

低频大位移多工作模式压电直线驱动器非线性迟滞控制及实验研究

李冲* 栢新 童玉健 方记文

江苏科技大学机械工程学院,镇江,212100

摘要:提出具有低频、大位移和高负载特性的压电直线驱动器,实现三种行程工作模式,能够满足不同工况的需要。分析了压电驱动器的工作原理和不同负载下的位移放大倍数。针对压电驱动器存在的迟滞非线性现象,建立了一种改进的迟滞非线性模型,该模型以PI为基础,通过遗传算法优化的反向传播神经网络(GA-BP)进行改进。建立了GA-BP前馈模糊自整定PID复合控制系统,开展了压电直线驱动器的迟滞非线性补偿实验。结果表明:两压电叠堆同时工作时压电驱动器的最大输出位移为558.3 μm ,正弦信号下轨迹跟踪的最大相对误差为0.0573 μm 。实施改进的控制策略有效提高了系统的性能,使得轨迹跟踪控制精度可达97%,延迟时间缩短至2 ms以内,并能在60 ms内实现控制反应。该策略不仅提高了系统响应的速度,还将稳态误差减小到0.09%以下,验证了压电驱动器的快速响应与低稳态误差的性能。

关键词:压电驱动器;大位移;迟滞;非线性模型;控制系统

中图分类号:TH139

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Nonlinear Hysteresis Control and Experimental Study of Low-frequency Large Displacement Multi-mode Piezoelectric Linear Actuators

LI Chong* BAI Xin TONG Yujian FANG Jiwen

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, 212100

Abstract: A piezoelectric linear actuator featuring low frequency, large displacement, and high-load characteristics was proposed, capable of operating in three modes to accommodate a variety of operational conditions. The working principle of the actuators and the displacement amplification under different loads were analyzed. For the hysteresis nonlinear phenomenon of the piezoelectric actuators, an improved hysteresis nonlinearity model was developed, which was based on PI and enhanced through a genetic algorithm optimized backpropagation neural network(GA-BP). A GA-BP feedforward fuzzy self-tuning PID compound control system was established, and the hysteresis nonlinear compensation experiments of the actuators were carried out. Results show that the maximum output displacement of the actuators is as 558.3 μm when two piezoelectric stacks are working simultaneously, and the maximum relative error of trajectory tracking is as 0.0573 μm under sinusoidal signals. The implementation of the improved control strategy effectively enhances the performance of the systems, resulting in a trajectory tracking control accuracy of up to 97%, a reduction of the delay time to less than 2 ms, and the ability to realize the control response within 60 ms. This strategy accelerates the system's response speed, and reduces the steady-state errors to less than 0.09%, demonstrating the capability for rapid responses and minimal steady-state errors.

Key words: piezoelectric actuator; large displacement; hysteresis; nonlinear model; control system

0 引言

迟滞现象在各个科学领域中广泛出现,包括

物理学、工程学、控制系统等多个领域^[1-3],彰显了其在科研和技术应用中的普遍影响。为了提高精密测量的准确性并降低误差,迟滞问题的控制显得尤为关键。在高精度测量要求的环境下,实现对迟滞现象的有效管理,对确保测量结果的精确性和可靠性具有决定性作用。

收稿日期:2024-04-22

基金项目:国家自然科学基金(51905228);江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目(苏教师函[2022]29号);江苏省重点研发计划(BE2022062-3)

