

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514256

一种用于压电定位台原子级轨迹跟踪的 MB-PSO 算法*

姜健康¹, 孟思源¹, 蔡雅斓^{1,2}, 居 倩^{1,2}, 汝长海^{1,3}

(1. 江苏集萃微纳自动化系统与装备技术研究有限公司 苏州 215000;
2. 苏州科技大学电子与信息工程学院 苏州 215000; 3. 苏州大学机电工程学院 苏州 215000)

摘 要: 跨尺度压电定位台凭借其毫米级行程、纳米级定位精度, 被视为能够实现原子级制造系统的核心部件。然而, 压电陶瓷驱动固有的迟滞非线性特性严重制约了其在微定位模式下的轨迹跟踪精度, 难以满足亚纳米级精度需求。在此背景下, 对迟滞模型参数进行精确辨识成为提升跟踪精度的关键环节。针对传统粒子群优化辨识多维复杂迟滞模型参数难以获取全局最优解的问题, 提出一种多模态贝叶斯优化 PSO 的参数辨识算法。首先, 基于非对称 Bouc-Wen 模型建立能够表征迟滞非线性的系统动力学模型; 其次, 通过对传统 PSO 算法参数辨识结果分析, 引入模态分工机制并融合贝叶斯优化进行局部搜索得到 MB-PSO 算法, 旨在克服传统辨识算法易陷入局部最优等不足。为了验证算法的有效性, 通过与 PSO、遗传算法、差分进化算法进行对比验证, 实验结果显示 MB-PSO 能够将参数波动率抑制在 12.3% 以内。进一步地, 为评估所提算法在提升迟滞模型精度与压电定位台轨迹跟踪精度的有效性, 进行了迟滞表征能力与轨迹跟踪精度对比测试。测试结果显示, 基于 MB-PSO 辨识的迟滞模型最大位移误差仅为 6.871 nm, 引入该迟滞模型的轨迹跟踪控制器将轨迹跟踪误差抑制在 0.976 nm 以内, 实现了亚纳米级跟踪精度, 为压电定位台系统实现原子级制造奠定基础。

关键词: 原子级制造; 压电定位台; 粒子群算法; Bouc-Wen 模型; 轨迹跟踪

中图分类号: TH89 TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

A MB-PSO algorithm for atomic-level trajectory tracking of a piezoelectric positioning platform

Jiang Jiankang¹, Meng Siyuan¹, Cai Yalan^{1,2}, Ju Qian^{1,2}, Ru Changhai^{1,3}

(1. Institute of Micro-Nano Automation System and Equipment Technology of JITRI, Suzhou 215000, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215000, China)

Abstract: The cross-scale piezoelectric positioning platform, with its millimeter-scale travel range and nanometer-level positioning accuracy, is considered a core component for enabling atomic-scale manufacturing systems. However, the inherent hysteresis nonlinear characteristics of piezoelectric ceramic actuators severely restrict their trajectory tracking accuracy under micro-positioning mode, making it difficult to meet the sub-nanometer precision requirements. In this context, the precise identification of hysteresis model parameters becomes a crucial step in improving tracking accuracy. To address the issue that traditional particle swarm optimization struggles to obtain the global optimal solution for identifying multi-dimensional complex hysteresis model parameters, a multi-modal Bayesian optimization PSO parameter identification algorithm is proposed. First, a system dynamics model capable of characterizing hysteresis nonlinearity is formulated based on the asymmetric Bouc-Wen model. Then, based on the analysis of the parameter identification results of the traditional PSO algorithm, a modal division mechanism is introduced, and Bayesian optimization is integrated for local search. In this way, the MB-PSO algorithm is developed. This is intended to overcome the limitations of traditional identification algorithms, such as being easily trapped in local optima. To evaluate the effectiveness of the proposed algorithm, a comparative experiment is implemented against PSO, the genetic algorithm, and the differential evolution algorithm. The experimental results show that the parameter fluctuation

收稿日期: 2025-07-12 Received Date: 2025-07-12

* 基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0721400)、国家自然科学基金(62273247)项目资助

under MB-PSO is suppressed to within 12.3%. Furthermore, to evaluate the efficacy of the algorithm in improving both hysteresis modeling accuracy and trajectory tracking performance of the piezoelectric positioning platform, comparative tests on hysteresis characterization and trajectory tracking accuracy are carried out. The results show that the maximum displacement error of the hysteresis model identified by MB-PSO is limited to 6.871 nm, and the trajectory tracking error, when incorporating this model into the control system, is reduced to within 0.976 nm, achieving sub-nanometer tracking accuracy. The foundation is laid by this work for atomic-level manufacturing to be achieved with piezoelectric positioning platform systems.

Keywords: atomic-level manufacturing; piezoelectric positioning platform; particle swarm optimization; Bouc-Wen model; trajectory tracking

0 引言

原子级制造技术凭借其亚纳米级精度和对微观结构的精细操控能力在先进材料^[1]、超精密器件制造^[2]以及生物医学^[3]等诸多领域展现出巨大的应用潜力。该技术通常依赖于具备实时高分辨成像功能的仪器(如透射/扫描电子显微镜等)以及原子级操作系统,从而实现对应用对象的原位操作^[4-5]。跨尺度压电定位台因其在高真空受限环境下兼具大范围快速运动与高精度定位操作能力^[6-7],被视为实现原子级制造的操作系统核心部件之一。跨尺度压电定位台通常具备宏定位和微定位两种工作模式,而提升微定位模式下的轨迹跟踪精度,是实现其整体亚纳米级定位性能的关键。然而,受压电陶瓷固有的非线性迟滞特性的影响,导致跨尺度压电定位台的轨迹跟踪精度难以满足原子级精密操作的需求。

目前,提升跨尺度压电定位台微定位模式轨迹跟踪的控制策略主要分为前馈控制、反馈控制以及复合控制^[8]。其中,前馈控制因其控制结构简单、易于实现且不依赖实时误差反馈而备受青睐^[9],包括无模型前馈控制与基于模型前馈控制两类。其中,无模型前馈控制(如电荷控制)因设计复杂且成本高等原因而未被广泛应用^[10-11]。而基于模型的前馈控制精度完全取决于迟滞模型的表征能力。一般来说,迟滞模型的表征能力由模型结构设计参数与参数辨识精度两部分决定。针对压电迟滞建模,研究人员基于 Preisach、P-I(Prandtl-Ishinskii)、Bouc-Wen 等经典迟滞模型^[12-15],提出了一系列改进模型。例如,Yuan 等^[16]基于 P-I 模型构建了一种非对称移位结构的改进模型,有效表征了压电非对称迟滞特征。Yu 等^[17-19]针对压电迟滞效应引起的细胞穿刺装置轨迹跟踪误差问题,采用 Bouc-Wen 模型建立了细胞穿刺装置的迟滞动力学模型。此类模型的共性在于包含大量待确定的模型参数,因此选择合适的参数辨识算法对其参数进行准确有效地识别,对于提升建模精度至关重要。

