

文章编号 1004-924X(2016)10-2505-10

锆钛酸铅镧陶瓷光致微位移的闭环伺服控制

王新杰*, 陆 飞, 刘亚凤, 黄家瀚

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要:利用锆钛酸铅镧(PLZT)陶瓷的光致形变效应,提出了一种光控微位移伺服系统,并通过实验对其闭环伺服控制特性进行研究。建立 PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服系统的多物理场耦合数学模型,通过静态实验对光照与光停阶段 PLZT 陶瓷光致形变表达式进行了参数识别。搭建了 PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服控制实验平台,基于 ON-OFF 控制策略,在不同光照强度下对 PLZT 陶瓷的光致微位移进行了闭环伺服控制实验。结果表明,通过对紫外光源施加 ON-OFF 控制,能够实现 PLZT 陶瓷输出位移的闭环伺服控制。PLZT 陶瓷输出位移曲线在伺服控制阶段出现超调量之后,围绕目标值上下波动。光致微位移伺服系统的响应速度、超调量与波高随着光照强度的增强而增加;在 400 mW/cm^2 光照强度下,PLZT 陶瓷输出位移到达目标值的时间仅为 100 mW/cm^2 光照强度下的 20%。实验结果为 PLZT 陶瓷在微驱动方面的工程应用奠定了基础。

关键词:锆钛酸铅镧(PLZT)陶瓷;闭环伺服控制;光致形变;光驱动;微位移

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162410.2505

Closed-loop servo control of photo-induced micro displacement of PLZT ceramic

WANG Xin-jie, LU Fei, LIU Ya-feng, HUANG Jia-han

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: xjwang@njust.edu.cn

Abstract: An optical control servo system for micro displacement was proposed based on the photodeformation effect of PLZT (Lead Lanthanum Zirconate Titanate) ceramic and its closed-loop servo control characteristic was researched via an experiment method. The control equations of servo system were derived based on the mathematical model of PLZT with coupled multi-physics fields. Then, parameters in photodeformation expression of PLZT ceramic during light on/off phases were identified through the static experiment. An experimental platform for closed-loop servo control of photo-induced micro displacement of PLZT ceramic was set up and corresponding control experiments were carried out based on on-off control strategy under different light intensities. The experimental results show that the output displacement of PLZT ceramic is controlled with simple on-off method by applying ultraviolet light. After the output displacement curve of PLZT ceramic actuator reaches the target

收稿日期:2016-05-01;修订日期:2016-06-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51205205),中国博士后基金资助项目(No. 2012M521083),中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 30915118823)

value, some different degrees of overshoot are presented, and the output displacement of PLZT ceramic actuator fluctuates around the target value. The response speed, overshoot and fluctuation height increase with the increasing light intensity. The time of the output displacement of PLZT ceramic reaching the target value under the illumination of 400 mW/cm^2 is only about 20 percent of that under the illuminated of 100 mW/cm^2 by the UV light. The results lay foundation for application of the PLZT ceramic in micro actuator engineering.

Key words: PLZT ceramic; closed-loop servo control; photodeformation; optical driving; micro displacement

1 引言

微光机电伺服系统以其对光束在时间和空间上的精确控制能力以及体积小、功耗低等优点,被广泛应用于大型光学孔径的航天器小型化、卫星通信的光束主动对准系统^[1]、激光装置光束自动准直系统^[2]以及激光扫描等系统中^[3]。而作为光学系统中光束调节装置的核心部件,微镜的驱动装置决定了整个系统的结构、尺寸和重量。传统的驱动方式中的电磁、压电、静电驱动^[4]都需要通过导线传递能量与信号,容易受到电磁干扰。

PLZT 陶瓷可将光能直接转化为机械能,而基于 PLZT 陶瓷作动器的光驱动伺服系统能够实现非接触式伺服控制,避免电磁噪声干扰,并具备无线能量传输等优点。PLZT 陶瓷的时域本构模型是开展 PLZT 陶瓷微驱动应用研究的理论基础,受到相关研究者的重视。1983 年 Brody^[5]等人提出利用 RC 充电电路模型描述光照阶段 PLZT 陶瓷在极化方向上电场的变化规律,但并未分析光停止后电场的变化规律。1993 年, Fukuda^[6]等人利用实验方法证实了 PLZT 陶瓷光致伸缩效应是多物理场耦合作用的结果,但未对此耦合关系进行数学建模。2005 年, Shih^[7]等人结合 Fukuda 等人的实验数据推导了 PLZT 陶瓷光致伸缩的本构方程,但未考虑热膨胀效应对光生电场的影响。2014 年,黄家瀚和王新杰等人^[8-10]考虑到热膨胀效应对光致电场的影响,基于多场耦合关系提出了一种光生电压及光致形变预测模型,通过 PLZT 陶瓷静态伸缩实验对模型的合理性进行了验证,并推导了光停阶段 PLZT 陶瓷形变的光-电-热-力耦合本构方程。为 PLZT 陶瓷在微驱动领域的闭环控制提供了理论依据。

