

超声电机驱动的可变光阑开环控制方法

吕本超¹, 李晓牛^{1*}, 武俊峰², 汤灵峰¹, 杨 峰¹, 孙鸿生³, 甘游宇³, 李淑芬³, 李 明³

1. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 江苏 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 211106;
3. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘 要: 针对变 F 数红外光学系统可变光阑的装配空间有限、光阑运动中叶片间摩擦力变化以及光阑活动环转角与孔径之间的非线性关系, 提出了一种行波型旋转超声电机驱动可变光阑的开环控制方法。建立了超声电机驱动可变光阑的控制模型, 并推导了可变光阑活动环转角和孔径之间的变化关系, 得到了超声电机驱动可变光阑的灰箱控制模型; 基于图像识别对超声电机驱动可变光阑的孔径变化进行采集, 并通过灰箱模型辨识灰箱控制模型参数; 设计实验对该控制方法进行验证, 实验中最小分辨率为 0.13 mrad , 光阑开启时平均绝对误差为 0.077° , 光阑闭合时平均绝对误差为 0.079° 。结果表明: 该开环控制方法满足超声电机驱动可变光阑变 F 数的需求。

关键词: 红外光学系统; 可变光阑; 开环控制; 灰箱模型; 超声电机

中图分类号: TN2; TB559; TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240266

0 引 言

可变光阑通过调整孔径大小实现通光量的调整, 实现红外光学系统中 F 数匹配, 提高系统的灵敏度和分辨率, 满足远程搜索、近程跟踪和识别目标的需求, 是实现连续变 F 数技术的关键部件^[1-2]。目前, 传统电磁电机驱动的可变光阑需要减速装置, 导致结构复杂、体积大, 难以实现小型化。超声电机是一种基于压电陶瓷逆压电效应的作动器, 具有无电磁干扰、推重比大、易于小型化和断电自锁等特点。因此, 超声电机被应用于驱动可变光阑^[3]。目前, 多种超声电机驱动可变光阑结构已被提出。然而, 如何实现超声电机驱动可变光阑的控制是个难题。

文献 [3] 设计了螺纹式行波型旋转超声电机驱动的可变光阑, 分辨率为 $20 \text{ } \mu\text{rad}$, 打开和闭合的时间分别为 96 ms 和 97.2 ms 。文献 [4] 提出了一种旋转型驻波压电作动器驱动的可变光阑, 其分辨率可达 0.34 mrad , 最大顺时针旋转速度为 62.8 rad/min , 最大逆时针旋转速度为 75.36 rad/min 。文献 [5] 设计了一

种单相压电电机驱动的可变光阑, 其最小分辨率可达 $40 \text{ } \mu\text{rad}$, 光阑完全打开和闭合的时间分别为 89 ms 和 92.4 ms 。迄今为止, 超声电机驱动可变光阑的研究集中在结构设计和性能评估, 尚未开展超声电机驱动可变光阑控制方法的研究。然而, 可变光阑的装配空间受到限制, 难以安装高精度的行程或位移传感器; 此外, 光阑叶片间的摩擦力变化、活动环运动和孔径变化的非线性关系进一步增大超声电机驱动可变光阑的控制难度。因此, 有必要研究超声电机驱动可变光阑控制方法。

超声电机驱动可变光阑受到能量转换、摩擦驱动以及温升、磨损等因素会造成输出特性非线性问题。目前, 超声电机的控制方法以闭环控制为主。文献 [6] 提出了一种新的 PI (比例-积分) 控制参数在线自适应调整的控制方法, 结果表明该方法可以提高控制器的非线性表达能力。文献 [7] 提出了一种新的自适应滑模控制方案, 该方案基于 PID (比例-积分-微分) 型滑模, 结构简单, 控制参数易于调整, 结果表明该方法提高了超声电机驱动平台的跟踪性能。文献

收稿日期: 2024-06-21; 修订日期: 2024-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51905265); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX23_0102)

作者简介: 吕本超, 男, 硕士生, 主要从事超声电机技术与应用方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 李晓牛, 男, 讲师, 博士, 主要从事超声电机技术与应用方面的研究。