现有迟滞模型参数辨识研究中所采用的方法包括最小二乘法、遗传算法(genetic algorithm, GA)、差分进化算法(differential evolution algorithm, DEA)等多种算法^[20-22]。

其中,Zhu 等^[23]提出了一种规范化 Bouc-Wen 模型参数识别方法,该方法首先采用最小二乘法进行参数初估,继而通过 GA 结合适当的适应度函数优化剩余参数,结果证明该方法在辨识精度与计算效率等方面具有显著优势。Kang 等^[24]利用自适应 DEA 对所提出的新型分数阶规范化 Bouc-Wen 模型进行参数辨识,验证了所提出的迟滞模型相比于传统 Bouc-Wen 模型迟滞表征能力更强。尽管这些算法取得了一些成效,但在处理压电迟滞模型这类具有高维度、强非线性、多局部最优点的复杂参数辨识问题时,往往面临收敛速度慢或对初始值敏感等挑战。

相较之下,粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法作为一种群体智能随机搜索算法,因其原理简单、收敛速度较快的优点,被广泛应用于信号处理^[25-26]、多目标优化^[27-28]、模式识别^[29-30]等领域,并被视为解决复杂优化问题的潜力工具。在基于 PSO 算法对迟滞模型进行参数辨识的研究,Feng 等^[31]针对基于速率依赖型 P-I 模型参数辨识问题,引入改进型 PSO 算法利用实验测量数据对该模型进行识别,该算法能够克服传统 PSO 算法的局部优化局限性。Zhang 等^[32]通过改进 PSO 算法设计自适应甲虫群优化算法,完成对压电驱动器的 Hammerstein 动态迟滞模型进行参数辨识,为后续对压电驱动器的动态滞后进行补偿与控制提供基础。然而,传统的 PSO 算法存在易陷入局部最优解并出现早熟收敛现象,导致其在多维复杂迟滞模型参数辨识中难以获得全局最优解。

针对上述传统 PSO 算法的局限性,本研究提出一种基于贝叶斯优化的多模态粒子群优化(multi-modal Bayesian enhanced PSO, MB-PSO)的参数辨识算法。首先,基于非对称 Bouc-Wen 模型构建压电定位台微定位模式下的动力学模型,旨在提升系统动力学模型的非线性迟滞表征能力。其次,在 PSO 中引入模态分工机制并融合贝叶斯优化进行局部搜索得到 MB-PSO 算法,以解决传统 PSO 算法在处理多维复杂迟滞模型的局限性。最后,通过多种辨识算法的对比验证以及轨迹跟踪测试,以验证所提出 MB-PSO 算法在提升非对称 Bouc-Wen 模型对跨尺度压电定位台微定位模式下迟滞特性的表征能力,以及提升平台轨迹跟踪精度方面的效果。

1 系统建模

1.1 系统概述

跨尺度压电定位台的机械结构如图 1 所示,主要构成组件包括:导轨、压电陶瓷、复合柔性铰链机构、基座、摩擦力调节螺钉以及预紧力调节楔形块。

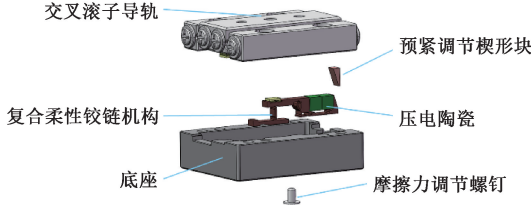


图 1 跨尺度压电定位台

Fig. 1 Cross-scale piezoelectric positioning platform

图 1 中,复合柔性铰链机构集成了传动铰链、预紧力调节单元及摩擦力调节单元,是定位平台实现跨尺度纳米运动定位的核心组成部件。

跨尺度压电定位台具备宏定位(压电粘滑)和微定位(压电扫描)两种工作模式:宏定位模式下平台能够实现毫米级行程的快速运动,而微定位模式下平台则能够实现纳米分辨率的精密定位。因此,本研究聚焦于微定位模式(运动范围为 $0 \sim 3 \mu\text{m}$),以验证跨尺度压电定位台应用于原子级制造技术的潜力。

1.2 动力学建模

根据图 1 跨尺度压电定位台的结构可知,导轨不与压电陶瓷直接接触,而是通过复合柔性铰链机构将压电陶瓷的输出位移传递至导轨。因此,微定位模式下定位平台的动力学模型由压电陶瓷和复合柔性铰链机构两部分的动力学模型组成,如图 2 所示。

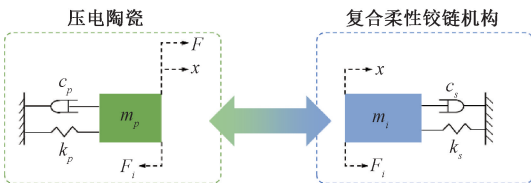


图 2 跨尺度压电定位台动力学模型

Fig. 2 Cross-scale piezoelectric positioning platform dynamics model

定位平台的动力学方程可表示为:

$$m_p \ddot{x}(t) + c_p \dot{x}(t) + k_p x(t) = F - F_i \quad (1)$$

$$m_i \ddot{x}(t) + c_s \dot{x}(t) + k_s x(t) = F_i \quad (2)$$

式中: m_p 、 c_p 和 k_p 分别表示压电陶瓷的等效质量、等效阻尼和等效刚度; m_i 、 c_s 和 k_s 分别表示复合柔性铰链机构的等效质量、等效阻尼和等效刚度; $x(t)$ 表示跨尺度压电定位台输出位移; F_i 表示压电陶瓷与复合柔性铰链机构

之间的相互作用力; F 表示压电陶瓷输出力。

联立式(1)、(2)可得:

$$F = (m_p + m_i) \ddot{x}(t) + (c_p + c_s) \dot{x}(t) + (k_p + k_s) x(t) \quad (3)$$

由于压电陶瓷固有的迟滞效应,导致其实际输出位移与输入电压呈非线性关系,因此实际输出位移 $x_p(t)$ 可表示为:

$$x_p(t) = \xi u(t) - h(t) \quad (4)$$

式中: ξ 为比例系数; $u(t)$ 为输入电压; $h(t)$ 为系统迟滞项。

因此,考虑到迟滞效应,微定位模式下系统的动力学方程可表示为:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = k [\xi u(t) - h(t)] \quad (5)$$

