

文章编号: 1671-7449(2026)05-0625-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(5): 625-632.

基于WOA优化MPC参数的压电执行器线性化控制

赵美婷^{1,2}, 亓雪^{1,2*}, 谭秋林^{1,2*}

(1. 中北大学 微纳器件与系统教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 为了提高压电执行器调速系统的控制性能, 提出了一种基于鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)优化模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)参数的压电执行器线性化控制方法。首先, 对压电执行器进行温度耦合的非线性建模, 在SolidWorks中构建其三维模型, 在Comsol中仿真并分析定子的振动模式; 其次, 建立Koopman离散状态空间模型, 设计压电执行器模型预测控制器, 提高系统的控制精度; 最后, 通过WOA整定MPC参数实现压电执行器的高精度控制。结果表明, WOA优化后的Koopman-MPC控制方法将系统超调量相较于Koopman-MPC减小1.68%, 调节时间缩短至0.6 s以内, 展现出更优的控制效果。

关键词: 压电执行器; 鲸鱼优化算法; 模型预测控制; 线性化控制

中图分类号: TM383

文献标识码: AA

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026061

引用格式: 赵美婷, 亓雪, 谭秋林. 基于WOA优化MPC参数的压电执行器线性化控制[J]. 测试技术学报, 2026, 40(5): 625-632.

Zhao Meiting, Qi Xue, Tan Qiulin. WOA-optimized MPC parameters for linearized control of piezoelectric actuators [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(5): 625-632.

WOA-Optimized MPC Parameters for Linearized Control of Piezoelectric Actuators

Zhao Meiting^{1,2}, Qi Xue^{1,2*}, Tan Qiulin^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To enhance the control performance of the piezoelectric actuator speed regulation system, a linearized control method based on the whale optimization algorithm (WOA) for optimizing model predictive control (MPC) parameters is proposed. Firstly, a temperature-coupled nonlinear model of the piezoelectric actuator is developed, and its three-dimensional model is constructed in SolidWorks. The vibration modes of the stator are then simulated and analyzed in COMSOL. Subsequently, a Koopman discrete state-space model is established, and a model predictive controller is designed for the piezoelectric actuator to improve the control accuracy of the system. Finally, high-precision control of the piezoelectric actuator is achieved by tuning the MPC parameters using WOA. The results demonstrate that the WOA-optimized Koopman-MPC control

【收稿日期】2025-12-13

【修回日期】2026-01-21

【录用日期】2026-03-09

【基金项目】山西省基础研究计划青年项目(202303021222112); 教育部重点实验室开放基金资助项目(WNQJ202505)

【作者简介】赵美婷(2001—), 女, 硕士生, 主要从事压电驱动及控制研究。E-mail: 1367710384@qq.com。

*【通信作者】亓雪(1996—), 女, 讲师, 博士, 主要从事压电驱动及控制研究。E-mail: 20230103@nuc.edu.cn。

谭秋林(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事极端环境传感及驱动技术研究。E-mail: tanqiulin@nuc.edu.cn。

method reduces the system overshoot by 1.68% compared to that of the conventional Koopman-MPC, shortens the settling time to within 0.6 s, and exhibits superior control performance.

Key words: piezoelectric actuator; whale optimization algorithm (WOA); model predictive control (MPC); linearized control

0 引言

压电执行器由于工作精度高,响应速度快及驱动力大等优势^[1],在微机电系统、半导体以及航空航天领域中广泛应用^[2-3]。这类执行器利用压电陶瓷的逆压电效应和超声振动,将电能转变为机械能^[4-6]。由于压电执行器运行时存在压电转换、摩擦等过程,表现出强非线性和时变性,很难得到准确的数学模型^[7]。

为保证系统的控制性能,在对系统建模时需要抑制不确定性造成的不利影响。He等^[8]通过引入惩罚函数,建立了类似库仑摩擦的连续摩擦模型。Li等^[9]基于等效弹簧模型和修正库仑摩擦模型,表征定子之间的粘滑分离与粗糙接触力学特性。韩京清^[10-11]提出的自抗扰控制吸收了比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制的优点,适用于具有未知动态特性、内部和外部扰动的非线性被控对象^[12]。在应用过程中,传统自抗扰控制值存在的计算相对复杂、参数调整比较困难等问题逐渐显现出来。Qi等^[13]对压电执行器进行线性变参数(Linear Parameter-Varying, LPV)建模以近似其非线性温度依赖性,并构建极严格无源(Very Strictly Passive, VSP)LPV控制器,经试验验证,此控制器可在较高温升条件下,使压电执行器仍能维持较高转速的稳定输出。王华等^[14]设计了压电陶瓷驱动的精密定位平台,通过模糊自整定PID控制和实验修正,实现了精密驱动和定位。

