

压电倾斜镜传递函数辨识方法

周睿¹, 张强^{1*}, 甘永东^{2,3}, 沈锋^{2,3}

¹中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 四川 广汉 618307;

²中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要 针对光轴控制系统中广泛使用的压电倾斜镜, 分析了其基本工作原理和数学模型, 描述了遗传算法在模型中的辨识过程。针对大口径压电倾斜镜, 搭建了频率响应测试系统, 实现了对压电倾斜镜传递函数的参数辨识。对比辨识传递函数的频率响应与实际测量数据, 并对系统中存在的多个谐振点的辨识精度进行分析。实验结果表明, 在各个谐振点处, 遗传算法获得的传递函数频率响应与实际测量数据具有较高的一致性, 利用该算法得到的传递函数能更为准确地分析光轴控制系统的动态特性, 有针对性地设计先进的控制算法, 从而达到提高光轴控制系统性能的目的。

关键词 激光光学; 压电倾斜镜; 遗传算法; 频率响应; 谐振

中图分类号 TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1105002

Transfer Function Identification Method for Fast-Steering Mirror Driven by PZT

Zhou Rui¹, Zhang Qiang^{1*}, Gan Yongdong^{2,3}, Shen Feng^{2,3}

¹College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618307, China;

²Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract The basic working principle and mathematical model for a fast-steering mirror driven by PZT, which is a type of mirror widely used in optical-axis control systems, are analyzed, and the identification process of genetic algorithms in the model is described. A system for measuring the frequency response of a large-aperture fast-steering mirror driven by PZT is set up to realize parameter identification for the transfer function. The frequency response of the identified transfer function and the actual measured data are compared, and the identification accuracy of multiple resonance points in the system is analyzed. The experimental results show that at each resonance point, the frequency response of the transfer function obtained by the genetic algorithm is consistent with the measured data. The results also show that the transfer function obtained by this algorithm can analyze the dynamic characteristics of optical axis control system more accurately, and we can design advanced control algorithm, thus improving the performance of the optical-axis control system.

Key words laser optics; fast-steering mirror driven by PZT; genetic algorithm; frequency response; resonance

OCIS codes 140.3425; 010.1080; 230.4040

1 引言

压电倾斜镜(FSM)利用分辨率达纳米量级的压电陶瓷(PZT)致动器驱动玻璃镜面,使光束发生快速、小角度的倾斜变化。与传统的电机驱动机构

相比,压电倾斜镜具有运动惯性小、响应速度快、角分辨率高等显著优点,在自适应光学、激光通信、光束控制等领域被广泛应用^[1-3]。随着系统对光轴控制精度要求的不断提高,期望压电倾斜镜能对更高频率的光束抖动进行抑制,因此对压电倾斜镜控

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-06-03; 录用日期: 2020-06-28

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2020YFG0446)、中国民用航空飞行学院科研基金(J2020-076)

* E-mail: zhangqiang_ioe@126.com

制系统的带宽提出了很高的要求^[4]。为了提高控制系统性能,分析被控对象的数学模型,建立精确的传递函数是进行系统设计和控制算法仿真的基础^[5-6]。压电倾斜镜的结构较为复杂,同时存在机械谐振,使得压电倾斜镜传递函数具有维数较高、待估计参数量较多等特点,导致辨识算法的计算量和存储量急剧增加,以至常规的辨识算法难以准确获得压电倾斜镜的参数^[7]。

本文通过分析压电倾斜镜的物理模型,利用遗传算法(GA)对包含高阶谐振的压电倾斜镜传递函数的各个参数进行辨识,对遗传算法拟合结果与实际数据进行对比,并分析了对控制系统影响较大的各阶关键谐振频率幅度和频点的偏移情况。实验结果表明,所提方法能够精确有效地得到压电倾斜镜传递函数的参数。

2 压电倾斜镜的基本原理与数学模型

压电倾斜镜主要由镜座基底、有一定厚度和刚度的镜面、呈直角排列的PZT致动器X和Y、起稳定作用的固定支柱O组成,如图1所示^[8]。

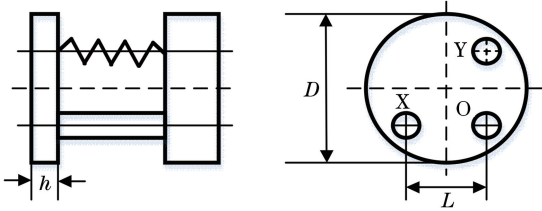


图1 压电倾斜镜结构

Fig. 1 Structure of fast-steering mirror driven by PZT

同时,根据压电倾斜镜的工作原理,可以将压电倾斜镜的模型分为质量-弹簧系统、致动器2个部分,其中质量-弹簧系统可以简化为二阶振荡环节,致动器可以简化为惯性振荡环节^[9]。因此压电倾斜镜的传递函数为

$$F_{\text{model}} = \frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\xi_m \omega_m s + \omega_m^2} \times \frac{1}{RCs + 1}, \quad (1)$$