目前, PLZT 在微驱动领域的工程应用主要体现在两大方面,一是开展 PLZT 陶瓷层合柔性结构的主动振动控制研究;二是开展 PLZT 光控伺服控制系统研究。在主动振动控制方面,学者们进行了大量的研究,相继开展了光电层合梁^[11,12]、板^[13,14]、壳^[15]的主动控制研究,但大多侧重于理论研究,缺少实验验证;且所采用的本构方程仍需完善。在光控伺服控制研究方面的相关文献较少;1995 年, Fukuda^[16]等人基于 PLZT 陶瓷双晶片提出一种光控伺服系统,并对其进行了实验验证,但未能从 PLZT 的本构方程出发给出光控伺服系统的数学模型。1997 年, Morikawa^[17]等人针对双晶片式 PLZT 陶瓷提出一种有效的位置控制策略,然而有关 PLZT 双晶片在光停阶段位移变化的数学模型未见报导。综上所述, PLZT 在微驱动方面的工程应用的核心问题就是完善 PLZT 陶瓷本构模型的基础上,开展 PLZT 陶瓷的闭环伺服控制研究。

本文基于单片式 PLZT 陶瓷提出一种光控微位移伺服系统,并利用前期所建立的 PLZT 陶瓷多场耦合数学模型,推导了光控微位移伺服系统的控制方程;并基于 ON-OFF 控制策略,对不同光照强度下 PLZT 陶瓷的输出位移进行闭环伺服控制实验研究。从而为 PLZT 陶瓷在微驱动方面的工程应用奠定基础。

2 PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服控制模型

2.1 光致微位移闭环伺服控制系统

PLZT 陶瓷的光致微位移闭环伺服控制系统由 PLZT 陶瓷、紫外光源、非接触式位移传感器、

计算机、光快门控制器以及光快门等组成,如图 1 所示。PLZT 陶瓷一端固支,一端自由;当紫外光源垂直照射 PLZT 陶瓷上表面时,PLZT 陶瓷的自由端将产生光致形变微位移,由非接触式位移传感器测量,并实时反馈到计算机中,经过数据处理与运算,通过光快门控制器控制光快门的开关,实现对光源的导通与斩断,并最终实现对 PLZT 陶瓷光致微位移的伺服控制。

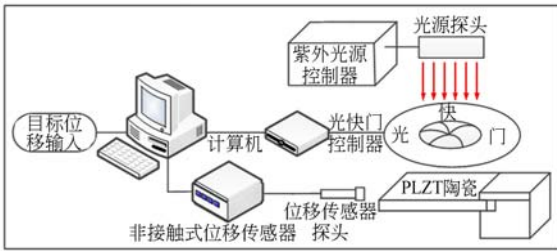


图 1 PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服控制系统框图
Fig. 1 Block diagram of closed-loop servo control system for photo-induced micro displacement of PLZT ceramic

2.2 光致微位移闭环伺服控制数学模型

PLZT 陶瓷的光致形变效应是多物理场耦合作用的结果,耦合关系如图 2 所示。当高能紫外光源照射 PLZT 陶瓷时,由于反常光生伏特效应,在 PLZT 陶瓷电极两端会产生高达数 kV/cm 的光生电场;由于光焦热效应,光照还会使 PLZT 陶瓷本体温度升高;而 PLZT 陶瓷温度的急剧变化,会诱发热释电效应,在 PLZT 陶瓷电极两端产生热释电场^[18];在热膨胀效应和压电效应的综合作用下,PLZT 陶瓷发生光致形变。基于正压电效应,一部分热膨胀形变会在 PLZT 陶瓷两端电极间产生电场,其电场方向与光生电场和热释电电场方向相反^[4]。

根据上述对 PLZT 陶瓷光致形变多场耦合关系分析,在光照阶段 PLZT 陶瓷所产生的光致形变为^[8]:

$$S(t) = \epsilon(t) D_e = \left[d_{3i} \frac{V_p(t) + V_\theta(t) - \beta V_e(t)}{D_e} + \epsilon_c \right] D_e = d_{3i} V_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + \left[\frac{d_{3i} A P \Delta T_s}{C_p} + (1 - \beta) \frac{\lambda \Delta T_s D_e}{Y_a} \right] (1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}), \quad (1)$$

式中: d_{3i} 为 PLZT 陶瓷的压电常数; V_p 为光生电

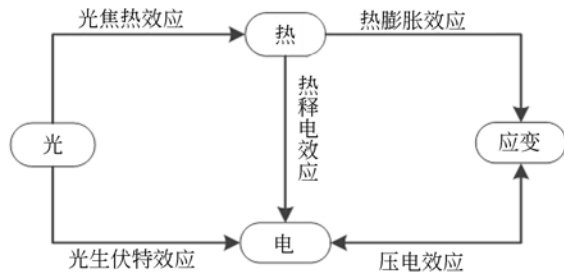


图 2 PLZT 陶瓷的光-电-热-力多物理场耦合关系示意图
Fig. 2 Coupling relationship of opto-electric-thermo-mechanic multi-physics fields of PLZT ceramic

Fig. 2 Coupling relationship of opto-electric-thermo-mechanic multi-physics fields of PLZT ceramic

压,且 $V_p(t) = V_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}})$, 其中 V_s 是饱和光生电压, τ_1 为光照时间常数; V_θ 为热释电电压,且 $V_\theta(t) = \frac{A P \Delta T_s}{C_p} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}})$, 其中 A 是 PLZT 陶瓷光照面积, P 是 PLZT 陶瓷热释电系数^[14], ΔT_s 为光照条件下温度最大变化量, τ_0 为热时间常数; λ 为 PLZT 陶瓷的热应力系数; Y_a 为 PLZT 陶瓷的杨氏模量; V_e 为由热形变所产生的电压,且 $V_e(t) = \frac{\lambda D_e}{d_{3i} Y_a} \Delta T_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}})$; D_e 为 PLZT 陶瓷两个电极之间的距离; β 为热膨胀电压耦合系数。