式中: $m = m_p + m_i$ 、 $c = c_p + c_s$ 和 $k = k_p + k_s$ 分别为系统的等效质量、等效阻尼和等效刚度。

1.3 迟滞模型建立

微分方程类迟滞模型仅需要一个辅助的非线性微分方程即可描述非线性迟滞效应,相比于算子类迟滞模型更加直观且简洁。因此,本研究采取 Bouc-Wen 模型来描述压电定位台微定位模式下的迟滞效应。

利用传统的 Bouc-Wen 模型表征系统迟滞时,基于式(5)可得到,即:

$$\begin{cases} m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = k [\xi u(t) - h(t)] \\ \dot{h}(t) = \alpha \dot{u}(t) - \beta \dot{u}(t) |h(t)|^n - \gamma \dot{u}(t) |h(t)|^{n-1} h(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: α 、 β 、 γ 和 n 均为模型参数,用于控制迟滞回线的形状和大小,通常为简化模型将 n 取为 1。

由于传统的 Bouc-Wen 模型在表征非线性迟滞效应时具有对称特性,与实际迟滞效应的非对称性不符。因此,在此基础上引入 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 这 3 个形状控制参数,得到一种非对称 Bouc-Wen 模型^[33]来描述系统迟滞,系统迟滞项可表示为:

$$\dot{h} = \dot{u} [\alpha - |h| \psi(\dot{u}, h)] \quad (7)$$

$$\psi(\dot{u}, h) = \gamma + \varphi_1 \text{sgn}(\dot{u}h) + \varphi_2 \text{sgn}(\dot{u}) + \varphi_3 \text{sgn}(h) \quad (8)$$

式中: $\psi(\dot{u}, h)$ 为参数 $\dot{u}$ 和 h 组成的形状控制函数; sgn 为符号函数。

2 MB-PSO 算法

2.1 PSO 算法

传统的 PSO 算法^[34]通过随机生成具有位置和速度属性的粒子作为优化种群,这些粒子在解空间中不断移动。在 D 维空间中,有 N 个粒子形成优化种群,第 i 个 ($i=1, 2, \dots, N$) 粒子在种群中的位置向量 X_i 和速度向量

V_i 分别为:

$$\mathbf{X}_i = [X_{i1}, X_{i2}, \cdots, X_{id}] \tag{9}$$

$$\mathbf{V}_i = [V_{i1}, V_{i2}, \cdots, V_{id}] \tag{10}$$

具备记忆功能的粒子在迭代过程中会保留历史最优信息,个体历史最优位置 $\mathbf{P}_{bi}$ 定义为:

$$\mathbf{P}_{bi} = [P_{i1}, P_{i2}, \cdots, P_{id}] \tag{11}$$

群体历史最优位置 $\mathbf{G}_b$ 定义为:

$$\mathbf{G}_b = [G_1, G_2, \cdots, G_d] \tag{12}$$

为了获得整个种群的最优解,在解空间不断移动的每个粒子都将与其他粒子共享单个最优解的信息。种群中的所有粒子都将基于速度与位置的最优解不断更新它们的位置和速度。其核心更新机制由速度更新方程与位置更新方程描述,即:

$$\mathbf{V}_i(t+1) = \omega \mathbf{V}_i(t) + C_1 r_1 [\mathbf{P}_{bi}(t) - \mathbf{X}_i(t)] + C_2 r_2 [\mathbf{G}_b(t) - \mathbf{X}_i(t)] \tag{13}$$

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \mathbf{X}_i(t) + \mathbf{V}_i(t+1) \tag{14}$$

式中: $\mathbf{V}_i(t)$ 和 $\mathbf{X}_i(t)$ 分别为第 t 次迭代时第 i 个粒子的速度和位置; ω 为惯性权重,其值用于平衡全局搜索和局部优化能力; C_1 和 C_2 为学习因子,分别调节个体认知与群体协作; r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 范围均匀分布的随机数。

2.2 PSO 局限性分析

为分析传统 PSO 参数辨识的局限性,首先需利用 PSO 算法对所建立的非对称 Bouc-Wen 模型进行参数辨识。搭建如图 3 所示的跨尺度压电定位台性能测试系统,该系统采用配备 12 V 输出驱动电源 (B06120500, Delippo) 的驱动控制器对定位台进行运动控制,控制器通过电气线缆直接与压电陶瓷两极相连接。同时,采用微米级精度激光干涉仪 (Picoscale, SmarAct GmbH, Germany) 测量定位台位移输出。通过对定位平台输入如图 4(a) 所示的三角波信号,测得定位平台的输入电压与输出位移的响应曲线如图 4(b) 所示。

待辨识参数集定义为 $\Theta = [m, c, k, d, \alpha, \gamma, \varphi_1,$

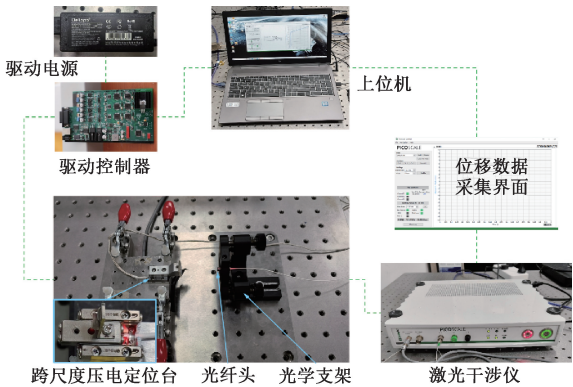


图 3 性能测试系统

Fig. 3 Performance testing system

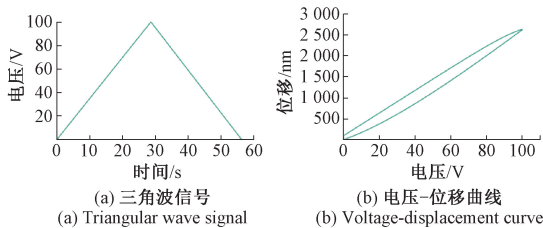


图 4 迟滞特性测试

Fig. 4 Hysteresis characteristics test

$\varphi_2, \varphi_3]$, 选取适应度函数为:

$$F(\Theta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [x(t_i) - \hat{x}(t_i | \Theta)]^2}{N}} \tag{15}$$

式中: $x(t_i)$ 为第 i 个采样时刻平台的实际位移; $\hat{x}(t_i | \Theta)$ 为第 i 个采样时刻相应地迟滞模型模拟位移; N 为测量采样点数。基于 PSO 算法对非对称 Bouc-Wen 迟滞模型进行 10 次参数辨识,参数辨识及评估结果如表 1、2 所示。其中, m 的单位为 kg, c 的单位为 $N \cdot s/m$, k 的单位为 N/m , d 的单位为 m/V , 后文同此。

