

光纤对正用光控驱动器的驱动性能研究

唐玉娟¹, 林 璟², 王新杰²

(1. 金陵科技学院智能科学与控制工程学院, 江苏 南京 211169;
2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对光纤对正用电磁类驱动器存在的电磁干扰问题,在分析镧改性锆钛酸铅(PLZT)陶瓷反常光生伏特效应、热释电效应、热膨胀效应以及压电效应耦合机理的基础上,推导了光照阶段 PLZT 陶瓷多能场耦合的光致形变公式,构建了 PLZT 陶瓷层合悬臂梁式光控驱动器在光照条件下的挠度输出数学模型,对光控驱动器的驱动位移进行了仿真分析。结果表明:光控驱动器的驱动位移和响应速度随着光照强度的增大而增大,且逐渐达到一个饱和值;在光照强度为 $200 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下,光纤对正用光控驱动器的最大输出位移可达 $226.7 \mu\text{m}$ 。

关键词: PLZT 陶瓷;光控驱动器;光致形变;光纤对正

中图分类号:TB381

文献标识码:A

文章编号:1672-755X(2022)01-0057-07

Study on Driving Performance of Optical Control Driver for Optical Fiber Alignment

TANG Yu-juan¹, LIN Jing², WANG Xin-jie²

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;
2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the problem of electromagnetic interference in the electromagnetic driver for optical fiber alignment, based on analysing coupling mechanism of anomalous photovoltaic effect, pyroelectric effect, thermal expansion effect and piezoelectric effect of lead lanthanum zirconate titanate (PLZT) ceramics, the photoinduced deformation formula of PLZT ceramic multi energy field coupling in the illumination stage is deduced, and the deflection output mathematical model of PLZT ceramic laminated cantilever optical control driver under light conditions is constructed. The driving displacement of the optical control driver is simulated and analyzed. The results show that the driving displacement and response speed of the optical control driver increase with the increase of light intensity, and gradually reach a saturation value. When the light intensity is $200 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, the maximum output displacement of the optical control driver for optical fiber alignment can reach $226.7 \mu\text{m}$.

Key words: PLZT ceramics; optical control driver; photoinduced deformation; optical fiber alignment

随着光纤通信技术的飞速发展,光信道间信息的交换可直接由光交换来完成,其中光纤对正驱动器是光交换中的重要组成机构。常见的微驱动器工作方式有压电驱动^[1]、形状记忆合金驱动^[2]、静电驱动^[3]、

收稿日期:2021-11-24

基金项目:2021 年度江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象项目

作者简介:唐玉娟(1987—),女,河南信阳人,副教授,博士,主要从事智能材料与结构研究。

电磁驱动^[4]和电致形变驱动^[5]等;但这些驱动方式均需要电磁激发装置,使得上述驱动方式的电磁兼容性较差。在特定波长高能光源的照射下镧改性锆钛酸铅(PLZT)陶瓷材料具有反常光生伏特效应及光致形变效应,在极化方向上可产生电场数量级的光生电压和光致形变位移,可以把光能直接转换成机械能,具有电磁兼容性好、驱动源清洁、可远距离控制等优点,为光纤对正驱动方式提供一种选择。

自 PLZT 陶瓷问世以来,很多研究者侧重于研究材料的制备及其电光效应。2002 年 Morikawa 等^[6]利用 PLZT 陶瓷的反常光生伏特效应,提出了一种新型光电马达。此后,国内学者如西北工业大学的唐波^[7]和东南大学的黄学良等^[8]也开展了基于 PLZT 陶瓷的光电马达研究,他们认为光电马达能将光能转化为机械能,可作为一种驱动源对负载进行驱动,但光电马达的结构较为复杂,利用光电马达对负载进行驱动时需要借助传动机构,降低了光电马达的输出性能。PLZT 陶瓷的光致形变效应是反常光生伏特效应、热释电效应、热膨胀效应以及压电效应之间相互耦合的结果,可以直接将光能转化为机械能,不需要传动机构,具有直接驱动(近零传动)的特点。基于此特点,研究者们开启了 PLZT 陶瓷光致形变理论及其工程应用的相关研究,他们将 PLZT 陶瓷的光致形变效应制作成光致形变作动器应用到梁、板、壳等柔性结构的主动振动控制领域^[9-11]。黄家瀚等^[12]利用 PLZT 双晶片设计出一种光驱动微夹钳,并通过柔性铰链对其驱动效果进行改善,有效地达到了夹紧及放开操作的效果。王新杰等^[13]利用 PLZT 陶瓷光致形变效应,基于 ON-OFF 控制策略,在不同光照强度下,进行控制 PLZT 位移输出的研究。综上所述,国内外学者基于 PLZT 陶瓷的反常光生伏特效应、光致形变效应在光电马达、主动振动控制、微夹钳等方面的应用开展了研究,但利用 PLZT 陶瓷的光致形变驱动实现光纤对正的研究还未有相关报道。