迟滞问题在多领域中的显著影响促使大量科研人员对其展开研究。SABARIANAND 等^[4]分析了为解决滞后和蠕变等主要问题的途径,并得出广义控制解并不适用于所有类型的压电作动器。NGUYEN 等^[5]针对具有迟滞特性的压电陶瓷驱动器,提出了一种新的递推建模与控制方法,并通过实验验证了该方法的有效性和位置(位移)跟踪控制效果。JUHÁSZ 等^[6]提出了一种新的嵌入式压电叠堆致动器参数的识别方法,并给出了一种实时的迟滞补偿措施。GHAFARIRAD 等^[7]提出了一种基于复合干扰抵消器的鲁棒控制方法,实验结果表明,该方法实现了精确的微定位存在的估计干扰。压电陶瓷执行器由于其固有的非对称迟滞现象、蠕变非线性和振荡特性,通常表现出复杂的非线性行为。KHADRAOUI 等^[8]研究了微机器人系统压电驱动器的建模与控制方法,并对所提出的方法进行验证讨论。AGUIRRE 等^[9]提出了一种新的补偿策略,制定一种新的简化模型来处理非对称滞后的补偿策略,实验证明了新的补偿方法能提高精度。SALAH 等^[10]提出了一种具有滞后动态补偿的 PEAs 鲁棒输出反馈控制器,该控制器具有较强的鲁棒性。

国内学者在迟滞问题方面也进行了一系列的研究。张连生等^[11]提出了一种新的电荷泵驱动,用于减少残余迟滞现象,通过推导出校正参数,优化了传统电荷泵驱动的迟滞非线性问题,迟滞率显著降低至 0.47% 以下,相较于传统方法,提出的方法使迟滞减小了约 83%,这种改进技术在高精度测量等应用领域展现出了潜在的价值。WANG 等^[12]搭建了一种利用 Lissajous 图形来描述和补偿动态迟滞的精确模型,实验数据显示基于此模型的补偿器能够有效减少压电驱动器的动态迟滞现象。GU 等^[13]提出了一种新的类椭圆数学模型来描述压电陶瓷驱动器中的迟滞现象,实验结果表明,在低频和高频下,迟滞效应都有明显的减小。杨浩等^[14]针对传统压电陶瓷的低韧性问题开发了基于高效率压电宏纤维的 MFC 致动柔性结构,充分利用了其优越的变形能力,提出了一个双极性偏置 PI 迟滞模型来详细描述 MFC 动态偏置时的迟滞非线性现象,并对其实施了前馈补偿控制。这一新模型有效地描绘了在不同频率条件下 MFC 致动柔性结构的动态迟滞行为,并通过前馈补偿实现了柔性梁构件的振动位移与目标跟踪位移之间的高度一致性,达到了 4.62% 的线性度误差。王琴琴等^[15]针对压电叠堆作动器的迟滞特性,开发了一种新的建模方

法,这种方法基于非对称的单边反冲算子的 BP 神经网络来模拟迟滞现象。通过实验验证,该 BP 神经网络模型在处理高频、低频及混合频率下的动态行为时,相较于传统的 PI 模型,平均误差减小了 70.90% 至 89.98%,相对误差也减小了 70.69% 至 89.84%,该结果证实了提出的模型在精度和频率适应性方面的显著优势。

虽然在解决迟滞问题上已经取得了众多的科研成果,然而大多数已有成果存在响应速度慢且稳态误差大等缺点。本文针对低频大位移压电直线驱动器的非线性迟滞问题,提出了一种改进的迟滞非线性模型。

1 压电驱动器工作原理

本文提出一种低频大位移多工作模式压电直线驱动器,如图 1 所示。该压电直线驱动器综合了位移放大机构、位移输出机构以及辅助装配机构,从而达到了高精度位移控制与灵敏的负载适应性。采用的桥式结构与双级杠杆耦合系统不仅提高了设备的机械稳定性,也增加了位移操作的准确性与可重复性。利用非对称放大结构改善了垂直位移效率,保障了设备在多样化的工作环境中的性能表现。位移放大机构利用桥式和双级杠杆系统的整合作用,显著扩展了压电位移的输出范围,实现了广泛的位移调整。位移输出机构结合导轨与移动输出平台及非对称放大结构精确控制负载位移,提高了设备的适应性和灵活性。辅助装配机构包括底座、外壳、端盖和预紧螺钉,为驱动器提供了坚固的支持和保护,确保了在各种负载下的操作可靠性和系统稳定性,使得该驱动器能够满足多样化的应用需求。

