

文章编号 1004-924X(2025)14-2220-11

平面光栅刻划机微定位系统压电校正技术

杨春吉^{1,2}, 李文昊¹, 于宏柱^{1*}, 姚雪峰^{1*}, 张 博¹, 于 硕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 100039)

摘要:针对平面光栅刻划机在刻划过程中因压电陶瓷驱动器的迟滞非线性特性引发的微定位精度下降问题,提出一种基于分段 Prandtl-Ishlinskii(PI)模型的复合控制误差补偿方法,提升光栅刻划的分度定位精度与稳定性。设计一套光栅分度微定位误差监测及校正系统,通过构建分段 PI 模型描述其非线性行为,利用最小二乘法辨识压电陶瓷驱动器的迟滞特性,并将逆模型作为前馈补偿环节,结合闭环反馈控制形成复合控制策略,实现动态误差校正。实验数据表明,相较于未加 PI 逆模型前馈补偿前,光栅的刻线定位误差由 ± 20 nm降至 ± 10 nm 以内。保障刻槽一致性,适用光栅刻划分度定位误差校正,为高密度光栅的制备提供了可靠技术支撑。未来研究将重点开展智能算法融合优化,用于进一步提升定位精度,以及探索该技术在曲面光栅以及变栅距刻划的拓展应用。

关键词:光栅刻划机;微定位系统;定位精度;P-I 模型;压电

中图分类号:TH74 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253314.2220

CSTR:32169.14.OPE.20253314.2220

Micro-positioning error monitoring and piezoelectric correction of plane grating ruling machine

YANG Chunji^{1,2}, LI Wenhao¹, YU Hongzhu^{1*}, YAO Xuefeng^{1*}, ZHANG Bo¹, YU Shuo¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: yhz_jl@sina.com.cn; yaoxf@ciomp.ac.cn

Abstract: To address the issue of the decline in micro-positioning accuracy caused by the hysteresis nonlinearity characteristic of the piezoelectric ceramic driver during the engraving process of the planar grating engraving machine, a composite control error-compensation method based on the segmented Prandtl-Ishlinskii (PI) model was proposed to enhance the indexing positioning accuracy and stability of the grating engraving. A set of error-monitoring and correction systems for grating micro-positioning with a certain degree of accuracy was designed. By constructing a segmented PI model to describe its nonlinear behavior, the hysteresis characteristics of the piezoelectric ceramic actuator were identified using the least-squares

收稿日期:2025-03-11;修订日期:2025-04-29.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2023YFF0718100);吉林省科技发展计划项目(No. 20240302025GX);吉林省科技发展计划科技条件与平台建设计划(No. 20220505001ZP);国家自然科学基金联合项目(No. U21A20509);中国科学院科研仪器设备研制项目(No. YJKYYQ2021002)

method. The inverse model was used as a feedforward compensation link, combined with closed-loop feedback control to form a composite control strategy, thereby achieving dynamic error correction. Experimental data show that, compared with before adding the PI inverse model feedforward compensation, the positioning error of the grating line has been reduced from ± 20 nm to within ± 10 nm. Ensure the consistency of the engraved grooves, apply the calibration of the grating etching division degree to correct the positioning error, providing reliable technical support for the preparation of high-density gratings. Future research will focus on integrating and optimizing intelligent algorithms to further improve positioning accuracy, as well as exploring the expansion application of this technology in curved surface gratings and variable grating pitch etching.

Key words: grating writer; micro positioning system; positioning accuracy; P-I model; piezoelectric

1 引 言

光栅^[1-3]作为现代高精度光谱仪器的核心光学元件,其制造能力直接决定了光谱仪器的技术水平。光栅制造技术是当今世界最为精密的制造技术之一,其中光栅刻划机因其极高的加工精度要求而被誉为“精密机械之王”^[4]。在光栅刻划机的诸多技术要素中,分度系统的定位精度是决定光栅刻划质量的关键因素,因此,实现分度系统的超精密定位控制构成了光栅刻划机技术的核心环节。

超精密定位控制技术作为现代超精密加工领域的关键技术,近年来已成为国内外研究的重点方向。在超精密定位系统的研究与应用方面,国际学术界已取得显著成果:韩国汉城大学开发的宏微复合驱动型精密工作台,在 200 mm 行程范围内实现了 10 nm 的定位精度^[5];日本东京工业大学研发的定位系统更是达到了 ± 2 nm 的定位精度^[6]。与此同时,各种先进控制方法在超精密定位平台中的应用研究也取得了突破性进展。国内研究机构在该领域同样成果斐然:机械制造系统工程国家重点实验室杨川等^[7]通过将智能 PID 控制技术应用 X 轴、Y 轴双向定位机构,分别实现了 25 nm 和 29 nm 的定位精度;哈尔滨工业大学精密工程研究中心研制的高精密定位系统则达到了 2 nm 的定位精度^[8-9]。此外,张金龙等学者在超精密直线定位和角定位领域也开展了深入研究^[10-11]。

基于上述应用背景,压电陶瓷凭借其高分辨率、无机械磨损、高效率、高强度、快速响应以及无热损耗等优异特性,已成为超精密定位系统中

理想的执行机构^[12]。其驱动原理基于逆压电效应,可实现电能与机械能之间的快速转换,具有优异的动态响应特性^[13-15]。然而,压电陶瓷固有的迟滞特性和蠕变特性严重制约了其定位精度,其中迟滞效应尤为显著,其引起的非线性误差可达最大量程的 10%~14%。这种非线性特性不仅导致执行机构难以准确定位至目标位置,还可能引发系统振荡,从而无法满足高精度定位的要求^[16-17]。

为提升压电陶瓷平台的定位精度,构建高性能的复合控制系统至关重要。一个设计优良的复合控制系统能够有效补偿压电陶瓷的固有特性缺陷,从而满足精密定位的严苛要求。本研究提出了一种创新的复合控制策略:采用基于分段式 Prandtl-Ishlinskii(P-I)^[18-19]模型的前馈补偿方法,并结合比例-积分(PI)控制器构成负反馈回路。该方案在确保系统快速响应的同时,通过数字电路实现负反馈控制,显著提升了系统的抗干扰能力。这一控制方法不仅具有重要的理论价值,同时在实际工程应用中展现出良好的实用前景。