本文基于 PLZT 陶瓷多能场耦合机理,构建光纤对正用 PLZT 陶瓷层合悬臂梁驱动器的数学模型;对 PLZT 陶瓷光生驱动电压进行实验测试,并依据实验数据对所构建的驱动电压数学模型进行参数识别;结合 PLZT 陶瓷层合悬臂梁的挠度表达式,对 PLZT 陶瓷层合悬臂梁驱动器的驱动位移进行仿真分析。

1 光纤对正用光控驱动器及其数学模型

1.1 PLZT 陶瓷层合悬臂梁驱动器应用于光纤对正

本文提出的 PLZT 陶瓷层合悬臂梁的光控驱动器用于光纤对正如图 1 所示。由图 1 可知:PLZT 陶瓷片与柔性悬臂梁表面层合,其宽度与悬臂梁的宽度相同;悬臂梁自由端通过驱动杆与输出光纤相连;输入光纤与输出光纤初始时为错开状态。PLZT 陶瓷在高能紫外光照条件下产生光致形变,促使悬臂梁自由端往下弯曲,通过驱动杆将输出光纤与输入光纤对正。

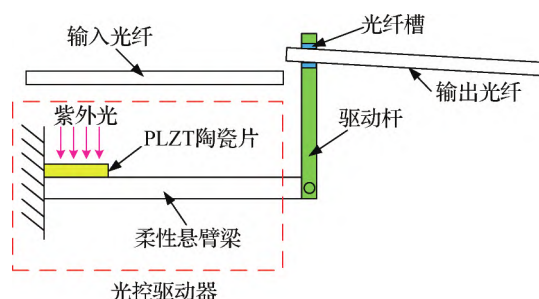


图 1 PLZT 陶瓷层合悬臂梁驱动器应用于光纤对正示意图

1.2 光照阶段 PLZT 陶瓷的光致形变数学模型

在高能紫外光照下 PLZT 陶瓷在两电极之间产生光生电压的等效电路可看成恒流源、电阻和电容构成的并联电路^[14],光生电流从一端流向另外一端,其间经过电容和电阻的分流,最后电荷聚集在 PLZT 电极两端,如图 2 所示。

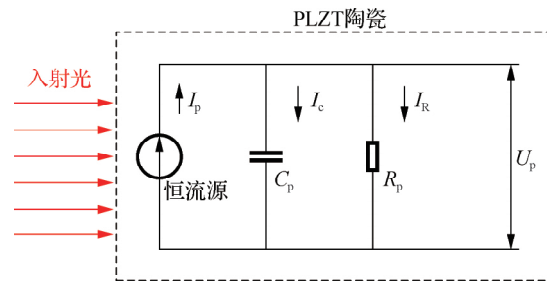


图 2 PLZT 反常光生伏特效应的等效电路模型

基于 PLZT 陶瓷的等效电路,可得到 PLZT 陶瓷的反常光生电压的表达式:

$$V_p = I_p R_p (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = V_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

式中: I_p 为 PLZT 陶瓷的光生电流; R_p 为 PLZT 陶瓷的光生电阻; τ 为 PLZT 陶瓷产生的反常光生电压的时间常数; V_s 为 PLZT 陶瓷的反常光生电压饱和值。由式(1)可以看出, PLZT 陶瓷在紫外光照下电压值迅速升高,并慢慢趋向于饱和。