本文针对压电执行器性能下降的问题,设计了Koopman-WOA-MPC模型控制器。其中,性能下降的主要原因是温漂现象,压电执行器在运行中因摩擦发热导致材料参数非线性变化,进而引起振动模式偏移与转速下降。首先,根据哈密顿原理建立了压电执行器的温度非线性模型,由于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)对非线性模型的控制效果不佳,使用Koopman进行非线性系统线性化,为MPC控制器奠定基础。然后,针对MPC控制器中需要整定的参数较多,试凑法效率较低,且容易陷入局部最优的问题,提出将鲸鱼优化算法(Whale

Optimization Algorithm, WOA)用于控制器参数整定。最后,将Koopman鲸鱼优化MPC控制方法应用于压电执行器控制中,并验证了该方法能够有效地表征温度耦合非线性模型。

1 压电执行器数学模型

1.1 工作原理

旋转型行波压电执行器由定子和动子组成,在交变电激励下,定子表面形成行波振动模式,通过接触界面的摩擦作用实现电能向机械能的能量转换^[15]。

如图1所示,定子表面是分区极化的压电陶瓷片,分为A、B两相,相位差为 90° 。向压电陶瓷施加20 kHz以上的高频交变电压,根据逆压电效应,陶瓷片会发生周期性伸缩形变,进而带动环形弹性体产生弯曲振动。对压电执行器进行模态分析,得到如图2所示的振动模式,振幅为 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

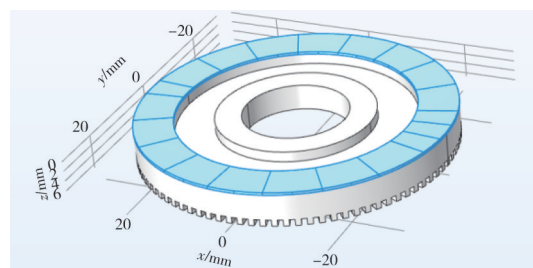


图1 压电执行器定子表面的压电陶瓷

Fig. 1 Piezoelectric ceramic on stator surface of actuator

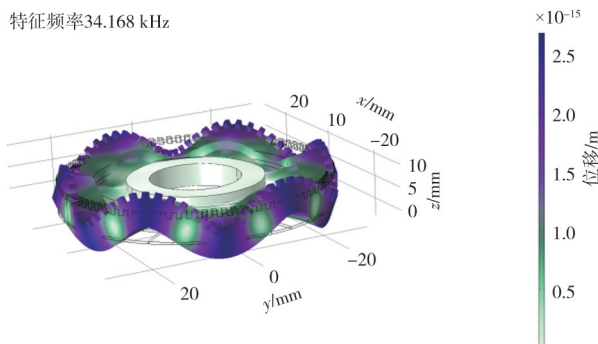


图2 压电执行器振动模式

Fig. 2 Vibration mode of piezoelectric actuator

对A、B两相压电陶瓷分别施加相位差为 90° 的同频交变电压,在环形定子上激发两个空间相

位差为 90° 的驻波。根据波的叠加原理,两个驻波会合成沿定子圆周传播的行波。行波在环形定子表面传播时,定子弹性体表面的任意质点会沿定子厚度方向发生轴向振动,沿定子圆周方向发生切向振动,两者的合成运动轨迹为椭圆轨迹。

压电执行器的振动受到定子、动子故障影响,通过振幅调制模型,在振动信号中引入低频调制成分来模拟定子和动子的磨损故障。胥永刚等^[16]提出故障特征频率多呈现基础频率倍的规律;Pietrzakowski^[17]利用实验证实了压电执行器摩擦故障会引发多阶谐波调制,动子接触界面的粘滑特性变化会产生 3 倍及以上基础频率的调制成分。于是,本文将定子磨损故障通过 2 倍转动频率(压电执行器的转动频率为 2 Hz)的调制频率和 0.6 的调制深度来模拟,动子摩擦故障则通过 3 倍转动频率的调制频率和 0.8 的调制深度来模拟,其不同状态下的振动信号时域对比如图 3 所示。由图 3 可知,定子和动子发生故障后,其振幅会有所下降,最终导致压电执行器运行状态发生偏移,减少器件寿命。

