^[16]。因此,4 m 光电望远镜系统的

自适应系统规模在千单元量级。

压电变形镜的校正行程也会随着望远镜口径的增大而增大,这意味着压电陶瓷需要更多的叠层,从而增加了高压放大器负载的等效容值,这要求高压放大器具有更强的驱动能力。本系统所用压电陶瓷的等效容值约为 0.3 μ F,最大加载电压为 120 V,此值由压电变形镜设计和所选用的压电陶瓷决定。

3 高压放大器设计与分析

3.1 系统要求与电路设计

根据自适应光学系统和压电变形镜的要求, 高压放大器的设计指标如下:

- (1) 输出电压 U_{pp} : $0 \sim 120$ V;
- (2) 根据输入信号可输出正弦信号和方波信号等;
- (3) 输出正弦信号满足 -3 dB 频率 $\geq 5\,000$ Hz;
- (4) 输出信号响应上升时间 $T_p \leq 100$ μ s。

对于电容性负载 C_L , 电路输出最大电压幅值为 U_p , 频率为 f 的正弦信号 $V(t) = U_p \sin(2\pi ft)$, 则电路输出电流应为:

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = C_L \frac{dV(t)}{dt} = C_L 2\pi f U_p \cos(2\pi ft). \quad (4)$$

已知压电陶瓷的等效容值约等于 0.3 μ F, 按照指标要求首先计算输出频率为 $5\,000$ Hz 的正弦信号时电路的最大输出电流:

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

计算系统响应阶跃信号时, 电路输出电流至少为:

$$i_p \approx \frac{C_L U_{pp}}{T_p} \approx \frac{0.3 \times 10^{-6} \times 120}{100 \times 10^{-6}} \approx 0.36 \text{ A}. \quad (6)$$

电路压摆率 R_s 会限制系统的全功率带宽, 根据最大信号频率和最大输出电压计算系统压摆率为:

$$R_s = \pi f U_{pp} \approx \pi \times 5\,000 \times 120 \times 10^{-6} \approx 1.88 \text{ V}/\mu\text{s}. \quad (7)$$

图 3 是本文采用的功率放大电路, 该电路主要分为运算校正级和功率放大级两部分。运算校正级主要由一片高速、低噪声低压运算放大器构成, 功率放大级主要由两片双极型晶体管构成。反馈通道由电阻 R_6 和 R_7 构成, 电路的放大倍数 $F = 1 + R_7/R_6$ 。

该电路的基本工作原理是, 在低压运算放大器输入端, 若同相输入端电压低于反向输入端, 代表被驱动负载电压低于预定输出, 则运算放大器输出较低电压, 晶体管 Q_1 电流很小, 集电极电位比较高, 晶体管 Q_2 导通, 二极管 D_2 截止, 电源

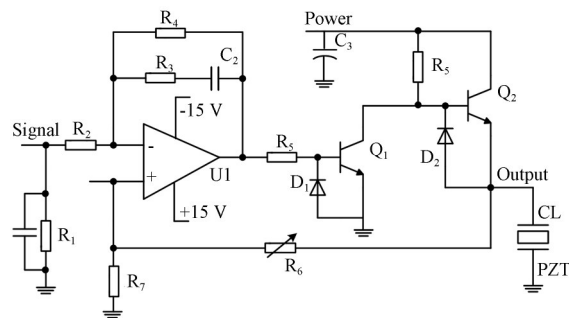


图 3 高压放大器基本电路

Fig. 3 Basic circuit of high voltage amplifier

通过 Q_2 向容性负载充电, 使负载电压升高; 相反, 若同相输入端电压高于反向输入端, 即被驱动负载电压高于预定输出, 则运算放大器输出较高电压, 控制晶体管 Q_1 打开, 输出较大电流, 此时晶体管 Q_2 截止, 负载通过二极管 D_2 卸放电流, 使容性负载电压值降低。在器件方面, 为了满足高动态性能, 应选用高速低压运放器件构成放大电路的第一级; 为了减轻前级电流负荷并获得较大的驱动能力, 应尽量选取放大倍数较大和具有较高耗散功率的功率管。