在紫外光的照射下, PLZT 陶瓷会产生光焦热效应,使得 PLZT 陶瓷的温度升高,温度的升高会诱发 PLZT 陶瓷产生热释电效应。紫外光照强度越大, PLZT 陶瓷热释电效应越明显,产生的热释电电压也越大。PLZT 陶瓷热释电电压的表达式为:

$$V_T = \frac{AP\Delta T_s}{C_p} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}}) \quad (2)$$

式中: A 为 PLZT 陶瓷两端电极的面积; P 为 PLZT 陶瓷的热释电系数,由 PLZT 陶瓷的剩余极化强度和温度变化量决定; ΔT_s 为 PLZT 陶瓷的温度变化量; C_p 为 PLZT 陶瓷的电容; τ_T 为 PLZT 陶瓷的热释电常数。

由公式(2)可得, PLZT 陶瓷两端电极的面积、热释电系数与温度变化量影响 PLZT 陶瓷热释电效应所产生的热释电电压的饱和值。在光照强度较小、光照时间较短时,热释电效应不明显。

另外, PLZT 陶瓷在光照下本体温度升高,发生热膨胀效应,产生的热变形诱发 PLZT 陶瓷的正压电效应,从而使其电极间产生一部分电压,其电场方向与剩余极化方向相反。光照下 PLZT 陶瓷由热膨胀效应和正压电效应产生的电压为:

$$V_e = \frac{D_e \lambda}{d_{31} E_p} \Delta T_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}}) \quad (3)$$

式中: λ 为 PLZT 陶瓷的热应变系数; E_p 为 PLZT 陶瓷的弹性模量; d_{31} 为 PLZT 陶瓷的压电常数; D_e 为 PLZT 陶瓷两电极之间的距离。

综上所述,在紫外光照下的 PLZT 陶瓷电极两端的光生电压主要是由反常光生伏特效应的产生的光生电压 V_p 、热释电效应所产生的热释电电压 V_T 、热膨胀效应与正压电效应所产生的电压 V_e 组成。可以用下式表达:

$$V = V_p + V_T + V_e \quad (4)$$

在光照强度较低、光照时间较短时, PLZT 陶瓷的温度变化量不大,热释电效应和热膨胀效应的影响可以忽略不计。故 PLZT 陶瓷在紫外光照下的光致形变表达式为:

$$\epsilon_p(t) = d_{33} \frac{V(t)}{D_e} \quad (5)$$

1.3 光纤对正用光控驱动器的数学模型

在 PLZT 陶瓷层合悬臂梁光控驱动器中, PLZT 陶瓷的长度为 l_p , 宽度为 w_p , 厚度为 h_p ; 悬臂梁长度为 l_b , 宽度为 w_b , 厚度为 h_b , 且 $w_p = w_b$ 。模型示意图如图 3 所示。

紫外光照射 PLZT 陶瓷时, PLZT 陶瓷基于光致形变效应沿悬臂梁长度 x 方向产生一个应变 ϵ_p , 此时 PLZT 陶瓷提供了一个沿悬臂梁长度 x 方向的应力:

$$\sigma_p = \epsilon_p E_p \quad (6)$$

则 PLZT 陶瓷在紫外光下产生的驱动力为:

$$F_p = h_p \omega_p \varepsilon_p E_p \quad (7)$$

产生的驱动弯矩为:

$$M_p = \frac{1}{2}(h_b + h_p)F_p \quad (8)$$

悬臂梁在简单载荷下的挠曲线方程为:

$$\omega_b = -\frac{M_p x^2}{2E_b I_b} \quad (9)$$

其中, I_b 为悬臂梁的惯性矩; E_b 为悬臂梁的弹性模量。如图 4 所示, PLZT 陶瓷层合悬臂梁的自由端挠度可表示为:

$$\omega = \theta_b a + \omega_b \quad (10)$$

其中, θ_b 为 PLZT 陶瓷长度 l_p 处悬臂梁中心至自由端变化的角度; a 为悬臂梁长度 l_b 与 PLZT 陶瓷长度 l_p 的差, 即 $a = l_b - l_p$ 。