为实现光栅刻划机微定位系统纳米级精度的技术要求,本研究采用宏微复合驱动工作台作为研究平台。研究内容主要包括以下几个方面:首先,系统阐述光栅刻划机的整体结构及其工作原理;其次,深入分析微定位误差监测与校正系统的关键技术;在此基础上,重点开展压电陶瓷迟滞特性建模研究。通过系统的仿真分析和刻划实验,验证误差校正精度,最终论证所提出控制方案的技术可行性。研究成果为光栅刻划机微定位精度的进一步提升,以及为高密度光栅的制备提供关键技术支撑。

2 光栅刻划机工作原理及控制方案

2.1 平面光栅刻划机工作原理

平面光栅刻划机主要由光栅基底驱动机构和金刚石刀具驱动机构两大核心部件构成。光栅基底驱动机构采用双轴正交的水平位移台结构,其中控制槽形间距方向运动的轴称为分度轴,控制槽形长度方向运动的轴称为刻划轴。金刚石刀具驱动机构则通过往复直线运动实现刀具的抬落动作,从而精确控制金刚石刀具与光栅基底的接触状态。

刻划机采用“间歇式”刻划工艺,每个刻划周期包含六个关键步骤:(1)宏定位阶段:分度轴带动刻划轴及其上的光栅基底完成一个光栅常数的位移。(2)稳定阶段:释放运动系统中的残余应力。(3)微定位阶段:分度补偿控制器基于双频激光干涉仪的反馈数据计算补偿量,驱动压电陶瓷促动器通过柔性铰链将补偿量传递至复合刀架,实现金刚石刀具的精确定位。(4)落刀阶段:根据圆光栅测角模块的角度反馈信息,执行落刀动作使刀具接触基底表面。(5)刻划阶段:随着刻划系统的转动,金刚石刀具与基底表面铝膜相互作用形成光栅刻槽,直至触发抬刀信号。(6)复位阶段:完成抬刀动作后,系统进入下一个刻划周期。

2.2 微定位系统误差监测及校正方案

为实现高精度控制,设计了多通道测量系统(如图1所示),包含三个测量通道:分度反馈测量通道实时监测光栅基底分度方向的位移变化;刀架反馈测量通道实时追踪刻划刀具的分度位移;空气折射率测量通道实时测量环境参数变化,为双频激光干涉仪提供波长补偿数据。其中,分度反馈和刀架反馈测量通道的数据作为微定位控制的核心反馈信号。

基于上述测量系统,本研究开发了基于压电陶瓷的光栅刻划微定位控制系统。系统通过采样板实时采集激光干涉仪的位置数据,计算分度反馈和刀架反馈测量通道的误差值,进而确定所需的补偿量。压电陶瓷控制器根据计算结果驱动执行机构,实现对刻划刀架的精确微调。具体控制流程如图2所示。

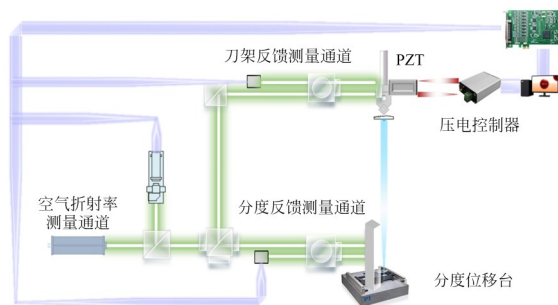


图1 微定位误差监测系统

Fig. 1 Micro-positioning Error Monitoring System

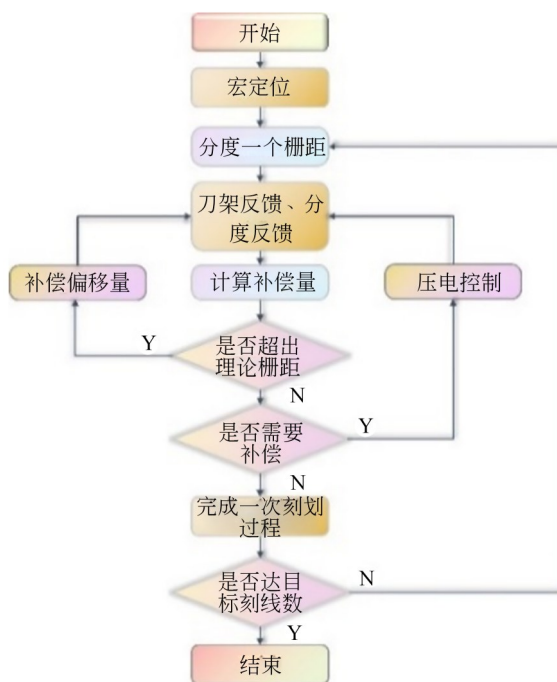


图2 误差校正控制流程示意图

Fig. 2 Error correction control flow diagram

3 压电校正控制模型及控制算法研究

3.1 压电陶瓷迟滞模型建立

针对压电陶瓷迟滞特性的建模研究,现有方法主要可分为物理学模型和现象学模型两大类。本研究采用现象学模型中的Prandtl-Ishlinskii(P-I)模型,该模型通过深入分析迟滞特性的本质特征,能够实现对压电陶瓷迟滞行为更精确的数学描述。作为Preisach模型的改进形式,P-I模型通过引入Play算子(如图3所示)简化了建模过程,在保证精度的同时显著提高了计算效率。

