

力矩促动器的迟滞非线性建模校正

刘攀登^{1,2,3}, 杜福嘉^{1,2}, 宫雪非^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 力矩促动器的迟滞非线性降低了系统的控制精度。为了解决该问题, 建立了可以精确描述该迟滞现象的模型并提出了合理的补偿控制方案。首先, 根据迟滞曲线的非中心对称的特性, 基于 Prandtl-Ishlinskii 模型对力矩促动器的迟滞非线性进行分段建模, 并采用 LMS 算法进行模型参数的优化辨识, 模型预测误差的 RMS 值为 0.08111N。然后, 通过 PI 模型的解析逆模型进行补偿控制。实验结果表明, 采用逆模型补偿后, 力矩促动器输出力误差的 RMS 值从 1.888N 降低到 0.2596N, 误差的方均根值降低了 86.25%, 有效保证了系统的控制精度。

关键词: 力矩促动器; 迟滞非线性; PI 模型; 逆模型; 补偿控制

中图分类号: TH16; TP29 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2022)11-0164-05

DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2022.11.042

Modeling and Correction for the Hysteresis Nonlinearity of Warping Harness

LIU Pan-deng^{1,2,3}, DU Fu-jia^{1,2}, GONG Xue-fei^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Jiangsu Nanjing 210042, China; 2. CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Jiangsu Nanjing 210042, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The hysteresis nonlinearity of warping harness reduces the control accuracy of the system. In order to solve this problem, building a model which can accurately describe the hysteresis phenomenon and proposing a reasonable compensation control scheme. First of all, according to the non-central symmetry characteristic of the hysteresis curve, based on Prandtl-Ishlinskii model, the hysteresis nonlinear of the warping harness is modeled in sections, and LMS algorithm is used to identify the model parameters. The RMS value of the model prediction error is 0.08111N. And then the analytical inverse of PI model is used to compensate the control. The experimental results show that the RMS value of output force error for warping harness decreases from 1.888N to 0.2596N, so the RMS of error is reduced by 86.25%, which effectively ensure the control accuracy of the system.

Key Words: Warping Harness; Hysteresis Nonlinearity; Prandtl-Ishlinskii Model; Inverse Model; Compensating Control

1 引言

随着天文观测需求的发展, 天文学家对望远镜成像质量的要求越来越高。为了保证成像质量, 需要通过改变镜面的面形来校正像差。Nelson 基于弹性变形理论提出力矩促动器技术, 通过力矩作用使镜面产生弯曲变形, 对校正离焦、像散等像差具有明显作用^[1], 相比较于传统的力促动器, 力矩促动器主要用来校正低频误差, 且不承担载荷。

因此, 力矩促动器技术日益成为国际上大望远镜镜室制造的关键技术^[2], 国外的三十米级大望远镜 TMT 和 E-ELT 均采用

了力矩促动器技术。研究高精度的镜面力矩促动器控制系统, 对于未来我国建设 10m 级甚至更大口径的望远镜有极为重要的意义^[3-4]。

在工程实践中, 通常使用应变片来检测力矩传感器的输出力矩, 然而, 由于弹簧叶片材料(航空铝)本身力与应变之间存在的迟滞非线性特性, 导致通过应变来检测力矩促动器输出力存在较大误差, 这严重限制了力矩促动器的控制精度。

针对迟滞非线性问题, 国内外学者在压电陶瓷和磁滞伸缩领域对迟滞特性进行了深入研究^[5-6], 目前研究人员主要是通过

来稿日期: 2021-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11873014 U1831111); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20181507)

作者简介: 刘攀登, (1991-), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要研究方向: 力矩促动器控制系统;

