

文章编号 1004-924X(2022)23-3081-09

地基大口径望远镜动态目标跟踪中 压电式快速反射镜迟滞效应的补偿

刘永凯^{1*}, 吕福睿^{1,2}, 高世杰¹, 邓永停¹, 吴昊¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高基于压电式快速反射镜的光学系统的动态目标跟踪性能, 对迟滞非线性效应带来的影响及其补偿方法进行了研究。首先, 基于 Prandtl-Ishlinskii (P-I) 模型, 建立 P-I 模型与自回归历变模型 (Auto-regressive Exogenous Model, ARX) 模型串联的率相关迟滞模型。然后, 提出了基于 P-I 的率相关模型复合控制补偿算法。最后, 搭建了基于压电式快速反射镜的实验平台, 对压电陶瓷的迟滞效应进行了模型辨识, 基于其逆模型设计了前馈控制器, 同时检验迟滞补偿方法对动态目标跟踪系统的优化作用。实验结果表明: 基于 P-I 的率相关模型适用于动目标跟踪系统, 采用复合控制补偿算法后, 动态目标跟踪系统的误差抑制带宽提高了 26 Hz, 有效提高了动态目标跟踪系统的误差抑制能力。

关键词: 压电陶瓷; 快速反射镜; 迟滞效应; 复合控制; 目标跟踪; P-I 模型; 率相关

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/OPE. 20223023. 3081

Compensation of hysteresis effect of piezoelectric fast steering mirror in dynamic target tracking of ground-based large aperture telescope system

LIU Yongkai^{1*}, LÜ Furui^{1,2}, GAO Shijie¹, DENG Yongting¹, WU Hao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: liuyk@ciomp. ac. cn*

Abstract: To improve the dynamic target tracking performance of optical systems based on piezoelectric fast mirrors, the effect of hysteresis nonlinearity and the corresponding compensation methods are investigated in this study. First, based on the Prandtl - Ishlinskii (P-I) model, a rate dependent hysteresis model in series with the P-I model and the auto regressive empirical model is established. Then, a rate dependent model compound control compensation algorithm based on P-I is proposed. Finally, an experimental platform using a piezoelectric fast mirror is built to identify the hysteresis effect of piezoelectric ceramics, and a feedforward controller is designed based on its inverse model. Simultaneously, the optimization effect of

收稿日期: 2022-09-29; 修订日期: 2022-10-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11973041, No. 12122304); 中国科学院青年创新促进会会员资助项目 (No. 2019218)

the hysteresis compensation method on the dynamic target tracking system is verified. The experimental results show that the rate dependent model based on P-I is suitable for moving target tracking systems. When the compound control compensation algorithm is applied, the error suppression bandwidth of the dynamic target tracking system is increased by 26 Hz. Thus, the error suppression capability of the dynamic target tracking system is effectively improved.

Key words: piezoelectric ceramic; fast steering mirror; hysteresis effect; compound control; target tracking; P-I model; rate dependent

1 引言

随着探测能力、空间分辨率等的提高,地基大口径望远镜对伺服系统跟踪性能的要求越来越高。系统结构多为复合轴跟踪结构,以动态范围广的主轴作为粗跟踪系统,以响应速度快的子轴作为精跟踪系统。而精跟踪控制系统的带宽越高,复合轴系统的动态目标跟踪能力越强,稳定性越高。研究结果证明,为充分发挥复合轴系统的优势,精跟踪系统的闭环带宽应是粗跟踪系统闭环带宽的 6~10 倍^[1]。因此,精跟踪系统带宽对于地基大口径望远镜的动态目标跟踪性能至关重要。

压电促动器(Piezoelectric Actuator, PEA)具有尺寸小、质量轻、出力大、噪声低等优点,而且具备纳米级的分辨率、超高的重复定位精度和优异的动态特性,因此在精密制造、生物医疗、半导体产业、航空航天、自动化与机器人技术、消费电子和精密光学等领域得到了广泛应用^[2]。压电式快速反射镜以 PEA 为驱动元件,具有响应速度快、指向精度高、谐振特性好、抗电磁干扰能力强等优点,广泛应用在自适应光学^[3]、激光通信^[4]、光束准直^[5]和三维显微镜^[6]等系统中,以实现光束的高精度指向与精密跟踪。然而,PEA 材料的固有特性决定了压电式快速反射镜必然会存在迟滞非线性效应^[7-10],这不仅会导致系统控制精度的降低,还会在闭环跟踪的过程中导致系统有效带宽的下降,严重影响光电系统的动态目标跟踪能力。因此,对压电式快速反射镜的迟滞效应进行补偿控制,是提高精跟踪系统带宽,实现高性能动态目标跟踪的关键。