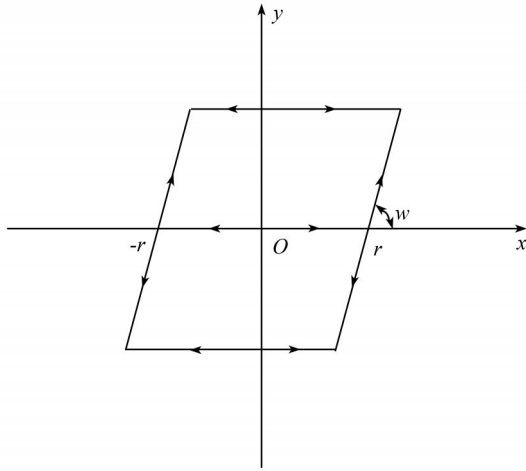


图 3 Play算子示意图

Fig. 3 Diagram of the "Play" operator

相较于传统 Preisach 模型, P-I 模型通过简化双重积分过程, 在保持建模精度的同时显著降低了计算复杂度。这一改进不仅提升了控制系统的运算效率, 同时也有助于提高控制精度和系统响应速度。该模型基于多个阈值 Play 算子^[20-21]的加权积分构建, 能够准确表征压电系统的输入电压与输出位移之间的非线性关系。其中, 单个 Play 算子采用奇对称结构, 其数学模型可表示为:

$$f_r(v(t), w(t)) =$$

$$\max \{v(t) - r, \min(v(t) + r, w(t))\}, \quad (1)$$

其中: r 为 Play 算子的阈值; $v(t)$ 为控制系统在 t 时刻时给定的输入; $w(t)$ 为 Play 算子在 t 时刻的输出, 其初始值为:

$$w(0) = H_r([v](0)) =$$

$$f_r(v(0), 0) = \max \{v(0), \min v(0), 0\}. \quad (2)$$

由于各算子阈值不同, 因此其能够反映不同迟滞现象的输入、输出间的关系。因此, 由 P-I 模型描述的压电陶瓷迟滞特性更加精确。加权叠加后 Play 算子的表达式为:

$$F_k(v(t), w(t)) =$$

$$s_a \max \{v(t) - r, \min(v(t) + r, w(t))\}, \quad (3)$$

其中: F_k 为阈值 r 的 Play 算子在 t 时刻的输出; s_a 为 Play 算子的权值。再对各个阈值对应的 Play 算子进行加权积分, 得到 P-I 迟滞模型的表达式为:

$$y(t) = \sum_{k=0}^n s_r F_k(v(t), w(t)) =$$

$$\sum_{k=1}^n s_r \max \{v(t) - r, \min(v(t) + r, w(t))\}, \quad (4)$$

其中: $y(t)$ 为 P-I 模型在 t 时刻的输出; k 为算子的个数。

研究表明, P-I 模型的拟合精度与 Play 算子数量呈现显著相关性: 随着算子数量减少, 模型拟合能力逐渐降低; 而增加算子数量虽能提升建模精度, 却会导致计算复杂度呈指数级增长。因此在满足建模精度要求的前提下, 需通过参数优化策略对 Play 算子数量进行最小化设计, 以实现模型精度与计算效率的最佳平衡。由图 4 可知, 在算子个数为 20 时, 位移误差稳定在 $0.12 \mu\text{m}$ 。

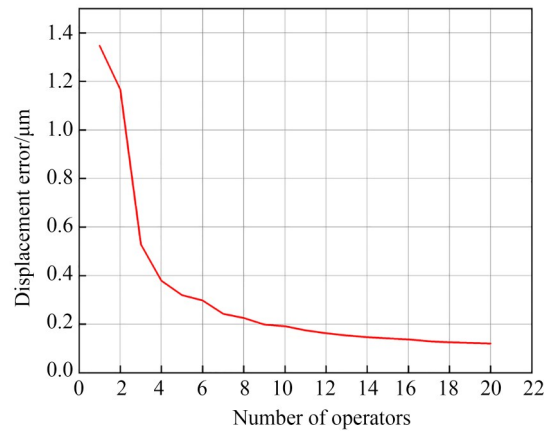


图 4 算子个数与位移误差的关系

Fig. 4 Relationship between the number of operators and the displacement error

为满足光栅刻划机的实时控制需求, 本研究通过优化 Play 算子数量(为方便计算, 最终选定 21 个算子)实现了模型精度与计算效率的平衡(见图 4)。该模型在嵌入式控制器中的单次计算耗时小于 1 ms , 完全满足刻划周期内微定位校正的实时性要求。

3.2 迟滞模型参数辨识与验证

压电数据采集平台原理图如图 5 所示。其中压电陶瓷驱动器的型号为 E-517, 放大器的型号为 E-505, 压电陶瓷伺服模块的型号为 E-509。其中电容传感器分辨率为 0.01 nm 。对压电位移平台施加电压, 测量电压与位移的关系, 可以得到如图 6 所示的迟滞曲线, 其结构是非对称的, 升压

