

doi: 10.3788/gzxb20124109.1071

光刻物镜中压电陶瓷驱动器的动态性能研究

王学亮, 巩岩

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

摘 要:针对压电陶瓷在光刻机投影物镜中作为像质补偿镜组驱动器的特定应用要求,对一种以集成运算放大器构成的压电陶瓷驱动器的动态性能进行了研究.首先,针对驱动器系统中集成运放固有频率特性对动态性能的影响进行了分析,确定了外部补偿网络的参量.然后,针对驱动器系统大容量负载对动态性能的影响进行了分析,提出了隔离电阻的补偿方法.最后,讨论了驱动器系统中寄生电容对动态性能的影响.计算表明:补偿后的压电陶瓷驱动器系统相位裕量为 79° ,阶跃响应无超调量,调节时间为 $5 \mu\text{s}$.基本满足压电陶瓷在光刻物镜中作为像质补偿镜组驱动器的稳定性强、响应快速、超调量小等动态要求.

关键词:光刻物镜;压电陶瓷;动态性能

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)09-1071-5

0 引言

光刻机作为集成电路的生产设备在半导体领域有着广泛的应用.随着集成电路从小规模到超大规模和特大规模的发展,光刻机投影物镜的分辨率要求不断提高,为了实现纳米量级的系统波相差,投影物镜内部需要装配位姿可调整的镜组^[1-2],用以对元件的制造公差、物镜的装配公差以及热和重力等因素引起的部分像差进行补偿.通常,光刻机投影物镜系统中补偿镜组的驱动器具有如下典型要求:10 nm 量级的定位准确度以精确补偿像差;良好的动态性能以满足光刻机的生产效率要求;小超调量以满足在有限的光机结构空间内完成像质补偿.

压电陶瓷材料具有分辨率高、频率特性好、输出力大、无磁干扰和发热小等优点,被广泛作为纳米级定位系统的执行机构使用^[3-7].压电陶瓷驱动器的性能直接决定着定位系统的性能,国内外广泛开展了对于驱动器的研究.例如,任斌等人研制了一种 0~90 V 输出,输出电压线性度小于 0.08% 的驱动器^[8];王宏等人利用高压运放研制了一种具有 ± 200 V 输出电压范围的驱动器^[9];张超等人结合电压放大器和电流放大器的优点设计了一种驱动器,该驱动器噪音系数小于 2 dB, ± 100 V 输出纹波小于 10 mV^[10];范伟等人通过将运算放大器与半导体制冷片和温度传感器结合,获得了输出纹波为

7.8 mV 的驱动器^[11];Dan J. Clingman 和 Mike Gamble 研制了一种应用于中大型压电器件的开关式 1 500 V 输出的驱动器^[12].可以发现,以上研究多将研究重点集中在压电陶瓷驱动器的稳态输出准确度和高压输出能力上,针对驱动器动态性能的研究比较少见.

因此,在上述的光刻机投影物镜应用中,要使用压电陶瓷作为补偿镜组的驱动器,首先要对驱动器的动态性能进行分析评估.针对该问题,本文对一种以集成运算放大器构成的压电陶瓷驱动器的动态性能进行了研究,讨论了多种影响动态性能的因素,提出了相应的补偿方法,并采用 PSpice 仿真进行了验证.

1 驱动器系统构成与指标要求

本文所研究的压电陶瓷驱动器电路结构如图 1 所示,该驱动电路由微控制器(Micro Control Unit, MCU)、精密电压基准(Voltage Reference, REF)、数模转换器(Digital Analog Convertor, DAC)、运算放大器(Operational Amplifier, OpAmp)和压电陶瓷负载(Piezoelectric Ceramic, PZT)构成.MCU 负责与上位机进行通信,并将接收的位移指令转换为 16 位数字信号,REF 为数模转换提供高精度低漂移的 +5V 参考电压,DAC 将 16 位数字信号转换为 -10~10 V 的模拟电压信号,该信号经增益配

基金项目:国家重大专项基金项目(No. 2009ZX02205)资助

第一作者:王学亮(1984—),男,研究实习员,硕士,主要研究方向为精密定位系统的电控技术. Email: wangxueliang@ciomp.ac.cn

收稿日期:2012-04-10;修回日期:2012-05-17

置为 20 dB 的 Op Amp 放大后驱动 PZT. 在该驱动器系统中, 运算放大器是 APEX 公司 PA85 型高压运放, 其 PSpice 模型根据文献[13]建立; PZT 是 PI 公司 P-882.11 型叠堆式压电陶瓷, 具有最大输入电压 100 V, 对应行程 6.5 μm , 在 PSpice 仿真中建模为 0.15 μF 电容.