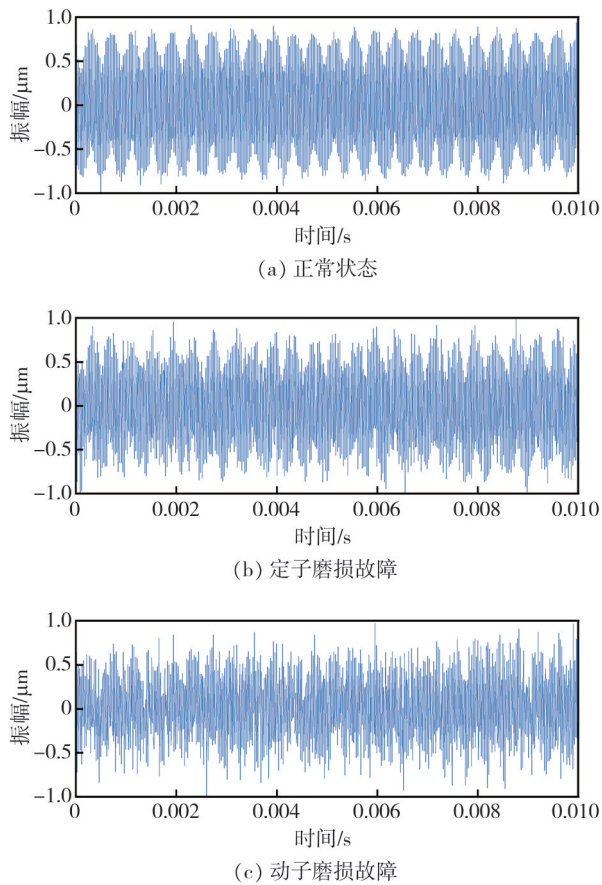


图 3 不同状态下压电执行器振动信号对比

Fig. 3 Vibration signal comparison under different conditions

1.2 温度耦合的非线性模型

当压电执行器运行时,动子摩擦导致温度升高,引发材料参数非线性偏移,最终致使压电执行器的输出发生偏移,以此建立压电执行器温度耦合的机电非线性模型。

压电执行器的机电耦合特性由弹性柔顺系数 s^E 、压电常数 d 、介电常数 ϵ^X 共同决定,三者均呈现显著温度依赖性。

$$s^E = s_{RM} + s_1 \Delta T + s_2 \Delta T^2, \quad (1)$$

$$d = d_{RM} + d_1 \Delta T + d_2 \Delta T^2, \quad (2)$$

$$\epsilon^X = \epsilon_{RM} + \epsilon_1 \Delta T + \epsilon_2 \Delta T^2, \quad (3)$$

式中: s_{RM} 、 d_{RM} 、 ϵ_{RM} 分别为弹性模量、压电常数以及室温下的介电常数; s_1 、 s_2 、 d_1 、 d_2 、 ϵ_1 、 ϵ_2 为基于 IEEE 标准对弹性系数、压电系数和介电常数进行温度依赖性修正的多项式系数^[18]。

基于哈密顿原理,将温度耦合的参数代入压电执行器机电耦合动力学方程,得到含温度项的非线性动态模型,用来描述定子振动响应的机械动力学方程为

$$M\ddot{p} + D\dot{p} + K(\Delta T)p = \Theta(\Delta T)v + F_L, \quad (4)$$

式中: $K(\Delta T)$ 为机械刚度,由温度耦合的 s_{11}^E 求积分得到; $\Theta(\Delta T)$ 为机电耦合系数,由温度化的 d_{31} 求积分得到; M 为定子等效质量; D 为等效阻尼; F_L 为负载力。

针对压电执行器因摩擦温升引发的材料参数非线性偏移问题,本文建立了考虑弹性柔顺系数、压电常数和介电常数的温度耦合非线性模型,并基于哈密顿原理推导了含温度项的动力学方程。

2 控制器设计

2.1 Koopman 线性化模型构建

压电执行器的温度-转速耦合特性呈现强非线性,直接建模难度大。Koopman 算子通过引入高维特征空间,将非线性系统的演化过程转化为线性映射,可为后续 MPC 控制提供可靠的线性模型基础。

本文将包含温升、弹性柔顺系数、压电常数、介电常数、驱动频率、定子振幅、转速 7 维状态 of Koopman 线性模型扩展为含驱动电压输入的状态空间模型,为 MPC 提供线性控制基础。

2.1.1 基础 Koopman 模型

基于压电执行器转速信号辨识得到多维 Koopman

转移矩阵 $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 原始Koopman线性化模型为

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{K}\mathbf{x}_k, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kN}]^T$ 为第 k 时刻 Koopman 状态向量, 当 N 为 7 时, $\mathbf{K}$ 矩阵为

$$\begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{17} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{71} & \cdots & K_{77} \end{bmatrix}。$$