表 1 PSO 辨识结果
Table 1 PSO identification results

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m	0.128 3	0.086 9	0.112 5	0.094 1	0.107 6	0.132 1	0.089 7	0.115 3	0.101 2	0.105 7
c	1 580	1 620	1 540	1 590	1 570	1 610	1 550	1 600	1 560	1 580
k	24 500	23 800	24 100	23 950	24 200	24 600	23 700	24 300	24 000	24 200
d	0.021	0.019	0.023	0.02	0.022	0.024	0.018	0.021	0.02	0.022
α	0.032	0.028	0.035	0.03	0.033	0.036	0.027	0.034	0.031	0.032
γ	0.12	0.11	0.13	0.12	0.14	0.15	0.10	0.13	0.12	0.13
φ_1	0.45	0.43	0.47	0.44	0.46	0.48	0.42	0.45	0.43	0.44
φ_2	-0.08	-0.07	-0.09	-0.08	-0.09	-0.10	-0.06	-0.08	-0.07	-0.08
φ_3	0.17	0.15	0.19	0.16	0.18	0.20	0.14	0.17	0.16	0.17
RMSE/nm	87	92	85	88	86	84	93	87	89	88

表 2 参数评估
Table 2 Parameter evaluation

参数	均值	标准差	波动率/%	敏感度指数
m	0.107 3	0.015 2	42.11	0.12
c	1 580	25.819 9	5.06	0.08
k	24 135	286.792 6	3.73	0.21
d	0.021 0	0.001 8	28.57	0.15
α	0.031 8	0.002 9	28.30	0.18
γ	0.125 0	0.014 3	40.00	0.16
φ_1	0.447 0	0.018 9	13.42	0.07
φ_2	-0.081 0	0.011 6	13.60	0.05
φ_3	0.169 0	0.017 9	35.50	0.03

基于参数辨识结果,引入 Hessian 矩阵谱分解与伴随方程法对辨识结果进行分析,揭示传统 PSO 算法的局限性:

(1) 适应度函数的非凸性:适应度函数 $F(\boldsymbol{\Theta})$ 的局部几何形态由其 Hessian 矩阵 $\boldsymbol{H}_{ij} = \partial^2 F / \partial \boldsymbol{\Theta}_i \partial \boldsymbol{\Theta}_j$ 决定。通过对子空间 $m - \alpha - \gamma$ 的 Hessian 矩阵谱分解,如图 5 所示。

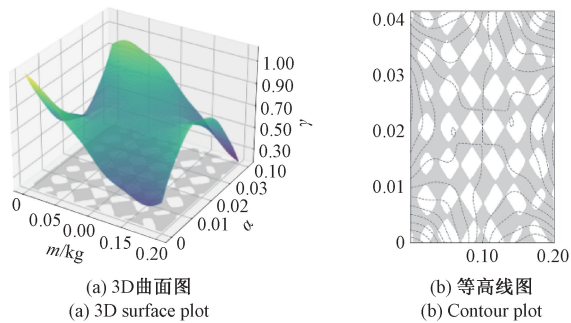


图 5 Hessian 矩阵谱分解
Fig. 5 Hessian matrix spectral decomposition

其关键特性包括:

(1) 鞍点涌现:非凸函数在三维曲面上表现为出现多个山峰和山谷,也就是说存在多个局部最小值,粒子在

搜索时很可能陷入局部最小值而无法找到最优解。当 $\gamma \in [0.10, 0.15]$ 时, $\boldsymbol{H}$ 的特征值呈现 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 < 0$ 和 $\lambda_3 \approx 0$ 的组合,适应度函数曲面存在多个鞍点或局部最小值,因此粒子在搜索时很可能陷入亚稳态(“伪稳态”),导致早熟收敛;

(2) 曲率各向异性:曲率反映曲线上某点处的弯曲程度和方向,主曲率及即曲线某一点处的最大和最小曲率,可以完全描述该点的局部弯曲特性。经过计算,鞍点处的最大主曲率比 $\lambda_{\max} / \lambda_{\min} \approx 10^2 \gg 1$,表明在某些方向上曲面的弯曲程度远大/小于其他方向,呈现出各向异性,导致优化方向的选择性发散或停滞;

(3) 模态耦合效应:模态耦合效应表现为不同参数之间相互依赖关系导致目标函数响应无法通过单一参数独立调整从而增加优化难度。通过混合偏导数 $\partial^2 F / \partial \boldsymbol{\Theta}_i \partial \boldsymbol{\Theta}_j$ 来反映;其中, $\partial^2 F / \partial m \partial \gamma$ 贡献了 15%~22% 的曲率变化,表明惯性参数与摩擦参数的强耦合性加剧了非凸性。

(2) 梯度场的非均匀性:梯度场反映了适应度函数各个参数方向上的导数分布情况(梯度向量的集合),梯度场的均匀性影响着优化算法的步长选择和收敛效率。基于伴随方程法计算梯度场分布,在 $\varphi_1 - \varphi_2$ 平面内,梯度模长 $\|\nabla F\|_2$ 呈现显著空间异质性,即:

$$\min_{\boldsymbol{\Theta} \in \Omega} \|\nabla F\|_2 = 4.7 \times 10^0 \tag{16}$$

$$\max_{\boldsymbol{\Theta} \in \Omega} \|\nabla F\|_2 = 2.3 \times 10^2 \tag{17}$$

这种跨越两个数量级的梯度幅值差异导致传统 PSO 的固定步长策略失效。当在低梯度区域($\|\nabla F\| > 10^2$),梯度模长较小,粒子驱动力不足而停滞不前,需加速推进;在高梯度区域($\|\nabla F\| < 10$),梯度模长较大,粒子动量过剩,引发超调震荡,容易冲过谷底,因此需要逐步收敛。

(3) 参数敏感性分层特性:通过对待辨识参数进行相关系数矩阵分析如表 3 所示,得到滞后项对参数 φ_i 的敏感性,即:

$$\frac{\partial \dot{h}}{\partial \varphi_i} = -\ddot{u} | h \begin{cases} \text{sgn}(\dot{u} h), & i = 1 \\ \text{sgn}(\dot{u}), & i = 2 \\ \text{sgn}(h), & i = 3 \end{cases} \tag{18}$$

表 3 参数相关系数矩阵
Table 3 PSO identification results

参数	m	c	k	d	α	γ	φ_1	φ_2	φ_3
m	1.00	0.12	0.08	0.15	0.05	0.03	0.10	0.07	0.02
c	0.12	1.00	0.25	0.18	0.31	0.22	0.14	0.09	0.11
k	0.08	0.25	1.00	0.42	0.17	0.38	0.21	0.15	0.23
d	0.15	0.18	0.42	1.00	0.55	0.47	0.33	0.28	0.19
α	0.05	0.31	0.17	0.55	1.00	0.62	0.41	0.37	0.25
γ	0.03	0.22	0.38	0.47	0.62	1.00	0.58	0.44	0.39
φ_1	0.10	0.14	0.21	0.33	0.41	0.58	1.00	0.67	0.52
φ_2	0.07	0.09	0.15	0.28	0.37	0.44	0.67	1.00	0.48
φ_3	0.02	0.11	0.23	0.19	0.25	0.39	0.52	0.48	1.00