[8] 研究了常前馈积分分离 PID 和基于模型参考自适应控制 (MRAC) 的自适应反馈和前馈。试验结果表明, 在识别死区深度后, 常前馈积分分离 PID 算法可以补偿时不变系统, 而自适应反馈和前馈算法更适合时变系统。文献 [9] 提出了一种改进的平衡优化器算法用于基于数据驱动无模型自适应控制方法 (MFAC) 的参数寻优, 结果表明, 基于改进平衡优化算法的 MFAC 的稳态误差和调整时间明显减小, 系统的控制性能得到显著提高。文献 [6-9] 是依赖反馈的闭环控制方法, 而具有反馈的庞大驱动电路限制了器件的小型化。文献 [10] 提出了实现超声电机速度、位置高精度开环控制方法, 建立并辨识了启动、关断两段式二阶速度模型, 采用双环复合控制算法实现了高平稳性速度控制。实验表明, 超声电机的速度平稳性为 0.44%, 分辨率达到了 0.375 μrad 。文献 [11] 提出了一种超声电机的位置控制方法, 该方法基于拍行波理论。实验表明, 该方法在低速开环控制下可获得约 15" 的有效平均结果, 波动范围在 0.5 mrad 以内, 满足工程需要。超声电机驱动可变光阑的开环控制方法无需反馈, 响应速度更快, 且有利于节约成本和空间, 适用于结构空间有限和速度响应要求较高的精密仪器控制。

灰箱模型基于系统的物理特性建立数学模型, 具有对数据的约束能力, 能够确保预测值在合理的输出范围内, 控制预测模型走向^[12], 更好地反映真实系统的动力学特性, 有助于提高系统的稳定性和鲁棒性^[13]。

因此, 提出基于灰箱模型超声电机驱动可变光阑的开环控制方法。首先, 设计了行波型旋转超声电机驱动可变光阑的总体结构; 其次, 建立了超声电机驱动的可变光阑的动力学控制模型, 并提出系统的灰箱控制模型; 再次, 利用图像识别程序对该系统的运动特性进行数据采集, 并通过灰箱模型进行参数辨识; 最后, 提出基于灰箱模型的开环控制方法并进行实验验证。

1 结构设计

如图 1 所示, 超声电机驱动的可变光阑主要由光阑 (包括叶片、活动环、固定环)、连接环、顶盖、固定台、轴承、转子、定子、PZT (压电陶瓷)、底座等组成。该行波型旋转超声电机驱动可变光阑的驱动原理是: 基于压电陶瓷的逆压电效应, 将电能转化为定子驱动齿表面的微幅振动, 这种微幅振动依赖定转子之间的摩擦作用, 继而转化为转子的宏观运动, 从而带动光阑活动环旋转, 实现光阑的开启和闭合。

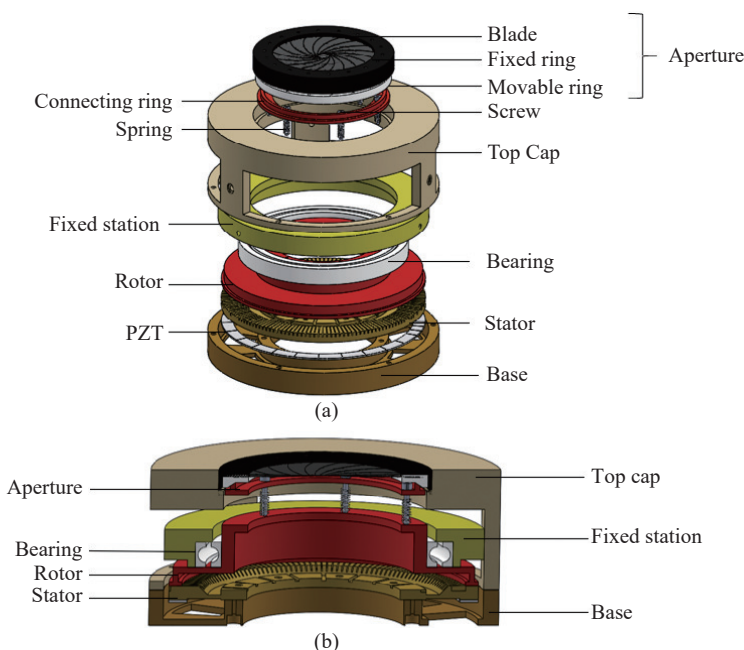


图 1 超声电机驱动的可变光阑

Fig.1 Variable aperture driven by ultrasonic motor

2 控制模型

首先,建立定转子之间的接触与摩擦模型,分析法向振动时定转子的接触关系。图 2 所示为定转子法向接触位置关系,定转子之间的接触是间断的,存在接触和脱离区域。图中, T 为定子振动周期, $2a$ 为接触时间, δ 为未变形表面到法向振动平衡位置的间距, W_Z 为法向振动幅值。接触时间 $2a$ 与 δ 的关系可以表示为:

$$a = \frac{\cos^{-1}(\delta/W_Z)}{\omega}, \quad \delta > W_Z \quad (1)$$

$$a = T/4, \quad \delta < -W_Z \quad (2)$$

法向振动的方程可表示为:

$$w(t) = W_Z \cos \omega_n t \quad (3)$$

因此,法向接触力 f_n 可以表示为:

$$f_n = \begin{cases} 0, & -\frac{\pi}{2} < t < t_a, t_e < t < \frac{3\pi}{2} \\ K_c W_Z (\cos \omega_n t - \cos \omega_n a), & t_a < t < t_e \end{cases} \quad (4)$$