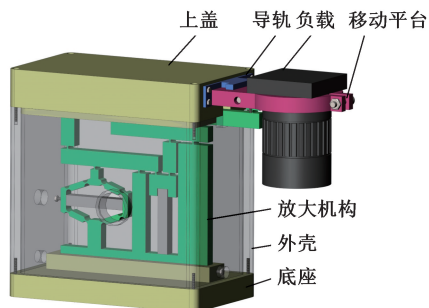


图 1 大位移压电直线驱动器结构图

Fig.1 Structure diagram of a large displacement piezoelectric linear actuator

压电驱动器的位移放大原理见图 2,基于施加的驱动电压,压电驱动器可实现三个工作模式。当仅对右侧的压电叠堆 1 施加电压时,它会发生伸长变形并产生放大位移 Δd_0 ,该位移与右侧杠杆的放大位移 Δh_0 。通过顶部的杠杆机构进行

耦合(图 2a)。相反,当仅对左侧的压电叠堆 2 施加电压,该叠堆也会伸展,经左侧的桥式结构和杠杆系统 Δd_b 放大其位移,这一位移随后被顶部的杠杆结构进一步增大(图 2b)。当电压同时施加于两个压电叠堆时,两者均会伸长,左侧桥式结构和杠杆机构放大的位移 Δd_b 与右侧杠杆的放大位移 Δh_a 通过顶部杠杆机构耦合并放大(图 2c)。

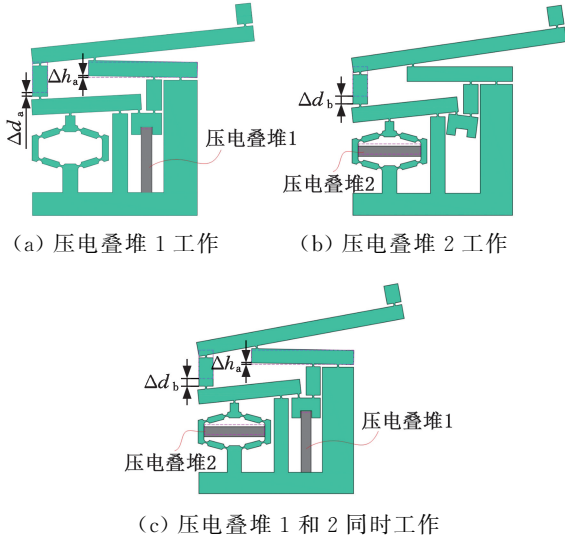


图 2 位移放大机构原理

Fig.2 Principle of displacement amplification mechanism

利用有限元计算不同负载下各工作模式的输出位移,如图 3 所示。同时,计算得到各负载下的放大倍数,如图 4 所示。右端压电叠堆 1 工作时的放大倍数大于左端压电叠堆 2 工作时的放大倍