φ_1 、 φ_2 和 φ_3 的敏感性指数呈现 $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$ 的分层特性。迟滞项对 φ_1 的偏导数为 $-\dot{u}|h|\text{sgn}(\dot{u}h)$, 包含速度与位移的耦合项 $\text{sgn}(\dot{u}h)$, 其非线性特性在输入方向频繁切换时敏感性显著增强; 而对于 φ_2 和 φ_3 的偏导数分别退化为 $\text{sgn}(\dot{u})$ 和 $\text{sgn}(h)$ 主导的线性依赖, 导致其敏感度指数随 $|h|$ 线性增长, 但受符号函数稳定性限制(如 $\text{sgn}(h)$ 在 $h>0$ 时恒定), 动态响应能力较弱。

在高梯度区域($\|\nabla F\|>10^2$)对应 $\text{sgn}(\dot{u}h)$ 频繁切换的瞬态工况, 此时 φ_1 敏感性因符号函数动态变化被放大; 低梯度区域($\|\nabla F\|<10$)多出现 $\text{sgn}(h)$ 或 $\text{sgn}(\dot{u})$ 稳定的准静态阶段, 大; 低梯度区域($\|\nabla F\|<10$)多出现 $\text{sgn}(h)$ 或 $\text{sgn}(\dot{u})$ 稳定的准静态阶段, 导致 φ_2 和 φ_3 的梯度幅值随着 $|h|$ 线性衰减, 引发辨识算法伪停滞。

2.3 MB-PSO 算法

针对上述传统 PSO 算法在复杂迟滞模型参数辨识中存在的早熟收敛、物理约束缺失等缺陷, 本文通过引入模态分工机制^[34]与贝叶斯优化^[35]局部搜索得到一种 MB-PSO 算法, 其流程如图 6 所示。

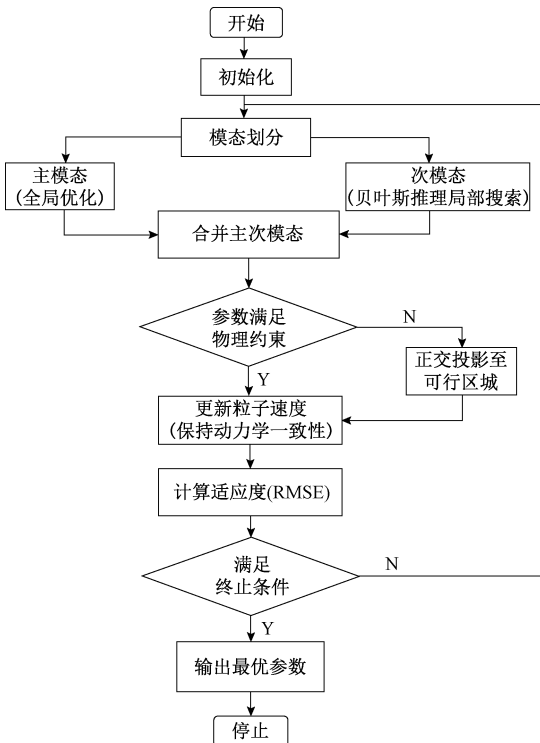


图 6 MB-PSO 算法流程

Fig. 6 MB-PSO algorithm flowchart

与传统的 PSO 算法相比, MB-PSO 算法引入了三重协同保障机制:

1) 参数空间多模态分解。基于多组实验样本数据, 采用主成分分析 (principal component analysis, PCA), 通过数据标准化与协方差矩阵分解, 提取主成分载荷, 对参数空间进行降维处理。

2) 多模态协同优化策略。对主成分进行模态划分, 根据参数主导特性将参数空间划分为主模态和次模态, 对主模态采取全局优化策略, 对次模态使用局部贝叶斯推理更新参数分布, 快速收敛, 减少资源浪费。

3) 物理约束正交投影。非对称 Bouc-Wen 模型存在物理可实现性约束 $\sum \varphi_i \leq 1$, 且 $\alpha > 0$, 也就是说, 粒子一旦移动到不可行区域, 将会失去物理意义。为此, 提出正交投影约束修正策略, 即:

$$\text{Proj}_{\Omega}(\boldsymbol{\theta}) = \arg \min_{\boldsymbol{q} \in \Omega} \|\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{q}\|_2 \quad (19)$$

待辨识参数集 $\boldsymbol{\theta}$ 的耦合约束可表述为线性不等式, 即:

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} \leq \boldsymbol{b} \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{A} = [0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0]$; $\boldsymbol{b} = 1$ 。另外需要增加单边约束 $\alpha > \epsilon$ ($\epsilon = 10^{-6}$), 避免除零错误。若找到当前离 $\boldsymbol{\theta}$ 最近的可行点 $\boldsymbol{\theta}'$, 即转化为凸优化问题:

$$\min_{\boldsymbol{q}} \|\boldsymbol{q} - \boldsymbol{\theta}\|_{2, \text{L}}, \quad \boldsymbol{A}\boldsymbol{q} \leq \boldsymbol{b} \quad (21)$$

用拉格朗日乘法求解。对于 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{q} = \boldsymbol{b}$, 解得:

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{A}^T(\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^T)^{-1}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{b}) \quad (22)$$

当 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{q} \leq \boldsymbol{b}$ 时, 无需修正;

当 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{q} > \boldsymbol{b}$ 时:

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{A}^T(\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^T)^{-1}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{b})_+ \quad (23)$$

式中: $(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{b})_+ = \max(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{b}, 0)$ 。

验证:

当 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} > \boldsymbol{b}$ 时:

$$\boldsymbol{\theta}' = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{A}^T(\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^T)^{-1}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{b}) \quad (24)$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta}' = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^T(\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^T)^{-1}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{b}) = \boldsymbol{b} \quad (25)$$

投影至边界处, 满足条件。

为保持动力学一致性, 同步更新粒子速度, 避免速度突变导致的振荡:

$$\boldsymbol{V}_{i+1} = \text{Proj}_{\Omega}(\boldsymbol{\theta}_i + \boldsymbol{V}_i) - \boldsymbol{\theta}_i \quad (26)$$

3 实验验证

为验证本文所提出的 MB-PSO 算法的有效性, 将从 3 个方面对其进行测试验证, 包括参数辨识对比验证、基于辨识参数的非对称 Bouc-Wen 模型迟滞表征能力验证以及轨迹跟踪控制性能验证。