杜福嘉, (1975-), 男, 辽宁人, 硕士研究生, 副研究员, 主要研究方向: 望远镜技术、极端环境影响

建立迟滞模型来校正迟滞非线性^[7], 目前已有的迟滞模型, 根据建立模型的原理不同, 可以分为原理迟滞模型和现象迟滞模型^[8], 原理迟滞模型是对迟滞产生的机理进行物理求解^[9], 求解出输入输出的物理方程从而建立迟滞模型, 但是建模困难, 且模型适用性范围较差。而基于现象的迟滞模型主要是通过对实际数据进行拟合, 简单可靠, 具有代表性数学模型比如由文献^[10]提出的 Perisach 模型, 文献^[11]使用改进的 Preisach 模型将压电陶瓷的位移误差降低到 0.14 μm , 但是此模型参数较多, 计算复杂。此外, 由文献^[12]提出的 Prandtl-Ishilinskii (PI) 模型相比较于 Perisach 模型, 结构较为简单, 参数少, 易于辨识, 并且存在解析逆, 广泛应用于压电陶瓷的迟滞补偿^[13-15], 文献^[16]就采用了 PI 模型对压电变形镜的迟滞特性就行了校正, 使开环精度提高了 70%。虽然力矩促动器与压电陶瓷致动器采用的材料和迟滞原理不同, 但对迟滞问题的补偿方法基本相同。因此这里采用 PI 模型对力矩促动器的迟滞非线性进行校正。首先建立力矩促动器应变-力控制系统的迟滞模型并优化算子个数, 然后利用迟滞逆模型求出消除迟滞后的补偿电压, 对补偿电压进行闭环控制, 实现电机输出轴上力的高精度线性控制。

2 力矩促动器工作原理及迟滞特性

力矩促动器工作原理示意图, 如图 1 所示。步进电机固定在下层的基座上, 电机输出轴与弹簧叶片连接在一起, 弹簧叶片另一端连接 Whiffletree 三脚架, Whiffletree 三脚架与基座通过柔性铰链连接在一起, 当电机输出位移顶起弹簧叶片后, 会在弹簧叶片另一端产生一个力矩, 从而改变了 Whiffletree 三脚架上的力的分布, 使镜面面型发生改变, 实现对低阶像差的校正。

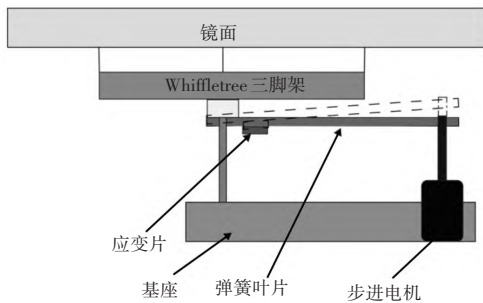


图 1 力矩促动器工作原理

Fig.1 Working Principle of Warping Harness

为了实际安装使用方便, 降低机械结构设计的复杂性, 使用应变片测量电机输出轴上的实际输出力。在保证校正低阶像差的前提下, 使用应变片测量电机输出力的精度应该控制在 0.5N 之内。经过对弹簧叶片进行静力学分析, 如图 2 所示。弹簧叶片在受力发生形变时, 弹簧叶片根部与 Whiffletree 三脚架连接处的位置产生的应变最大, 因此, 将应变片粘贴在此处, 测量分辨率最高。为了实现通过应变来精确测量三条 Whiffletree 支撑轴上力, 应变电压与电机输出轴上的力应该成线性关系。但是, 实验测量数据, 如图 3 所示。电机输出轴上的力在增大和减小的过程中会产生不同的应变, 即应变-力测量系统存在迟滞性。如果想实现电机输出力的精确测量, 需要对这个迟滞特性进行校正, 以达到期望的控制精度。