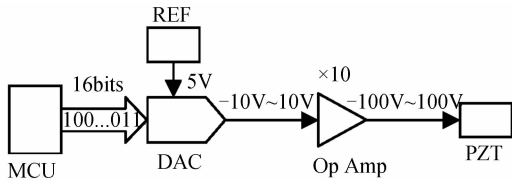


图1 压电陶瓷驱动器电路结构框图

Fig.1 The architecture diagram of the PZT driver

针对某特定的光刻机投影物镜, 本文所研究的压电陶瓷驱动器具有如下动态性能要求: 相位裕量 $\geq 60^\circ$, 阶跃响应超调量 $\leq 10\%$, 调节时间 $\leq 10 \mu\text{s}$.

2 驱动器动态性能分析与补偿

2.1 运放频率特性的影响与补偿

运算放大器具有频率特性, 其开环增益通常含有多个极点, 其中在低频段出现主导极点, 随着频率的增高可能出现更多极点. 每个极点使增益的幅值加快衰减并使增益的相位滞后, 若在环路增益的交叉频率附近出现高阶极点, 则系统的相位裕量变小甚至成为负值, 即动态性能变差^[14-15]. PA85 提供外部补偿引脚, 通过配置外部 RC 补偿网络向开环增益配置零点 Z_1 , 达到改善频率特性的目的. Z_1 由式(1)确定

$$Z_1 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

式中 R 是外部补偿电阻, C 是外部补偿电容.

首先设置外部补偿网络 $R=0, C=10 \text{ pF}$, 进行 PSpice 仿真. 此时 Z_1 处于无穷高频率处, 等效于无外部补偿, 所以获得的传函即是 PA85 固有的开环增益. 仿真结果如图 2 所示, 其中 A_{ol} 是 PA85 开环增益, T 是系统环路增益, A_{cl} 是系统增益, β 是反馈增益(以下同). 得到 PA85 开环增益为

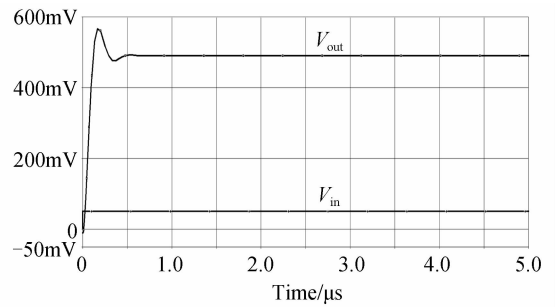
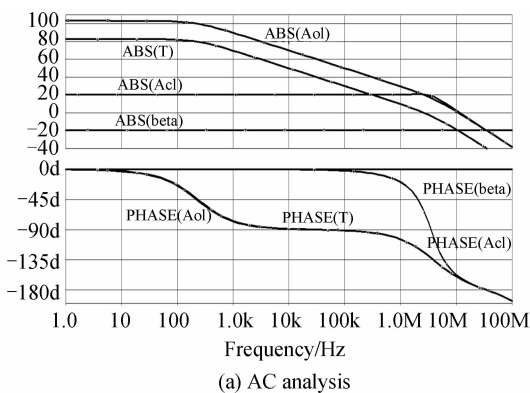


图2 无外部补偿的交流分析和瞬态分析

Fig.2 AC analysis and transient analysis without external compensation

$$A_{ol} = \frac{G_{dc}}{(1+jf/P_1)(1+jf/P_2)} \quad (2)$$

式中 f 为频率变量, $G_{dc} = 103 \text{ dB}$, $P_1 = 224 \text{ Hz}$, $P_2 = 3.9 \text{ MHz}$.

虽然 P_2 出现在 T 的交叉频率 f_x ($|T(f_x)| = 1$) 之后, 但由于 P_2 在 f_x 的十倍频以内, 导致驱动器系统相位裕量为 56° , 时域响应有 15% 超调量, 调节时间为 0.4 μs . 为消除 P_2 对动态性能的影响, 调整补偿网络 $R=4 \text{ k}\Omega, C=10 \text{ pF}$, 根据式(1), 零点 Z_1 应出现在 3.98 MHz 处, 进行 PSpice 仿真. 结果如图 3 所示, Z_1 出现在 4 MHz 处, 与式(1)计算值相符, Z_1 与运放固有的 P_2 抵消, 使系统相位裕量增大至 76° , 时域响应超调量减小至 0.6%, 调节时间为 0.14 μs .