转子周向的速度可以表示为:

$$V_t = U_x \sin \omega_n t \quad (5)$$

当定子的周向速度大于等于转子的周向速度时,周向力做正功,反之则做负功。在一个周期内周向力与转子的速度关系如图 3 所示。转子在整个接触时间 $2a$ 内,在 $t_a \sim t_m$ 区间和 $t_n \sim t_e$ 区间做负功,在 $t_m \sim t_n$ 区间周向力做正功。这个过程中随着阻碍区面积的增加,驱动区的面积逐渐减小,转子所受的周向力也随之变小。当电机静止或匀速运行时,阻碍区面积就等于驱动区面积。因此,在非匀速状态下,一个周期内转子受到的等效切向力可以视为工作区和阻碍区两部分的差,则一个周期内转子所受等效切向力

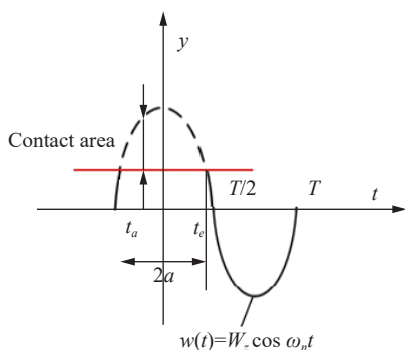


图 2 定转子法向接触模型

Fig.2 Stator and rotor normal contact model

f_d 为:

$$f_d = \frac{2\mu_s}{T} \left(\int_{t_a}^{t_d} f_n(t) dt - \int_{t_n}^{t_m} f_n(t) dt \right) \quad (6)$$

将 t_d 和 t_m 表示为角度形式:

$$\varphi_d = 0 \quad (7)$$

$$\varphi_m = \omega_n t_m - \frac{\pi}{2} = \sin^{-1} \frac{V_s}{U_x} \quad (8)$$

联立公式 (1)~(8) 得:

$$f_d = \frac{2\mu_s k_c W_Z}{T \omega} \left(1 - \frac{V_s^2}{U_x^2} \right) \quad (9)$$

转子的动力学方程为^[14]:

$$J_r \ddot{\beta} + C_r^J \dot{\beta} = M_{Ti} - M_T \quad (10)$$

式中: J_r 为转子的转动惯量; C_r^J 为转子绕 Z 轴转动的阻尼; β 为转子转动的角位移; M_{Ti} 为驱动扭矩; M_T 为负载扭矩。

而转子和光阑活动环同轴,两者角度变化相同都为 β 。将 f_d 代入公式 (10) 就可得到该行波型旋转超声电机驱动可变光阑的控制模型为:

$$\ddot{\beta} = bu(t) - g\dot{\beta}^2 - \frac{C_r^J}{J_r} \dot{\beta} - \frac{1}{J_r} M_T + \frac{1}{J_r} d(t) \quad (11)$$

式中: $u(t)$ 为控制输入; b 为转子驱动力转换增益; g 为转子运动负反馈系数^[15]; $d(t)$ 为扰动。

其次,在建立可变光圈控制模型时,输出值为活动环的角度变化。因此,需要根据可变光阑中转角和孔径大小之间的对应关系进行转换。两者的转换公式如公式 (12)~(17)^[16] 所示。

已知光阑的最大孔径 $2\rho_n=30$ mm, 最小孔径 $2\rho_m=4$ mm, 内半径 $r_m=30$ mm, 光阑片的参数计算如公式 (12) 所示:

$$r = \frac{1}{3} \left[r_m + \sqrt{7r_m^2 - 3\rho_m(2r_m - \rho_m)} \right] \quad (12)$$

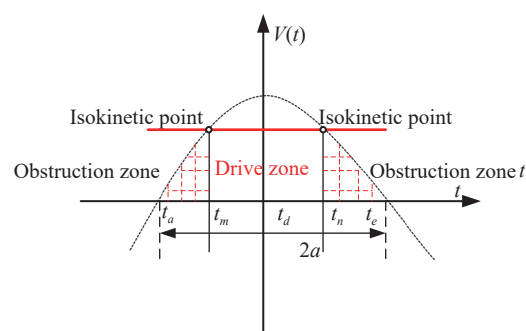


图 3 切向力与转子运动速度的关系

Fig.3 Relationship between the tangential force and the speed of the rotor

$$r_n = 2r - r_m \quad (13)$$

$$\sin \frac{\tau}{2} = \frac{r + r_m}{2r} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{\tau}{2} + 2\sin^{-1} \frac{r_m - \rho}{2r} \quad (15)$$

$$R = \frac{r}{r + r_m} \quad (16)$$

式中: r 为光阑片销钉所在圆周半径; r_n 为光阑片外半径; τ 为光阑片销钉孔对中心张角; γ 为可移动销钉转动角度; ρ 为任一级光孔半径; R 为一中间变量, 无实际意义。