关闭高能紫外光源后,PLZT 陶瓷驱动器在光照停止阶段的光致形变为^[9]:

$$S_d(t) = d_{3i} V_d(t) - S_{e-d}(t) = d_{3i} V(t_0) - \left(\frac{d_{3i} A P}{C_p} + \frac{(1 - \beta_2) \lambda D_e}{Y_a} \right) \Delta T_{s-d} + \left(\frac{d_{3i} A P}{C_p} + \frac{(1 - \beta_2) \lambda D_e}{Y_a} \right) \Delta T_{s-d} e^{-\frac{t}{\tau_d}}, \quad (2)$$

式中: $V(t_0)$ 为当紫外光源在 t_0 时刻关闭时, PLZT 陶瓷电极两端的电压; ΔT_{s-d} 是停止光照后,温度最大变化量, $\Delta T_{s-d} = T(t_0) - T_0$, 其中 $T(t_0)$ 为紫外光源在 t_0 时刻关闭时 PLZT 陶瓷的温度, T_0 是 PLZT 陶瓷周边环境温度; τ_d 是黑暗时间常数; β_2 为热变形与电场强度的转化系数。 S_{e-d} 为由于温度所引起的 PLZT 陶瓷的形变。

由于 PLZT 陶瓷在停止光照后,最终将恢复到光照前的无形变状态,即当 t 趋于无穷大时, $S_d(t)$ 趋于 0,因此 PLZT 陶瓷光照停止阶段的光致形变可以简化为:

$$S_d(t) = \left(\frac{d_{3i} A P}{C_p} + \frac{(1 - \beta_2) \lambda D_3}{Y_a} \right) \Delta T_{s-d} e^{-\frac{t}{\tau_d}}. \quad (3)$$

为了方便对不同光强下 PLZT 陶瓷光致形变表达式进行参数识别,分别对式(1)和式(3)进行简化。根据式(1),PLZT 陶瓷在光照阶段输出的光致微位移可简化为:

$$S(t) = d_{3i}V_s(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + B_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}), \quad (4)$$

$$\text{式中: } B_1 = \frac{d_{3i}AP\Delta T_s}{C_p} + (1 - \beta) \frac{\lambda\Delta T_s D_e}{Y_a}。$$

根据式(3),PLZT 陶瓷在光照停止阶段输出的光致微位移可简化为:

$$S_d(t) = B_2 e^{-\frac{t}{\tau_d}}, \quad (5)$$

$$\text{式中: } B_2 = \left(\frac{(1 - \beta_2)\lambda D_e}{Y_a} - \frac{d_{3i}AP}{C_p} \right) \Delta T_{s-d}。$$

综上所述,PLZT 陶瓷光致微位移的伺服控制理论模型为:

$$\begin{cases} S(t_{(m+1)_j}) = S(t_{m_j}) + \left(\frac{d_{3i}V_s}{\tau_1} e^{-\frac{t_{m_j}}{\tau_1}} + \frac{B_1}{\tau_\theta} e^{-\frac{t_{m_j}}{\tau_\theta}} \right) \Delta t \\ (S(t_{m_j}) \leq S_t), \end{cases} \quad (6a)$$

$$\begin{cases} t_{n_j} (n=0) = S_d^{-1}(S(t_{m_j})) \\ (S(t_{(m-1)_j}) \leq S_t, S(t_{m_j}) > S_t), \end{cases} \quad (6b)$$

$$\begin{cases} S_d(t_{(n+1)_j}) = S_d(t_{n_j}) - \left(\frac{B_2}{\tau_d} e^{-\frac{t_{n_j}}{\tau_d}} \right) \Delta t \\ (S_d(t_{n_j}) > S_t), \end{cases} \quad (6c)$$

$$\begin{cases} t_{m_{j+1}} (m=0) = S^{-1}(S_d(t_{n_j})) \\ (S_d(t_{(n-1)_j}) > S_t, S(t_{n_j}) \leq S_t), \end{cases} \quad (6d)$$

$$t = \sum_j (m_j + n_j) \Delta t, \quad (6e)$$

式中: Δt 是位移传感器的采样周期, S_t 是控制前输入的目标位移; j 为紫外光源的 ON-OFF 控制周期数,由于每一个周期不一定相等,则周期可以用公式 $T = (m_j + n_j)$ 表示,其中 m_j 与 n_j 分别为一个 ON-OFF 控制周期内光照和光停阶段位移传感器的采样周期数; $S_d^{-1}(S(t_{m_j}))$ 是光停止阶段 PLZT 陶瓷输出位移公式的反函数, $S^{-1}(S_d(t_{n_j}))$ 是光照阶段 PLZT 陶瓷输出位移公式的反函数; t 表示 PLZT 陶瓷光致微位移伺服控制系统运行的总时间。

2.3 光致微位移闭环伺服控制模型的参数识别

在 PLZT 陶瓷静态试验中,对不同光照强度 (100 mW/cm^2 、 200 mW/cm^2 、 300 mW/cm^2 、 400 mW/cm^2) 下 PLZT 陶瓷输出位移进行开环测量,测量时间为 600 s ,其中光照和光停阶段各 300 s 。图 3 所示为不同光照强度下 PLZT 陶瓷输出位移随时间变化曲线。