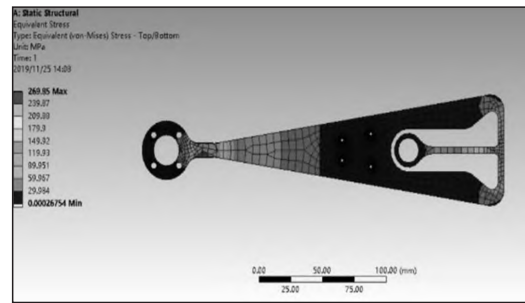


图 2 弹簧叶片的静力学分析

Fig.2 Static Analysis of Leaf-Spring

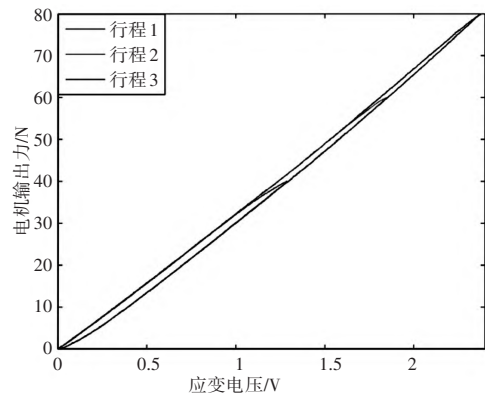


图 3 力矩促动器迟滞曲线

Fig.3 Hysteresis Characteristics of Warping Harness

3 PI 迟滞模型

3.1 PI 迟滞建模

PI 模型的参数一般包括阈值 r_i 、权值向量 w_i 。每一组参数都构成一个简单的滞回系统, 也叫 play 算子, PI 模型是由多个 play 算子加权叠加构成, 单个 play 算子的表达式为:

$$f_i(t) = \max \{ u(t) - r_i, \min \{ u(t) + r_i, f_i(t-1) \} \} \quad (1)$$

初值条件为:

$$f_i(0) = \max \{ u(0) - r_i, \min \{ u(0) + r_i, f_{i0} \} \} \quad (2)$$

将 n 个 play 算子乘以权值 w_i 后进行叠加即可得到力矩促动器的迟滞 PI 模型, 表达式为:

$$f(t) = \sum_{i=0}^n w_i \cdot \max \{ u(t) - r_i, \min \{ u(t) + r_i, f_i(t-1) \} \} \cdots \quad (3)$$

式中: n —算子个数;

$u(t)$ — t 时刻的电压输入;

$f(t)$ — t 时刻的建模输出;

w_i —第 i 个算子的权值;

r_i —第 i 个算子的阈值。

其中, play 算子的阈值 $r_i = \frac{i-1}{n} r_{\max}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。 r_{\max} 应当小于输入电压的最大值, 具体取值应当为保证 PI 模型存在解析逆时的最大值。

权值 w_i 的取值是通过最小二乘法找出最优解, 然后对力矩促动器的迟滞曲线进行参数辨识得到的。

将 PI 模型表达式 (3) 写为向量形式:

$$f(t) = w^T \cdot H(t) \quad (4)$$

式中： $H(t) = (H_1(t), H_2(t) \cdots H_n(t))^T$ —算子在 t 时刻的状态向量；

$w^T = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ —权值向量。

力矩促动器在 t 时刻的实际测量数据中的输出为 $y(t)$ ，则 t 时刻建模误差 $e(t)$ 为：

$$e(t) = f(t) - y(t) = w^T \cdot H(t) - y(t) \quad (5)$$

根据最小二乘法，误差函数的平方和取最小值时， w^T 由最优解，由式(6)可知，误差的平方和有最小值，因此这就是要找的最优解。

$$w_{n \times 1} = (H_{n \times N} H_{n \times N}^T)^{-1} H_{n \times N} Y_{N \times 1} \quad (6)$$

由于力矩促动器迟滞曲线中上升和下降过程的不对称性，不能共用一套模型参数，因此需要对上升和下降过程分别进行辨识，根据上述式(3)、式(6)，结合测量得到的如图3所示的电压-力迟滞曲线，基于PI模型进行参数辨识，分别求出上升和下降过程的权向量 w^T 、阈值 r ，然后代入式(3)，也就是PI模型的表达式，即可得出力-应变变系统的PI迟滞模型。

从式(3)可以看出，辨识出的PI模型的准确度与算子的个数有关。根据最小方均根算法(Least Mean Square)算法，通过使用不同数目的算子进行建模，然后计算模型误差的均方根，可以找出最优的算子个数。算子数目不同时辨识出的PI模型与实际数据的误差方均根，如图4所示。当算子增加到25个以后，PI模型的辨识误差基本趋于稳定。同时，随着算子个数的增加，控制系统计算补偿电压的运算量也会随之增加，系统迟滞补偿的速度也会相应变慢，不利于实验进行实时的补偿校正。