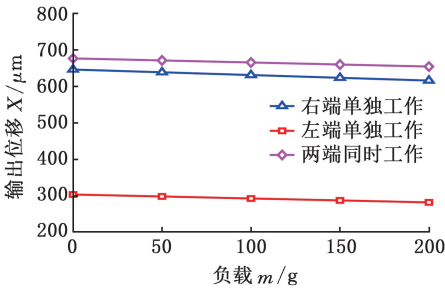


图 3 不同负载下各工作模式的输出位移

Fig.3 Output displacement of each operating mode under different loads

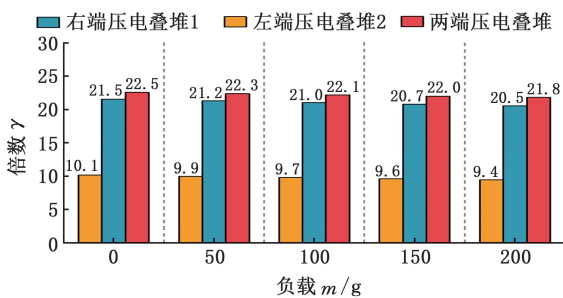


图 4 各负载下放大倍数

Fig.4 Magnification under each load

数,且两端压电叠堆同时工作时输出位移最大。无负载情况下最大放大倍数为 22.566。随着负载的增加,位移放大机构的放大倍数略微下降。

2 压电驱动器非线性建模

2.1 数据采集与预处理

为探究大位移压电驱动器的迟滞非线性现象,使用 NI 6002 采集卡发出正弦信号,经过 15 倍信号放大后,使用芯明天 MTP150/7 × 7/39.1 压电叠堆作动力单元,同时应用 LVDT 接触式电感位移传感器对放大机构尾端的位移输出进行测量。原理如图 5 所示。

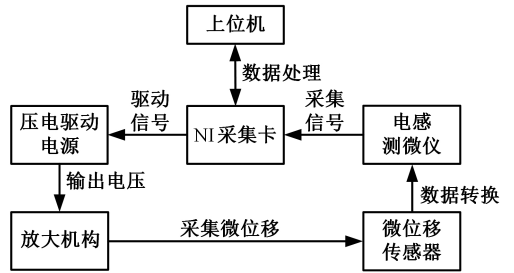


图 5 数据采集原理图

Fig.5 Schematic diagram of data acquisition

采用小波滤波对信号进行处理,小波函数的表达式为

$$wf(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: $wf(a, b)$ 为信号 $f(t)$ 在尺度 a 和位置 b 下的小波变换系数,具体表示信号 $f(t)$ 在给定的小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 上的投影; $f(t)$ 为原始信号(时域信号),它是被小波变换处理的目标函数; $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 表示小波函数 $\psi(t)$ 在时间和尺度上的变换, t 为当前时刻, a 和 b 分别为尺度因子和平移因子。

在对压电驱动器的输出信号进行处理时,采用了小波逆变换来进行信号的重构和滤波分析。相对于常规的低通滤波器,小波滤波展现了其在保持信号原始幅值和消除噪声方面的高效性。这一方法解决了低通滤波器引起的信号失真和延迟问题,突显了小波滤波在信号处理领域的优越性。小波滤波通过保持信号的基本特性和削减噪声,提高了压电驱动器输出信号的清晰度和信赖度,从而在多样化的应用场景中增强了其效果和精确度。信号采集与滤波处理结果如图 6 所示。

2.2 PI 迟滞非线性模型

通过 Preisach-Ishlinskii(PI) 模型构建了压电驱动器的迟滞模型,该模型由多个 Play 迟滞算子的加权重叠构成。

Play 迟滞算子的数学表达式为

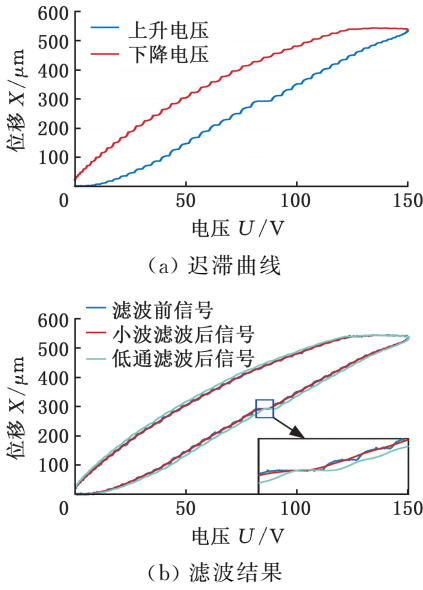


图 6 信号采集与滤波处理结果

Fig.6 Signal acquisition and filtering results

$$p(t) = H_{r,w_i}(u(t), p(t-T)) = w_i \cdot \max(u(t) - r, \min(u(t) + r, p(t-T))) \quad (2)$$

式中: H_{r,w_i} 为迟滞算子, 用于描述压电驱动器中非线性迟滞现象; $u(t)$ 为输入信号; r 为迟滞算子的阈值; T 为采样周期; p 为迟滞算子的输出; w_i 为每个算子的权重。