3.2 闭环精度和稳定性分析

放大电路的闭环增益会影响电路的输出精度、响应性能和稳定性^[4]。闭环增益和电路的反馈系数 β 有关, 运放电路的闭环传递函数 $A_c(s)$ 为:

$$A_c(s) = \frac{A_o(s)}{1 + \beta A_o(s)}, \quad (8)$$

其中 $A_o(s)$ 为运放电路的开环传递函数。在低频段将 $A_o(s)$ 视为一个具有较大增益 A_{oo} , 截止频率为 $\frac{1}{T} = \omega_o$ 的一阶惯性环节, 则有:

$$A_o(s) = \frac{A_{oo}}{1 + Ts}. \quad (9)$$

那么, 放大电路的闭环传递函数可以表示为:

$$A_c(s) = \frac{1}{1 + \beta A_{oo}} \cdot \frac{A_{oo}}{1 + \frac{T}{(1 + \beta A_{oo})} s}. \quad (10)$$

根据式(10)可知, 闭环放大电路的增益比开环缩小了 $(1 + \beta A_{oo})$ 倍, 带宽扩大了 $(1 + \beta A_{oo})$ 。

一般地, 运算放大电路具有足够大的开环增益, 可以认为 $A_{oo} \gg 1$ 。在理想情况下, 放大电路

在低频端的闭环增益可以近似为:

$$A_{cc} = \frac{A_{oo}}{1 + \beta A_{oo}} = \frac{1}{\frac{1}{A_{oo}} + \beta} \approx \frac{1}{\beta}. \quad (11)$$

定义闭环增益误差 ϵ 为:

$$\epsilon = \frac{A_{CL} - A_{cc}}{A_{CL}} = \frac{\frac{1}{\beta} - \frac{A_{oo}}{1 + \beta A_{oo}}}{\frac{1}{\beta}} = \frac{1}{\beta A_{oo}}, \quad (12)$$

其中: A_{CL} 为理想情况下电路闭环增益, A_{cc} 为实际电路闭环增益。由此可知, 反馈增益越大, 电路的闭环增益误差越小, 电路的输出精度越高。另一方面, 引入反馈的放大电路环路传递函数为 $\beta A_o(s)$, 其频率特性曲线如图 4 所示。为了使闭环放大电路稳定, 当环路增益 $\beta A_o(\omega) = 1$ 时, 应留有一定的相位裕度; 但是, 反馈增益越大, 电路的相位裕度越小, 电路的稳定性越差。为了防止高频振荡, 在电路前级运放电路加入 R_2, R_3, R_4 和 C_2 构成的校正环节。引入滞后环节降低了系统的穿越频率, 增加了系统的相位裕度。应用时应调整校正环节参数使系统开环增益曲线以 20 dB/decade 穿越, 保证系统稳定。

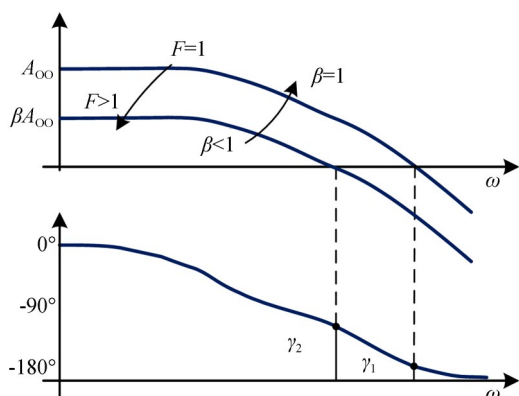


图 4 放大电路环路频率特性曲线

Fig. 4 Loop frequency characteristic curve of amplifier circuit

结合系统要求, 放大器前端 DA 转换器输出的电压控制量模拟信号为 0~5 V, 放大倍数为 24, 实现 0~120 V 的电压输出。

3.3 印刷电路板设计与布局

压电变形镜高压驱动系统的校正单元较多, 功耗较高, 发热量也较大, 因此高压放大器的印

刷电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 设计与布局尤为重要。本文提出的高压放大器采用模块化设计, 每一路高压放大器为一个模块, 通过高压放大器基板进行组网, 每个放大器基板在后端还有配有状态检测模块, 完成网络的检测诊断。模块化设计可以更好地完成整体设备的组装、调试, 有利于后期的维护和升级。图 5 所示是放大器模块的三维示意图。高压放大器机箱如图 6 所示。