与降压阶段的位移-电压曲线不重合,形成闭合的滞回环,在高电压区域,位移增速减缓,趋于饱和状态,所施加正弦电压幅值越大,其迟滞环越大,迟滞特性越明显。

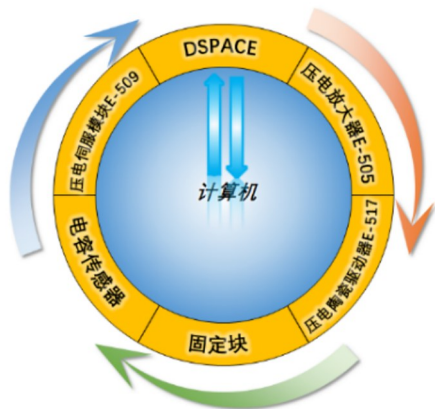


图 5 压电数据采集平台

Fig. 5 Piezoelectric data acquisition platform

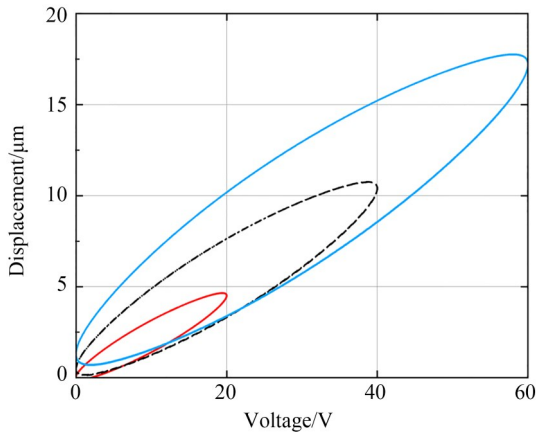


图 6 不同输入电压条件下的迟滞曲线

Fig. 6 Hysteresis curves under different input voltage conditions

本研究采用分段式 P-I 模型进行拟合分析,分别对升程和回程过程建立独立模型。在权值选择方面,通过评估加速度矢量(dv/dt)的幅值特性来判定升压段与降压段的转换点。传统方法常基于输入电压或位移的阈值划分升程与回程,但动态过程中电压变化的瞬时特性易被忽略。本文提出以加速度矢量(dv/dt)作为分段依据,能够直接反映电压变化的动态特性,可快速捕捉升压与降压的转折点;相比位移信号,电压信号受环境噪声影响较小, dv/dt 的计算更稳定,通过数

字信号处理器实时计算可在微秒级完成分段切换,满足实时控制需求。当 dv/dt 大于预设阈值时,判定为升压段,小于预设阈值的相反数时判定为降压段,其余情况保持当前模型,避免频繁切换导致的振荡。具体实现部分,通过 STM32F407 微控制器保证 dv/dt 的实时计算。

根据模型特性,逆模型解与 P-I 模型的乘积构成单位矩阵($yy'=E$)。值得注意的是,各分段逆模型均遵循统一的数学表达式,具体可表示为:

$$Y(t)=y'(t)=\sum_{k=0}^n s_r \max \{v(t)-r', \min (v(t)+r', w'(t))\}=s_r' F_r'[y, y'], \quad (5)$$

其中:

$$s_o'=\frac{1}{s_o}, \quad (6)$$

$$s_r'=\frac{-s_r}{\left(s_o+\sum_{j=1}^k s_j\right)\left(s_o+\sum_{j=1}^{k-1} s_j\right)}. \quad (7)$$

为此基于此分段 P-I 模型,应用最小二乘法对采集到的压电陶瓷输入电压-输出位移进行参数辨识,其中,因选用的压电驱动器位移随电压变化关系不明显,故选取 0~40 V 作为辨识的阈值以得到更精确的辨识结果,系统压电-位移采集过程的输入为 0~40 V 的正弦电压信号,采样频率为 12.5 Hz,辨识结果如表 1 所示。

表 1 参数辨识结果

Tab. 1 Parameter identification results

阈值	上升段 权值	下降段 权值	阈值	上升段 权值	下降段 权值
0	-0.100 5	0.022 6	22	1.252 0	-0.051 8
2	0.295 7	0.130 0	24	-0.314 4	-0.046 0
4	-0.041 8	0.0152 0	26	0.101 8	-0.040 3
6	0.048 6	0.032 0	28	-0.006 3	-0.034 5
8	0.018 8	0.024 3	30	0.026 0	-0.028 8
10	0.029 1	0.027 3	32	0.013 9	-0.023 0
12	0.023 6	0.027 5	34	0.054 7	-0.017 3
14	0.051 7	0.040 9	36	-0.035 1	-0.011 5
16	-0.009 8	0.028 5	38	0.369 5	-0.005 7
18	0.277 4	0.161 3	40	0.000 0	0.000 0
20	-1.326 5	-0.057 5			

在 Prandtl-Ishlinskii (P-I) 模型中,正模型的权值理论上虽为正值,但实际应用中因分段建模策略和压电陶瓷的非对称迟滞特性,权值可能出现正负混杂的现象。论文通过分段式 P-I 模型对升程和回程过程独立建模,允许权值符号随局部动态特性灵活调整,以更精确描述非对称迟滞环的差异。最小二乘法参数辨识过程中,权值符号会根据实际数据中局部反向特性(如输入电压与位移的瞬时关系)自动优化,以最小化模型误差。同时,实际压电陶瓷的迟滞特性往往呈现非对称性,分段模型中负权值可有效补偿回程阶段的滞后效应,提升整体拟合精度。此外,通过优化 Play 算子数量,模型在平衡精度与计算效率的同时,覆盖更复杂的输入-输出关系。因此,权值的正负混杂是模型扩展后适应实际工程复杂性的合理结果,为后续逆模型补偿提供了更精准的数学基础。

在此辨识结果基础上,分别给出了传统 P-I 模型以及分段 P-I 模型的输入-输出迟滞曲线拟合结果,如图 7 所示(彩图见期刊电子版)。其中黑色曲线为实际输出位移,红色曲线为传统 P-I 模型输出位移,蓝色曲线为分段 P-I 模型输出位移。

本研究通过对比分析了模型拟合结果与实际输出位移的吻合度,为了更好地表征分段 P-I 模型的优势,表 2 列举了两组实验数据的归一化

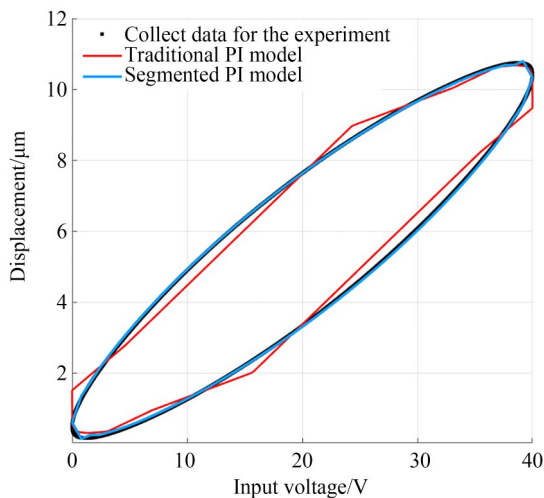


图 7 40 V 正弦电压输入下压电陶瓷迟滞曲线的拟合结果
Fig. 7 Fitting results of the hysteresis curves of piezoelectric ceramics under sinusoidal voltage input of 40 V