3.1 参数辨识对比

首先, 通过对 MB-PSO、PSO、GA 以及 DEA 这 4 种参数辨识算法进行 10 次独立参数辨识实验, 得到如表 4 所示的辨识结果, 其中各参数结果为均值 $\pm$ 标准差。结果表明, MB-PSO 显著降低了各参数的波动幅度, 所有参数波动率均 $< 12.30\%$, 其中参数 c 和 φ_2 的波动率分别降至 3.20% 与 2.80% , 相比于传统算法中最优的 PSO (5.06% 与 13.60%) 降幅达到 36.76% 与 79.4% 。该结果验证了所提出的 MB-PSO 算法有效提升了参数辨识的稳定性。

表 4 辨识结果对比

Table 4 Comparison of identification results

参数	MB-PSO		PSO		GA		DEA	
	结果	波动率/%	结果	波动率/%	结果	波动率/%	结果	波动率/%
m	0.124±0.005	12.30	0.108±0.015	42.11	0.128±0.025	19.865	0.108±0.018	16.462
c	1.438±10.964	3.20	1.580±25.820	5.06	1.331±366.857	27.548	1.542±22.735	14.74
k	28.490±130.259	2.10	24.135±286.793	3.73	25.209±6.561.199	26.02	24.108±199.939	8.29
d	0.034±0.001	9.80	0.021±0.002	28.57	0.012±0.004	54.42	0.018±0.003	33.81
α	0.012±0.001	7.50	0.032±0.003	28.30	0.034±0.011	32.71	0.026±0.007	17.75
γ	0.084±0.004	3.50	0.125±0.014	40.00	0.127±0.039	60.81	0.131±0.022	56.42
φ_1	0.284±0.005	4.20	0.447±0.019	13.42	0.362±0.114	31.56	0.462±0.022	18.64
φ_2	-0.178±0.006	2.80	-0.081±0.012	13.60	-0.103±0.018	27.96	-0.100±0.014	21.62
φ_3	0.590±0.009	5.10	0.169±0.018	35.50	0.087±0.013	25.33	0.141±0.002	20.18

3.2 迟滞表征能力验证

为验证本文提出的 MB-PSO 算法对非对称 Bouc-Wen 模型迟滞表征能力的提升效果,将 4 种算法辨识所得参数分别代入非对称 Bouc-Wen 模型进行仿真,生成模拟位移,并与实测位移(图 4(b))进行对比,结果如图 7 所示。分别计算出各算法对应的模拟位移与实测位移间的最大位移误差($e_{\max}$)及均方根误差(RMSE),结果如表 5 所示。

表 5 迟滞表征能力对比

Table 5 Comparison of hysteresis characterization capabilities (nm)

评估指标	MB-PSO	PSO	GA	DEA
$e_{\max}$	6.871	89.878	131.479	128.394
RMSE	3.623	49.313	72.911	69.819

结果表明,MB-PSO 算法能够显著提升非对称 Bouc-Wen 模型的迟滞表征能力。基于 MB-PSO 辨识得到非对称 Bouc-Wen 模型的 $e_{\max}$ 为 6.871 nm, RMSE 为 3.623 nm, 将建模精度压缩至 10 nm 以下。相较于 3 种传统算法中表现最优的 PSO,其 $e_{\max}$ 提升了 92.36%, RMSE 提升了 92.65%。该结果充分验证了 MB-PSO 可有效增强非对称 Bouc-Wen 模型的迟滞表征能力。

3.3 轨迹跟踪控制验证

为验证所提出的算法通过提升非对称 Bouc-Wen 模型的迟滞表征能力进而增强跨尺度压电定位台的轨迹跟踪精度的效果,基于图 3 所示的实验装置进行了轨迹跟踪测试实验。分别将 MB-PSO、PSO、GA 与 DEA 算法辨识得到的非对称 Bouc-wen 模型引入先前设计的前馈-反馈复合控制器^[36],在控制器其他参数保持不变的前提下,对跨尺度压电定位台施加期望轨迹 $x_d = 1\,000 + 1\,000\sin(0.2\pi t - \pi/2)$,单位为 nm,进行轨迹跟踪性能测试。

通过测试得到相应的轨迹跟踪曲线、跟踪误差(图 8、9)及误差统计结果(表 6)。结果表明,引入 MB-PSO 算法辨识的非对称 Bouc-Wen 模型时,系统轨迹跟踪实现了亚纳米级轨迹跟踪精度,其 $e_{\max}$ 仅为 0.976 nm, RMSE 低至 0.574 nm。相较于传统 PSO,其 $e_{\max}$ 降低了 79.97%, RMSE 降低了 80.34%;而相较于 GA 和 DEA,