联立公式 (12)~(16), 可得活动环转角为:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \alpha - R \tan \omega}{\tan \tau \cos \gamma + R} \right) \quad (17)$$

则孔径和活动环转角的对应关系为:

$$\rho = r_m - r \sin \cos^{-1} \frac{\cos \alpha - R \tan \omega - R \tan \beta}{\tan \tau \tan \beta} \quad (18)$$

最后, 针对光阑运动中非线性性和超声电机输出非线性带来的干扰, 对控制模型简化, 得到超声电机驱动可变光阑的灰箱控制模型为:

$$\ddot{\beta} = bu(t) - g\dot{\beta}^2 - K\dot{\beta} + L \quad (19)$$

式中: 参数 K 为 C_r'/J_r , 参数 L 为 $\frac{1}{J_r}d(t) - \frac{1}{J_r}M_T$ 。

3 实验

3.1 实验原理

超声电机驱动可变光阑实物及实验原理如图 4 所示。信号发生器 (AFG3022, Tectronix Inc., Beaverton, OR, USA) 和功率放大器 (HFVP-153, Foneng Inc., Nanjing, China) 用于给超声电机发送激励信号。电子放大器 (P-103U, Gaopin Inc., Kunshan, China) 用于采集光阑孔径变化的图像。

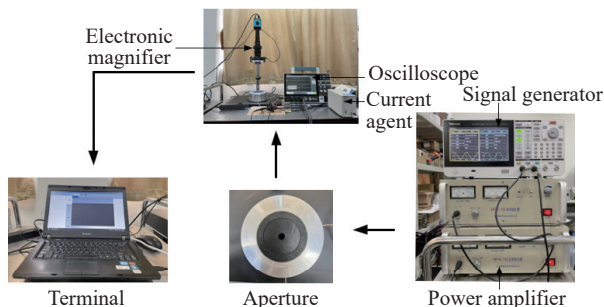


图 4 实验原理

Fig.4 Experimental principle

3.2 数据采集

实验在室温下进行, 电压调节范围设为 50~200 Vpp, 频率范围为 28.1~28.5 kHz, 周期范围为 100~1500。采集到的图像经灰度处理、二极化处理、形态学操作, 完成对采集图像孔径大小的识别, 如图 5 所示。

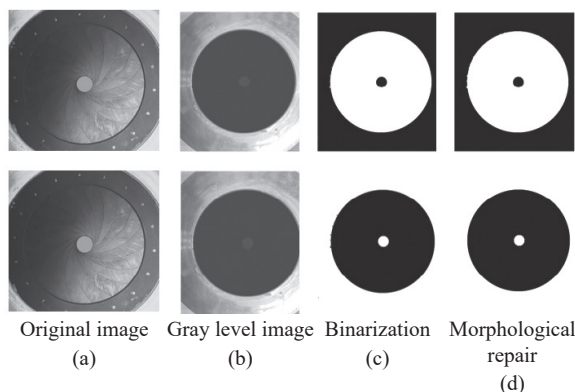
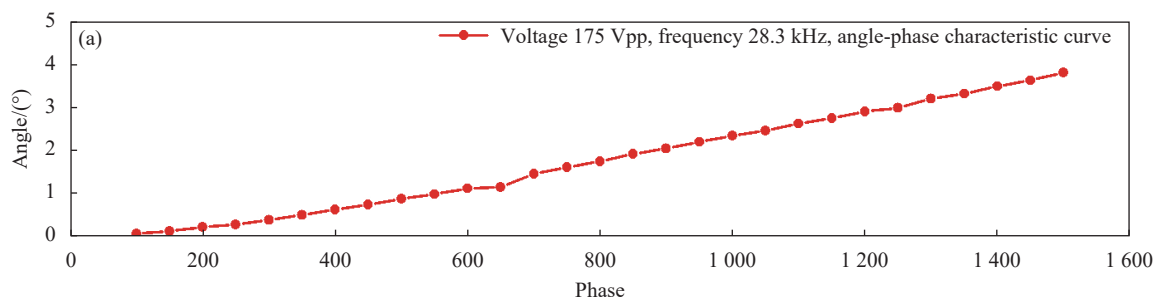