目前,描述 PEA 迟滞的模型主要包括:Preisach 模型^[11]、Prandtl-Ishlinskii (P-I) 模型^[12]、Krausselskii-Pokrovskii (K-P) 模型^[13]、分数阶模

型^[14]和 Bouc-Wen 模型^[15]等。上述模型均为静态模型,随着 PEA 控制信号变化频率的提升,模型精度下降,因此人们针对 PEA 动作频率与迟滞效应的关系开展研究,提出了基于 Hammerstein 结构的率相关迟滞模型^[16]。

在压电式快速反射镜控制方面,常见的控制方法主要有前馈控制、反馈控制和前馈-反馈复合控制等。袁刚^[17]采用基于 Bouc-Wen 模型的前馈控制法,使压电式快速反射镜的镜面偏转角度与输入控制电压的线性度提高到 2.3%,迟滞误差减小到 $\pm 0.5\%$,该控制方式属于开环控制,并未研究闭环系统的跟踪带宽。王昱棠^[18]采用双 PID 闭环的反馈控制方法,在频率为 30 Hz 的跟踪信号下跟踪残差相比于单环控制降低 46%,由于该方法通过内部闭环来改善迟滞非线性,降低了系统的响应速度和带宽。王玉坤^[19]提出采用 Smith 预估算法补偿 PID 的闭环控制方式,系统误差抑制带宽较传统 PID 控制提高 26%,但将迟滞非线性扰动作线性处理,没有进行补偿,因此系统的动态性能还可进一步提高。

根据研究现状可知,针对率相关迟滞前馈补偿法对闭环跟踪系统带宽影响的研究相对较少。然而,在基于地基大口径望远镜的复合轴光学目标动态跟踪系统中,以压电式快速反射镜为执行机构的精跟踪系统主要抑制的是中高频段的扰动,其系统带宽对于整个系统的目标跟踪性能至关重要。针对上述问题,本文从提高系统动态目标跟踪性能的角度出发,基于应用广泛、模型可靠的 P-I 模型结合动态线性 ARX 模型建立了压电式快速反射镜的率相关动态迟滞模型,并结合反馈控制算法进行复合控制,以提高基于压电式快速反射镜的精跟踪系统误差抑制带宽,进而提高复合轴系统的动态目标跟踪能力。

2 迟滞效应原理

2.1 迟滞效应

迟滞现象广泛存在于以 PEA 为驱动的机构中,由于逆压电效应,PEA 升压曲线和降压曲线之间存在回差,最终表现为输入和输出之间存在严重的非线性效应。对于压电式快速反射镜,迟滞效应表现为输入的控制电压信号与镜面偏转角度之间的非线性、多值性和非单一路径的特点。除此之外,PEA 的迟滞特性还与控制信号的频率与幅值有关,呈现为率相关性。

图 1 为基于某型号压电式快速反射镜测量的迟滞曲线。图 1(a)展示了输入信号幅值一定,不同频率下的迟滞曲线。图 1(b)展示了输入信号频率一定,不同幅值下的迟滞曲线。由测试结果可知:输入幅值相同频率变化的电压信号后,输出的迟滞曲线在高频率电压驱动下变宽,输出位移范围减小,并且产生顺时针旋转;输入频率相同幅值变化的电压信号后,输出的迟滞曲线在高幅值电压驱动下变宽,输出位移范围增大,并出现非单调响应现象。

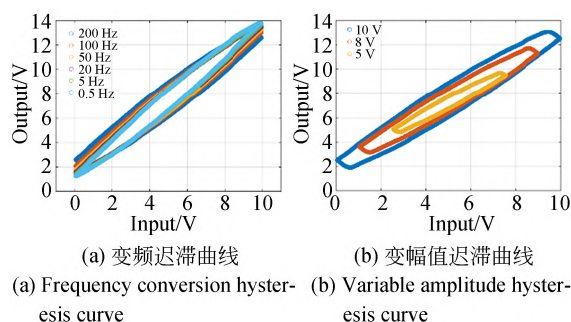


图 1 不同输入电压频率和幅值下的迟滞曲线

Fig. 1 Hysteresis curves at different input voltages and frequencies

2.2 基于 Play 算子的 P-I 模型

P-I 模型属于唯象模型,是依靠系统的输入输出关系进行建模,核心方法是基于迟滞单元(例如 Play、Stop 算子)的加权叠加。本文基于 Play 算子建立模拟迟滞特性的 P-I 模型。Play 算子的输入信号 x 和输出信号 y 之间的关系如图 2 所示。