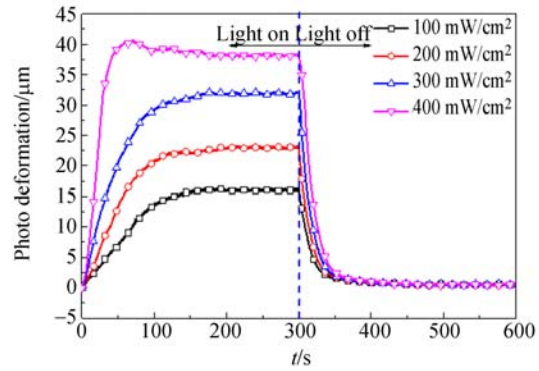


图 3 不同光照强度下 PLZT 陶瓷位移随时间变化曲线

Fig. 3 Time history of photostrictive curves of PLZT ceramic under different intensities

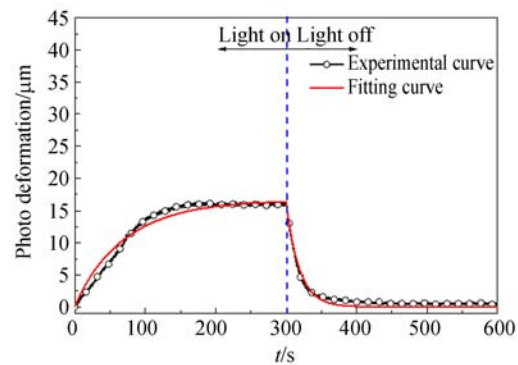
由式(4)~(5),建立 PLZT 陶瓷在静态实验中输出位移与光照时间的 S-T 数学模型表达式:

$$\begin{cases} S(t) = d_{3i}V_s(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + B_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}) & (0 < t \leq 300), \\ S_d(t) = B_2 e^{-\frac{t-300}{\tau_d}} & (300 < t \leq 600), \end{cases} \quad (7)$$

式中: $d_{3i}V_s$ 、 B_1 、 τ_1 、 τ_θ 、 B_2 和 τ_d 均为模型待求参数。利用 Origin 软件的非线性曲线拟合功能,基于 S-T 模型的表达形式,对不同光照强度下 PLZT 陶瓷输出位移曲线进行拟合,得到 S-T 模型各待定参数。其求解步骤如下。

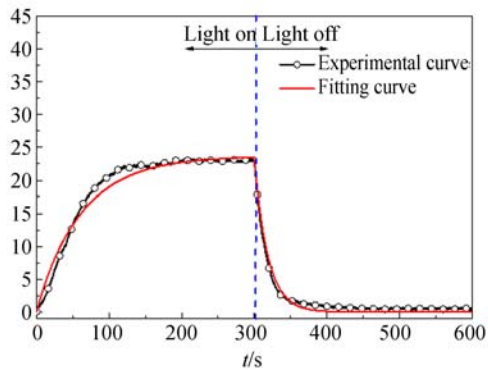
(1)将实测的 PLZT 陶瓷输出位移随时间变化数据导入到 Origin 软件的 worksheet 工作表格中,可绘制 S-T 实验曲线。

(2)在实验曲线图中,采用 Analysis 命令中的 Nonlinear Curve Fit,依据 S-T 模型的表达形式,分别创建 PLZT 陶瓷光照和光停阶段位移输出函数。

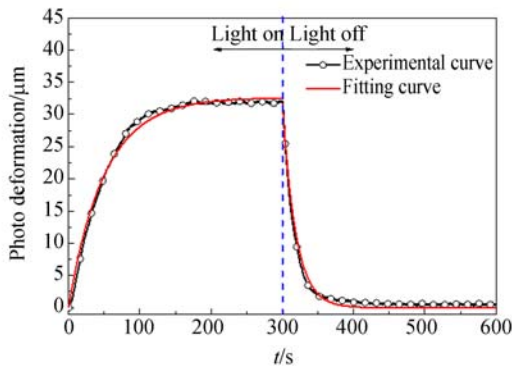


(a) 光照强度为 100 mW/cm^2

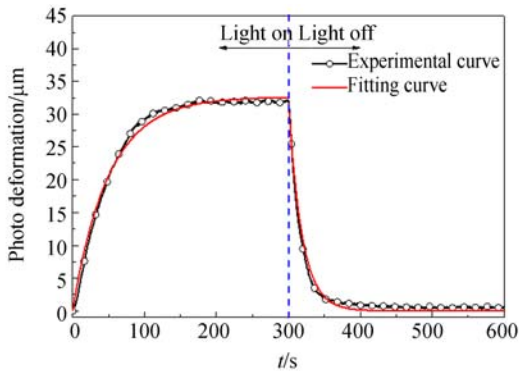
(a) Light intensity is 100 mW/cm^2



(b) 光照强度为 200 mW/cm²
(b) Light intensity is 200 mW/cm²



(c) 光照强度为 300 mW/cm²
(c) Light intensity is 300 mW/cm²



(d) 光照强度为 400 mW/cm²
(d) Light intensity is 400 mW/cm²

图 4 不同光照强度下 PLZT 输出位移的实验曲线与拟合曲线

Fig. 4 Experimental curves and fitting curves of deformation of PLZT ceramic irradiated by the ultraviolet light with different intensities