图 5 图像识别

Fig.5 Image recognition

如图 5 所示, 已知圆直径为 60 mm, 识别后其圆周长为 1510.9 mm; 经识别, 待测孔径的圆周长为 155.48 mm, 则待测孔径的实际直径为 6.174 mm。经过公式 (18) 变换得到孔径所对应的转角大小, 输入与转角关系如图 6 所示。文中以周期为变量, 研究超声



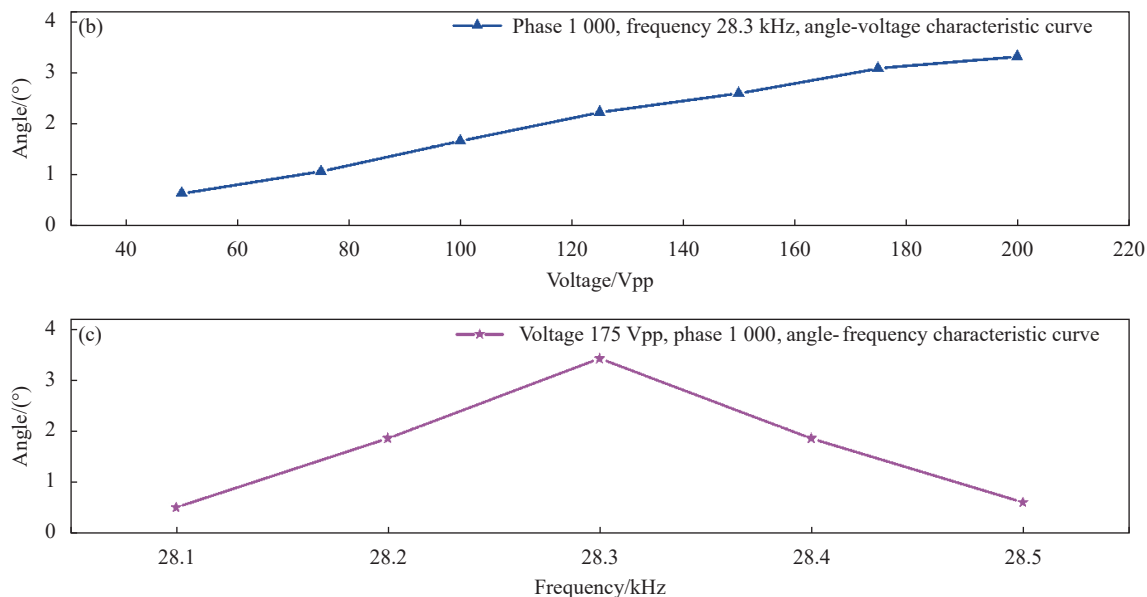


图 6 输入输出曲线

Fig.6 Input and output curves

电机驱动可变光阑的控制方法。

3.3 灰箱模型辨识

灰箱模型的输出方程和状态方程为:

$$\begin{aligned} y &= x(1) \\ dx &= \begin{bmatrix} x(2) \\ -b \times u(1) - g \times x(2)^2 - Kx(2) + L \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

对灰箱控制模型中的参数 b 、 g 、 K 和 L 进行参数辨识。图 7 和图 8 所示为超声电机驱动的可变光阑的灰箱模型及误差曲线。

如图 7 所示, 光阑开启时模型的拟合度达到了

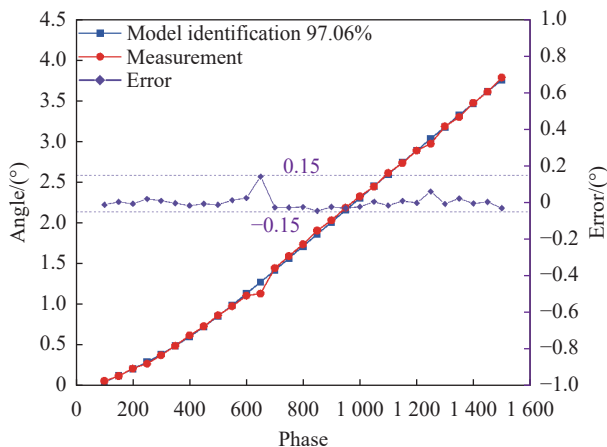


图 7 光阑开启时灰箱模型及误差

Fig.7 Gray box model and error when the aperture is opened

97.06%, 误差在 $\pm 0.15^\circ$ 以内; 如图 8 所示, 闭合时模型的拟合度达到了 92.49%, 误差在 $\pm 0.1^\circ$ 以内。结果显示: 模型的误差较小, 说明建立的灰箱模型效果良好。然而, 相比光阑开启, 光阑闭合时因光阑叶片间挤压, 对灰箱模型辨识效果有一定影响。打开和闭合参数辨识结果如表 1 所示。