式中: s 为复频率; ω_m 为等效的自然谐振角频率; ξ_m 为等效的阻尼比; R, C 分别为致动器的等效电阻、电容。

由于致动器部分的时间常数较小,因此在分析过程中可以将压电倾斜镜的传递函数进一步简化,表达式为

$$F_{\text{model}} = \frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\xi_m \omega_m s + \omega_m^2}. \quad (2)$$

但是由于压电倾斜镜固有的弹性结构,其刚度

有限,当控制信号的频率较高时,其频率响应除了在其固有的自然谐振角处产生振荡外,还会在更高的频率段出现一个或多个谐振频率点。对频率响应进行分析,其高阶谐振模式可以近似为双二阶振荡模型,表达式为

$$F_k(s) = \frac{s^2 + 2\xi_{zk} \omega_{zk} s + \omega_{zk}^2}{s^2 + 2\xi_{pk} \omega_{pk} s + \omega_{pk}^2}, \quad (3)$$

式中: ω_{pk} 和 ω_{zk} 分别为第 k 阶谐振的极点频率和零点频率; ξ_{pk} 和 ξ_{zk} 分别为极点阻尼系数和零点阻尼系数。因此,压电倾斜镜的频率特性表现为各阶谐振频率综合作用的结果,其传递函数可以表示为 F_{model} 与若干个机械谐振环节串联的形式,表达式为

$$F_{\text{SM}}(s) = F_{\text{model}}(s) \cdot F_1(s) \cdot F_2(s) \cdot \dots \cdot F_k(s). \quad (4)$$

3 遗传算法的基本原理

由于压电倾斜镜传递函数的参数辨识过程可以等效为一个复杂问题的寻优过程,因此,采用智能寻优算法可以有效地提高模型参数辨识的效率^[10-11]。遗传算法是一种基于自然选择和遗传学原理的智能优化算法,无需任何初始信息即可寻求全局最优解。在遗传算法中,通过对计算解的适应度值进行排序来确定每个迭代优化的质量,然后通过模拟自然界中生物的选择、交叉和变异等运算来寻找最佳的解决方案^[12-15]。

利用遗传算法进行参数辨识的基本流程如图2所示,可知,利用遗传算法进行压电倾斜镜传递函数参数辨识的过程主要包括以下几个步骤。

1)根据压电倾斜镜的模型,确定需要辨识的参数,对参数进行编码,确定初始种群。压电倾斜镜传递函数待辨识的参数包括自然谐振角频率 ω_m 、等效的阻尼比 ξ_m 、第 k 阶谐振的极点频率和零点频率 ω_{pk} 和 ω_{zk} 、第 k 阶谐振极点和零点阻尼系数 ξ_{pk} 和 ξ_{zk} ,由此可以确定种群为

$$P(e) = (\omega_m, \xi_m, \omega_{p1}, \xi_{p1}, \omega_{z1}, \xi_{z1}, \dots, \omega_{zk}, \xi_{zk}, \omega_{zk}, \xi_{zk}), \quad (5)$$

式中: e 为迭代次数。在求解连续参数优化的问题时,基于实数编码的收敛速度要显著地高于二进制编码;同时,由于待辨识的参数在其取值范围内具有连续渐变的特点,实数编码的效率要明显优于二进制编码^[16-17]。因此,根据压电倾斜镜传递函数物理模型的特点,选择使用浮点数编码的形式以期能够获得更高精度的辨识结果。