(3) 在 Function Selection 中, 输入各参数的初始值和取值范围。点击 Fit 命令进行拟合, 即可得各参数值及其拟合误差等信息。

图 4 所示为 PLZT 陶瓷在不同光照强度下的光致输出位移的拟合曲线; 表 1、2 为 S-T 模型中的各参数值拟合值。

表 1 光照阶段 PLZT 陶瓷输出位移表达式中各参数的识别值

Tab. 1 Identification values of parameters in the expression of PLZT output displacement under during irradiation phase

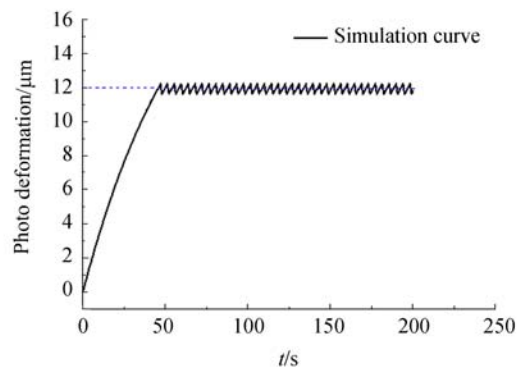
光照强度 (mW/cm ²)	参数标定			
	$d_{31}V_s$ (μm)	B_1 (μm)	τ_1 (s)	τ_0 (s)
100	0.534 1	16.158 5	11.234 1	72.523 1
200	0.583 4	23.079 2	10.236 5	62.523 6
300	0.625 4	32.013 8	9.236 1	51.232 1
400	0.726 3	38.241 9	8.342 1	28.236 3

表 2 光停阶段 PLZT 陶瓷输出位移表达式各参数的识别值

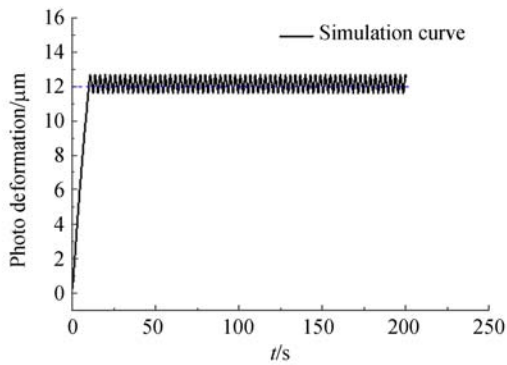
Tab. 2 Identification values of parameters in the expression of PLZT output displacement during light switched off phase

光照强度 (mW/cm ²)	参数标定	
	B_2 (μm)	τ_0 (s)
100	16.247 9	18.654 8
200	23.231 1	18.654 8
300	31.976 4	18.654 8
400	39.457 2	18.654 8

根据式(6)及表 1、表 2 所识别的 S-T 模型参数, 在 Matlab 中分别对 200 mW/cm² 和 400 mW/cm² 光照强度下 PLZT 陶瓷的输出位移进行伺服控制仿真。采样周期 Δt 设置为 200 ms, 目标位移设置为 12 μm, 仿真时间设置为 200 s, 如图 5 所示。从图中可以看出, 随着光照强度的



(a) 光照强度为 200 mW/cm²
(a) Light intensity is 200 mW/cm²



(b) 光照强度为 400 mW/cm²

(b) Light intensity is 400 mW/cm²

图 5 PLZT 光致微位移闭环伺服控制仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of closed-loop servo control of photo-induced micro displacements of PLZT ceramic

增加,PLZT 陶瓷的响应速度增加,到达目标位移的时间逐步减小,但在到达目标位移后,围绕目标位移的波动幅度也逐步增加。

3 PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服控制实验

3.1 光致微位移闭环伺服控制实验平台

PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服控制实验平台如图 6 所示。实验所用 PLZT 陶瓷样品由中科院上海硅酸盐研究所提供,陶瓷片尺寸为 13 mm × 5 mm × 0.8 mm,组分为 3/52/48。高能紫外光源为波长 365nm 附近的 LED-UV 面光源;PLZT 陶瓷输出的微位移由非接触式色散共焦位移传感器进行测量。

实验平台中所采用的光快门为美国 Thorlabs 公司的 SHB1 光快门,其最小开关响应时间均在 10 ms 以内。为了实现闭环伺服控制,需要重新设计光快门的驱动与控制电路。图 7 是根据伺服系统需要设计制作的光快门驱动与控制电路。

微控制器 C8051F410 通过接收上位机发送的命令改变光快门的的状态,同时通过串口返回当前光快门的的状态。由于单片机 C8051F410 的每个 I/O 引脚最大输出电流为 100 mA,而光快门的驱动电流需要 0.6 A 以上,所以单片机的 I/O

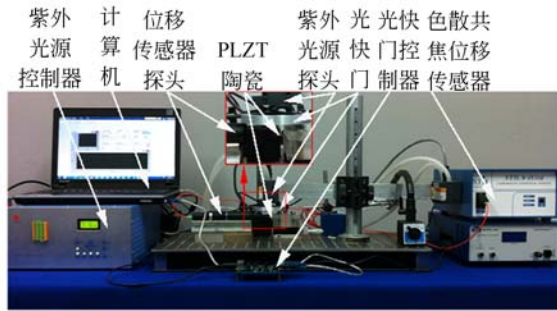


图 6 PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服控制实验平台

Fig. 6 Experiment setup for closed-loop servo control of photo-induced micro displacement of PLZT ceramic