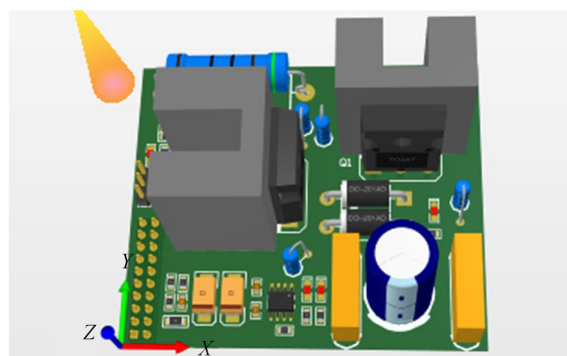


图 5 放大器模块的三维示意图

Fig. 5 Three-dimensional schematic diagram of amplifier module



图 6 高压放大器机箱

Fig. 6 Case of high voltage amplifiers

4 实验与结果分析

高压放大器性能测试实验系统由任意信号发生器、示波器、万用表、可编程功率电源、高压放大器基板和压电陶瓷负载等组成。实验中, 可编程电源输出 125 V 电压并通入高压放大器, 利用任意信号发生器模拟 DA 转换器输出的模拟信号。

首先测试高压放大器的输出精度, 向放大器模块输入 0~5 V (0.5 V 步进) 的模拟电压信号,

测量放大器输出电压,结果如图7所示。经过拟合,高压放大器全行程的输出线性度优于0.015。

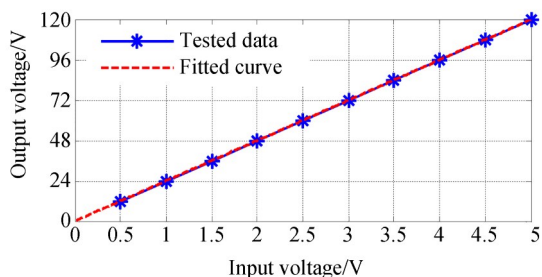


图7 高压放大器的输出测试曲线

Fig. 7 Output test curve of high-voltage amplifier

然后,令任意信号发生器产生峰峰值为0~5 V的正弦信号,其频率从500 Hz变化到5 000 Hz,测试高压放大器的动态响应性能,经放大器功率放大以后的输出波形如图8所示。由图8可以看出,高压放大器可以快速良好地跟踪放大输入信号。将输入信号频率设定为5 000 Hz,放大器输出波形如图9所示。由图9可以看出,高压放大器在响应频率为5 000 Hz的输入信号时输出信号峰峰值为86.4 V左右,输出衰减不超