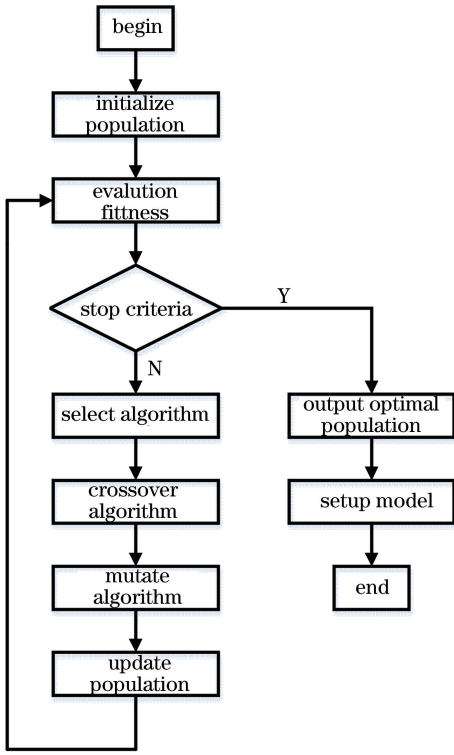


图 2 基于 GA 的参数辨识流程图

Fig. 2 Flowchart of parameter identification based on GA

2) 定义适应度函数。压电倾斜镜的参数辨识的迭代过程利用每一迭代得到的辨识结果,建立压电倾斜镜的传递函数,求取待建模压电倾斜镜的频率响应 F_i , 并对其与实际结果 P_i 进行比较。采用方均根误差 R_{MSE} 作为适应度函数,表达式为

$$f(e, i) = R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - P_i)^2}{n}}, \quad (6)$$

式中: n 为测量数据的个数; $f(e, i)$ 为第 e 次迭代过程中第 i 个个体的适应度函数值。

3) 根据适应度进行排序和选择。采用精英保存的策略,其能避免轮盘赌算子在随机选择时淘汰适应度较高的染色体的问题,利用精英保存策略保存适应度较高的群体。个体被选中的概率为

$$P_{sel} = \frac{f(e, j)}{\sum_{j=1}^N f(e, j)}, \quad (7)$$

式中: N 为个体的数量; $f(e, j)$ 为第 e 次迭代过程中第 j 个个体的适应度函数值。

4) 利用变异、交叉算法产生新的个体。变异过程采用自适应变异算法与启发式交叉策略结合的方式,仅选取适应度较高的解空间并将其传递给子代,从而加快收敛速度,获得更优的解^[18]。假设种群 $P_1 = (P_{f_1}^1, P_{f_2}^1, \dots, P_{f_n}^1)$ 和 $P_2 = (P_{f_1}^2, P_{f_2}^2, \dots, P_{f_n}^2)$, 其中 P_1 的适应度优于 P_2 , 则经过交叉运算

后的子代表示为

$$s_i^1 = \lambda \times (f_i^1 - f_i^2) + f_i^2, \quad (8)$$

式中: $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 为经过交叉运算过后的子代; λ 为启发系数; f_i^p 为第 p 个种群中第 i 个个体的适应度函数。

4 压电倾斜镜传递函数参数辨识与实验

为了测试压电倾斜镜的频率响应特性,针对光束抖动控制系统,搭建了如图 3 所示的频率响应测试系统。该实验系统主要包括待测试的口径为 200 mm 的压电倾斜镜、采样频率为 2000 Hz 的探测器、高压放大器 (HVA)、DA 采样器、控制器 (CC)、光源及频响分析仪。实验过程中,入射光束经压电倾斜镜在探测器上形成聚焦光斑,控制器实时计算光斑中心位置与标定位置的偏差,利用控制算法,DA 采样器和高压放大器驱动压电倾斜镜产生相应的动作。在频率响应测试过程中,频响分析仪显示周期性变化的扫频信号,同时接收来自光束控制系统的误差信号和反馈信号,经过计算,输出频率响应测量的结果。

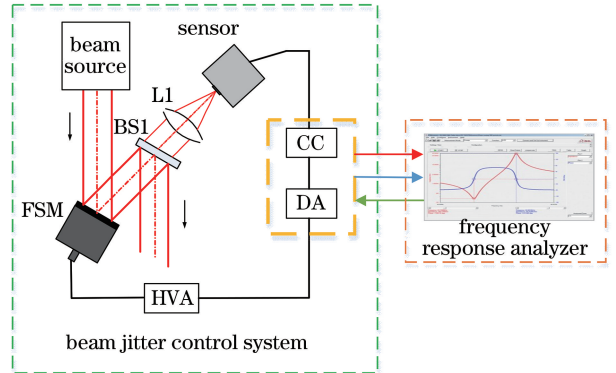


图 3 压电倾斜镜频率响应测试结构

Fig. 3 Structure of frequency response test of fast-steering mirror driven by PZT