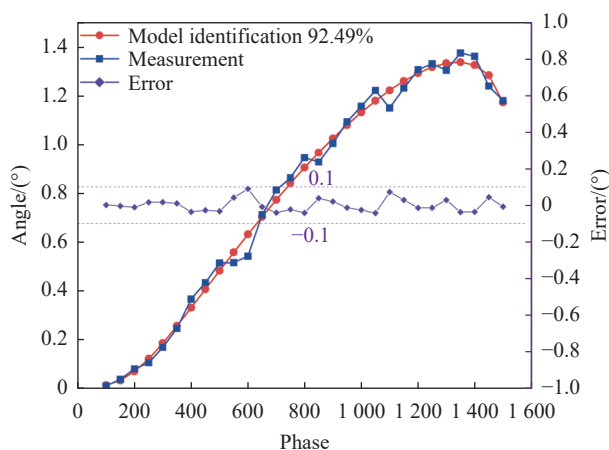


图 8 光阑闭合时灰箱模型及误差

Fig.8 Gray box model and error when the aperture is closed

图 9 和图 10 所示分别为光阑开启和闭合时灰箱模型的相关性图, 其中, (a) 图显示了模型输出的自相关性, (b) 图显示了残差与输入之间的互相关, 表明模型的建立是准确的。

表 1 参数辨识结果

Tab.1 Parameter identification results

Parameter	b	a	K	L
Open	-0.00033	6.445	14.46	-7.021
Closed	-0.00232	5.181	5.3	0.378

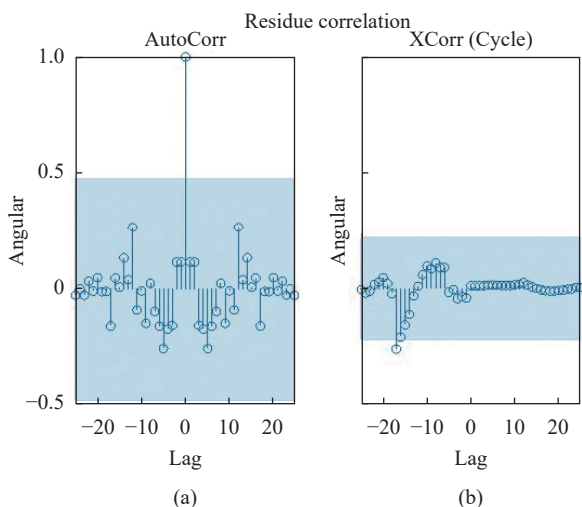


图 9 开启时灰箱模型相关性图

Fig.9 Gray box model correlation diagram when opened

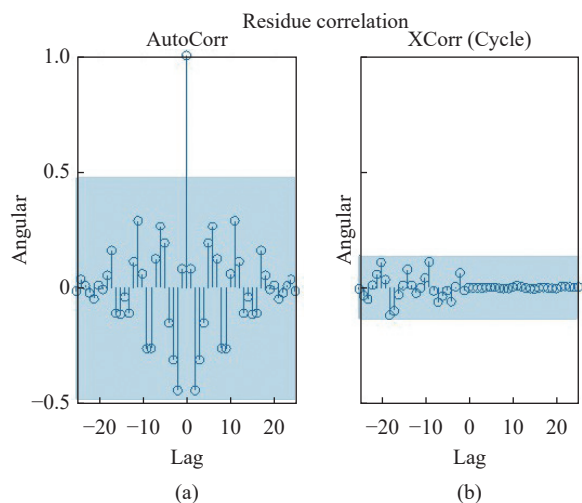


图 10 闭合时灰箱模型相关性图

Fig.10 Gray box model correlation plot when closed

3.4 实验验证

在 10~20 mm 的孔径范围内进行开环控制实验, 实验在室温下进行, 电压为 175 Vpp, 频率为 28.3 kHz。实验结果如图 11 和图 12 所示。

如图 11 所示, 光阑在 10~20 mm 变化的过程中, 预测值和实际值之间的最大误差为 -0.11965° , 最小误差为 -0.02304° , 误差在 $\pm 0.12^\circ$ 内; 如图 12 所示, 光阑在 20~10 mm 变化的过程中, 预测值和实际值的最大误差为 0.12707° , 最小误差为 -0.02183° , 误差在 $\pm 0.13^\circ$ 内。可变光阑的孔径在 10~20 mm 的开启、闭合过程中, 活动环转角的变化为 10.8° , 而实验中最大误差仅占总行程的 1.18%, 误差较小。实验结果显示, 基于灰箱模型的开环控制方法能够实现光阑孔径大小的控制, 满足可变光阑孔径控制变化的需求。光阑开启时的平均绝对误差为 0.077° , 光阑闭合时的平均绝对误差为 0.079° 。其中, 误差主要由光阑孔径呈不规则圆形引起。