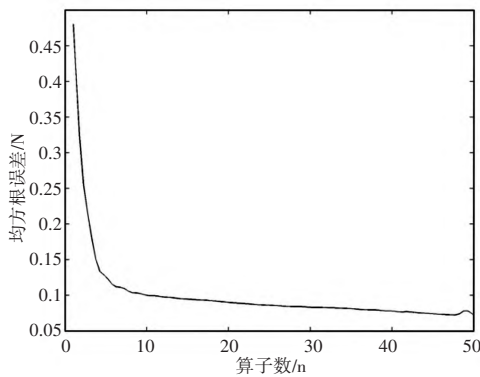


图4 辨识误差下降曲线
Fig.4 Error Decline Curve

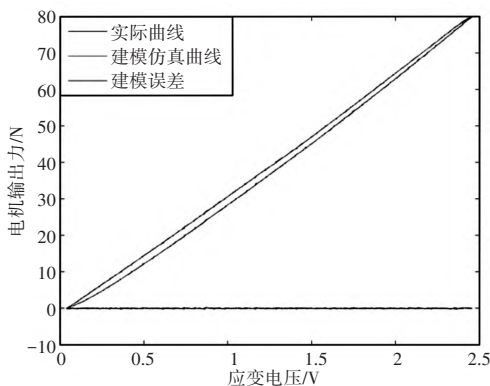


图5 力矩促动器迟滞建模结果
Fig.5 Modeling Results of Warping Harness Hysteresis

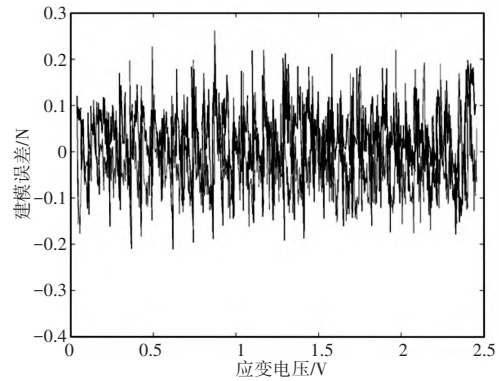


图6 PI模型建模误差
Fig.6 Modeling Error

因此，为了兼顾系统的迟滞模型的误差和系统的运算时间，实验最终选择25个算子来进行PI模型辨识，辨识结果，如图5所示。模型辨识误差，如图6所示。此时PI模型的建模结果与实验数据基本一致，误差也控制在很小的范围内，误差的方均根值(Root Mean Square)为0.0811N。因此，当我们选择25个算子进行建模时，可以满足补偿控制的需求。

3.2 PI逆模型

由于PI模型存在解析逆，所以可以通过PI逆模型与PI模型之间互逆的关系计算出PI逆模型的阈值向量和权系数向量，其向量元素分别为：

$$r'_i = \sum_{j=1}^i w_j (r_i - r_j) \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$w'_1 = \frac{1}{w_1}, w'_i = \frac{-w_i}{\sum_{j=1}^i w_j \sum_{j=1}^{i-1} w_j} \quad (8)$$

$$i = 2, 3, \dots, n$$

PI逆模型算子的初始值为

$$u_i(0) = \sum_{j=1}^{i-1} w_j f_j(0) + \sum_{j=i}^n w_j f_j(0) \quad (9)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

同理，PI逆模型在 t 时刻的输出表达式为：

$$u(t) = \sum_{i=1}^n w'_i \cdot h_i(t) = \sum_{i=1}^n w'_i \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} f(t) \\ -r'_i, \min \{ f(t) + r'_i, u_i(t-1) \} \end{array} \right\} \quad (10)$$

将3.1中计算出的上升和下降过程的PI迟滞模型参数分别代入式(7)~式(9)，即可计算出各自的逆模型的参数；然后将逆模型参数代入逆模型输出表达式(10)，即可分别求出力矩促动器上升和下降过程迟滞补偿的PI逆模型。