2.1.2 含控制输入的模型扩展

为适配控制需求, 引入压电执行器的核心控制输入驱动电压 u_k 作为控制变量, 将Koopman模型扩展为离散时间状态空间模型,

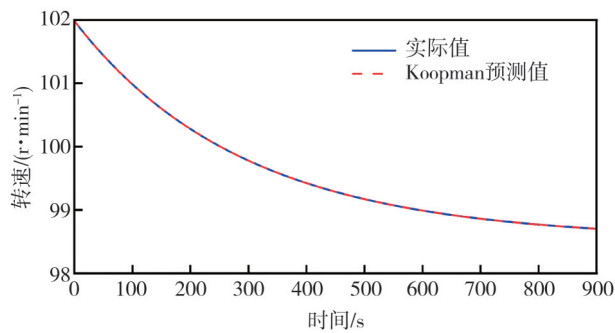
$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}u_k, \\ y_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}u_k, \end{cases} \quad (6)$$

式中: y_k 为系统输出; $\mathbf{A}$ 为状态转移矩阵, 本文将Koopman转移矩阵 $\mathbf{K}$ 作为状态转移矩阵 $\mathbf{A}$; $\mathbf{B}$ 为输入矩阵, 表示状态向量对系统输出结果的影响力, $\mathbf{B} = [b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7]^T$; $\mathbf{C}$ 为输出矩阵, 表示状态到输出的映射, $\mathbf{C} = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7]^T$; $\mathbf{D}$ 为直接传输矩阵, 表示输入到输出的直接映射, $\mathbf{D} = [d_1]$ 。

该模型为后续 MPC 控制器设计提供了统一的线性化基础, 其核心优势在于保留了压电执行器非线性特性的本质, 同时具备线性系统的易控性。

2.1.3 Koopman模型预测验证

基于温度耦合的非线性模型, 仿真得到压电执行器由于温升而导致转速下降的数据, 并使用构建的Koopman线性化模型进行预测, 通过对比预测值与实际值的偏差, 验证此线性化模型对压电执行器转速状态的表征能力, 预测结果如图4所示。



(a) 预测结果

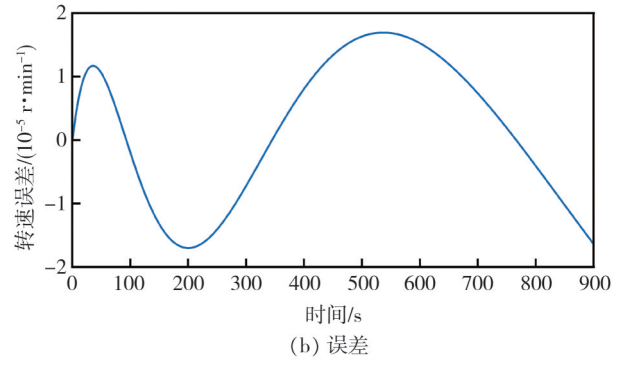


图4 无负载时预测结果及误差

Fig. 4 Prediction results and error under no-load condition

本文通过平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE)、平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 和决定系数 (R^2) 4 个指标来评价模型的预测效果。表1为0.2~1 N负载下的预测误差指标。

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i - \hat{y}_i|, \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\%, \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}. \quad (10)$$

表1 不同负载扭矩下的预测误差指标

Tab. 1 Prediction error metrics under different load torques

负载/N	MAE/ 10^{-5}	RMSE/ 10^{-5}	MAPE/ $10^{-5}\%$	R^2
0.2	1.022 4	1.149 6	1.092 7	0.98
0.4	1.026 3	1.155 2	1.172 0	0.97
0.6	1.028 8	1.158 6	1.261 3	0.99
0.8	1.021 2	1.148 0	1.351 3	0.98
1.0	1.045 5	1.182 0	1.503 2	1.00

预测结果表明, Koopman 模型对定子转速的预测曲线与实际曲线趋势高度一致, 误差幅值保持在较小范围, 验证了所构建的线性化模型能够准确表征压电执行器的非线性动力学演化特性, 为后续 MPC 控制提供了可靠的模型基础。

2.2 Koopman-WOA-MPC 模型

基于Koopman模型和WOA优化参数, 通过滚动时域优化实现压电执行器转速的高精度、约束化控制。

2.2.1 MPC 模型

MPC 是一种基于动态模型的前馈-反馈复合控制策略,核心思想是通过滚动时域优化(Receding Horizon Optimization, RHO)实现多变量系统的闭环最优控制^[19],其结构如图 5 所示。