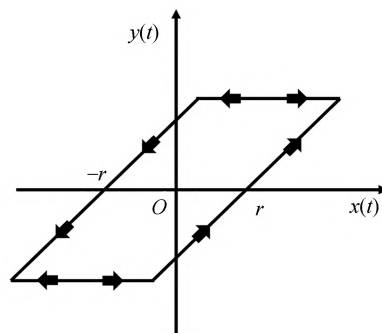


图 2 Play 算子

Fig. 2 Play operator

Play 算子的数学表达式为:

$$y(t) = F(x(t), y(t_{i-1}), r) =$$

$$\max\{x(t) - r, \min[x(t) + r, y(t_{i-1})]\}, \quad (1)$$

式中: $t \in [t_0, t_m]$, $t_0 \leq t_0 \leq \dots \leq t_{i-1} \leq t \leq t_i \leq \dots \leq t_{m-1} \leq t_m$; $x(t)$ 为分段单调输入信号。

初始条件为:

$$y(t_0) = F(x(t_0), 0, r) =$$

$$\max\{x(t_0) - r, \min[x(t_0) + r, 0]\}, \quad (2)$$

其中 r 为 Play 算子阈值。

将多个阈值不同的 Play 算子线性加权叠加,得到具有迟滞特性的模型,输出公式为:

$$z(t) = \sum_{j=1}^n \omega_j F_j(x(t), y_j(t_{i-1}), r_j) =$$

$$\sum_{j=1}^n \omega_j \max\{x(t) - r_j, \min[x(t) + r_j, y_j(t_{i-1})]\}, \quad (3)$$

式中: ω_j 和 r_j 为 Play 算子的权重和阈值,满足 $0 = r_1 < \dots < r_n < +\infty$; n 为 play 算子加权叠加的数量。

基于式(1)~式(3)建立迟滞模型并进行仿真分析,如图 3 所示。输入随机的正弦信号,输入信号经 P-I 模型后输入-输出之间呈现迟滞非线性关系。从图 3 可以看出,P-I 模型描述的迟滞曲线受到输入幅值变化的影响,即输入幅值越大,产生的迟滞曲线越宽,该现象与实验测试出的 PEA 迟滞特性相符,因此通过合适的方法调整 P-I 模型中的权重系数和阈值系数,可以描述实际的 PEA 迟滞曲线,以便对迟滞带来的非线性误差进行补偿和抑制。

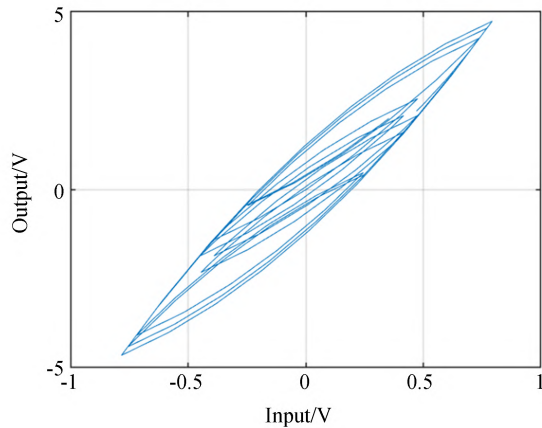


图3 P-I模型模拟迟滞特性

Fig. 3 P-I model simulates hysteresis characteristics

该模型属于静态非线性模型,而实际 PEA 的迟滞特性是率相关的,迟滞特性不仅受信号幅值的影响,也受信号频率的影响。对于目标变化速率快的动态光学目标跟踪系统,压电式快速反射镜的控制信号频率也快速变化,因此,有必要在此基础上建立一个与输入信号频率相关的动态迟滞模型。

2.3 基于 P-I 的率相关模型

为了建立压电式快速反射镜的率相关模型,本文采用 Hammerstein 结构将静态非线性 P-I 模型与动态线性 ARX 模型串联,其结构如图 4 所示。图中, u 表示输入信号, x 表示输入信号经过 P-I 模型后的中间信号, y 为输出信号。

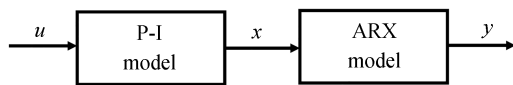


图4 率相关 P-I 模型结构

Fig. 4 Structure of rate-dependent P-I model

ARX 模型的表达式为:

$$G_0(z) = \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1})}, \quad (4)$$

其中: $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb}$, $A(z^{-1}) = a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na}$ 。

图 5 为基于 P-I 的率相关模型在输入相同幅值,不同频率信号下的输出迟滞曲线。该曲线与实际 PEA 在不同输入频率信号下的迟滞曲线相同,由此可见,基于 P-I 的率相关模型与实际 PEA