图 7 光快门驱动与控制电路

Fig. 7 Drive and control circuit of optical shutter

口不能够直接驱动光快门。驱动电路采用 L9110H 芯片作为光快门的驱动芯片,其每个通道能够通过 750~800 mA 的持续电流,并具有较高的输出饱和压降,内置的钳位二极管能释放感性负载的反向冲击电流。光快门执行机构通过 Mini din4 接口与控制器连接。

3.2 光致微位移闭环伺服控制策略

利用实验平台,基于 ON-OFF 控制策略,对紫外光源照射下的 PLZT 陶瓷进行微位移伺服控制实验研究,其控制策略如图 8 所示。

PLZT 陶瓷形变量在未达到目标值之前,紫外光源对其进行持续照射,同时非接触式位移传感器实时测量形变数据。当 PLZT 陶瓷的形变量大于目标值时,上位机向光快门控制器发送“OFF”命令,光快门关闭,同时 PLZT 陶瓷开始收缩。当 PLZT 陶瓷形变量小于目标值时,上位机向光快门控制器发送“ON”命令,光快门打开,

PLZT 陶瓷在光照下继续伸长。从而利用紫外光源“开关”动作实现对 PLZT 陶瓷微位移的非接触伺服控制。

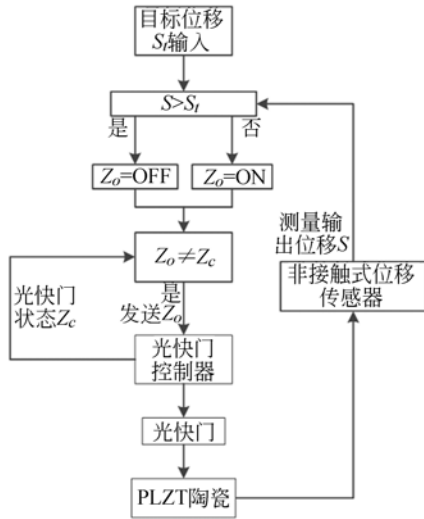
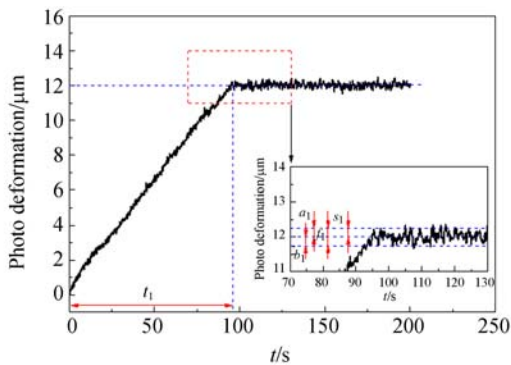


图 8 ON-OFF 控制策略

Fig. 8 ON-OFF control strategy

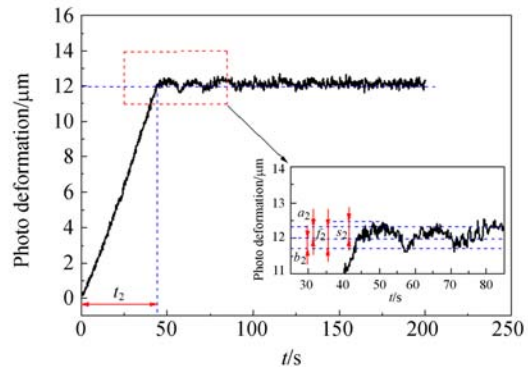
3.3 实验结果及分析

如图 9 所示为在 100 mW/cm^2 、 200 mW/cm^2 、 300 mW/cm^2 和 400 mW/cm^2 光照强度下 PLZT 陶瓷光致微位移的伺服控制实验曲线。实验前设置采样周期为 200 ms ，实验时间为 200 s ，目标位移为 $12 \mu\text{m}$ 。PLZT 陶瓷的输出位移达到目标位移后，开始围绕目标位移值上下波动。输出位移从零时刻至首次达到目标位移所需时间是衡量该伺服系统响应速度的重要指标。由于 PLZT 陶瓷在光照与光停下的形变速率不一致，所以波动曲线的波峰和波谷与目标位移之间的距离