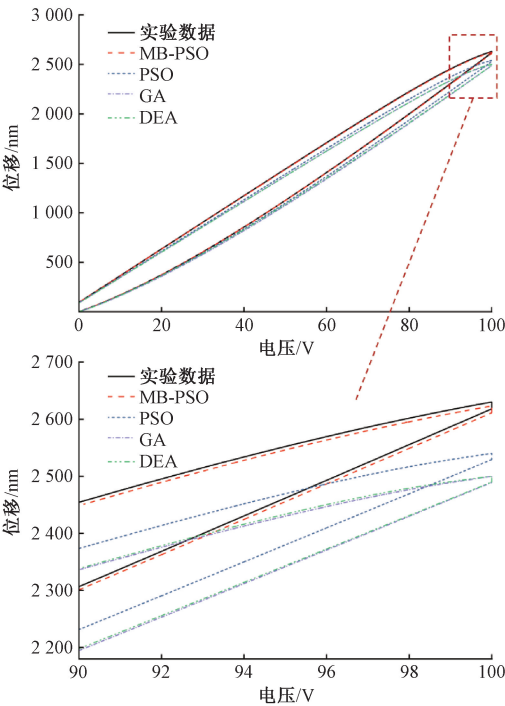


图 7 迟滞模拟曲线

Fig. 7 Hysteresis simulation curve

$e_{\max}$ 和 RMSE 降幅均达到了 94% 以上。结果验证了 MB-PSO 对跨尺度压电定位台微定位模式轨迹跟踪精度提升的有效性。

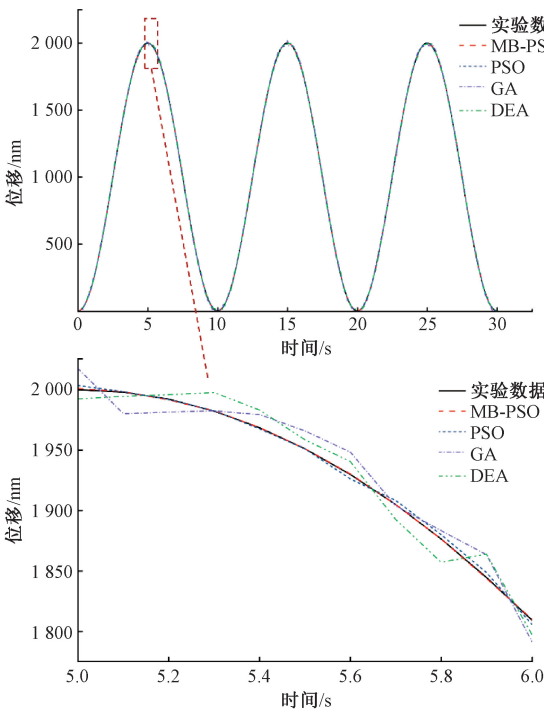


图 8 轨迹跟踪位移曲线
Fig. 8 Trajectory tracking displacement curve

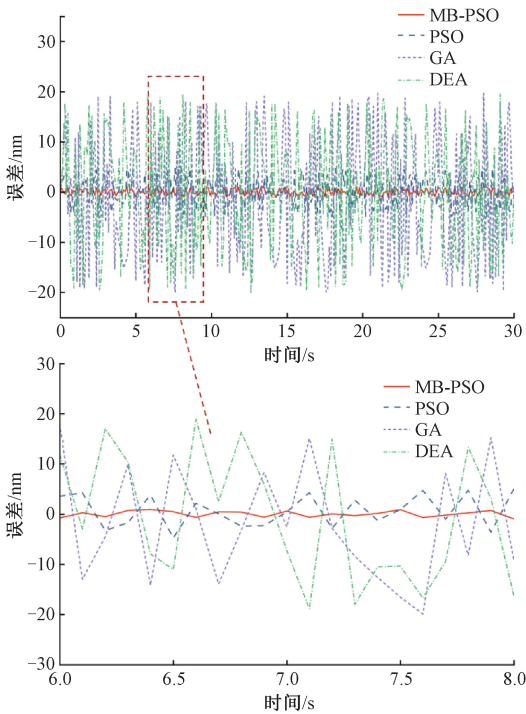


图 9 轨迹跟踪误差
Fig. 9 Trajectory tracking error

表 6 轨迹跟踪测试对比
Table 6 Trajectory tracking test comparison (nm)

评估指标	MB-PSO	PSO	GA	DEA
$e_{\max}$	0.976	4.978	19.985	18.541
RSME	0.574	2.919	11.864	11.049

4 结 论

本文提出了一种 MB-PSO 参数辨识算法,用于精确辨识表征跨尺度压电定位台微定位模式下迟滞的非对称 Bouc-Wen 模型。首先,针对传统 PSO 算法在处理多维复杂迟滞模型的局限性,引入了模态分工机制对多维度参数空间进行模态分解与协同优化,提升了全局搜索效率。其次,融合了贝叶斯优化进行局部搜索,有效遏止了传统 PSO 的早熟收敛问题。

综合实验结果表明,相较于传统参数辨识算法,本文提出的 MB-PSO 算法不仅能显著提升参数辨识的稳定性以及迟滞模型的表征能力,更能有效支撑前馈-反馈复合控制器,实现跟踪误差稳定在亚纳米级的高精度轨迹跟踪,为跨尺度压电定位台满足原子级制造需求奠定了基础。未来的工作将聚焦于面向原子级制造高速加工需求的跨尺度压电定位台高带宽工况研究,重点突破动态迟滞模型参数辨识和轨迹跟踪控制技术,进一步拓展 MB-PSO 算法支撑原子级制造超精密运动控制的能力。

参考文献

[1] WANG L H, ZHANG Y, ZENG ZH, et al. Tracking the sliding of grain boundaries at the atomic scale [J]. Science, 2022, 375 (6586) : 1261-1265.

[2] CHEN F, MA T Y, ZHANG T R, et al. Atomic-level charge separation strategies in semiconductor-based photocatalysts [J]. Advanced Materials, 2021, 33 (10) : 2005256.

[3] LIN Z M, AKIN H, RAO R, et al. Evolutionary-scale prediction of atomic-level protein structure with a language model [J]. Science, 2023, 379 (6637) : 1123-1130.

[4] GOLOZAR M, GAUVIN R, ZAGHIB K. In situ and in operando techniques to study Li-ion and solid-state batteries: Micro to atomic level [J]. Inorganics, 2021, 9 (11) : 85.

[5] YUAN ZH X, ZHOU SH L, HONG C L, et al. Piezo-actuated smart mechatronic systems for extreme scenarios [J]. International Journal of Extreme Manufacturing,

- 2025, 7(2): 022003.
- [6] LI P ZH, WANG X D, ZHAO L, et al. Dynamic linear modeling, identification and precise control of a walking piezo-actuated stage[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 128: 141-152.
- [7] MENG S Y, JIANG J K, WANG F B, et al. Automated nanomanipulation for repairing defects on nanoimprint lithography Masters[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 14967-14975.
- [8] YUAN ZH X, ZHOU SH L, ZHANG ZH G, et al. Piezo-actuated smart mechatronic systems: Nonlinear modeling, identification, and control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 221: 111715.
- [9] YANG CH, WANG Y, YOUCEF-TOUMI K. Feedback-assisted feedforward hysteresis compensation: A unified approach and applications to piezoactuated nanopositioners[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(11): 11245-11254.
- [10] YANG CH, ZHAO J, JU B F. Charge controller with a novel hysteresis disturbance observer for high-accuracy trajectory tracking of piezoelectric actuators[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(19): 22713-22722.
- [11] GU G Y, YANG M J, ZHU L M. Real-time inverse hysteresis compensation of piezoelectric actuators with a modified Prandtl-Ishlinskii model[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(6): 065106.
- [12] GU G Y, LI CH X, ZHU L M, et al. Modeling and identification of piezoelectric-actuated stages cascading hysteresis nonlinearity with linear dynamics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 21(3): 1792-1797.
- [13] STEFANSKI F, MINOROWICZ B, PERSSON J, et al. Non-linear control of a hydraulic piezo-valve using a generalised Prandtl-Ishlinskii hysteresis model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 412-431.
- [14] AL JANAIDEH M, AL SAAIDEH M, RAKOTONDRABE M. On hysteresis modeling of a piezoelectric precise positioning system under variable temperature[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145: 106880.
- [15] 周民瑞, 周振华, 刘鑫, 等. 压电执行器的非对称动态迟滞特性建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 108-120.
- ZHOU M R, ZHOU ZH H, LIU X, et al. Modeling of asymmetric dynamic hysteresis characteristics of piezoelectric actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 108-120.
- [16] YUAN G X, ZHANG ZH Q, XIE X J, et al. Adaptive control for time-varying nonlinear hysteresis systems with application to piezoelectric positioning platform[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025: 1-12.
- [17] YU SH D, WU H T, XIE M Y, et al. Precise robust motion control of cell puncture mechanism driven by piezoelectric actuators with fractional-order nonsingular terminal sliding mode control[J]. Bio-Design and Manufacturing, 2020, 3(4): 410-426.
- [18] YU SH D, XIE M Y, MA J Y, et al. Precise robust motion tracking of a piezoactuated micropuncture mechanism with sliding mode control[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(8): 4410-4434.
- [19] YU SH D, XIE M Y, WU H T, et al. Composite proportional-integral sliding mode control with feedforward control for cell puncture mechanism with piezoelectric actuation[J]. ISA Transactions, 2022, 124: 427-435.
- [20] HASSANI V, TIAHJOWIDODO T, DO T N. A survey on hysteresis modeling, identification and control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 49(1/2): 209-233.
- [21] AL JANAIDEH M, ALJANAIDEH O. Further results on open-loop compensation of rate-dependent hysteresis in a magnetostrictive actuator with the Prandtl-Ishlinskii model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 104: 835-850.
- [22] QUARANTA G, LACARBONARA W, MASRI S F. A review on computational intelligence for identification of nonlinear dynamical systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 99(2): 1709-1761.
- [23] ZHU H T, RUI X T, YANG F F, et al. An efficient parameters identification method of normalized Bouc-Wen model for MR damper[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 448: 146-158.
- [24] KANG SH ZH, WU H T, LI Y, et al. A fractional-order normalized Bouc-Wen model for piezoelectric hysteresis nonlinearity[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 27(1): 126-136.
- [25] MITRA S, MUKHOPADHYAY R, CHATTOPADHYAY