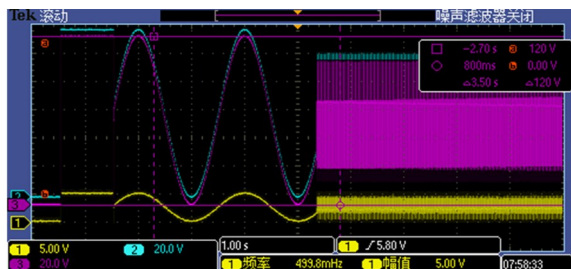


图8 高压放大器动态信号响应曲线

Fig. 8 Dynamic signal response curve of high-voltage amplifier

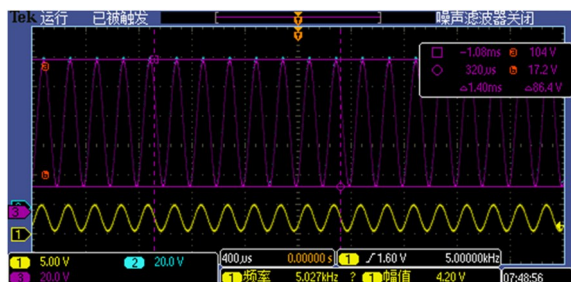


图9 高压放大器正弦波信号响应曲线

Fig. 9 Sine wave signal response curve of high-voltage amplifier

过-3 dB,满足设计要求。同时,利用可编程电源测量双通道放大器的工作电流为0.41 A,此时放大器功耗约为52 W。

令任意信号发生器产生幅值为0~5 V,频率为200 Hz的方波信号,经放大器功率放大以后的输出波形如图10所示。通过图10可以看到,高压放大器可以良好地跟踪放大输入信号。

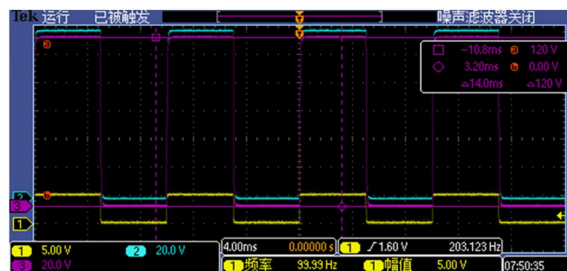


图10 高压放大器方波信号响应曲线

Fig. 10 Square wave signal response curve of high-voltage amplifier

然后,利用示波器捕获经放大器功率放大后输出信号的上升沿和下降沿波形,分别如图11和图12所示。由图11和图12可知,输出信号的上升时间和恢复时间小于100 μs,满足设计要求。

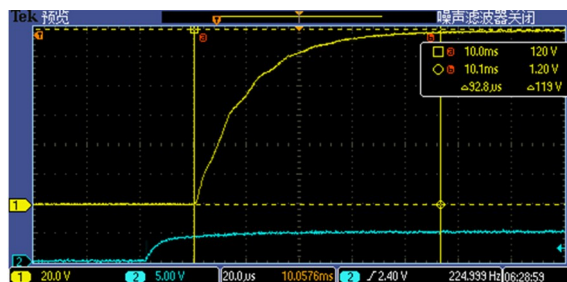


图11 高压放大器放大信号上升响应曲线

Fig. 11 Amplified signal rising response curve of high-voltage amplifier

为了对比说明本文设计放大器的性能,采用PA79集成运放器件设计了一款高压放大器。该放大器跟踪正弦信号的结果如图13所示(红线为0.03 μF,蓝线为0.33 μF),跟踪上升沿信号的结果如图14所示(红线为0.03 μF,蓝线为0.33 μF)(彩图见期刊电子版)。当驱动0.33 μF容性负载时,输出0~96 V的正弦信号,跟踪频率可以达到1 500 Hz,当频率不断增加时,由于其连续驱动电流较小,信号出现失真。从方波阶跃响应