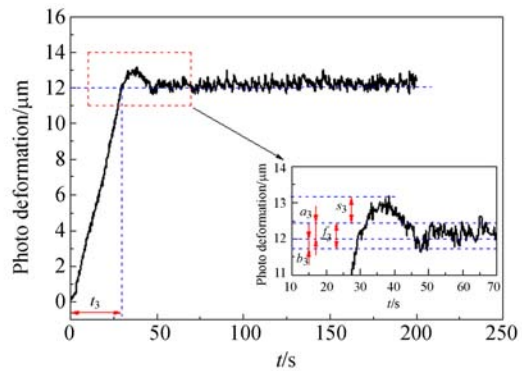
(a) 光照强度为 100 mW/cm^2

(a) Light intensity is 100 mW/cm^2



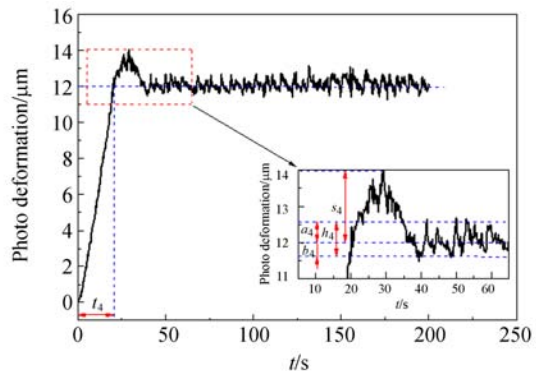
(b) 光照强度为 200 mW/cm^2

(b) Light intensity is 200 mW/cm^2



(c) 光照强度为 300 mW/cm^2

(c) Light intensity is 300 mW/cm^2



(d) 光照强度为 400 mW/cm^2

(d) Light intensity is 400 mW/cm^2

图 9 不同光强下 PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服控制曲线

Fig. 9 Experimental curves of closed-loop servo control of photo-induced micro displacements of PLZT ceramic with different light intensities

离不相等。平均波高 f 是衡量该伺服系统控制效果的重要指标。

从图 9(a)~(d)可以得到在 100 mW/cm^2 、 200 mW/cm^2 、 300 mW/cm^2 和 400 mW/cm^2 光照强度下所对应的参数 t_r 分别为 95.8 s 、 44.2 s 、 29.4 s 和 19.2 s ；所对应的平均波高 f 分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.65 \mu\text{m}$ 、 $0.75 \mu\text{m}$ 和 $0.9 \mu\text{m}$ 。另外，光照强度为 200 mW/cm^2 、 300 mW/cm^2 和 400 mW/cm^2 时，PLZT 陶瓷的输出位移曲线在达到目标值后都出现了不同程度的超调，其超调量分别为 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.65 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 。

从上述实验结果分析可知，通过对紫外光源施加 ON-OFF 控制，能够实现对 PLZT 陶瓷微位移的伺服控制。通过对比图 9(a)~(d) 中 PLZT 陶瓷输出位移曲线，可得到以下结论：

(1) PLZT 陶瓷的响应速度随着光照强度的增加而增大，与仿真结果吻合；在 400 mW/cm^2 光照强度下，PLZT 陶瓷输出位移到达目标值的时间仅为 100 mW/cm^2 光照强度下的 20%；

(2) PLZT 陶瓷的输出位移在达到目标值后，围绕目标值上下波动的平均波高随着光照强度的增加而增加，与仿真结果一致。这主要是因为相等的时间间隔内，光照强度越强，PLZT 陶瓷的光致形变速率越大，从而导致波高越大。同时，通过对实验曲线分析得知，波高的增加主要是由于在光照下，随着光强增大而引起的波峰距离目标位移的上偏差的增大，从 100 mW/cm^2 的 $0.25 \mu\text{m}$ 增加到 400 mW/cm^2 的 $0.6 \mu\text{m}$ 。而在停止光照后，PLZT 陶瓷收缩所引起的波谷距离目标位移的下偏差几乎没有变化，仅仅从 100 mW/cm^2 的 $0.25 \mu\text{m}$ 增加到 400 mW/cm^2 的 $0.35 \mu\text{m}$ ；

(3) PLZT 陶瓷输出位移在达到目标值后所出现的超调量随着光照强度增强而增加。

为了进一步研究闭环控制下 PLZT 陶瓷光致微位移的伺服特性，进行了 400 mW/cm^2 光照强度下多目标位移伺服控制实验，如图 10 所示。

A 时刻为紫外光源开始对 PLZT 陶瓷进行照射，PLZT 陶瓷的输出位移迅速增加，在 B 时刻首次达到目标位移值 $20 \mu\text{m}$ ，然后在伺服系统的控制下围绕目标位移值上下波动。在 C 时刻，输入新的目标位移值 $26 \mu\text{m}$ ，PLZT 陶瓷的输出位移继续增加，在 D 时刻到达新的目标位移值，然后在伺服系统的作用下，围绕新的目标位移上下波动直到 E 时刻结束。同样需要指出的是，

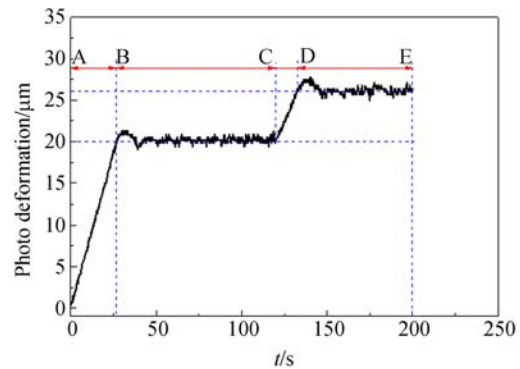


图 10 400 mW/cm^2 光照强度下多目标位移光驱动 PLZT 陶瓷伺服控制实验曲线

Fig. 10 Experimental curve of closed-loop servo control for photo-induced micro displacements of PLZT ceramic with multi-targets

PLZT 陶瓷的输出位移在达到目标位移值后，同样出现了不同程度的超调量。

4 结 论

本文利用 PLZT 陶瓷所具有的光致形变效应，提出一种光控微位移伺服系统，与传统电磁驱动的位移伺服系统相比，其具有无电磁干扰、非接触控制、无线能量传输等优点。基于 PLZT 陶瓷多场耦合本构方程，构建了 PLZT 陶瓷光致微位移的闭环伺服控制模型，并对数学模型中的相关参数进行了识别。搭建 PLZT 陶瓷光致微位移闭环伺服控制实验平台，并基于 ON-OFF 控制策略，对不同光照强度下 PLZT 陶瓷的输出位移进行伺服控制的实验研究。