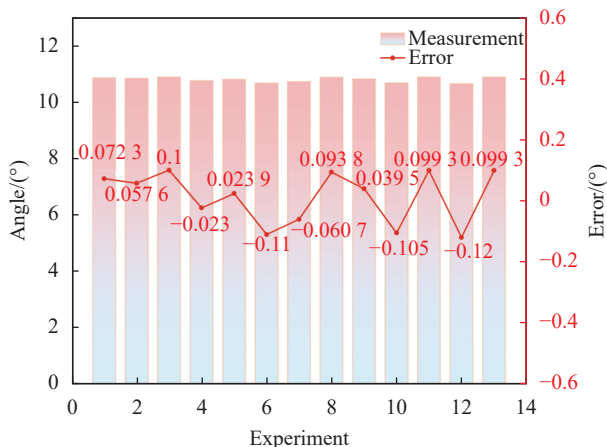


图 11 光阑开启时误差

Fig.11 Error when the aperture is opened

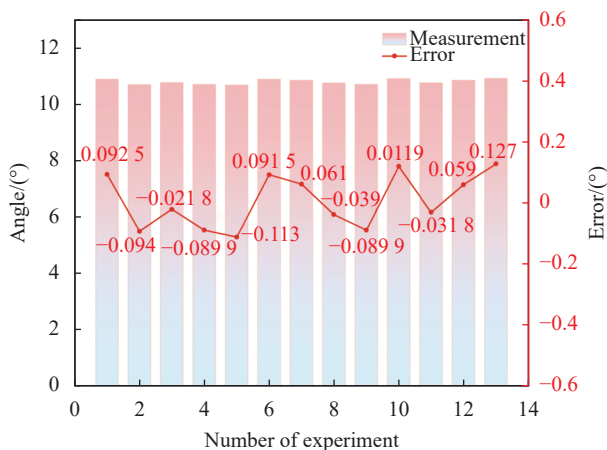


图 12 光阑闭合时误差

Fig.12 Error when the aperture is closed

4 结 论

针对红外系统空间有限、光阑叶片间摩擦力变化、活动环转角与孔径之间的非线性、超声电机输出非线性,文中提出了基于灰箱模型超声电机驱动可变光阑的开环控制方法。建立了超声电机驱动可变光阑的控制模型,通过灰箱模型对控制模型中的参数进行辨识,并设计实验对该控制方法进行了验证。结果表明,基于灰箱模型的开环控制方法开启时的平均绝对误差为 0.077° , 闭合时的平均绝对误差为 0.079° , 满足可变光阑变 F 数控制的需求。下一步将进一步设计整体结构和控制方法: 结构上对超声电机的预压力结构进行准零刚度和一体化设计, 实现小型化、轻型化; 控制方法上进行深度学习、神经网络等控制方法的研究。

参考文献:

- [1] CHEN Lu, FENG Zhiming, ZHAO Jinchun, et al. Optical system design method for complex mapping relationship between object and image based on field-dependent parameters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(7): 20240125. (in Chinese)
- [2] ZHOU Enyuan, CAO Yueqin, SHI Jianping, et al. Design of compact dual-field lens for visible light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210042. (in Chinese)
- [3] LI Xiaoni, ZHOU Shengqiang. A novel piezoelectric actuator with a screw-coupled stator and rotor for driving an aperture [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(3): 035027.
- [4] LIU Jian, JIN Jiamei, CHEN Di, et al. Rotary type standing wave piezoelectric actuator for aperture[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(1): 97-102. (in Chinese)
- [5] CAO Teng, LI Xiaoni, WANG Boquan, et al. Design of high precision apertures driven by a single phase piezoelectric motor [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(20): 2414-2419. (in Chinese)
- [6] SONG L, SHI J. Adaptive PI control of ultrasonic motor using iterative learning methods[J]. *ISA transactions*, 2023, 139: 499-509.
- [7] MIN M, WENYU L, ZHAO F, et al. PID-type sliding mode-based adaptive motion control of a 2-DOF piezoelectric ultrasonic motor driven stage[J]. *Mechatronics*, 2021, 76: 102543.
- [8] MO J, QIU Z, WEI J, et al. Adaptive positioning control of an ultrasonic linear motor system[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2017, 44: 156-173.
- [9] HU Qifu, LIU Dianting, WU Shan, et al. Model free adaptive control of ultrasonic motor based on improved equilibrium optimizer [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2023, 39(1): 58-64. (in Chinese)
- [10] CHEN Ning, ZHENG Jieji, FAN Shixun, et al. High-precision control algorithm for velocity and position of ultrasonic motor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 790-799. (in Chinese)
- [11] LIN Y, YONGJIE H, WEIHAO R, et al. Position control method for ultrasonic motors based on beat traveling wave theory[J]. *Ultrasonics*, 2022, 125: 106793.
- [12] BARZEGARI M M, ALIZADEH E, PAHNABI H A. Grey-box modeling and model predictive control for cascade-type PEMFC [J]. *Energy*, 2017, 127: 611-622.
- [13] YUAN H, NA H, KIM Y. Robust MPC-PIC force control for an electro-hydraulic servo system with pure compressive elastic load [J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 79: 170-184.
- [14] ZHAO Chunsheng. Ultrasonic Motors Technologies and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [15] PANUSITTAKORN W, LEE C M, RO I P. Modeling and sliding-mode control of friction-based object transport using two-mode ultrasonic excitation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(4): 917-926.
- [16] Editor group of *Optics Apparatus Design Manual*. Optics Apparatus Design Manual [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1972. (in Chinese)