表 2 拟合结果误差对比

Tab. 2 Comparison of fitting result errors

输入正弦电压幅值/V	模型	NRMSE	MRE
0~40	传统 P-I	0.022 7	16.36%
0~40	分段 P-I	0.012 5	10.32%

均方根误差 (Normalized Root-Mean-Square Error, NRMSE) 和平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE) 量化指标。具体计算过程如下所示:

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2}{y_{\max} - y_{\min}}}, \quad (8)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y_i'}{y_i} \right|, \quad (9)$$

其中: n 为样本数量; y_i 为实际输出位移值; y_i' 为拟合输出位移值, $y_{\max}$ 和 $y_{\min}$ 分别为实际输出位移值的最大值和最小值。将实际采样结果与模型拟合结果所得各参数值代入上述公式,得到表 2 数据,其中 NRMSE 和 MRE 越小,模型预测越准确。

实验结果表明:相较于传统 P-I 模型,采用最小二乘参数估计方法的分段 P-I 模型可有效提升压电陶瓷迟滞曲线的拟合精度。基于上述分段 P-I 模型的参数辨识及验证结果,本研究进一步将该模型嵌入光栅刻划机微定位控制系统中。通过构建分段 P-I 逆模型作为前馈补偿环节,结合闭环反馈控制策略,形成复合控制系统。该系统的核心目标是将压电陶瓷的迟滞非线性误差动态补偿至纳米级,从而满足光栅刻划工艺对定位精度的严苛要求。其中未引入前馈的闭环反馈控制部分采用正弦扫频信号分析方法进行系统辨识,以确定相关参数,通过劳斯判据最终确定系统为稳定系统。复合控制系统结构图如图 8

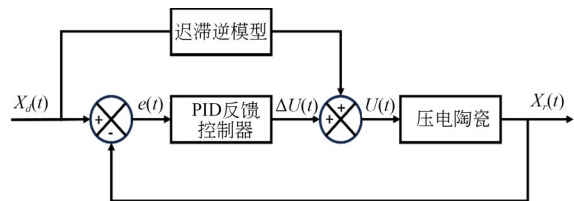


Fig. 8 Composite control structure diagram

所示。具体实验验证将在第 4 章详细阐述。

4 刻划实验与结果

本研究通过“建模-辨识-补偿”的闭环流程,将理论模型与工程实践紧密结合。第三章建立的分段 P-I 模型为前馈补偿提供了数学基础,而第四章的刻划实验验证了该模型在动态校正中的实际效能,二者共同构成了高精度光栅刻划控制系统的核心框架。

为验证此刻划机所制作的光栅微定位精度,并对刻槽误差进行实时校正,故搭建以下平面光栅微定位监测及校正装置样机,其实物图如图 9 所示。

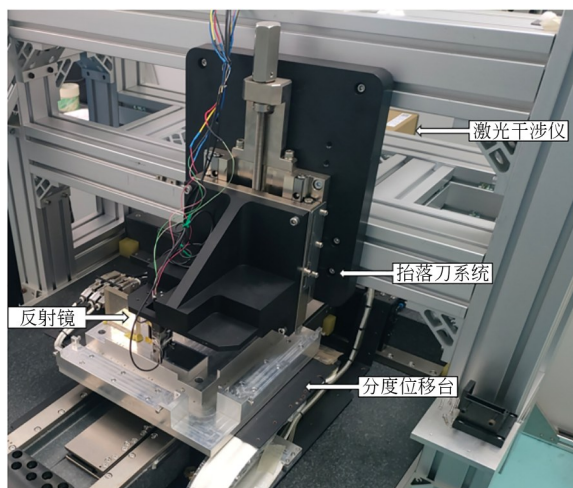


图 9 刻划实验平台实物图

Fig. 9 Physical drawing of the experimental platform for profiling

本实验采用第 3 章中基于最小二乘法辨识的分段 P-I 逆模型作为前馈补偿器。逆模型通过实时计算压电陶瓷的输入电压补偿量,与控制器输出的反馈信号叠加,驱动刀架执行微定位校正。该实验系统主要由双频激光干涉仪、高精度位移台、刀架装置、压电陶瓷控制系统以及波长跟踪器等核心部件构成。系统工作时,三个反馈测量通道将实时采集的刻线位置光信号传输至信号接收器,经激光采集板卡进行信号转换后,将电信号传输至上位机处理系统,随后通过控制板卡对压电陶瓷控制器进行精确调控,从而驱动刀架执行微位移校正。基于上述理论框架,本研究开展了以下实验验证:分别采用未引入迟滞模型的

闭环控制系统与分段 P-I 逆模型作为前馈环节的闭环复合控制系统,在 120 gr/mm 的光栅刻划密度下进行实验。通过分度定位误差监测系统对刻槽微定位精度进行实时检测,获得以下实验结果:图 10(a)展示了分度位移台位移曲线;图 10(b)呈现了校正前所有刻线的微定位误差分布;图 10(c)显示了单条高精度刻线的实际位置与理论位置偏差曲线;同时,图 10(d)对比了校正前后所有刻线刻槽的直线度误差变化情况。

尽管第 3 章模型拟合的位移误差为 $0.12 \mu\text{m}$ (见图 4),但通过复合控制策略的叠加效应(前馈补偿+闭环反馈),系统最终实现了纳米级定位精度。具体而言,前馈补偿基于分段 P-I 逆模型消除了压电陶瓷的迟滞非线性主误差,而闭环反馈控制进一步抑制了环境扰动与残余误差,使得整体定位误差由 $\pm 20 \text{ nm}$ 降至 $\pm 10 \text{ nm}$ 以内,如图 10(d)。