使用PI逆模型补偿的原理，如图7所示。首先测量得到力矩促动器控制系统的实际迟滞曲线，然后进行模型辨识，分别得到上升过程的PI逆模型和下降过程的PI逆模型。然后根据力矩促动器校正面形时的输入的期望力 $f(t)$ ，与上一时刻的期望力 $f(t-1)$ 进行比较，确定此次校正是上升过程还是下降过程，并使用相应的逆模型计算出此时力矩促动器的补偿控制电压 $u(t)$ 。最后

通过闭环控制应变电压信号 $u(t)$, 实现对力矩促动器电机输出力的补偿控制。

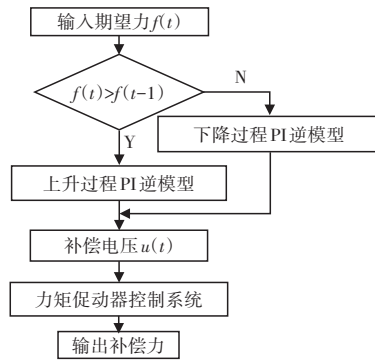


图7 力矩促动器补偿控制原理

Fig.7 Compensation Control Principle of Warping Harness

4 实验验证

根据力矩促动器的工作原理, 实验室研制了的力矩促动器实验模型, 如图8所示。主要由基座、三条 Whiffletree 支撑轴、Whiffletree 三脚架、弹簧叶片、电机输出轴组成, 通过控制电机的输出位移, 使弹簧叶片发生形变, 弹簧叶片形变会在弹簧叶片的根部 (与 Whiffletree 三脚架连接处) 产生一个力矩, 此力矩会使三条 Whiffletree 支撑轴上支撑力重新分配, 从而达到改变镜面面型的目的。电机输出轴上的每一个力都对应 Whiffletree 三脚架上的一组可以改变镜面面型的力, 通过闭环控制电机输出轴上的力, 可以达到期望的面型。

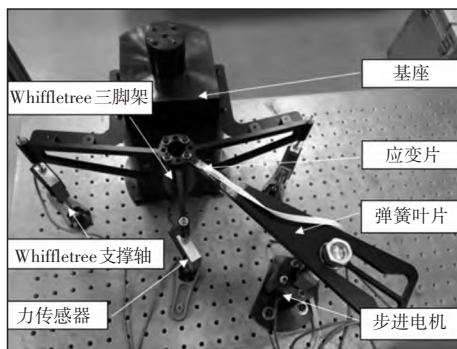


图8 力矩促动器实物图

Fig.8 Material Object of Warping Harness

为了对力矩促动器进行测试和控制, 搭建了基于 DSP 的力矩促动器控制系统, 该系统以 TMS320F28335 为控制核心, 一共有 5 路 12 位高精度 AD 通道, 其中, 1 通道采集电机输出轴上的力, 3 通道采集三条 Whiffletree 支撑轴上的力, 1 通道采集应变片的输出电压。电机输出轴和 Whiffletree 支撑轴上各安装了力传感器, 力传感器采用 Interface 公司的 SM-200 型力传感器, 应变片采用 Vishay 公司生产的 N2A-13-S5232K-350/E5 型应变片。通过闭环控制应变片的输出应变电压, 实时测量电机输出轴上的力和三条 Whiffletree 支撑轴上的力。

为了验证 PI 模型在力矩促动器控制系统的有效性, 在通过对模型进行建模后, 计算出逆模型的各项参数向量, 然后将逆模型的补偿通过 DSP 控制系统来实现。将期望力通过上位机发送

给 DSP 后, DSP 根据力矩促动器前一刻的运行状态和期望力, 通过逆模型计算得出补偿电压, 然后通过闭环控制应变电压来实现控制电机轴上力的输出, 输出力的大小通过安装在电机输出轴上的力传感器来进行验证。

在本次实验中, 通过上位机依次给 DSP 发送 0N 递增至 80N 到力, 然后再从 80N 递减到 0N, 间隔为 2N, 先通过 PI 逆模型得到补偿后电压的大小, 然后通过闭环控制弹簧叶片的应变电压, 使用 PID 控制实时调节步进电机的运行频率, 使弹簧叶片达到期望的应变, 力矩促动器补偿输出结果示意图, 如图 9 所示。