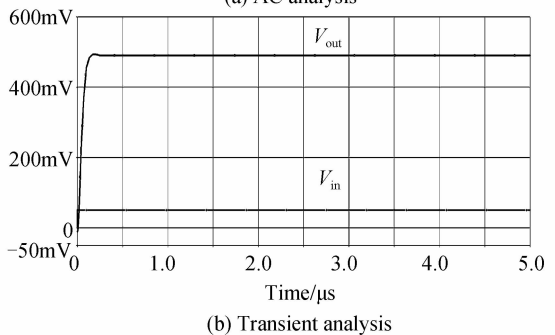
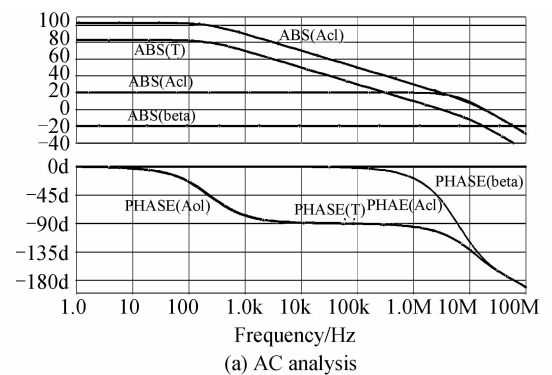


图3 有外部补偿的交流分析和瞬态分析

Fig.3 AC analysis and transient analysis with external compensation

2.2 容性负载的影响与补偿

当运算放大器驱动压电陶瓷时, 其输出电阻 R_o .

与容性负载 C_1 构成低通滤波结构,如图 4 所示,此时有

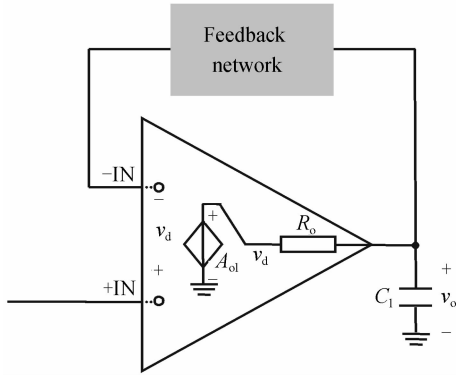


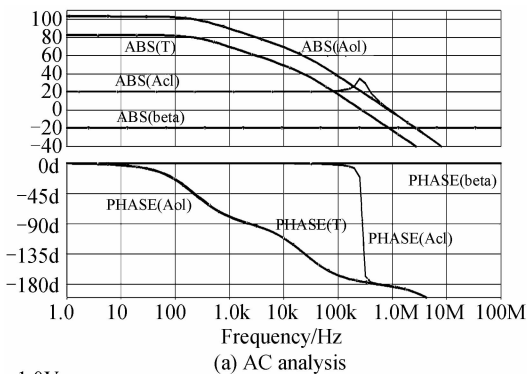
图 4 容性负载影响的原理示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the impact of the capacitive load

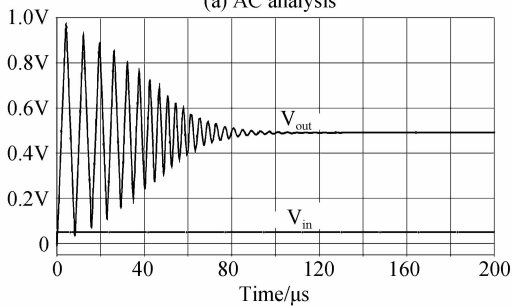
$$A'_{ol} = \frac{v_o}{v_d} = A_{ol} \cdot \frac{1}{1+jf/P_3} \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{1}{2\pi R_o C_1} \quad (4)$$

等效于向 PA85 的开环增益 A_{ol} 配置极点 P_3 . R_o 和 C_1 值越小, P_3 将会出现在越高的频率处,对动态性能的影响也将越小,但是压电陶瓷负载通常具有较大的电容值,因此将对动态性能造成影响.本驱动器系统中, $R_o \approx 50 \Omega$, $C_1 = 150 \text{ nF}$,根据式(4),极点 P_3 约出现在 21.2 kHz 处,进行 PSpice 仿真.结果如图 5 所示, P_3 出现在 24.4 kHz 处,与式(4)计算值基本相符, P_3 导致驱动器系统相位裕量减小至 4° ,时域响应超调量增大至 98%,调节时间增长至 $87 \mu\text{s}$.