实验数据分析表明,在环境条件稳定的情况下,系统所刻划的线条呈现出良好的槽形特征,且刻线密度分布均匀,整体定位精度保持稳定。通过对校正前后系统刻线定位精度的对比分析发现:在单条稳定性较好的刻线中,校正后的定位精度误差显著改善,稳定控制在 $\pm 5 \text{ nm}$ 范围内,其实际位置所有采样数据点的峰谷值(pv 值)为 14.003 nm ,均方根值(Root Mean Square, RMS)为 2.276 nm ,表现出较小的波动特性。就整体刻线质量而言,校正后所有刻线的定位精度误差由 $\pm 20 \text{ nm}$ 显著降低至 $\pm 10 \text{ nm}$ 范围内,波动幅度明显减小。图 10(d)中校正后刻线直线度误差显著降低(pv 值由 49.984 nm 降至 19.625 nm),验证了第 3 章所建分段 P-I 模型的有效性。结合表 1 中 MRE 指标,模型的高精度参数辨识为动态补偿提供了可靠基础。同时以上数据也充分证实了校正系统的有效性。

为验证刻划质量,采用原子力显微镜对光栅槽形进行表征(如图 11 所示),结果显示刻划所得光栅槽形均匀性良好,刻槽间距一致性优异。刻槽具有理想的几何形貌,相邻刻槽间距与理论值的偏差小于 10 nm ,完全满足 120 gr/mm 刻线密度的工艺要求。