的迟滞特性相符合。

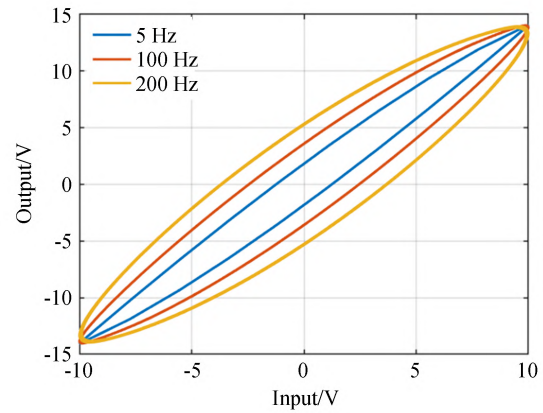


图5 不同输入频率下的率相关 P-I 模型输出

Fig. 5 Rate-dependent P-I model output at different input frequencies

3 迟滞效应补偿

3.1 基于逆模型的前馈控制补偿

为了减小 PEA 迟滞非线性的影响,前馈控制是有效的方法之一。本文采用的方法是对上一节建立的迟滞非线性模型求取逆模型,将逆模型作为前馈控制器与压电式快速反射镜串联,补偿 PEA 迟滞特性带来的非线性误差,其结构如图 6 所示。图中, u 表示输入信号, x 表示输入信号经过前馈控制器后的中间信号, y 为输出信号。

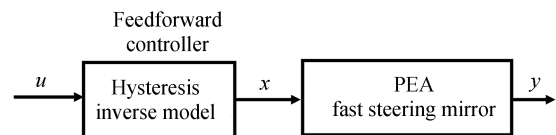


图6 逆模型前馈补偿控制框图

Fig. 6 Block diagram of inverse model feedforward compensation control

迟滞模型与其逆模型的关系如图 7 所示,迟滞逆模型也属于非线性模型,并在坐标系中与迟滞模型关于 45° 线对称。因此,输入信号经过逆模型计算后再提供给压电式快速反射镜,整个系统的输入信号与输出信号呈线性关系。

针对动态目标跟踪系统的高频输入信号,本

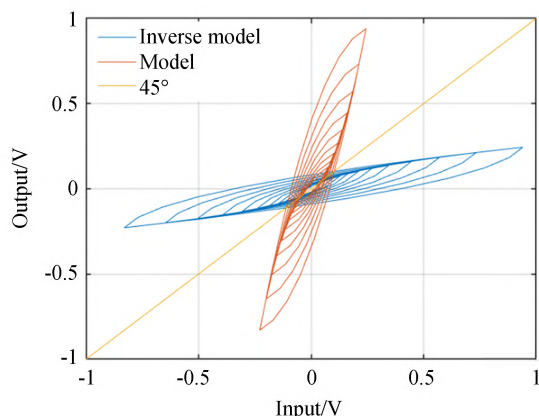


图 7 迟滞模型和逆模型示意图
Fig. 7 Hysteresis model and inverse model

文建立了静态非线性 P-I 模型与动态线性 ARX 模型串联的率相关模型。首先对静态非线性 P-I 模型取逆,其逆模型可以表示为:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n w'_i \{ \max \{ y(t) - r'_i, \min [y(t) + r'_i, y(t_{i-1})] \} \}, \quad (5)$$

式中:

$$w'_1 = \frac{1}{w_1}, \quad (6)$$

$$w'_i = \frac{-w_i}{(\sum_{j=1}^i w_j)(\sum_{j=1}^{i-1} w_j)}, \quad (7)$$

$$r'_i = \sum_{j=1}^i w_j (r_i - r_j), \quad (8)$$

其中 w'_i 和 r'_i 为 P-I 逆模型的权重系数和阈值系数。

然后,建立动态线性部分 $G_0(z)$ 的逆模型 $W_0(z)$,表示为:

$$W_0(z) = G_0^{-1}(z) z^{-1}. \quad (9)$$

将上述两逆模型串联后得到系统的前馈控制器,前馈控制属于开环控制,其抗干扰能力和稳定性较差。为提高实际工程应用的可靠性,针对存在外界扰动的动态目标跟踪系统,应采用前馈控制与反馈结合的复合控制方式。

3.2 前馈-反馈复合控制补偿

前馈-反馈复合控制结构如图 8 所示。图中, u 表示控制系统的输入信号, y 表示输出信号。前馈控制器为率相关迟滞模型的逆模型,反馈控制器采用 PID 控制,其表达式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (10)$$