联立公式可求得在紫外光照下悬臂梁自由端的挠度为:

$$\omega = \frac{l_p h_p \omega_p \varepsilon_p E_p (h_b + h_p)}{2E_b I_b} \left(\frac{1}{2} l_p - l_b \right) \quad (11)$$

将公式(5)代进公式(11)得到光控驱动器输出挠度位移为:

$$\omega = \frac{l_p h_p \omega_p E_p (h_b + h_p) \left(\frac{1}{2} l_p - l_b \right) d_{33}}{2E_b I_b D_e} V_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (12)$$

由公式(12)可知, 在光照条件下光控驱动器的挠度幅值与 PLZT 陶瓷的材料特性参数和尺寸参数有关, PLZT 陶瓷的光生电流、光生电阻和悬臂梁的特性参数与尺寸参数有关。

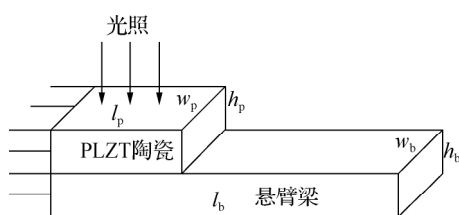


图 3 PLZT 陶瓷层合悬臂梁模型

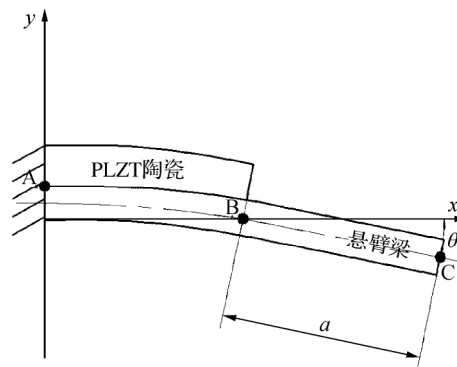
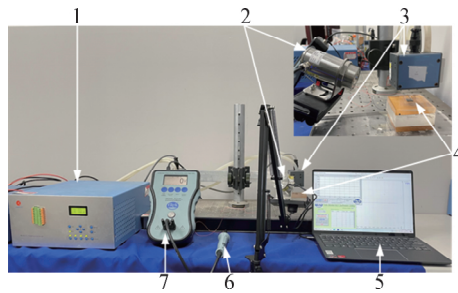


图 4 PLZT 陶瓷层合悬臂梁自由端挠度输出示意图

2 光控驱动器驱动电压的响应规律

由 PLZT 陶瓷的光致形变机理可知, 在紫外光的照射下 PLZT 陶瓷内部会发生多能场耦合效应, 在 PLZT 陶瓷电极两端产生驱动电压, 最后发生光致形变, 通过柔性悬臂梁将输出位移放大后驱动输出光纤。因此, PLZT 陶瓷在不同光照强度下的驱动电压的变化规律是光控驱动器驱动特性研究的重点。本文将对 PLZT 陶瓷在不同光照强度下的光生电压进行实验测试, 所搭建的光生电压测试平台如图 5 所示。该测试平台由 365 nm 紫外光源、PLZT 陶瓷片、高阻抗电压表 (Trek Model821) 和 PC 组成。当紫外光源垂直照射在 PLZT 陶瓷上时, 反常光生伏特效应在 PLZT 陶瓷电极两端会产生光生电压; PLZT 陶瓷的正电极通过导线与 Trek 电压表探头相连接, 负电极与电压表的接地线相连接, Trek 电压表与 PLZT 陶瓷处于并联状态; 电压表显示屏上可以实时显示光生电压的数值, 电压表 USB 端口与 PC 端相连, 通过 Trek 电压表配套测试软件, 电压的变化曲线可以在 PC 端显示出来。