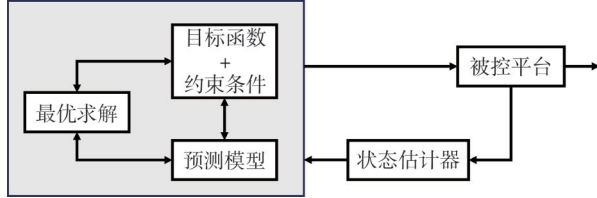


图 5 MPC 结构图

Fig. 5 Structure of MPC

MPC 模型包括系统动态模型、代价函数和约束条件。系统动态模型用于预测未来时域内的状态演化;目标函数用于衡量系统性能,如跟踪误差、控制输入变化量等;约束条件确保系统在安全范围内运行,如输入约束、状态约束和输出约束^[20]。

1) 动态模型

MPC 依赖系统的动态模型预测未来时域内的状态演化。对于离散时间系统,其状态空间模型可用 Koopman 线性化后的离散时间状态空间模型式(6)表示。

2) 目标函数

典型目标函数形式为^[21]

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|e_{\varphi}(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i|k)\|_R^2 + \rho \epsilon^2, \quad (11)$$

式中:第 1 项为跟踪误差项,表示系统输出与期望参考信号之间的偏差; $e_{\varphi}(k+i|k)$ 表示在时刻 k , 基于当前状态预测未来 $k+i$ 时刻系统输出与参考轨迹之间的偏差; Q 和 R 分别为输出权重和输入变化率权重,分别用于惩罚输出跟踪误差和控制输入变化量,在压电执行器的控制中,较大的 R 可有效减少扭矩波动,延长设备寿命; N_p 为预测时域; N_c 为控制时域($N_c \leq N_p$); $\rho \epsilon^2$ 为松弛因子项, ϵ 为松弛变量, ρ 为其权重系数。

3) 约束设计

MPC 通过显式处理约束条件确保系统安全性,约束式为^[22]

$$u_{\min} \leq u(k+i|k) \leq u_{\max}, \quad (12)$$

$$x_{\min} \leq x(k+i|k) \leq x_{\max}, \quad (13)$$

$$\Delta u_{\min} \leq u(k+i|k) - u(k+i-1|k) \leq \Delta u_{\max}, \quad (14)$$

2.2.2 WOA 参数寻优

WOA 是一种模拟鲸鱼捕猎行为的元启发式算法,可以解决 MPC 控制器参数传统试凑法效率低且易陷入局部最优的问题,主要包括猎物围捕、气泡网攻击和随机搜索 3 个阶段。

第 1 个阶段是围捕猎物,鲸鱼向着目标猎物靠近,数学模型为

$$P = |GY^*(t) - Y(t)|, \quad (15)$$

$$Y(t+1) = Y^*(t) - VP, \quad (16)$$

式中: P 为鲸鱼和猎物之间的距离向量; $Y^*(t)$ 为群体当前位置向量; $Y(t)$ 为最优位置向量; t 为迭代次数; V 、 G 为位置系数向量,定义为

$$V = 2ar_1 - a, \quad (17)$$

$$G = 2r_2, \quad (18)$$

式中: r_1 和 r_2 分别为 $[0, 1]$ 内的随机向量; a 随着迭代次数线性递减。

第 2 个阶段是气泡网攻击,鲸鱼以螺旋路径更新位置,模拟气泡网收缩为

$$Y(t+1) = \begin{cases} Y^*(t) - VP, & p < 0.5, \\ P'e^{bl} \cos(2\pi l) + Y^*(t), & p \geq 0.5, \end{cases} \quad (19)$$

式中: P' 为当前鲸鱼和猎物间的距离向量; b 为限定螺旋线的常数; l 为 $[-1, 1]$ 间的随机数。在不断优化过程中,为了模拟鲸鱼在沿着螺旋线包围同时收缩包围的路径向猎物靠近,设置更新概率 p 均为 0.5。

第 3 个阶段是搜索猎物,若 $|V| \geq 1$, 鲸鱼随机选择个体进行全局搜索,

$$Y(t+1) = Y_{\text{rand}} - VP_{\text{rand}}, \quad (20)$$

式中: Y_{rand} 为从当前座头鲸种群中随机选择的一个位置向量(即随机鲸鱼个体); P_{rand} 为当前鲸鱼个体与随机选择的鲸鱼个体之间的距离向量。图 6 所示为鲸鱼优化算法的流程图。