其中: $e(t)$ 为参考输入与实际输出的误差; K_p 为比例系数; T_d 为微分时间常数; T_i 为积分时间常数。

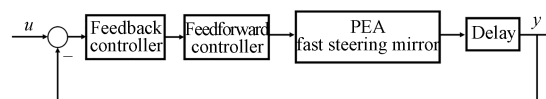


图 8 前馈-反馈复合控制框图
Fig. 8 Block diagram of feedforward-feedback composite control

这种前馈-反馈复合控制结合了前馈控制对迟滞非线性的补偿和反馈控制抗干扰性高、稳定性好的优点,适用于存在外界干扰,且跟踪信号频率较快的动态目标跟踪系统。

3.3 动态目标跟踪性能仿真

基于精跟踪控制系统结构,搭建动态目标跟踪仿真系统,利用基于 P-I 的率相关模型表示压电式快速反射镜,用其逆模型作为前馈控制器, PID 作为反馈控制器。

为了探究迟滞补偿对闭环控制系统性能的影响,本文进行了 3 种不同控制策略的对比仿真,3 种 PID 控制器的参数调节判断条件一致,具体参数如下:

(1) PID 闭环负反馈控制: PID 控制器参数为 $K_p=0.25$, $T_i=463.2$, $T_d=0.00026$;

(2) 基于 P-I 模型的前馈补偿结合 PID 负反馈的复合控制: PID 控制器参数为 $K_p=0.27$, $T_i=501.3$, $T_d=0.00051$;

(3) 基于 P-I 的率相关动态模型的前馈补偿结合 PID 负反馈的复合控制: PID 控制器参数为 $K_p=0.33$, $T_i=551.7$, $T_d=0.00048$;

为研究不同控制方式的动态目标跟踪效果,并验证基于率相关动态模型的前馈-反馈复合控制法对动态目标跟踪系统的带宽优化作用,在仿真分析中,通过引入频率从 1~500 Hz 递增,幅值指数衰减的正弦信号来模拟跟踪目标的高速变频、变幅运动,分别分析了以上 3 种控制方式的误差抑制能力,结果如图 9~图 10 所示。

由仿真结果可知,采用单一 PID 负反馈控

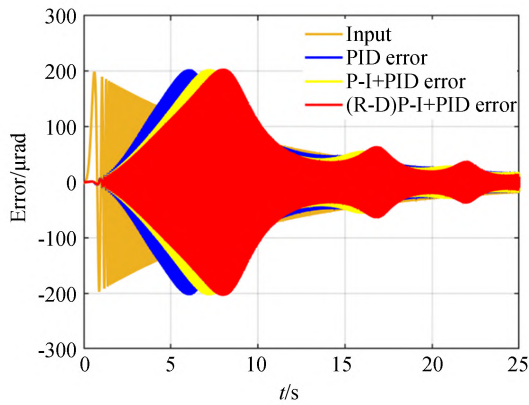


图9 三种控制方式的时域控制效果对比

Fig. 9 Comparison of time domain control effects of three control modes

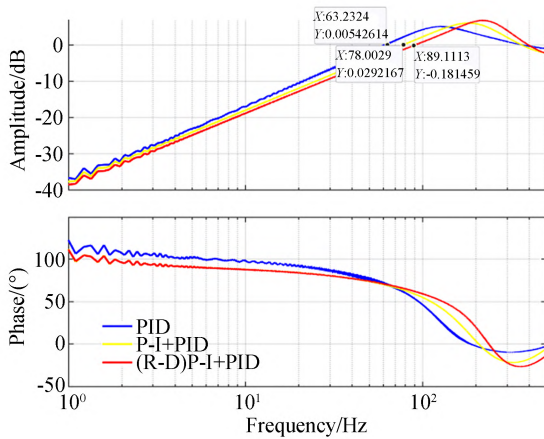


图10 三种控制方式的频域控制效果对比

Fig. 10 Comparison of frequency domain control effect of three control modes

制系统误差抑制带宽可以达到 63 Hz, 加入基于 P-I 的前馈补偿可以使误差抑制带宽达到 78 Hz, 在此基础上采用基于 P-I 的率相关前馈补偿, 可以使系统误差抑制带宽提升到 89 Hz。仿真结果表明, 前馈补偿可以有效提高压电式快速反射镜跟踪控制系统的性能。对于控制信号幅度、频率快速变化的动态目标跟踪系统, 基于率相关的前馈补偿法对系统带宽提高的效果更明显。