注:1—UV光源控制器;2—温度传感器;3—UV光源照射探头;4—PLZT陶瓷;5—PC;6—高阻抗电压表传感器探头;7—高阻抗电压表控制器

图 5 PLZT 陶瓷光生驱动电压测试平台

本文所用 PLZT 陶瓷尺寸参数为 $10\text{ mm}(l_p) \times 5\text{ mm}(w_p) \times 1\text{ mm}(h_p)$,极化方向为沿长度方向,压电常数 $d_{33} = 4.5 \times 10^{-10}\text{ m} \cdot \text{V}^{-1}$,弹性模量 $E_p = 9 \times 10^{10}\text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。分别采用 50 、 100 、 150 和 $200\text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的光照强度照射 PLZT 陶瓷 120 s ,记录 PLZT 陶瓷两端的电压值。对实验得到的 $50 \sim 200\text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 光照强度下 PLZT 陶瓷两端的驱动电压数据进行拟合,实验曲线及拟合曲线如图 6 所示。

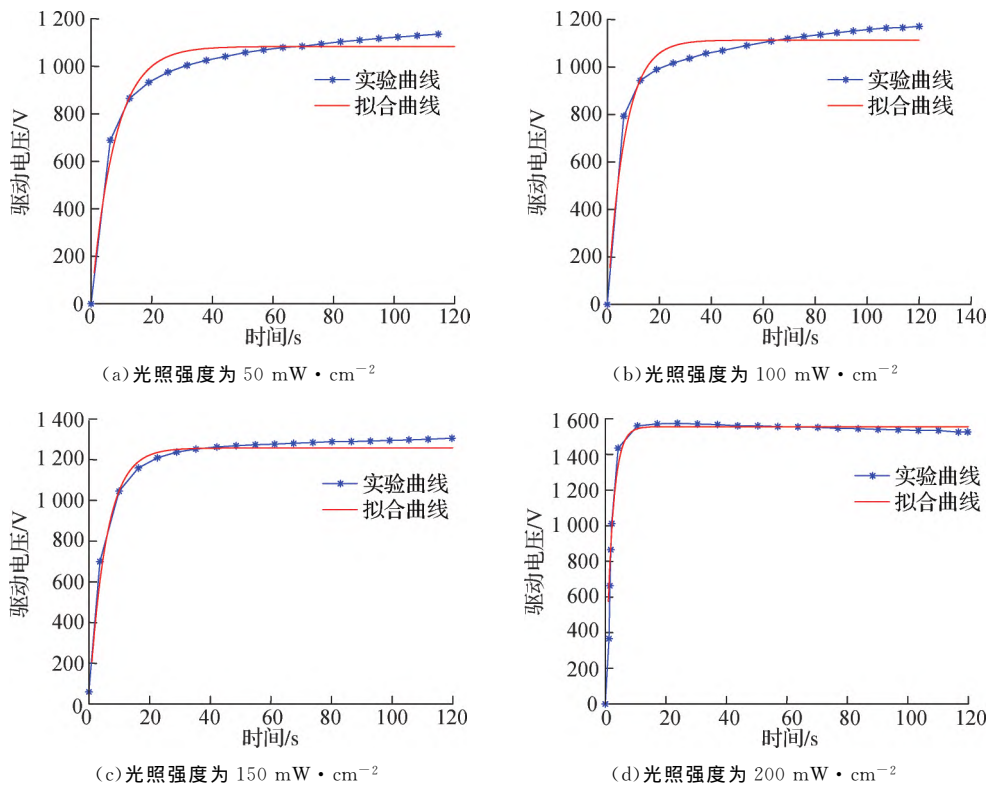


图 6 不同光照强度下 PLZT 陶瓷两端驱动电压实验及拟合曲线

由图 6 可知,PLZT 陶瓷驱动电压随着光照时间的增加而逐渐增加;光照强度越高,PLZT 陶瓷两端驱动电压上升速度越快,且驱动电压峰值会越高。同时,由图 6(d)可看出 PLZT 陶瓷在光强 $200\text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下,驱动电压达到峰值后略微下降,说明 PLZT 陶瓷在光强较大时存在热膨胀效应和热释电效应,产生了一部分与极化方向相反的电压,但在本实验中下降不明显,因此可忽略热释电效应和热膨胀效应的影响。利用公式(1)对图 6 中的实验曲线进行拟合,识别出不同光照强度下的饱和驱动电压和时间常数,如表 1 所示。从表 1 可以看出光照强度越大,饱和驱动电压越大,时间常数越小。