Ultrasonic motor-driven variable aperture open-loop control method

LV Benchao¹, LI Xiaoniu^{1*}, WU Junfeng², TANG Lingfeng¹, YANG Feng¹,
SUN Hongsheng³, GAN Youyu³, LI Shufen³, LI Ming³

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China;

2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

3. Kunming Physics Research Institute, Kunming 650223, China)

Abstract:

Objective Infrared detection, characterized by its robust anti-interference capability and all-weather operability, finds extensive application in infrared optical systems, particularly in military domains such as tracking, reconnaissance, and surveillance. Advancing technology has escalated the requirements for infrared optical systems, necessitating the implementation of variable F -numbers for enhanced performance through F -number matching. Ultrasonic motors, offering distinct advantages such as compact size, simple structure, and absence of electromagnetic interference, present a compelling alternative to electromagnetically driven variable apertures. Despite the introduction of several ultrasonic motor-driven variable apertures, research emphasis has primarily been on structural design and performance evaluation, underscoring the critical need for control methodology studies. The inherent challenges of limited assembly space, non-linear friction dynamics among aperture blades, non-linear relationships between rotation angle and aperture size, and the output non-linearity of ultrasonic motors, introduce complexities in the control of ultrasonic motor-driven variable apertures. Thus, the investigation of effective control methods for ultrasonic motor-driven variable apertures is imperative to meet the requirements of miniaturization and precise aperture control.

Method This study proposes an innovative open-loop control approach for ultrasonic motor-driven variable apertures, grounded in a grey box model. A traveling wave type ultrasonic motor-driven variable aperture was conceptualized and developed, featuring an adjustable aperture diameter spanning from 4 mm to 60 mm. A dynamic control model for the ultrasonic motor-driven variable aperture was formulated (Eq.11). Leveraging image recognition technology, aperture change data was meticulously collected, and the parameters were identified through the grey box model (Tab.1). To substantiate the efficacy of the open-loop control method based on the grey box model, a series of experimental validations were carried out (Fig.11-Fig.12).

Results The grey box identification model exhibited a fitting degree of 97.06% during the aperture opening phase, with error margins confined within $\pm 0.15^\circ$ (Fig.7). When the aperture was in the closing phase, the model showed a fitting degree of 92.49%, with errors tightly bounded within $\pm 0.1^\circ$ (Fig.8). These metrics underscore the model's effectiveness in accurately representing the system's dynamic characteristics. When subjected to aperture changes from 10-20 mm, experimental validation revealed a maximum error of -0.11965° and a minimum error of -0.02304° , confined within $\pm 0.12^\circ$ (Fig.11). During aperture transitions from 20-10 mm, the maximum error was recorded at 0.12707° , with the minimum at -0.02183° , all within $\pm 0.13^\circ$ (Fig.12). The average absolute error was measured at 0.077° during aperture opening and 0.079° during closing, corroborating the feasibility and precision of the ultrasonic motor-driven variable aperture control method.

Conclusion An open-loop control strategy for ultrasonic motor-driven variable apertures, underpinned by a grey

box model, has been successfully proposed. The method adeptly tackles the multifaceted challenges posed by limited assembly space, the non-linear dynamics of aperture blade friction, and the output non-linearity of ultrasonic motors. A grey box control model was established, and aperture change data was meticulously collected using image recognition techniques. The grey box model's parameter identification capability was validated, achieving a fitting degree of 97.06% during the aperture opening phase and 92.49% during the closing phase. Experimental results demonstrated negligible error values during aperture changes, attesting to the control method's efficacy in achieving precise control of ultrasonic motor-driven variable apertures without the reliance on additional sensors. This approach not only simplifies system architecture but also enhances response speed, making it a compelling solution for advanced infrared optical systems.

Key words: infrared optical system; variable aperture; open loop control; grey box model; ultrasonic motor

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (51905265); Jiangsu Provincial Graduate Research and Practice Innovation Program (SJCX23_0102)