4 实验与结果

4.1 实验平台

快速反射镜控制系统实验平台如图 11 所示。

以嵌入式数字信号处理器作为主控单元, 高速相机作为快速反射镜输出偏转量的测量单元, 利用快速反射镜 1 和快速反射镜 2 模拟跟踪目标在方位和俯仰方向的高速运动, 以压电式快速反射镜为控制对象进行目标跟踪。

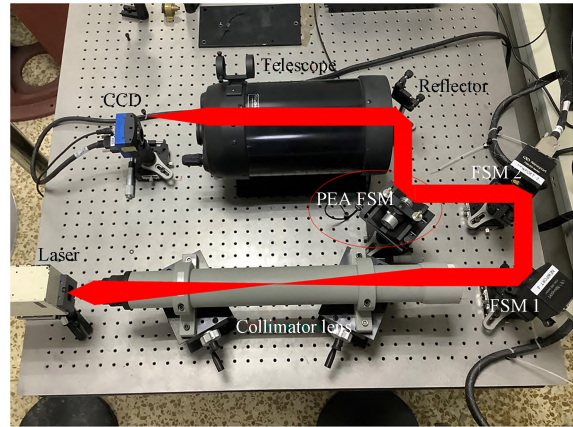


图11 快速反射镜控制系统实验平台

Fig. 11 Experiment platform of fast steering mirror control system

4.2 迟滞模型辨识与测试

由实验结果可知, 压电式快速反射镜在输入电压信号频率较低时 (一般在 5 Hz 以下), 输出的迟滞曲线几乎没有任何变化, 近似为静态迟滞系统。因此, 本文在低频段辨识压电式快速反射镜模型中的静态非线性部分。采用 10 个 play 算子来拟合迟滞曲线, 权重系数 w 和阈值系数 r 的拟合结果如下:

$$r = [0 \quad 1.1 \quad 2.2 \quad \cdots \quad 9.9]^T,$$

$$w = [0.980 \quad 1 \quad 0.185 \quad 1 \quad 0.123 \quad 1 \quad \cdots \quad 0.037 \quad 1]^T.$$

图 12 为输入信号为 5 Hz 时, P-I 模型输出的迟滞曲线与压电式快速反射镜实测的迟滞曲线。可以看到, 模型拟合的曲线与实验测量的曲线基本重合, 证明静态非线性部分的建模结果良好。

然后, 采用宽频谱范围的正弦信号分别激励静态非线性模型和压电式快速反射镜, 输出结果分别作为输入和输出数据。将输入输出数据通过系统辨识的方法得到 ARX 模型中的参数, 从而得到压电式快速反射镜模型中的动态线性部分。辨识结果如下:

$$G_0(z) = \frac{0.1835z + 0.1227}{z^2 - 0.995z + 0.3012}. \quad (11)$$

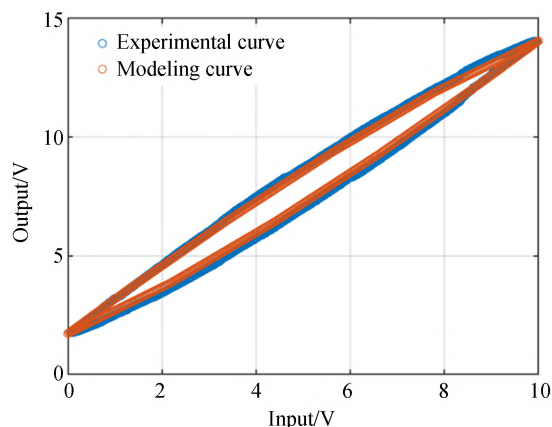


图 12 5 Hz 下模型与实测迟滞曲线

Fig. 12 Model and measured hysteresis curves at 5 Hz

图 13 为输入信号为中高频时,基于 P-I 的率相关模型输出的迟滞曲线与压电式快速反射镜实测的迟滞曲线。两条曲线一致性好。因此,本文建立的基于 P-I 的率相关模型无论在低频段还是高频段都能模拟实际压电式快速反射镜的迟滞非线性曲线。在该参数下求取其逆模型,完成前馈控制器设计。