表1 PLZT陶瓷在不同光照强度下的饱和驱动电压和时间常数

光照强度 $I/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$	饱和驱动电压拟合值 V_s/V	时间常数 τ/s
50	1.083	7.805
100	1.113	6.690
150	1.275	5.582
200	1.555	2.167

3 光控驱动器的驱动位移响应规律

基于 PLZT 陶瓷驱动电压随光照强度和变化的规律,对不同光照强度下光控驱动器输出位移进行仿真分析。光控驱动器中的悬臂梁选用 PMMA 材料,长度为 20 mm,厚度为 1 mm,弹性模量 E_b 为 2 GPa。将表 1 中的 V_s 及 τ 代入公式(11),结合 PLZT 陶瓷和悬臂梁的尺寸参数、材料参数可得 PLZT 陶瓷层合 20 mm 悬臂梁驱动位移仿真曲线,如图 7 所示。

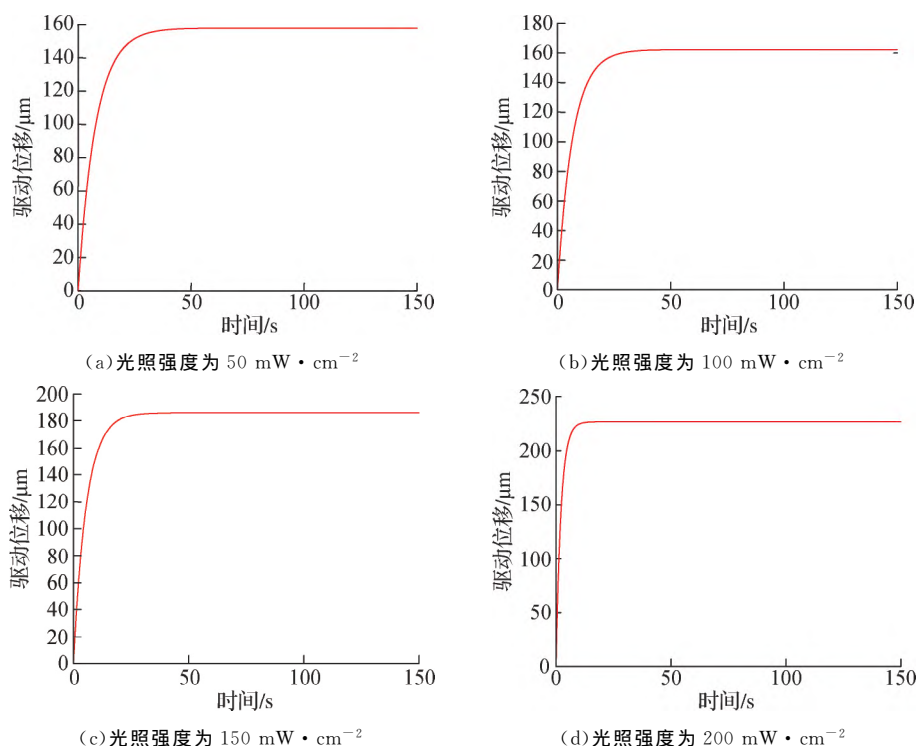


图7 不同光照强度下光控驱动器的驱动位移

由图 7 可看出光控驱动器的驱动位移随着光照时间的增大而增大,到达响应时间后趋向于稳定值,且驱动位移的响应速度和峰值随着光照强度的增大而增大。驱动位移峰值在不同光照强度下的变化规律如图 8 所示,在 $50 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的值为 $157.9 \mu\text{m}$,在 $200 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的值为 $226.7 \mu\text{m}$,驱动位移的变化趋势与 PLZT 陶瓷的驱动电压变化趋势相似。由仿真结果可知,光控驱动器的驱动位移能够满足光纤外径为 $125 \mu\text{m}$ 双光光纤的对正需求,可以通过调节光照强度来满足光纤对正时的速度需求。