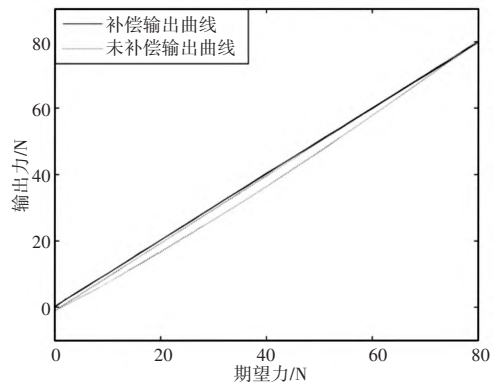


图9 力矩促动器补偿控制输出

Fig.9 Warping Harness Compensation Control Output

对比图9中的两条曲线, 可以看出, 经过 PI 逆模型校正的控制精度明显高于未使用逆模型补偿时的控制精度。使用逆模型补偿后的测量误差随校正力的变化的曲线, 如图 10 所示。通过与图 6 中的 PI 模型拟合误差对比可以看出, 实际补偿误差略大于模型的拟合误差, 因此, 补偿控制后的输出力误差一方面来源于模型拟合时的误差, 另一方面也与控制系统的系统误差有关。

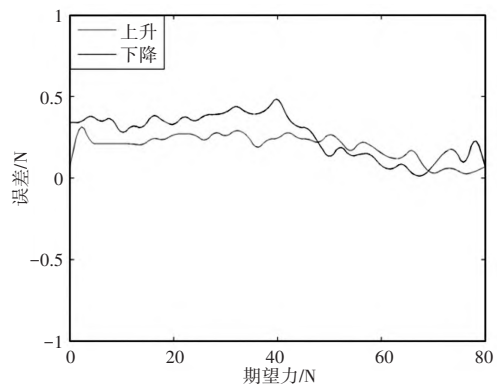


图10 补偿控制后的误差曲线

Fig.10 Error Curve after Compensation Control

补偿后误差的下降幅度, 如表 1 所示。在上升的过程中, 误差一直控制在很小的范围内, 具有较好的补偿效果。下降过程的控制误差波动略大于上升过程。通过对误差的测量数据进行计算可得, 未使用逆模型补偿时输出力误差的 RMS 值为 1.888N, 使用逆模型补偿后的 RMS 值为 0.2596N, 减少了 86.25%, 较好的提高了力矩促动器的控制精度。

表1 补偿控制后的误差

Tab.1 Error Comparison before and after Compensation

期望力/N	校正前误差/N		校正后误差/N		误差下降幅度	
	上升	下降	上升	下降	上升	下降
0	0.22	0.58	0.07	0.34	67.73%	41.73%
10	2.37	0.28	0.21	0.26	91.15%	8.46%
20	3.01	0.64	0.27	0.32	91.03%	50.30%
30	3.18	0.91	0.25	0.4	92.13%	56.12%
40	3.16	1.24	0.24	0.51	92.41%	58.95%
50	3.06	1.22	0.28	0.11	90.86%	91.02%
60	2.40	0.81	0.15	0.07	93.74%	91.35%
70	1.39	0.14	0.02	0.08	98.56%	43.87%
80	0.16	0.16	0.07	0.07	56.14%	56.14%