若干 Play 算子各自拥有独特的阈值 r , 通过线性叠加构建了 PI 迟滞模型:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n_s} H_{r,w_i}(u(t), p(t-T)) = \sum_{i=1}^{n_s} w_i \cdot \max(u(t) - r_i, \min(u(t) + r_i, p_i(t-T))) = \mathbf{W}^T \mathbf{H}_r(u(t), p(t-T)) \quad (3)$$

式中: \mathbf{W}^T 、 r_i 和 n_s 分别为权重向量的转置形式(权重用于加权不同的 Play 算子贡献)、阈值和算子总数量。

为了合理评估模型的拟合精度, 采用相对误差(RE)、均方根误差(RMSE)和最大绝对误差(MAE)作为评价模型性能的三个指标:

$$\left. \begin{aligned} E_{RE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_e} (Y - y)^2}{\sum_{i=1}^{n_e} y^2}} \\ E_{RMSE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_e} (Y - y)^2}{n_e}} \\ E_{MAE} &= \max |Y(t) - y(t)| \quad 1 \leq t \leq n_e \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: Y 为实际观测值或真实值, 是模型拟合的目标值; y 为模型预测值或计算值, 是模型根据输入变量预测的结果。

利用最小二乘递推方法确定拟合模型, 并计算出上述三个性能指标, 结果见图 7a。当算子数量超过 14 个时, 最大绝对误差变得稳定, 因此选择 15 个算子来进行模型辨识。PI 迟滞模型的拟合效果见图 7b。误差主要集中在 $-10 \sim 15 \mu\text{m}$ 范围内, 电压下降阶段的拟合精度较高, 而电压上

升阶段的拟合精度相对较低。在电压由上升转为下降的转折点处, 误差较大, 表明模型有进一步优化的可能。

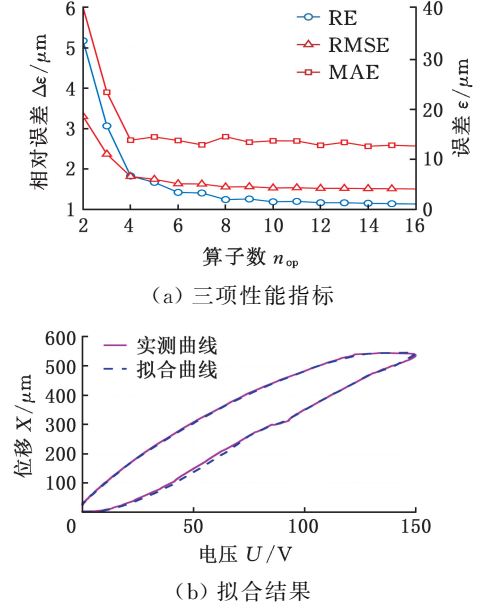


图 7 压电驱动器 PI 迟滞模型拟合结果

Fig.7 Fitting results of PI hysteresis model for piezoelectric driver

2.3 基于 PI 的改进 GA-BP 迟滞非线性模型

由图 7 可知, 由 Play 算子组合形成的模型无法完全精确地匹配真实的迟滞曲线, 因此, 通过将 BP 神经网络与 PI 迟滞模型结合来提高迟滞模型的精度。

神经网络最基本的单元是模仿神经元的处理单元结构, 经过单个神经元的作用, 输出值 y 为

$$y = f\left(\sum_{i=1}^{n_s} w_i x_i - r_y\right) \quad (5)$$

式中: f 、 x_i 分别为激励函数和输入信号; r_y 为神经元的阈值。

为了防止数值差异过大影响权值调整, 需对输入输出数据执行归一化处理。

隐藏层神经元节点数量为

$$n = \sqrt{n_{in} + n_{out}} + k \quad (6)$$

式中: n_{in} 、 n_{out} 分别为输入层和输出层神经元个数; k 为常数。

在构建前馈神经网络时, 其输出层采用线性激励函数以直接表示网络的最终输出, 而隐藏层选用 long-sigmoid 型激励函数, 有助于复杂非线性关系的处理与传递。该设计结构使得从输入层的第 i 个输入到隐藏层的第 j 个神经元的转换可以用精确的数学形式表达, 如下所示:

$$\left. \begin{aligned} b_j &= f_b\left(\sum_{i=1}^3 w_{ij} x_i - r_j\right) \\ f_b(x) &= \frac{1}{1 + e^{-x}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： b_j 为隐藏层中的第 j 个神经元的输出； w_{ij} 为权重； θ 为调整激活函数形状的因素。

在 BP 神经网络框架内，隐藏层中的第 j 个神经元到输出层的数学关系可表述如下：

$$\left. \begin{aligned} y &= g\left(\sum_{j=1}^{12} \lambda_j b_j - \theta\right) \\ g(x) &= kx + b \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： λ_j 为权重； θ 为偏置项。

BP 神经网络面临强随机性、易落入局部最小值和缓慢的收敛速度等问题，为此，使用遗传算法对 BP 神经网络进行优化。遗传算法从初始解开始，依照一定的规则进行迭代，以产生新的解决方案，直至满足既定的条件，流程如图 8 所示。此过程开始于对初始权重与阈值的联合编码，生成 m 个随机个体形成起始种群，这里的种群规模 m 设定为 200。接下来确定最大迭代次数为 80 次，设定交叉概率为 0.8 和变异概率为 0.05，运用这些遗传算法操作来识别最适应的个体。适应度函数 F_i 作为衡量个体表现的标准，通过计算拟合结果与实验结果之间的均方误差来评价个体的性能。

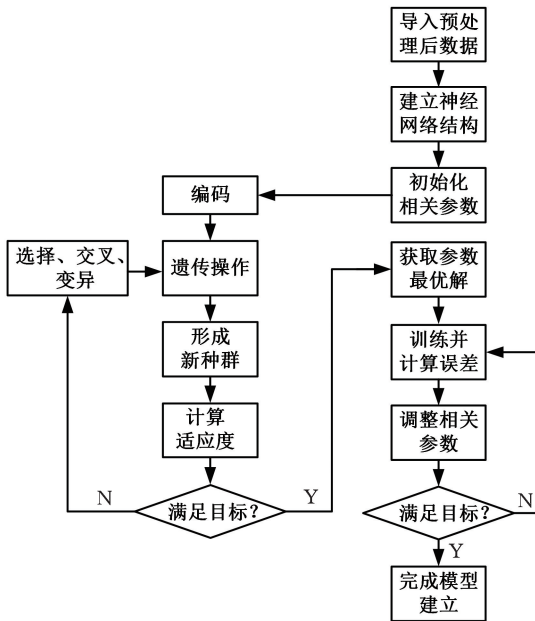
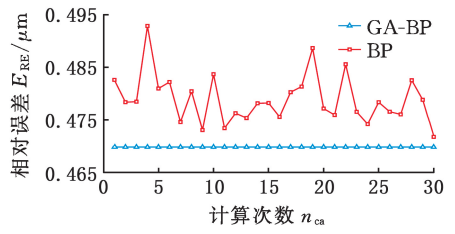


图 8 遗传算法优化的 BP 神经网络流程图

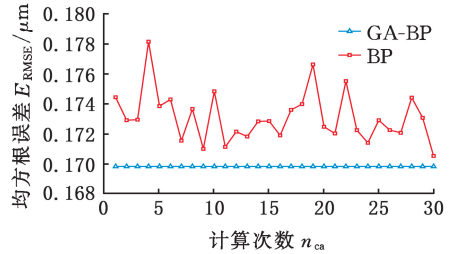
Fig.8 Flow diagram of BP neural network optimized by genetic algorithm