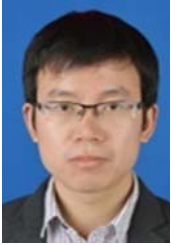
实验结果表明，随着光照强度的增加，PLZT 陶瓷输出位移到达目标位移的时间逐渐减小，即该伺服系统的响应速度逐渐增大，在 400 mW/cm^2 光照强度下，PLZT 陶瓷输出位移到达目标值的时间仅为 100 mW/cm^2 光照强度下的 20%；另外，当光照强度增大时，输出位移的波动幅度逐渐增大，达到目标值后所出现的超调也越大，在 400 mW/cm^2 的光照强度下其输出位移的超调量达到 $2 \mu\text{m}$ ，这将对控制精度造成不利影响，在今后的工作中将通过预测控制和变光强控制等手段来消除波动幅度与超调量，进一步提高 PLZT 陶瓷光致微位移伺服系统的控制精度。

参考文献:

- [1] 徐科华,马晶,谭立英. 深空光通信中光束瞄准技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 16-21.
XU K H, MA J, TAN L Y. Research on beam pointing in deep space optical communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 16-21. (in Chinese)
- [2] 李红,王东方,邹伟,等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002003.
LI H, WANG D F, ZOU W, *et al.*. Design of high power laser beam automatic alignment system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, 40(10): 1002003. (in Chinese)
- [3] 郑猛,冯其波,邵双运,等. CR 扫描仪激光扫描光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 21-28.
ZHENG M, FENG Q B, SHAO SH Y, *et al.*. Design and analysis of laser scanning optical system for computed radiography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 21-28. (in Chinese)
- [4] CHEN CH A, CHIU Y. Flip-up micro scanning mirror with vertical comb drive assembled by simple push operations [C]. *Proceedings of the 16th International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, Istanbul, Turkey: OMN*, 2011: 189-190.
- [5] BRODY P S. Optomechanical bimorph actuator [J]. *Ferroelectrics*, 1983, 50(1): 27-32.
- [6] FUKUDA T, HATTORI S, ARAI F, *et al.*. Characteristics of optical actuator - servomechanisms using bimorph optical piezoelectric actuator [J]. *Proceeding of IEEE Robotics and Automation Conference*, 1993: 618-23.
- [7] SHIH H R, TZOU H S, SAYPURI M. Structural vibration control using spatially configured opto-electromechanical actuators [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 284(1): 361-378.
- [8] HUANG J H, WANG X J, WANG J. A mathematical model for predicting photo-induced voltage and photostriction of PLZT with coupled multi-physics fields and its application [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 25(2): 025002.
- [9] HUANG J H, WANG X J, WANG J. A study on residual photovoltage and photo-induced strain in PLZT ceramic with coupled multi-physics fields [C]. *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Houston*.
- [10] 黄家瀚,王新杰,王灵. PLZT 陶瓷在多能场耦合下的光致伸缩效应 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 760-768.
HUANG J H, WANG X J, WANG J. Photostrictive effect of PLZT ceramic at coupling of multiple energy fields [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 760-768. (in Chinese)
- [11] SUN T, TONG L Y. Modeling of wireless remote shape control for beams using nonlinear photostrictive actuators [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(2): 672-684.
- [12] JIANG J, DENG Z Q, YUE H H, *et al.*. Research on constitutive model of hybrid photovoltaic/piezoelectric actuation mechanism [C]. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers*, 2014, Montreal.
- [13] SHIH H R, TZOU H S, SAYPURI M. Structure vibration control using spatially configured opto-electromechanical actuators optomechanical bimorph actuator [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 284: 361-378.
- [14] ZHENG S J. Finite element simulation of wireless structural vibration control with photostrictive actuators [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(3): 709-716.
- [15] 邓宗全,王新杰,岳洪浩. 光电层合抛物薄壳的主动控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(5): 1433-1438.
DENG Z Q, WANG X J, YUE H H. Active con-

- trol of photostrictive laminated thin paraboloidal shell [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(5):1433-1438. (in Chinese)
- [16] FUKUDA T, HATTORI S, ARAI F, *et al.*. Performance improvement of optical actuator by double side irradiation [J]. *IEEE T. Ind. Electron*, 1995, 42: 455-461.
- [17] MORIKAWA, YASUSHI, TAKESHI N. Position control of PLZT bimorph-type optical actuator by on-off control. *Industrial Electronics, Control and Instrumentation [C]. IECON 97, 23rd International Conference on*, 1997:1403-1408.
- [18] 邵式平. 热释电效应及其应用[M]. 北京:兵器工业出版社, 1994:109-110.
- SHAO SH P. *Pyroelectric Effect and Its Application* [M]. Beijing: Ordnance Ind. Press, 1994: 109-110. (in Chinese)

作者简介:



王新杰(1982—),男,河南平顶山人,博士,副教授,2004年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2006年、2011年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事智能材料、结构及其控制以及基于光致形变材料的微驱动与控制等方面的研究。E-mail: xjwang@njust.edu.cn



陆飞(1991—),男,江苏盐城人,硕士研究生,2014年于浙江理工大学获得学士学位,主要从事光致形变材料特性及其驱动控制系统等方面的研究。E-mail: yanghuaishu1991@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)