在一般情况下,探测器和 DA 采样器的传递函数可以表达成零阶保持器,可以近似地表示为 $\exp(-\tau_1 s)$, 其中 τ_1 为探测器和 DA 采样器等效延迟时间。高压放大器的传递函数可以近似看作比例放大环节 K_{HV} , 在频率响应测试过程中,采用比例控制器,其传递函数可以表示为 K_{CC} , 压电倾斜镜的传递函数如(4)式所示^[19]。同时,考虑控制器目标提取算法时间计算、数据传输等环节带来的延时 $\exp(-\tau_2 s)$, 被测系统的传递函数可以等效地表示为

$$G(s) = K_{CC} \times K_{HV} \times \exp[-(\tau_1 + \tau_2)s] \times F_{SM}(s) = K \times \exp(-\tau s) \times F_{SM}(s), \quad (9)$$

式中: K 为系统等效放大倍数。由(9)式可以看出,待测系统的传递函数主要包括两个部分,即时间延迟环节 $\exp(-\tau s)$ 和压电倾斜镜传递函数 $F_{SM}(s)$ 。其中,时间延迟环节仅仅影响待测系统的相位特性,对幅值特性没有影响,因此,可以从被测系统的传递函数中得到压电倾斜镜的传递函数特性。

图4为利用Levy法和GA对压电倾斜镜传递函数进行参数辨识后,对其频率响应与实际测量结果进行比较的结果。从图4可以看出:GA对压电倾斜镜高阶谐振的辨识较好,而Levy法仅对低阶谐振有较好的辨识结果;GA辨识得到的传递函数曲线与实际测量曲线吻合较好,幅度曲线和相位曲线均与实测曲线有较高的一致性。

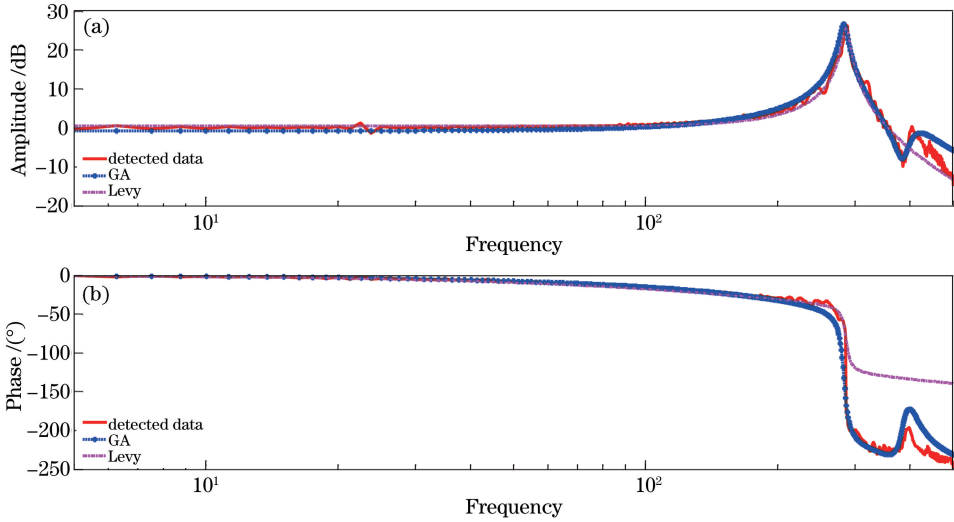


图4 压电倾斜镜频率传递函数辨识结果。(a)幅度响应;(b)相位响应

Fig. 4 Identification result about frequency transfer function of fast-steering mirror driven by PZT.

(a) Amplitude response; (b) phase response

同时,根据前述分析可知,影响压电倾斜镜频率特性的主要参数为各阶谐振的零点和极点频率 ω 、阻尼系数 ξ 。为了分析遗传算法对关键参数的识别准确性,定义谐振点频率偏移误差和幅度响应误差,表达式分别为

$$E_{\omega, i_r} = |\omega'_{i_r} - \omega_{i_r}|, \quad (10)$$

$$E_{M, i_r} = |M'_{\omega, i_r} - M_{\omega, i_r}|, \quad (11)$$

式中: ω'_{i_r} 为辨识的传递函数第 i_r 个谐振点的频率

值; ω_{i_r} 为实际测量第 i_r 个谐振点的频率值; M'_{ω, i_r} 为辨识的传递函数第 i_r 个谐振点的幅度响应; M_{ω, i_r} 为实际测量第 i_r 个谐振点的幅度响应。

表1为谐振频率点的幅度响应误差和频率偏移误差,可以看出,对于影响压电倾斜镜频率特性的关键谐振点,所提方法辨识得到的频率偏移误差小于等于10 Hz,幅度响应误差小于等于2 dB。