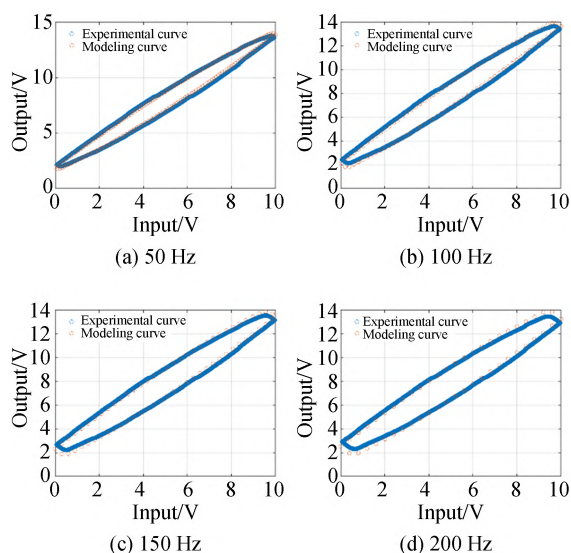


图 13 高频段模型与实测迟滞曲线

Fig. 13 High band model and measured hysteresis curves

4.3 迟滞补偿下的动态目标跟踪

基于本文搭建的动态目标跟踪实验系统,对迟滞前馈补偿效果进行了实验验证。实验中,分别记录了开环、无前馈补偿的闭环 PID 控制、基于 P-I 模型的静态前馈补偿的闭环 PID 控制以及

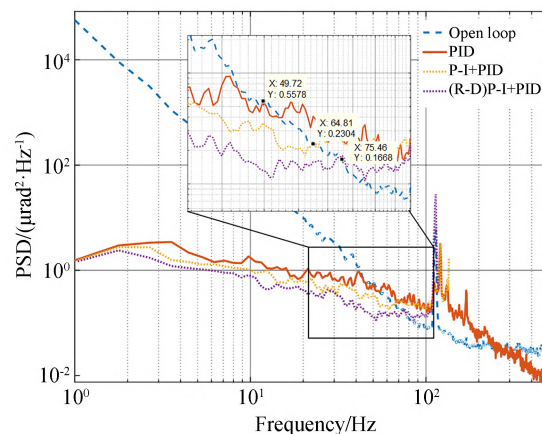


图 14 动态目标跟踪实验结果

Fig. 14 Dynamic target tracking experimental results

基于 P-I 率相关模型的闭环 PID 控制条件下的探测器脱靶量,并对其进行了功率谱密度(power spectral density, PSD)分析,结果如图 14 所示。

由实验结果可知,单一采用 PID 负反馈控制时,系统误差功率谱密度在 49 Hz 之前有抑制效果,在 49 Hz 后对误差有放大,起不到抑制效果,因此,该控制方式的误差抑制带宽为 49 Hz。通过加入基于 P-I 模型的静态迟滞前馈补偿,系统误差抑制带宽从 49 Hz 提升到 65 Hz,在将迟滞补偿模型更换为率相关动态模型后,系统误差抑制带宽提升到了 75 Hz。受实验条件、信号延迟等因素的干扰,实验测试的系统误差抑制带宽与仿真结果相比有所降低,但迟滞补偿带来的系统带宽提升现象与仿真结果一致。实验结果表明,有效抑制压电式快速反射镜的迟滞非线性扰动,可以提高跟踪系统的带宽。

5 结 论

本文根据动态目标跟踪系统带宽需求高、控制信号变化速率快的要求,提出了基于 P-I 率相关模型的前馈-反馈复合控制方法。基于 P-I 模型模拟迟滞非线性的原理,建立了 P-I 模型与 ARX 模型串联的率相关迟滞模型。然后,基于实测压电式快速反射镜的数据辨识出了率相关模型的参数,并根据其逆模型设计了补偿迟滞的前馈控制器。最后,搭建了动态目标跟踪实验平台,验证了率相关迟滞模型与压电式快速反射镜实测迟滞曲线的拟合效果,并检验了迟滞补偿方

法对动态目标跟踪系统的优化作用。实验结果显示:对于 200 Hz 以内的典型信号频率,率相关迟滞模型均能与实测数据较好的拟合;采用基于

率相关模型的前馈-反馈复合控制法,可以有效提高动态目标跟踪系统的误差抑制带宽,最多可达 26 Hz。

参考文献:

- [1] 唐涛,马佳光,陈洪斌,等. 光电跟踪系统中精密控制技术进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 3-31.
TANG T, MA J G, CHEN H B, *et al.* A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 3-31. (in Chinese)
- [2] MOHITH S, UPADHYA A R, NAVIN K P, *et al.* Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review [J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30 (1) : 013002.
- [3] 刘鑫,李新阳,杜睿. 压电倾斜镜迟滞非线性建模及逆补偿控制[J]. 光电工程, 2020, 47(4): 19-25.
LIU X, LI X Y, DU R. Modeling and inverse compensation control of hysteresis nonlinear characteristics of piezoelectric steering mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47 (4) : 19-25. (in Chinese)
- [4] 朱世伟,盛磊,刘永凯,等. 基于能量反馈的单模光纤激光章动耦合算法[J]. 中国激光, 2019, 46 (2): 165-170.
ZHU SH W, SHENG L, LIU Y K, *et al.* Laser nutation coupling algorithm for single mode fiber based on energy feedback [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 165-170. (in Chinese)
- [5] 朱凡,李颖先,谭久彬. 高精度激光光束准直系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 817-826.
ZHU F, LI Y X, TAN J B. Design of high-accuracy laser beam collimation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 817-826. (in Chinese)
- [6] CHAKRABORTY T, CHEN B Y, DAETWYLER S, *et al.* Converting lateral scanning into axial focusing to speed up three-dimensional microscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 165.
- [7] HARPER P G. Kinematic theory of piezoelectric hysteresis[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52 (11): 6851-6855.
- [8] 范伟,傅雨晨,于欣妍. 压电陶瓷驱动器的迟滞非线性规律[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1793-1799.
FAN W, FU Y CH, YU X Y. Hysteresis nonlinear law of piezoelectric ceramic actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1793-1799. (in Chinese)
- [9] SABARIANAND D V, *et al.* A review on control strategies for compensation of hysteresis and creep on piezoelectric actuators based micro systems [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106634.
- [10] GAN J Q, ZHANG X M. A review of nonlinear hysteresis modeling and control of piezoelectric actuators[J]. *AIP Advances*, 2019, 9(4): 040702.
- [11] 刘玠,安坤,王亚锋,等. 基于神经网络的 Preisach 磁滞模型的建模[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(3): 5-8.
LIU J, AN K, WANG Y F, *et al.* Modeling of preisach hysteresis model based on neural network [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2022(3): 5-8. (in Chinese)
- [12] 于志亮,王岩,曹开锐,等. 压电陶瓷执行器迟滞补偿及复合控制[J]. 光学精密工程, 2017, 25 (8): 2113-2120.
YU ZH L, WANG Y, CAO K R, *et al.* Hysteresis compensation and composite control for Piezoelectric actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2113-2120. (in Chinese)
- [13] LI Z, SHAN J J, GABBERT U. Inverse compensation of hysteresis using krasnoselskii-pokrovskii model [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(2): 966-971.
- [14] 李致富,黄楠,钟云,等. 压电驱动器迟滞非线性的分数阶建模及实验验证[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1124-1131.
LI Z F, HUANG N, ZHONG Y, *et al.* Fractional order modeling and experimental verification of hysteresis nonlinearities in piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28 (5) : 1124-1131. (in Chinese)
- [15] 杨晓京,胡俊文,李庭树. 压电微定位台的率相关动态迟滞建模及参数辨识[J]. 光学精密工程,

- 2019, 27(3): 610-618.
- YANG X J, HU J W, LI T S H. Rate-dependent dynamic hysteresis modeling of piezoelectric micro platform and its parameter identification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 610-618. (in Chinese)
- [16] 郭咏新, 张臻, 毛剑琴, 等. 超磁致伸缩作动器的率相关 Hammerstein 模型与 H_∞ 鲁棒跟踪控制 [J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 197-207.
- GUO Y X, ZHANG ZH, MAO J Q, *et al.* Rate-dependent Hammerstein model and H_∞ robust tracking control of giant magnetostrictive actuators [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(2): 197-207. (in Chinese)
- [17] 袁刚, 张小波, 王代华, 等. 压电式快速控制反射镜的迟滞特性及线性化 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1650-1656.
- YUAN G, ZHANG X B, WANG D H, *et al.* Hysteresis and linearization of piezoelectric fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1650-1656. (in Chinese)
- [18] 王昱棠, 张宇鹏, 徐钰蕾. 压电陶瓷驱动快速反射镜双闭环控制 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 68-72.
- WANG Y T, ZHANG Y P, XU Y L. Dual-loop control strategy for fast-steering mirror driven by PZT [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(S1): 68-72. (in Chinese)
- [19] 王玉坤, 胡立发, 王冲冲, 等. 液晶自适应光学系统中倾斜镜的建模与控制 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 771-779.
- WANG Y K, HU L F, WANG C C, *et al.* Modeling and control of tip/tilt Mirror in liquid crystal adaptive optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 771-779. (in Chinese)

作者简介:



刘永凯(1989—),男,黑龙江黑河人,博士,助理研究员,2012年、2014年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2021年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事自由空间光通信光束跟踪、指向与控制相关技术的研究。E-mail: liuyk@ciomp.ac.cn



吕福睿(1998—),男,吉林洮南人,硕士研究生,2020年于长春理工大学获得学士学位,主要从事激光通信精跟踪控制系统设计的研究。E-mail: lvfurui2022@163.com