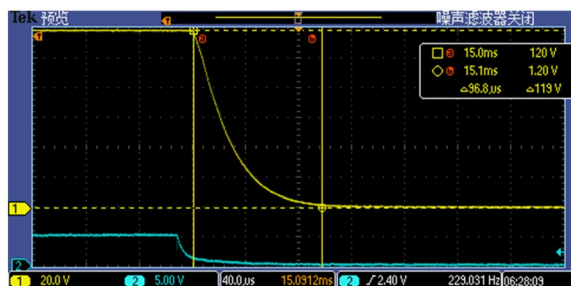


图 12 高压放大器放大信号下降响应曲线

Fig. 12 Amplified signal drop response curve of high-voltage amplifier

结果可以看出,由于存在限流保护,驱动 $0.33 \mu\text{F}$ 容性负载时已经进入饱和状态。当驱动较小容性负载时其仍然具有较快的上升时间。

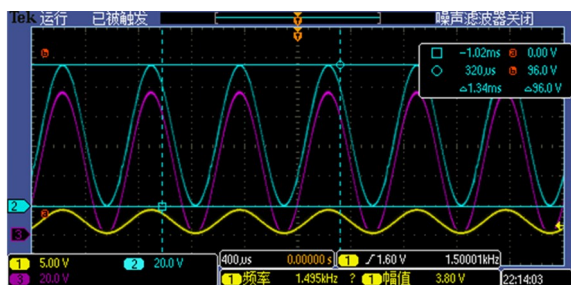


图 13 PA79 高压放大器正弦波信号响应曲线

Fig. 13 Sine wave signal response curve of PA79 high-voltage amplifier

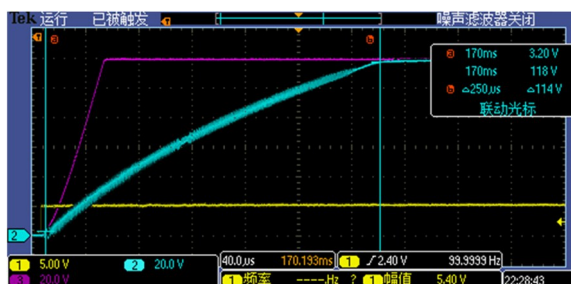


图 14 PA79 高压放大器放大信号上升响应曲线

Fig. 14 Amplified signal rising response curve of PA79 high-voltage amplifier

同时,采用 PA92 高压集成运放器件设计了一块高压放大器,其驱动电流为 4 A ,经过合理的前级设计,其驱动效果与本文设计的分立式放大器相当。但 PA92 高压集成运放器件自身尺寸较大,散热较为困难,最终设计的集成式放大器体积虽与分立结构放大器相当,成本却大幅提升。

通过对比可知,采用集成运放器件构成的放大器电路具有原理简单、布局紧凑的优点,在天

基光学系统等领域具有显著优势,但是集成运放受到器件的驱动能力、尺寸和价格等因素的限制;而采用分立结构的高压放大器在地基压电变形镜高压驱动系统中具有更加灵活的优势。

使用所设计的高压放大器对压电变形镜进行组网驱动,利用桌面自适应光学系统对压电变形镜进行校正,得到系统校正前后的远场光斑图像,如图 15 所示。校正前远场光斑图像的灰度峰值为 3 347,校正后灰度峰值为 45 876,远场光斑的能量集中度明显提高。

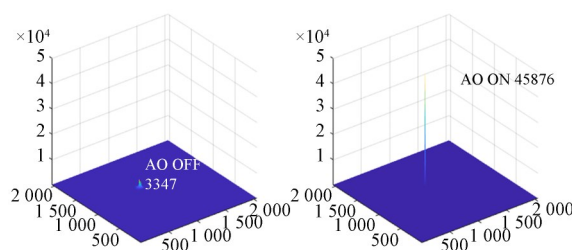


图 15 校正前后的光源成像效果对比

Fig. 15 Contrast of light source imaging effect before and after aberration correction

利用湍流模拟器进行自适应光学动态像差校正实验,实验中湍流模拟器等效模拟的大气相干长度为 11 cm ,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像差校正。校正前后系统入射的波前(去除倾斜像差)的均方根值变化如图 16 所示,校正前系统入射波前残差为 $0.5\lambda \sim 1.3\lambda$ ($\lambda = 600 \text{ nm}$),