表1 谐振点的频率偏移误差和幅度响应误差

Table 1 Frequency offset error and amplitude response error of resonance points

Number of resonance points	Measured frequency /Hz	Measured amplitude /dB	Fitted frequency /Hz	Fitted amplitude /dB	Frequency error /Hz	Amplitude error /dB
1	286.3	26.5	282.5	27.2	3.8	0.7
2	385.0	-9.9	383.8	-8.8	1.2	1.1
3	406.4	0.1	413.8	-0.6	7.4	0.5

为了检验GA对压电倾斜镜模型辨识的准确性,研究其对光束控制系统性能的影响,建立了如图5所示的光束抖动控制实验系统。该实验系统主要由激光器、扰动反射镜(DFSM)、控制反射镜(CFSM)、HVA、探测器、扰动模拟计算机、实时抖动控制系统组成。其中扰动模拟计算机产生符合大

气湍流功率谱的实验数据,其能量与频率的关系可以近似地表示为

$$E_{\text{dist}} = c \times f_{\text{dist}}^{-\frac{8}{3}}, \quad (12)$$

式中: E_{dist} 为扰动能量; f_{dist} 为扰动频率; c 为常数项。该实验数据驱动扰动反射镜,以实现对大气湍

流扰动的模拟;探测器探测到光束抖动后,利用光束抖动控制系统产生模拟电压信号,该信号经过高压放大后,驱动 CFSM 工作,从而实现对光束传输过程中抖动的抑制。

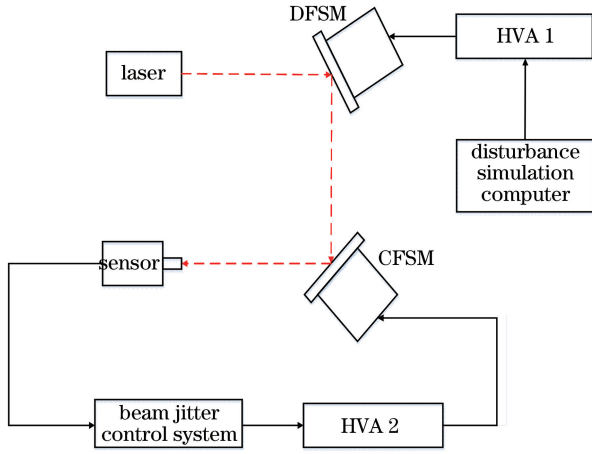


图 5 光束抖动控制实验原理框图

Fig. 5 Block diagram of beam jitter control experiment principle

图 6 为基于经典的 PI 控制器,利用双二阶补偿器对压电倾斜镜的谐振进行补偿前后的积分功率谱曲线。可以看出,在对压电倾斜镜的模型进行精确辨识并补偿后,光束控制系统对光束抖动的抑制能力大大增强。