(a) AC analysis



(b) Transient analysis

图 5 容性负载影响的交流分析和瞬态分析

Fig. 5 AC analysis and transient analysis of the impact of the capacitive load

为了补偿容性负载对驱动器动态性能的影响,在运放输出端与负载 C_1 之间配置电阻 R_i ,如图 6 所示,此时有

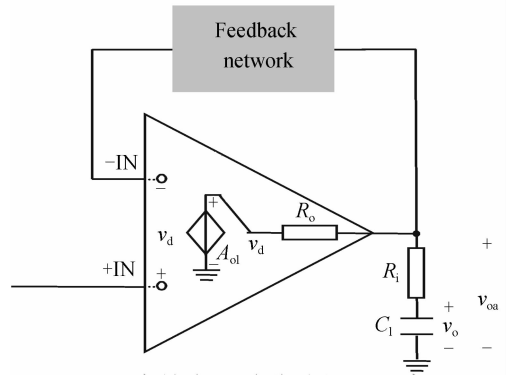


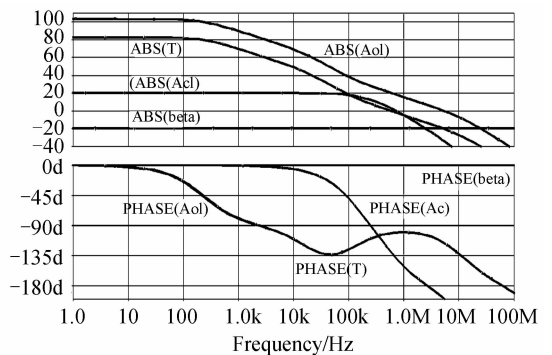
图 6 容性负载补偿的原理示意图

Fig. 6 The schematic diagram of the compensation of the capacitive load

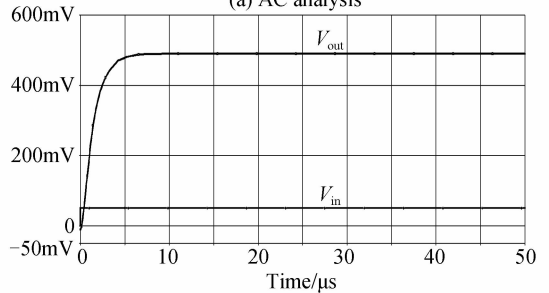
$$A''_{ol} = \frac{v_{oa}}{v_d} = A_{ol} \cdot \frac{R_i}{R_i + R_o} \cdot \frac{1+jf/Z_2}{1+jf/P_4} \quad (5)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2\pi R_i C_1}, P_4 = \frac{1}{2\pi (R_i + R_o) C_1} \quad (6)$$

等效于向 PA85 的开环增益 A_{ol} 同时配置极点 P_4 和零点 Z_2 ,调整 R_i 使 P_4 和 Z_2 在十倍频程之内,以相互抵消对动态性能的影响.同时,为了减小以 v_{oa} 替代 v_o 进行负反馈所造成的影响, R_i 尽可能小.在本驱动器中,设定 R_i 为 10Ω ,根据式(6),零点 Z_2 应出现在 106 kHz 处,极点 P_4 应出现在 17.8 kHz 处,进行 PSpice 仿真.结果如图 7 所示, P_4 出现在 20 kHz 附近, Z_2 出现在 100 kHz 附近,与式(6)计



(a) AC analysis



(b) Transient analysis

图 7 容性负载补偿的交流分析和瞬态分析

Fig. 7 AC analysis and transient analysis of the compensation of the capacitive load

算结果基本相符, P_4 和 Z_2 相互抵消, 使系统的相位裕量增大至 79° , 时域响应无超调量, 调节时间缩短至 $5 \mu\text{s}$.