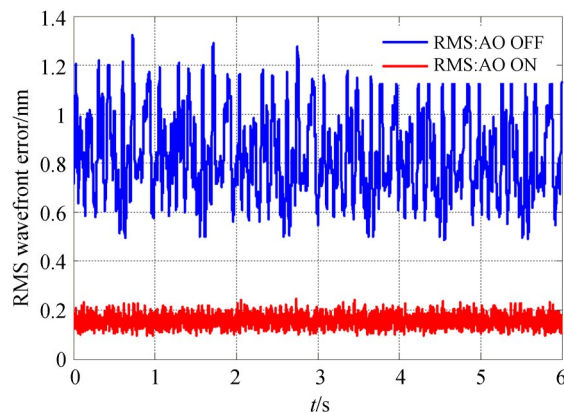


图 16 自适应校正前后系统波前残差曲线

Fig. 16 Residual wavefront error before and after adaptive correction

均值为 0.83λ ;校正后系统波前残差明显降低,波前残差均值为 0.16λ ,约为 100 nm。

5 结 论

本文针对自适应光学千单元级压电变形镜中高压驱动系统,设计了一种基于分立元件构成

的压电陶瓷高压放大器。该高压放大器能够实现 120 V 的高压输出,驱动 $0.33\ \mu\text{F}$ 容性负载时 $-3\ \text{dB}$ 带宽达到 5 000 Hz,在整体尺寸相当时,相比于基于集成式高压运放搭建的高压放大器,具有驱动能力更强、成本更低的优势,适用于驱动通道较多的压电变形镜系统,并且满足千单元级压电变形镜的应用要求。

参考文献:

- [1] 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): 9-14.
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): 9-14. (in Chinese)
- [2] 王玉坤,曹召良,李大禹,等. 液晶-变形镜自适应光学系统的数据采集与处理软件设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1507-1516.
WANG Y K, CAO ZH L, LI D Y, *et al.* Design of liquid crystal-deformable mirror adaptive optical system data acquisition and process software [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1507-1516. (in Chinese)
- [3] 李小辉. 高精度动态压电陶瓷驱动电源的研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2009.
LI X H. *Research on High-precision Dynamic Piezoelectric Ceramic Driving Power* [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [4] 徐辽,范青武,刘旭东,等. 基于PA85A的高精度动态压电陶瓷驱动电源设计[J]. 压电与声光, 2018, 40(4): 564-567.
XU L, FAN Q W, LIU X D, *et al.* Design of high-precision dynamic PZT driving power based on PA85A[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2018, 40(4): 564-567. (in Chinese)
- [5] 张文博. 基于压电叠堆的微动扫描平台控制器研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
ZHANG W B. *Research on Controller for Micro Scanning Platform Based on Piezoelectric Stack* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] 钱存,张文涛,杜浩,等. 一种大容量负载的压电陶瓷驱动电源设计[J]. 压电与声光, 2019, 41(5): 752-755.
QIAN C, ZHANG W T, DU H, *et al.* Design of a piezoelectric ceramic drive power supply with large capacitive load[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2019, 41(5): 752-755. (in Chinese)
- [7] 龙传慧,刘友,凡木文,等. 大容量负载双极性高压功率放大器设计[J]. 电测与仪表, 2011, 48(8): 76-79.
LONG CH H, LIU Y, FAN M W, *et al.* Design of a bipolar high-voltage power amplifier for large capacitive loads[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2011, 48(8): 76-79. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] 胡域,朱玉玉. 一种高压压电陶瓷驱动电源的设计[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 71-76.
HU Y, ZHU Y Y. Design of a high voltage piezoelectric ceramic driving power supply [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2020, 42(1): 71-76. (in Chinese)
- [10] 凡木文. 高性能压电波前校正器高压驱动技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016.
FAN M W. *High-performance High-voltage Drive Electronics and Method for Piezoelectric Wavefront Corrector* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 林海奇. 基于模型辨识的自适应光学系统控制技

- 术研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2019.
- LIN H Q. *Research on Adaptive Optics System Control Technology Based on Model Identification* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (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, 赵金字, 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] 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)
- [16] 王建立, 陈涛, 张景旭, 等. 地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及关键技术分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 2-16.
- WANG J L, CHEN T, ZHANG J X, *et al.* General requirements and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 2-16. (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:



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,研究员,2015年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事望远镜精密跟踪控制术的研究及电子学设计方面的研究。E-mail: dyt0612@163.com