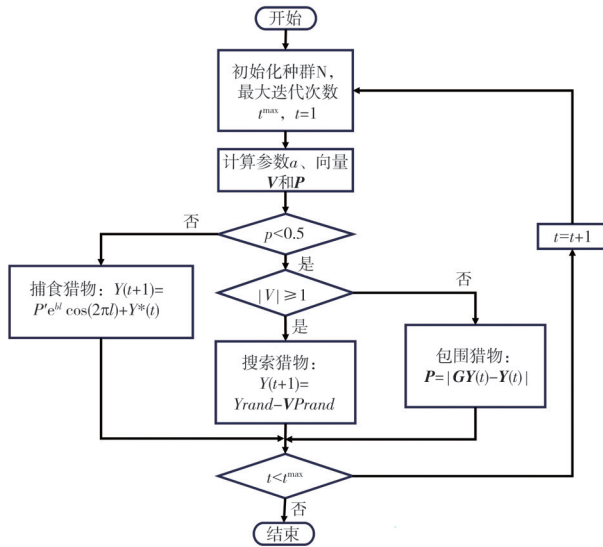


图6 WOA优化流程图

Fig. 6 Flowchart of WOA optimization

2.2.3 Koopman-WOA-MPC模型

Koopman-WOA-MPC模型系统框图如图7所示。

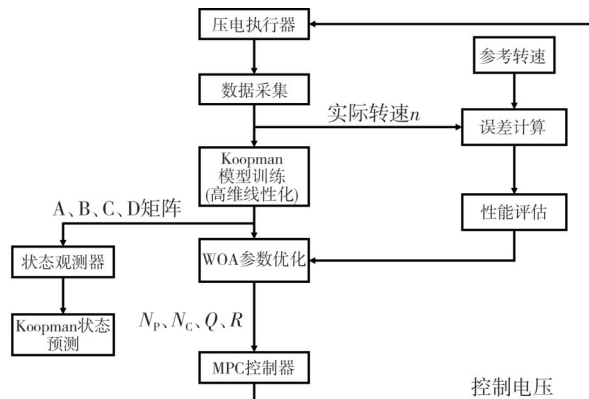


图7 Koopman-WOA-MPC模型系统框图

Fig. 7 System block diagram of Koopman-WOA-MPC model

在上述流程中, Koopman算子可通过深度挖掘多源数据的时空特征实现高精度长期预测与非线性系统线性化建模, WOA可以精准得到MPC控制器的最优参数, 而MPC能够基于实时数据滚动优化动态校正预测误差, 三者协同实现了压电执行器中“预测-优化-反馈”的闭环控制。

3 压电执行器控制仿真分析

为了更直观地验证Koopman线性化建模-WOA优化MPC控制策略的效果, 采用Koopman-MPC控制方法与之对比。Koopman中A矩阵使用状态转移矩阵K, K基于压电执行器温度耦合非线性模型的

仿真数据辨识得到。通过动态模式分解方法对多工况仿真数据进行分析, 提取出反映系统非线性演化特性的线性映射矩阵元素如下: $K_{11}=0.9997$, $K_{17}=0.0001$, $K_{55}=1$, $K_{77}=0.9993$, 其余均为0。B矩阵中元素为 $b_1=0$, $b_2=0$, $b_3=0$, $b_4=0$, $b_5=5.05 \times 10^{-5}$, $b_6=5.05 \times 10^{-5}$, $b_7=5.05 \times 10^{-4}$ 。C矩阵中选择的输出为压电执行器的转速, 所以 $c_7=1$, 其余均为0。由于压电执行器具有动态延迟特性, 所以D矩阵中 $d_1=0$ 。WOA中的相关参数设置为: 鲸鱼种群大小为20, 最大迭代次数为30, 搜索维度为7, 收敛参数a从2线性递减到0, 螺旋常数 $b=1$, 更新频率 $p=0.5$ 。MPC控制器采用的参数设置为: 预测时域 N_p 优化范围为[10,30], 最终取值为17; 控制时域 N_c 优化范围为[3,8], 最终取值为5; 输出权重Q优化范围为[50,200], 最终取值为125.5; 输入变化率权重R优化范围为[0.01,0.5], 最终取值为0.125。系统仿真所采用的压电执行器参数为: 驱动频率为40~45 kHz, 额定转速100 r/min, 最大转速150 r/min, 额定扭矩0.5 N·m, 最大扭矩1 N·m, 额定功率5 W, 最大功率10 W。

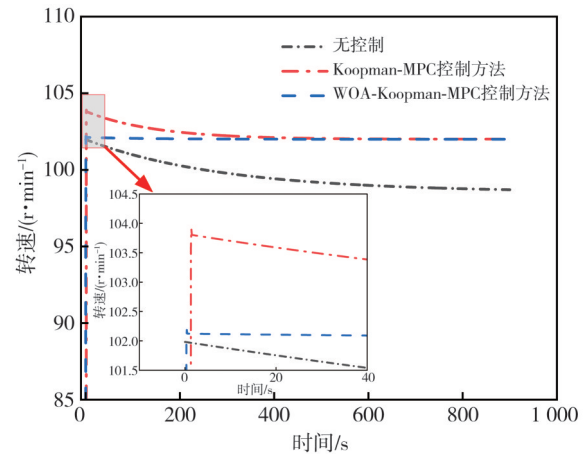


图8 压电执行器在无负载扭矩时的控制结果

Fig. 8 Control performance of piezoelectric actuator under no-load torque condition