2.3 寄生电容的影响与补偿

实际的压电陶瓷驱动器系统中一定存在寄生电容, 其中对动态性能影响最大的是与运算放大器反向输入端相关的元件、引线、插座和印制电路板的外部寄生电容 C_e . C_e 与运放的输入电容 C_i 并联成为反向端对地电容 C_n . C_n 与反馈网络构成低通滤波结构, 如图 8 所示, 此时有

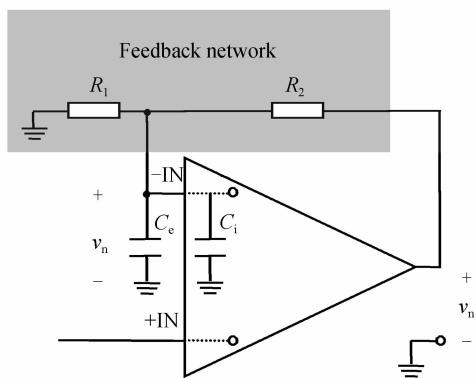


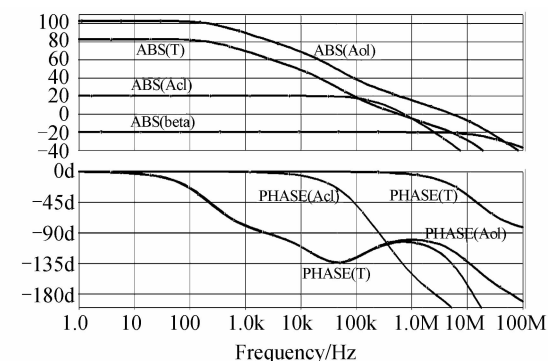
图 8 寄生电容影响的原理示意图

Fig. 8 The schematic diagram of the impact of the parasitic capacitance

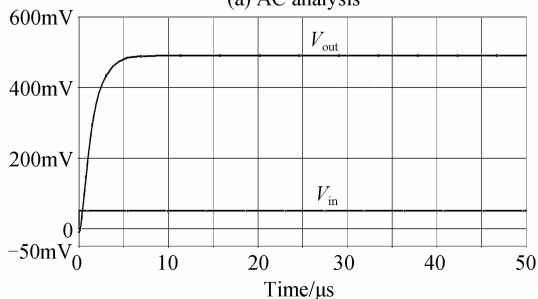
$$\beta' = \frac{v_n}{v_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + jf/P_5} \quad (7)$$

$$P_5 = \frac{1}{2\pi(R_1 \parallel R_2)C_n} \quad (8)$$

等效于向反馈网络的反馈增益 β 配置极点 P_5 . 在本



(a) AC analysis



(b) Transient analysis

图 9 寄生电容影响的交流分析和瞬态分析

Fig. 9 AC analysis and transient analysis of the impact of the parasitic capacitance

驱动器中, C_i 为 4 pF , C_e 为 8 pF ^[14], R_1 为 $1 \text{ k}\Omega$, R_2 为 $9 \text{ k}\Omega$, 根据式(8), 极点 P_5 应出现在 14.7 MHz 处, 进行 PSpice 仿真, 结果如图 9 所示, P_5 出现在 15 MHz 附近, 与式(8)计算结果基本相符, 由于 P_5 在 T 的 f_x 十倍频之后, 因此在本驱动器系统中寄生电容对动态性能基本没有影响, 故无须补偿.

3 结论

为了在光刻机投影物镜中使用压电陶瓷作为精密定位促动器, 需要进行定位系统的动态性能分析. 本文对一种由集成运算放大器构成的压电陶瓷驱动器的动态性能进行了研究, 对驱动器系统中影响动态性能的因素进行了分析并提出了相应补偿方法. 结果表明, 经动态性能补偿的驱动器具有 79° 相位裕量, 阶跃响应无超调量, 调节时间为 $5 \mu\text{s}$, 基本满足某特定光刻物镜中的使用要求. 因此, 本文中的驱动器系统架构为光刻物镜应用中的压电陶瓷驱动器设计提供了参考. 同时, 在其他类似的要求驱动器具有严格动态性能的应用中, 也可以采用本文中的动态性能补偿方法.