为了验证遗传算法对 BP 神经网络改进的有效性，分别运行 BP 和 GA-BP 神经网络进行 30 次拟合性能对比，如图 9 所示。结果表明，GA-BP 神经网络在提高神经网络的收敛效率和减少平均误差方面表现出色，并且具备逃离局部最优解、寻找全局最优解的能力，从而达到更优的拟合性能。

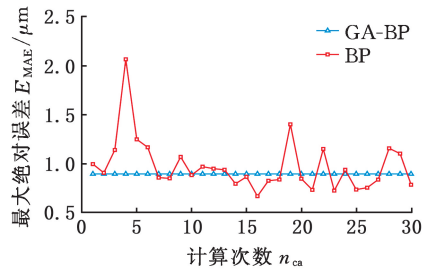
分别使用非奇对称性质 MPI 模型、径向基函数(RBF)神经网络、BP 神经网络和 GA-BP 神经



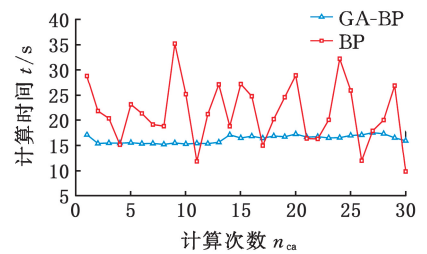
(a) 相对误差



(b) 均方根误差



(c) 最大绝对误差



(d) 计算时间

图 9 不同算法的性能比较

Fig.9 Performance comparison of different algorithms

网络算法对压电驱动器电压上升段和电压下降段进行拟合，如图 10 所示。对每种算法进行了相对误差(RE)、均方根误差(RMSE)和最大绝对误差(MAE)的计算，结果见表 1。由结果可知：GA-BP 神经网络在整体和局部误差上均显著小于前述模型，表现出更优的拟合能力。

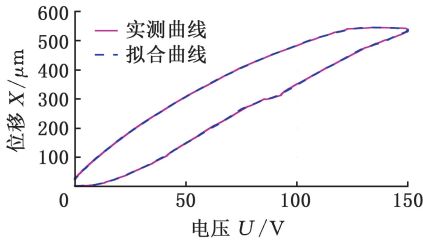
3 压电驱动器非线性控制策略

3.1 迟滞非线性逆模型求解

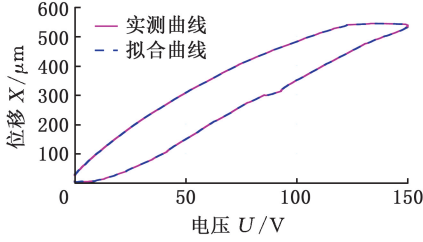
PI 逆模型的表达式与正模型的表达式基本类似，也是对迟滞算子的叠加，Play 迟滞逆运算的数学公式表示如下：

$$q(t) = \mathbf{W}^T \mathbf{H}_r^{-1}(y(t), q(t-T)) = \max(y(t) - r', \min(y(t) + r', q(t-T))) \quad (9)$$

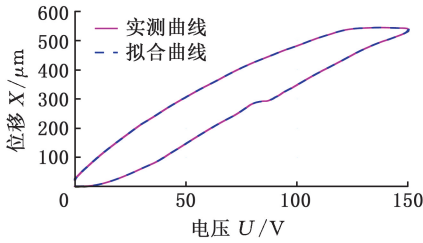
式中： $y(t)$ 为 t 时刻的输入量； r' 为逆模型的阈值； q 为迟滞算子的输出。