对所刻划光栅进行检测,得到其具体参数如表 3 所示。

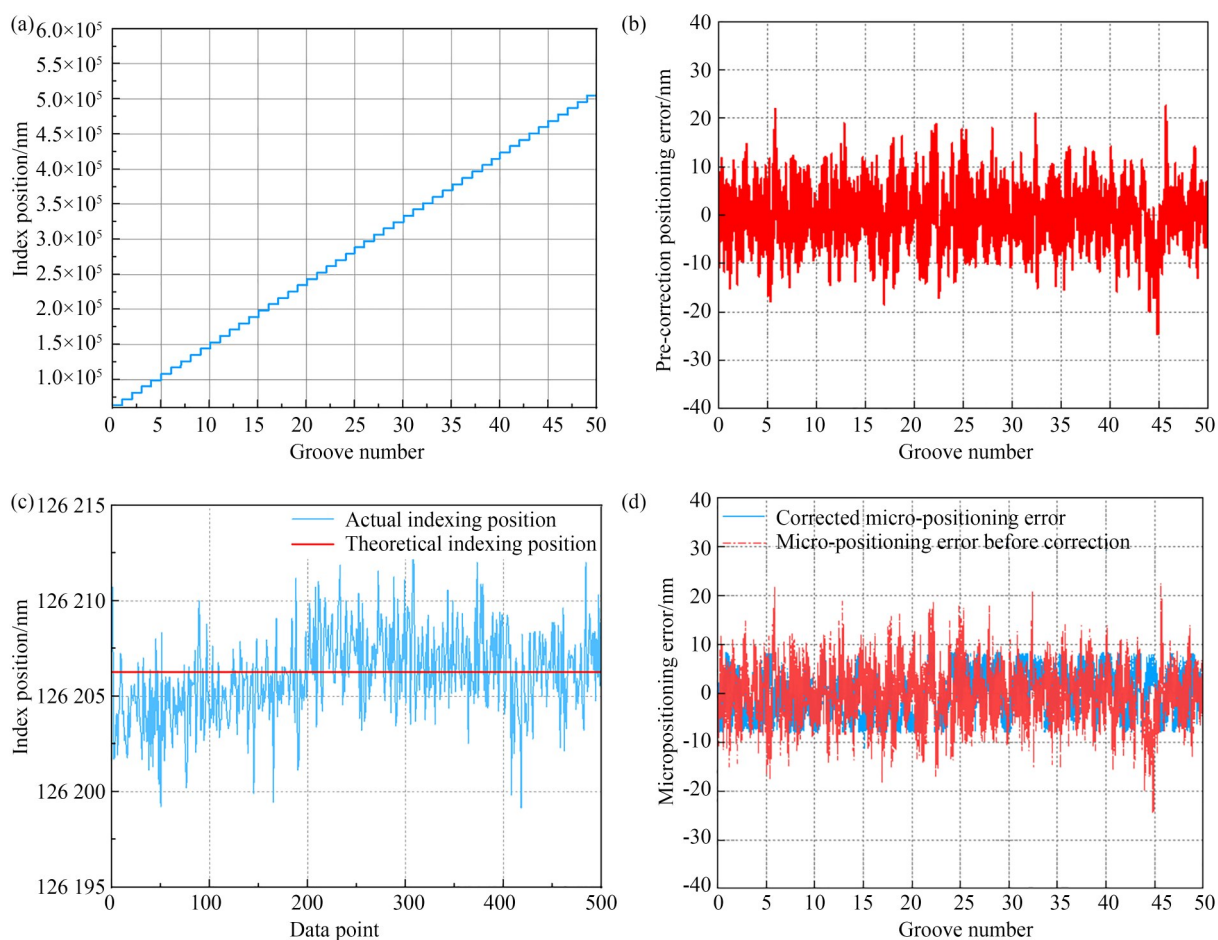


图 10 分度转台微定位结果

Fig. 10 Micro-positioning result of the indexing rotary table

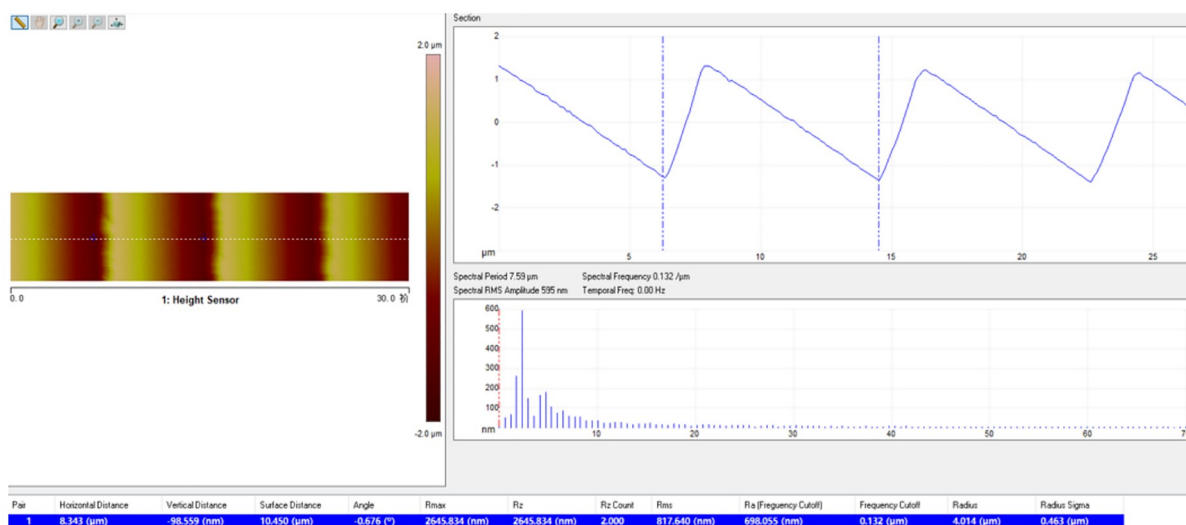


图 11 原子力显微镜光栅槽形图

Fig. 11 Grating profile images of atomic force microscope

表 3 经校正所刻划光栅检测参数规格

Tab. 3 Specifications for the detection parameters of the engraved grating after correction

参数	内容
波长	400~1 000 nm
表面形貌	平面
表面形状	矩形
刻线密度(线/mm)	120
峰值衍射效率	89%
闪耀角	2.75° ~6.89°

检测结果表明:经光栅刻划机微定位监测及

控制系统校正后,所制备的光栅显著提升了刻线精度,验证了该控制算法及控制方案,有效保证了光栅刻划质量。

为评估复合控制策略对系统动态响应速度的影响,对系统进行动态响应测试。分别对采用分段 P-I 逆模型前馈补偿+闭环反馈的复合控制系统以及仅采用闭环反馈控制系统施加幅值 ± 20 nm 的阶跃信号,通过激光干涉仪记录位移响应时间,并测试系统带宽。得到阶跃响应时间序列对比以及频率响应幅频特性对比如图 12 (a)、图 12(b)所示。得到动态响应性能对比结果如表 4 所示。

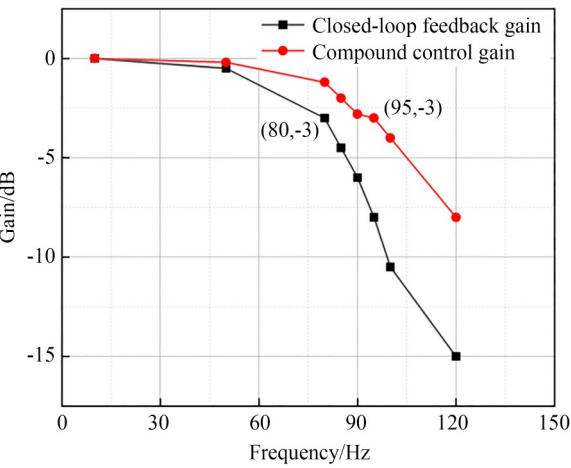
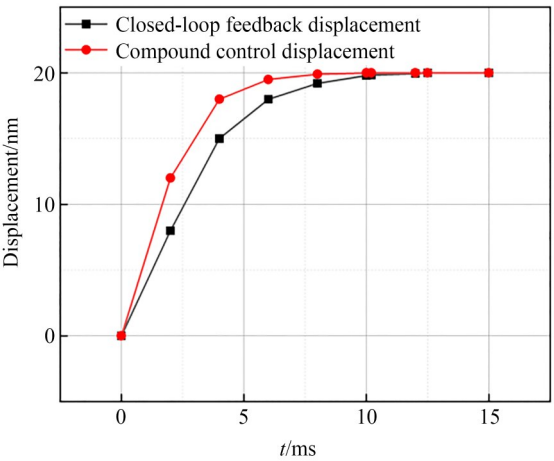


图 12 阶跃响应时间序列对比以及频率响应幅频特性对比图

Fig. 12 Comparison of step response time series and frequency response amplitude-frequency characteristics diagram

表 4 动态响应性能对比

Tab. 4 Dynamic response performance comparison

控制方法	响应时间/ms	带宽/Hz
仅闭环反馈控制	12.5	80
复合控制	10.2	95

实验结果表明:复合控制策略通过前馈补偿提前生成校正信号,减少了系统对反馈误差的依赖,使得阶跃响应时间由 12.5 ms 缩短至 10.2 ms,带宽从 80 Hz 提升至 95 Hz。闭环反馈的引入虽增加了少量计算延迟,但前馈补偿的高效性主导了动态响应速度的优化。

5 结 论

本研究开发的微定位监测及校正系统能够实现光栅刻划机分度定位误差的高精度实时监测与校正,经系统校正后,光栅刻线的微定位精度稳定控制在 ± 10 nm 范围内,部分刻线误差可达 ± 5 nm。通过反馈校正机制,所刻划光栅的各项参数均达到较高精度标准,刻划质量得到有效提升,验证了该方法在刻槽位置精度控制中的有效性。本研究不仅解决了光栅刻划机微定位精度的关键技术难题,更为未来精密制造技术的创新发展提供了新的思路和方法,为曲面光栅以及变栅距刻划的微定位误差校正提供参考,具有重要的学术价值和工程应用前景。

作者贡献声明:

杨春吉:控制方案的提出,数据处理,论文构思和撰写;

李文昊:项目管理与提供资源;

于宏柱:提供资源与论文审核;

姚雪峰:提供资源与论文审核;

张博:平台软件与论文指导;

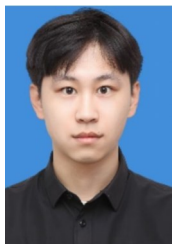
于硕:论文指导。

参考文献:

- [1] ZHANG J W, JIRIGALANTU, YU S, *et al.* Research on manufacturing technology of nanoim-printed grating[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 131: 891-909.
- [2] ZHOU W Y, LIU Z W, SUN Y J, *et al.* Bidirectional Littrow double grating interferometry for quadruple optical interpolation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110751.
- [3] LIU R, LI W H, ZHANG W, *et al.* Manipulating continuous optical spectra in the wave vector domain by metalens[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(2): 598-601.
- [4] 葛新方,王孝平. 面向光栅刻划机的负刚度结构隔振性能优化[J]. *机械设计与制造*, 2024(3): 1-5.
- GE X F, WANG X P. Optimization of vibration isolation performance of negative stiffness structure for the grating ruling machine[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2024(3): 1-5. (in Chinese)
- [5] 刘吉柱,张雯雯,陈立国,等. 高精度定位平台X-Y方向振动误差补偿[J]. *振动测试与诊断*, 2017, 37(6): 1227-1232, 1284.
- LIU J Z, ZHANG W W, CHEN L G, *et al.* Vibration error compensation in X-Y direction for high precision positioning platform[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(6): 1227-1232, 1284. (in Chinese)
- [6] MAO J H, TACHIKAWA H, SHIMOKOHBE A. Precision positioning of a DC-motor-driven aerostatic slide system[J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(1): 32-41.
- [7] 施建昌,肖晓兰,李昊,等. 压电致动器非线性特征的控制策略研究进展[J]. *广东工业大学学报*, 2024, 41(4): 14-25.
- SHI J C, XIAO X L, LI H, *et al.* Research progress on control strategies for nonlinear characteristics of piezoelectric actuators[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2024, 41(4): 14-25. (in Chinese)
- [9] 邵逸飞,孔繁星,何腾飞,等. 压电陶瓷在精密超精密领域的应用及发展[J]. *化工自动化及仪表*, 2023, 50(2): 125-130, 180.
- SHAO Y F, KONG F X, HE T F, *et al.* Application and development of piezoelectric ceramics in precision and ultra-precision fields[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2023, 50(2): 125-130, 180. (in Chinese)
- [11] 张金龙,徐慧,刘京南,等. 基于模糊神经网络的精密角度定位PID控制[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(3): 549-554.
- ZHANG J L, XU H, LIU J N, *et al.* PID control based on fuzzy neural network for precision angular alignment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(3): 549-554. (in Chinese)
- [12] 刘英想,邓杰,常庆兵,等. 压电驱动技术研究进展与展望[J]. *振动测试与诊断*, 2022, 42(6): 1045-1061, 1239.
- LIU Y X, DENG J, CHANG Q B, *et al.* Progress and prospects in piezoelectric actuation technologies[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(6): 1045-1061, 1239. (in Chinese)
- [13] BOLZONI L. Structural electroactive cermets: dielectric and structural properties of conductive metallic reinforced piezoelectric ceramics[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2021, 46(1): 38-81.
- [14] 胡志鹏,李晨捷,潘文强,等. 基于双内十字定子的压电宏微平面运动台研究[J]. *噪声与振动控制*, 2025, 45(2): 243-249.
- HU Z P, LI C J, PAN W Q, *et al.* A piezoelectric macro-micro planar motion platform based on a dual-inner-cross stator[J]. *Noise and Vibration Control*, 2025, 45(2): 243-249. (in Chinese)
- [15] 孙明超,彭佳琦,宋悦铭. 压电平台高精度自适应分数阶滑模跟踪控制[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(16): 2504-2512.
- SUN M C, PENG J Q, SONG Y M. High-precision adaptive fractional order sliding mode tracking control for piezoelectric platform[J]. *Opt.*

- Precision Eng.*, 2024, 32(16): 2504-2512. (in Chinese)
- [16] 杨宁征, 王艳艳, 渠莉莉. 基于自适应PI模型的压电陶瓷驱动器精密定位方法[J]. 传感技术学报, 2024, 37(3): 499-506.
YANG N Z, WANG Y Y, QU L L. A precise positioning method for piezoelectric driver based on the adaptive PI model[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2024, 37(3): 499-506. (in Chinese)
- [17] ZHANG J, MERCED E, SEPÚLVEDA N, *et al.* Optimal compression of generalized Prandtl-Ishlinskii hysteresis models [J]. *Automatica*, 2015, 57: 170-179.
- [18] LI Z, ZHANG X Y, MA L W. Development of a combined Prandtl ishinskii-preisach model [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 304: 111797.
- [19] GU G Y, ZHU L M, SU C Y. Modeling and compensation of asymmetric hysteresis nonlinearity for piezoceramic actuators with a modified Prandtl-ishlinskii model[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(3): 1583-1595.
- [20] 韩振, 刘曰涛, 李智鹤, 等. 压电陶瓷位移平台的复合控制方法研究[J]. 压电与声光, 2023, 45(1): 45-50.
HAN Z, LIU Y T, LI Z H, *et al.* Study on composite control method of piezoelectric ceramic displacement platform [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2023, 45(1): 45-50. (in Chinese)
- [21] WU T, HU W, ZHANG J X, *et al.* Research on hysteresis modeling and nonlinear compensation of piezoelectric actuators [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2025, 13(1): 52.

作者简介:



杨春吉(1997—),男,吉林长春人,硕士研究生,2021年于郑州大学获得学士学位,硕士就读于中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所,主要从事平面及凸面光栅刻划机控制方面的研究。

E-mail: brightlishi@gmail.com

通讯作者:



姚雪峰(1985—),男,吉林永吉人,博士,副研究员,2009年于吉林大学获得硕士学位,2018年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事精密仪器与天文光谱仪器方面的研究。

E-mail: yaoxf@ciomp.ac.cn

通讯作者:



于宏柱(1977—),男,河北保定人,硕士,正高级工程师,2001年于吉林大学获得学士学位,2013年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光栅制造装备研制及光栅位移测量技术研究。

E-mail: yhz_jl@sina.com.cn