参考文献

- [1] XU Wei-cai, HUANG Wei, YANG Wang. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1122003. 许伟才, 黄玮, 杨旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1122003.
- [2] MATSUYAMA T, TANAKA I, OZAWA T, *et al.* Improving lens performance through the most recent lens manufacturing process[C]. *SPIE*, 2003, **5040**: 801-810.
- [3] LIU Xiang-guo, JIAN Sheng-yong, LIU Guang-cong. Study on preparing method and performances of piezoelectric ceramics actuators with square crossing shape[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2011, **33**(6): 958-960. 刘相果, 蹇胜勇, 刘光聪. 十字交叉型压电陶瓷致动器的制备方法及其性能研究[J]. *压电与声光*, 2011, **33**(6): 958-960.
- [4] PAN Song, HUANG Wei-qing, WANG Yin, *et al.* High efficiency driving of linear motor based on piezoelectric actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(10): 2464-2471. 潘松, 黄卫清, 王寅, 等. 基于压电作动器的直线电机及其高效驱动[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(10): 2464-2471.
- [5] YU You-long, TAN Ling, ZOU Li-gang, *et al.* Piezoelectric ceramic characteristics using fiber grating sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 994-997. 余有龙, 谭玲, 邹李刚, 等. 用光纤光栅传感器研究压电陶瓷的特性[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 994-997.
- [6] CHEN Hui, TAN Yong-hong, ZHOU Xing-peng, *et al.* Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(1): 88-95. 陈辉, 谭永红, 周杏鹏, 等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(1): 88-95.
- [7] LAI Zhi-lin, LIU Xiang-dong, GENG Jie, *et al.* Sliding mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse Preisach compensation[J]. *Optics and Precision Engineering*,

- 2011, **19**(6): 1281-1290.
- 赖志林,刘向东,耿洁,等. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(6): 1281-1290.
- [8] REN Bin, TONG Shou-feng, SONG Yan-song, *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.
- 任斌,佟首峰,宋延嵩,等. 空间激光通信精跟踪单元的高准确度快速 PZT 驱动技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, **32**(2): 420-425.
- [9] WANG Hong, ZHONG Chao-wei, ZHANG Shu-ren. Development of a dynamic driving line power for piezoelectric ceramic actuator[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2004, **26**(3): 189-191.
- 王宏,钟朝位,张树人. 压电陶瓷驱动器线性动态驱动电源的研制[J]. 压电与声光, 2004, **26**(3): 189-191.
- [10] ZHANG Chao, DUAN Fa-jie, JIANG Jia-jia, *et al.* Piezoelectric ceramic fiber phase modulation system and its online calibration[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(6): 89-92.
- 张超,段发阶,蒋佳佳,等. 光纤压电陶瓷相位调制系统及其在线标定[J]. 光电工程, 2011, **38**(6): 89-92.
- [11] FAN Wei, CUI Chang-cai, YE Rui-fang. The research on PZT power supply temperature control system [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, **33**(6): 946-949.
- 范伟,崔长彩,叶瑞芳. 压电陶瓷驱动器电源温度控制系统研究[J]. 压电与声光, 2011, **33**(6): 946-949.
- [12] CLINGMAN D J, GAMBLE M. High power piezo drive amplifier for large stack and PFC applications[C]. *SPIE*, 2001, **4334**: 345-353.
- [13] Cirrus. PA85. LIB [EB/OL]. http://www.cirrus.com/cn/pubs/software/apexpoweropamps_0811.zip.
- [14] FRANCO S. Design with operational amplifiers and analog integrated circuits [M]. LIU Shu-tang, ZHU Mao-lin, RONG Mei, transl. 3rd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2009.
- 佛朗哥 S. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 刘树棠,朱茂林,荣玫,译. 3 版. 西安:西安交通大学出版社, 2009.
- [15] DORF R C, BISHOP R H. Modern control system [M]. 11th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- 多尔夫 R C,毕晓普 R H. 现代控制系统[M]. 11 版. 北京:电子工业出版社, 2009.

Dynamic Performance of the PZT Driver Used in a Lithographic Objective

WANG Xue-liang, GONG Yan

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

Abstract: The dynamic performance of a PZT driver which contains an operational amplifier was studied according to the specific requirements of the image quality compensator in a lithographic objective. Firstly, the impact of the inherent frequency characteristics of the operational amplifier on dynamic performance was analyzed and the parameters of the compensatory network were fixed. Secondly, the impact of the capacitive load of the driver system on dynamic performance was analyzed and the corresponding solution was provided. Finally, the impact of the parasitic capacitance in the driver system was discussed. As calculated, after compensated the PZT driver system had a phase margin of 79 degrees and a setting time of 5 microseconds, and presented no overshoot in step response. The driver would fulfill the dynamic requirements of strong stability, rapid response and little overshoot when the PZT was used as actuator of the image quality compensator in a lithographic objective.

Key words: Lithographic objective; PZT; Dynamic performance