在无负载施加和无控制器控制时, 如图8所示, 转速在900 s内由101.9 r/min下降至98.7 r/min, 而采用Koopman线性化建模WOA优化MPC控制策略后, 转速相对稳定在102 r/min, 与无控制器和Koopman-MPC控制方法相比, 超调减少了1.68%, 上升时间最短。当施加的负载转矩为0.5 N·m时, 如图9所示, 转速从初始的86.98 r/min下降到83.7 r/min, 采用所提出的控制器后, 转速能保持在86.88 r/min。图10展示了负载转矩为1 N·m时的结果, 在无控制的情况

下,转速从 71.98 r/min 下降到 68.7 r/min,采用本文所提出的控制策略后,可以使其转速保持在 72 r/min。压电执行器在运行过程中,转速要高度匹配其输入特性,防止超调量过大引起压电执行器损坏。显然,采用 Koopman-WOA-MPC 控制器的稳定性要高于采用 Koopman-MPC 控制器的稳定速性,且损耗更低。

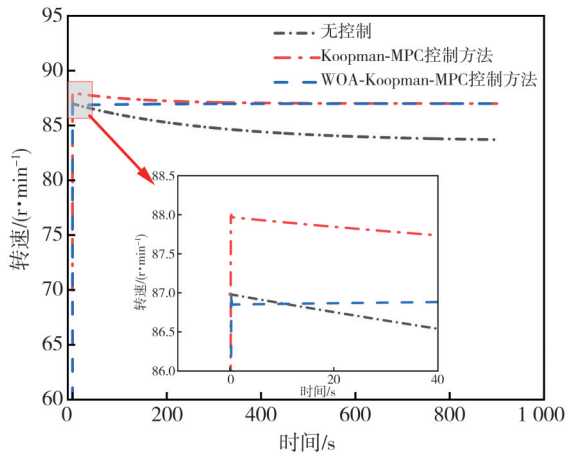


图 9 压电执行器在负载扭矩为 0.5 N·m 时的控制结果

Fig. 9 Control performance of piezoelectric actuator under a load torque of 0.5 N·m

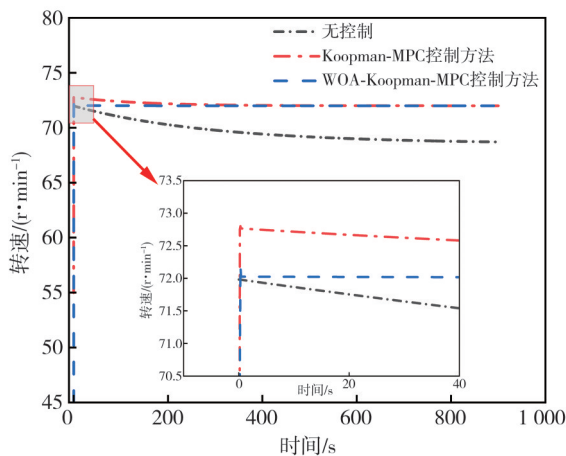


图 10 压电执行器在负载扭矩为 1 N·m 时的控制结果

Fig. 10 Control performance of piezoelectric actuator under a load torque of 1 N·m

4 结 论

针对压电执行器由于温漂产生转速下降的问题,设计了 Koopman-WOA-MPC 控制系统。该控制系统解决了非线性系统不易建模、MPC 对于非线性系统控制精度低的问题,并且利用 WOA 整定 MPC 参数,避免了传统试凑法效率低且易陷入局部最优的问题。结果表明,本研究提出的方法可有效适用于压电执行器非线性系统的控