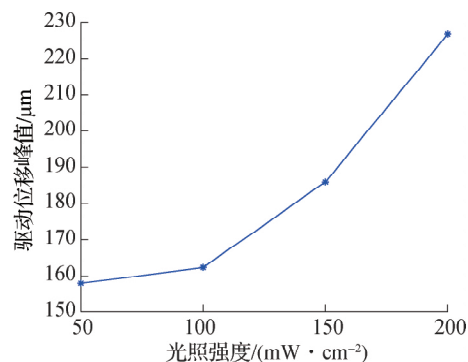


图8 驱动位移峰值随光照强度的变化规律

4 结 语

本文利用 PLZT 陶瓷在紫外光照射下的光致形变效应,提出一种光纤对正用光控驱动器,它是一种电磁兼容性好、驱动源清洁、非接触远程光控的新型微驱动器。在对 PLZT 陶瓷光照条件下多能耦合场作用机理分析的基础上,构建了光照条件下光控驱动器的数学模型;对 PLZT 陶瓷光生驱动电压进行实验测试,并依据实验数据对所构建的驱动电压数学模型进行参数识别;结合 PLZT 陶瓷层合悬臂梁的挠度表达式,对光控驱动器的驱动位移进行数值仿真。实验结果表明:驱动位移随着光照时间的增大而增大,到达响应时间后趋向稳定,且驱动位移响应速度和峰值随着光照强度的增大而增大;在 $200 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 光强下光控驱动器的最大驱动位移可达 $226.7 \mu\text{m}$,能够满足光纤外径为 $125 \mu\text{m}$ 双光光纤的对正需求,可为 PLZT 陶瓷光控驱动器在光纤对正中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 林超,李坪洋,沈忠磊,等. 压电驱动微夹持器特性分析[J]. 仪器仪表学报,2019,40(7):224—232
- [2] MIKOVA E, MEDVECKA B S, KELEMEN M, et al. Application of shape memory alloy(SMA) as actuator[J]. Metalurgija,2015,54(1):169—172
- [3] ARYA S, KHAN S, KUMAR S, et al. Design and fabrication of MEMS based electrostatic cantilever as ultrasonic signal generator[J]. Microelectronic Engineering,2016,154(C):74—79
- [4] 张钰,刘志伟. 基于电磁驱动的微扑翼飞行器驱动器振动特性[J]. 传感器与微系统,2019,38(3):11—13
- [5] LALLART M, RICHARD C, SUKWISUT P, et al. Electrostrictive bending actuators: modeling and experimental investigation[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2012,179:169—177
- [6] MORIKAWA Y, ICHIKI M, NAKADA T. Electrostatic optical motor using PLZT elements[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,2006,72(718):1807—1811
- [7] 唐波. 锆钛酸镧陶瓷制备及其应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2006
- [8] 黄学良,叶飞. 基于新型光电材料 PLZT 的光电机研究[J]. 光电工程,2007,34(12):139—143
- [9] JIA M, ZHENG S, HE R. Multi-mode optimal fuzzy active vibration control of composite beams laminated with photostrictive actuators[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2019,32(6):1442—1450
- [10] 姜晶,岳洪浩,邓宗全,等. 新型光电作动器产生的非均匀力矩对板的控制[J]. 机械工程学报,2010,46(12):175—181
- [11] SHIH H R, TZOU H S, WALTERS W L. Photonic control of flexible structures-application to a free-floating parabolic membrane shell[J]. Smart Materials and Structures,2009,18(11):115019
- [12] 黄家瀚,王新杰,王灵. 基于光致形变材料的光驱动微夹钳[J]. 上海交通大学学报,2014,48(12):1681—1687
- [13] 王新杰,陆飞,刘亚风,等. 锆钛酸铅陶瓷光致微位移的闭环伺服控制[J]. 光学精密工程,2016,24(10):2505—2514
- [14] FRIDKIN V M. Photoferroelectrics[M]. Berlin: Springer-Verlag,1979

(责任编辑:谭彩霞)