- P. PSO driven designing of robust and computation efficient 1D-CNN architecture for transmission line fault detection[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 210: 118178.
- [26] 荆俊明, 石建明, 张秀蓉, 等. 舞台载波通信自适应跳频抗干扰仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 145-152.
- JING J M, SHI J M, ZHANG X R, et al. Simulation and analysis of adaptive frequency hopping anti-jamming for stage carrier communication[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 145-152.
- [27] WANG L, LI ZH P, ADENUTSI C D, et al. A novel multi-objective optimization method for well control parameters based on PSO-LSSVR proxy model and NSGA-II algorithm[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107694.
- [28] 王苏戎, 马登成, 任泽, 等. 悬臂式掘进机断面成型轨迹多目标优化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 183-192.
- WANG S Y, MA D CH, REN Z, et al. A multi-objective optimization method for cantilever roadheader section forming trajectory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 183-192.
- [29] VERMA H, VERMA D, TIWARI P K. A population based hybrid FCM-PSO algorithm for clustering analysis and segmentation of brain image[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 167: 114121.
- [30] 唐定龙, 王恒, 冯蛟, 等. 一种卫星功率和编码调制模式联合分配算法[J/OL]. 电子测量技术, 1-10[2025-08-12].
- TANG D L, WANG H, FENG J, et al. A joint allocation algorithm for satellite power and coding modulation mode[J/OL]. Electronic Measurement Technology, 1-10[2025-08-12].
- [31] FENG Y, LI Y. System identification of micro piezoelectric actuators via rate-dependent Prandtl-Ishlinskii hysteresis model based on a modified PSO algorithm[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2021, 20: 205-214.
- [32] ZHANG Q, GAO Y P, LI Q L, et al. Adaptive compound control based on generalized Bouc-Wen inverse hysteresis modeling in piezoelectric actuators[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(11): 115004.
- [33] LI W, CHEN X D, LI Z L. Inverse compensation for hysteresis in piezoelectric actuator using an asymmetric rate-dependent model[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(11): 115003.
- [34] TIAN Y, LIU R CH, ZHANG X Y, et al. A multipopulation evolutionary algorithm for solving large-scale multimodal multiobjective optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2020, 25(3): 405-418.
- [35] WANG X L, JIN Y CH, SCHMITT S, et al. Recent advances in Bayesian optimization[J]. ACM Computing Surveys, 2023, 55(13s): 1-36.
- [36] 居倩, 姜健康, 朱军辉, 等. 基于 ABW 模型的纳米定位迟滞抑制与精度控制[J]. 微纳电子技术, 2025, 62(6): 107-117.
- JU Q, JIANG J K, ZHU J H, et al. Nano-positioning hysteresis suppression and precision control based on ABW model[J]. Micronanoelectronic Technology, 2025, 62(6): 107-117.

作者简介



E-mail:jjkang0122@163.com

Jiang Jiankang received his B.Sc. degree from Hubei University of Technology in 2021, and received his M.Sc. degree from Soochow University in 2024. He is currently an engineer at the Institute of Micro-Nano Automation System and Equipment Technology of JITRI. His main research interest is micro-nano motion control.



E-mail:22B908054@stu.hit.edu.cn

Meng Siyuan received his B.Sc. and M.Sc. degrees from Harbin Engineering University in 2019 and 2021, respectively. He is currently a deputy director at the Institute of Micro-Nano Automation System and Equipment Technology of JITRI. His

姜健康, 2021 年于湖北工业大学获得学士学位, 2024 年于苏州大学获得硕士学位, 现为江苏集萃微纳自动化系统与装备技术研究所有限公司工程师, 主要研究方向为微纳运动控制。

孟思源, 分别在 2019 和 2021 年于哈尔滨工程大学获得学士学位和硕士学位, 现为江苏集萃微纳自动化系统与装备技术研究所有限公司副所长, 主要研究方向为微纳运动控制, 精密传感等。

main research interests include micro-nano motion control, precision sensing, etc.



蔡雅斓,2023 年于苏州科技大学获得学士学位,现为苏州科技大学硕士研究生,主要研究方向为光电信息传感。

E-mail:caiyalan2024@ 163. com

Cai Yalan received her B.Sc. degree from Suzhou University of Science and Technology in 2023. She is currently a master’s student at Suzhou University of Science and Technology. Her main research interest is photoelectric information sensing.



居倩,2023 年于苏州科技大学获得学士学位,现为苏州科技大学硕士研究生,主要研究方向为微纳运动控制。

E-mail:jqjq1206@ qq. com

Ju Qian received her B.Sc. from Suzhou University of Science and Technology in 2023. She is currently a

master’s student at Suzhou University of Science and Technology. Her main research interest is micro-nano motion control.



汝长海(通信作者),2005 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为苏州大学机电工程学院教授,博士生导师,江苏集萃微纳自动化系统与装备技术研究有限公司所长,主要研究方向为微纳操作,纳米定位等。

E-mail:rchhai@ 163. com

Ru Changhai (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2005. He is currently a professor and a doctoral advisor with the School of Mechanical and Electrical Engineering at Soochow University, and a director at the Institute of Micro-Nano Automation System and Equipment Technology of JITRI. His main research interests include micro-nano manipulation, nano-positioning, etc.