制中。

未来工作将聚焦于降低算法计算复杂度以增强实时性,并在实际实验平台上验证该方法的鲁棒性。此外,将进一步探索多物理场耦合建模与状态监控一体化控制策略。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] Mohith S, Upadhyaya 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.
- [2] 彭洪涛, 凌杰, 李成刚, 等. 基于 J-A 模型的压电双晶片执行器非线性建模及验证[J]. 压电与声光, 2025, 47(1): 142-147.
Peng Hongtao, Ling Jie, Li Chenggang, et al. Nonlinear modeling and verification of piezoelectric bimorph actuator based on Jiles-Atherton model [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2025, 47(1): 142-147. (in Chinese)
- [3] 孟莹, 薛春霞, 王勋. 压电材料圆形板热弹耦合作用下的主共振[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 495-502.
Meng Ying, Xue Chunxia, Wang Xun. Principal resonance of piezoelectric material circular plates under thermoelastic coupling [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 495-502. (in Chinese)
- [4] Storck H, Littmann W, Wallaschek J, et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors [J]. Ultrasonics, 2002, 40(1/2/3/4/5/6/7/8): 379-383.
- [5] Olofsson J, Lindberg F, Johansson S, et al. On the role of tribofilm formation on the alumina drive components of an ultrasonic motor [J]. Wear, 2009, 267(5/6/7/8): 1295-1300.
- [6] Zhang Y, Fu Y, Hua X, et al. Wear debris of friction materials for linear standing-wave ultrasonic motors: Theory and experiments [J]. Wear, 2020, 448/449: 203216.
- [7] Wang G, Song J, Zhao G, et al. Improving output performance of ultrasonic motor by coating MoS₂ on the stator [J]. Tribology International, 2023, 186: 108608.

- [8] He Y, Yao Z, Dai S, et al. Hybrid simulation for dynamic responses and performance estimation of linear ultrasonic motors [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 153/154: 219-229.
- [9] Li X, Kan C, Cheng Y, et al. Performance evaluation of a bimodal standing-wave ultrasonic motor considering nonlinear electroelasticity: modeling and experimental validation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 141: 106475.
- [10] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19-23.
Han Jingqing. Auto-disturbance-rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23. (in Chinese)
- [11] Han J. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [12] Zhang D, Yao X, Wu Q, et al. ADRC based control for a class of input time delay systems [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(6): 1210-1220.
- [13] Qi X, Shi W, Wang S, et al. Compensating nonlinear temperature dependence of ultrasonic motor [J]. *Ultrasonics*, 2021, 117: 106522.
- [14] 王华, 张宪民, 邓俊广. 基于压电陶瓷驱动的精确定位平台研究[J]. *测试技术学报*, 2007, 21(4): 295-300.
Wang Hua, Zhang Xianmin, Deng Junguang. Research on a precision positioning stage based on piezoelectric actuators [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2007, 21(4): 295-300. (in Chinese)
- [15] 陈建毅, 林星陵, 吴庆勇. 多自由度超声电机的研究进展[J]. *微电机*, 2023, 56(9): 54-60.
Chen Jianyi, Lin Xingling, Wu Qingyong. Research progress of multi-degree-of-freedom ultrasonic motor [J]. *Micromotors*, 2023, 56(9): 54-60. (in Chinese)
- [16] 胥永刚, 孟志鹏, 陆明, 等. 基于双树复小波和奇异差分谱的齿轮故障诊断研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(1): 11-16.
Xu Yonggang, Meng Zhipeng, Lu Ming, et al. Gear fault diagnosis based on dual-tree complex wavelet transform and singular value difference spectrum [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(1): 11-16. (in Chinese)
- [17] Pietrzakowski M. Effects of piezoactuator failure on active control of beam vibration [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. ASME Digital Collection, 2012: 847-852.
- [18] IEEE standards on piezoelectricity [EB/OL]. (1988-12-31) [2026-01-19]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/26560>.
- [19] 王南勤, 刘泽辰, 张伟, 等. 基于模型预测控制的含新能源多阶段 AVC 优化策略[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(7): 118-126.
Wang Nanqin, Liu Zechen, Zhang Wei, et al. Multi-stage AVC optimization strategy with new energy based on model predictive control [J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(7): 118-126. (in Chinese)
- [20] 石蓉, 王雪妍, 陆鑫, 等. 基于改进聚类算法的清洁能源互联网源网荷储协调控制研究[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(7): 134-139.
Shi Rong, Wang Xueyan, Lu Xin, et al. A study on the load and storage coordination control of clean energy Internet source network based on improved clustering algorithm [J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2023, 39(7): 134-139. (in Chinese)
- [21] 侯旭桐, 季亮, 刘舒, 等. 基于双层优化模型的能源互联网自愈及优化运行策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(23): 9-18.
Hou Xutong, Ji Liang, Liu Shu, et al. Self-healing and optimal operation strategy of the energy Internet based on a bi-level optimization model [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(23): 9-18. (in Chinese)
- [22] 吴建旭, 于永进. 基于改进和声搜索算法的多目标配电网重构优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(19): 78-86.
Wu Jianxu, Yu Yongjin. Multi-objective distribution network reconfiguration optimization based on an improved harmony search algorithm [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(19): 78-86. (in Chinese)