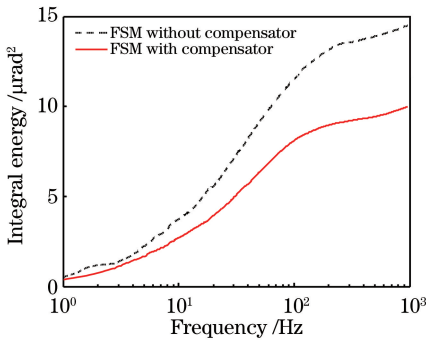


图 6 光束抖动的积分功率谱曲线

Fig. 6 Integral power spectrum curve of beam jitter

5 结 论

分析了压电倾斜镜的基本原理和数学模型,搭建了压电倾斜镜频率响应测试系统,利用遗传算法对压电倾斜镜传递函数的参数进行辨识,对比分析了辨识传递函数数据与实际测量数据。实验结果表明,遗传算法能够准确地辨识出压电倾斜镜传递函数的参数,其幅度响应误差小于 2 dB,频率偏移误差小于 10 Hz。所提方法能够获得高精度的压电倾斜镜传递函数模型,对提高系统性能具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Li X Y, Ling N. Stable control of the fast-steering mirror in adaptive optics system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(1): 31-36.
李新阳, 凌宁. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 31-36.
- [2] Yu Z L, Jiang X M, Cao K R, et al. Hysteresis characteristics of steering mirror driven by piezoelectric actuator and its experimental research [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0814002.
于志亮, 姜晓明, 曹开锐, 等. 压电式倾斜镜迟滞特性及其实验研究[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0814002.
- [3] Ding Y C, Wang D E, Lun B L, et al. Realization of high tracking precision using a tip-tilt mirror for the 2.4-meter telescope-part I: prototype design and test[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 071104.
丁永超, 王德恩, 伦宝利, 等. 利用倾斜镜技术实现 2.4 m 望远镜的高精度跟踪 I: 原理样机设计及测试[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071104.
- [4] Huang L H, Fan M W, Zhou R, et al. System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 170704.
黄林海, 凡木文, 周睿, 等. 大口径压电倾斜镜模型辨识与控制[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170704.
- [5] Qin L A, Hou Z H, Wu Y. Transfer function identification method and its application in photoelectrical tracking system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2810-2816.
秦来安, 侯再红, 吴毅. 光电跟踪架传递函数辨识方法及应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2810-2816.
- [6] Zhou R. Real time signal processing and optimal control technology on adaptive optics systems [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
周睿. 自适应光学实时信号处理及优化控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.
- [7] Zhao X, Yao Y, Fang Q. The study on the hierarchical identification method in the debugging of turntable servo system [J]. Control Theory & Applications, 2002, 19(2): 229-234.
赵霞, 姚郁, 方强. 递阶辨识方法在转台伺服系统调试中的应用研究[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 229-234.
- [8] Ling N, Chen D H, Guan C L, et al. Two-dimension piezoelectrical fast steering mirror [J]. Opto-

- Electronic Engineering, 1995, 22(1): 51-60.
- 凌宁, 陈东红, 官春林, 等. 两维高速压电倾斜反射镜[J]. 光电工程, 1995, 22(1): 51-60.
- [9] Shi J J, Yao B D, Lu J G. Modeling and transfer function identification of FSM system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2748-2752.
- 时晶晶, 姚佰栋, 鲁加国. 高速倾斜镜建模与传递函数辨识[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2748-2752.
- [10] Cai C Z. Research on identification of hydrodynamic parameters of ship lateral motion based on genetic algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(1A): 13-15.
- 蔡长征. 基于遗传算法的船舶横向运动水动力参数辨识的研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(1A): 13-15.
- [11] Chen Y, Shen Q X, Liu H L. Optimization algorithm of receiver optical power uniformity in indoor visible light communication [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506003.
- 陈勇, 沈奇翔, 刘焕淋. 室内可见光通信中接收光功率均匀性优化方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506003.
- [12] Zhou G Z, Fu Y L, Yang R R. Parameter identification of electro-hydrostatic actuator based on genetic algorithm [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016(4): 92-96.
- 周国哲, 付永领, 杨荣荣. 基于遗传算法的电动静液作动器模型参数辨识[J]. 液压与气动, 2016(4): 92-96.
- [13] Wu Z H, Yang R F, Guo C X, et al. Synthesis and verification of finite-time rudder control with GA identification for electric rudder system[J]. Energies, 2020, 13(6): 1379.
- [14] Zhang B, Chang S, Wang J, et al. Feature points extraction of laser vision weld seam based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102001.
- 张斌, 常森, 王桔, 等. 基于遗传算法的激光视觉焊缝特征点提取 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102001.
- [15] Hergli K, Marouani H, Zidi M, et al. Identification of Preisach hysteresis model parameters using genetic algorithms [J]. Journal of King Saud University-Science, 2019, 31(4): 746-752.
- [16] Dong Y, Liu H J, Xu B D, et al. A modified genetic algorithm based on real-coding [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(4): 219-221.
- 董颖, 刘欢杰, 许宝栋, 等. 一种基于实数编码的改进遗传算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(4): 219-221.
- [17] Liu W, Li K, Geng G H, et al. Photo-skull overlay method based on real-coded genetic algorithm [J]. Application Research of Computers, 2016, 33(6): 1890-1893.
- 刘薇, 李康, 耿国华, 等. 一种基于浮点数编码遗传算法的颅像叠加方法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(6): 1890-1893.
- [18] An C, Chu J K, Zhang R. Optimization of bilayer sub-wavelength metallic grating based on genetic algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 220501.
- 安超, 褚金奎, 张然. 基于遗传算法的双层亚波长金属光栅优化[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 220501.
- [19] Zhou R, Li X Y, Shen F, et al. Laser beam stabilizing system based on close loop control of two fast steering mirrors in series[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1214002.
- 周睿, 李新阳, 沈锋, 等. 基于两级高速倾斜镜闭环控制的光束稳定技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1214002.