5 结论

这里提出了基于PI模型的力矩驱动器补偿控制方法,利用PI迟滞模型对力矩驱动器的迟滞特性进行建模,通过LMS算法优化得出算子个数为25时建模效果最佳,然后使用逆模型对输入电压进行补偿,实现对力矩驱动器输出力的高精度控制。经过逆模型补偿的电压-力控制系统的RMS值由原来的1.888N降低为0.2596N,最大相对误差由原来的4.073%降低为0.6375%。实验结果表明:对力矩驱动器进行PI逆模型补偿可以有效降低输出力的迟滞误差,提高了力矩驱动器的控制精度,在主动光学中具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] Ponslet E, Blanco D, Cho M, et al. Development of the primary mirror segment support assemblies for the thirty meter telescope [C]. Optomechanical Technologies for Astronomy. International Society for Optics and Photonics, 2006(6273): 627319.
- [2] 韩琳楚. 基于TMT三镜的半主动光学面形校正技术研究[D]. 2017. (Han Lin-chu. Study on correction of semi-Active optics technology for large optical flat mirror based on TMT tertiary mirror [D]. 2017.)
- [3] 宫雪非, 陈迅, 陈哲. 拼接子镜力矩驱动器布局的优化设计[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 363-371. (Gong Xue-fei, Chen Xun, Chen Zhe. The optimization of the layout of warping harness of segmented-mirror telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 363-371.)
- [4] Han L, Liu C, Fan C, et al. Low-order aberration correction of the TMT tertiary mirror prototype based on a warping harness [J]. Applied Optics, 2018, 57(7): 1662-1670.
- [5] 杨斌堂, 赵寅, 彭志科, 等. 基于Prandtl-Ishlinskii模型的超磁致伸缩驱动器实时磁滞补偿控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 124-130. (Yang Bin-tang, Zhao Yin, Peng Zhi-ke, et al. Real-time compensation control of hysteresis based on Prandtl-Ishlinskii operator for GMA [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 124-130.)

- [6] 王海涛, 李世杰, 张艳蕊. 基于压电陶瓷的微进给平台的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 208-210. (Wang Hai-tao, Li Shi-jie, Zhang Yan-rui. Experimental study on micro-feeding table based on piezoelectric ceramic [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(7): 208-210.)
- [7] 张桂林, 张承进, 李康. 基于PI迟滞模型的压电驱动器自适应辨识与逆控制[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 11(1): 85-89. (Zhang Gui-lin, Zhang Cheng-jin, Li Kang. Adaptive identification and inverse control of piezoelectric actuators based on PI hysteresis model [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013, 11(1): 85-89.)
- [8] 范伟, 林瑜阳, 李钟慎. 压电陶瓷驱动器的迟滞特性[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1112-1117. (Fan Wei, Lin Yu-yang, Li Zhong-shen. Hysteresis characteristics of piezoelectric ceramic actuators [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1112-1117.)
- [9] 陈远晟. 压电驱动器的迟滞非线性建模与控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013. (Chen Yuan-sheng. Hysteresis modeling and nonlinear control of piezoelectric actuators [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.)
- [10] Mayergoyz I D, Friedman G. Generalized Preisach model of hysteresis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 212-217.
- [11] 魏燕定, 陶惠峰. 压电驱动器迟滞特性的Preisach模型研究[J]. 压电与声光, 2004, 26(5): 364-367. (Wei Yan-ding, Tao Hui-feng. Study the preisach model of hysteresis in piezoelectric actuator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2004, 26(5): 364-367.)
- [12] Kuhnen K. Modelling, identification, and compensation of complex hysteretic and log(t)-type creep nonlinearities [J]. Control and intelligent systems, 2005, 33(2): 134-147.
- [13] 杨宗峰, 李文来, 彭泰然, 等. 具有迟滞补偿的单压电变形镜的闭环校正性能[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 284-290. (Yang Zong-feng, Li Wen-lai, Peng Tai-ran, et al. Performance of closed-loop correction with hysteresis compensation for unimorph deformable mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 284-290.)
- [14] Zhang X, Lin Y, Mao J. A robust adaptive dynamic surface control for a class of nonlinear systems with unknown Prandtl-Ishlinskii hysteresis [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(13): 1541-1561.
- [15] Sjoström M, Visone C. Moving Prandtl-Ishlinskii operators with compensator in a closed form [J]. Physica B-condensed Matter, 2006, 372(1): 97-100.
- [16] 田雷, 陈俊杰, 崔玉国, 等. 基于PI迟滞模型的单压电变形镜开环控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 136-142. (Tian Lei, Chen Jun-jie, Cui Yu-guo, et al. Control of piezoelectric deformable mirror based on PI hysteresis model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 136-142.)