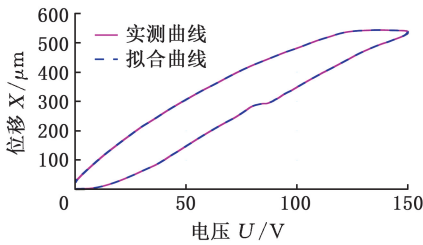
(a)MPI 模型



(b)RBF 神经网络算法



(c)BP 神经网络算法



(d)GA-BP 神经网络算法

图 10 不同算法拟合结果比较

Fig.10 Comparison of fitting results of different algorithms

表 1 各算法拟合结果

Tab.1 Fitting results of various algorithms

拟合算法	RE/%	RMSE/μm	MAE/μm
MPI 模型	0.208	0.914	3.864
RBF 神经网络	0.048	0.174	1.745
BP 神经网络	0.048	0.174	0.693
GA-BP 神经网络	0.047	0.170	0.631

通过线性组合多个 r' 的 Play 逆算子,可以形成 PI 迟滞的逆模型:

$$q(t) = \mathbf{W}^T \mathbf{H}_{r'}^{-1}(y(t), q(t-T)) = \sum_{i=1}^n w'_i \cdot \max(y(t) - r'_i, \min(y(t) + r'_i, q_i(t-T))) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{H}_{r'}^{-1}$ 为系统动态变换矩阵的逆; q_i 为第 i 个部分在时间 $t-T$ 时刻的输出量; w'_i, r'_i 分别为各个逆算子的权重和阈值。

权值和阈值表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} w'_i &= \left(-w_i / \sum_{j=1}^i w_j \right) \sum_{j=1}^{i-1} w_j \\ r'_i &= \sum_{j=1}^i w_j (r_i - r_j) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

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

式中: r_j 为不同阶段的偏移量。

3.2 模糊自适应改进 PID 控制器

为了方便控制, PID 控制器通常离散化, 表达式为

$$u(k) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \quad (12)$$

式中: K_p, T_i, T_d 和 $e(k-1)$ 分别为比例增益、积分时间常数、微分时间常数和上一时刻的误差; k, T 分别为采样序号和周期。

为了减小误差, 对积分环节的积分元进行改进:

$$\frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k \frac{e(i) + e(i-1)}{2} \quad (13)$$

采用分离法对微分环节进行改进:

$$\frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (14)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & |e(k)| > \epsilon \\ 1 & |e(k)| \leq \epsilon \end{cases} \quad (15)$$

式中: β, ϵ 分别为常系数和偏差的临界值。

改进得到的 PID 离散化表达式为

$$u(k) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k \frac{e(i) + e(i-1)}{2} + \beta \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \quad (16)$$

$k-1$ 时刻的输出控制电压表达式为

$$u(k-1) = K_p \{e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} \frac{e(i) + e(i-1)}{2} + \beta \frac{T_d}{T} [e(k-1) - e(k-2)]\} \quad (17)$$

将式(16)和式(17)相减可得

$$u(k) = u(k-1) + K_p \{e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i} \frac{e(i) + e(i-1)}{2} + \frac{T_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]\} = u(k-1) + g_0 e(k) + g_1 e(k-1) + g_2 e(k-2) \quad (18)$$

各项系数为

$$\left. \begin{aligned} g_0 &= K_p \left(1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} \right) \\ g_1 &= -K_p \left(1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{2T_d}{T} \right) \\ g_2 &= K_p \frac{T_d}{T} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

为了提高性能, 设计了一种可以自动调节

PID 控制器参数的系统。这种自适应模糊 PID 控制器融合了模糊逻辑算法和 PID 参数的自动调节功能,实现了有机整合,具体过程如图 11 所示。

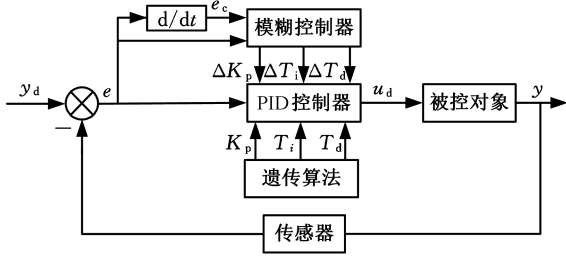


图 11 遗传算法优化的模糊 PID 控制过程

Fig.11 Fuzzy PID control process optimized by genetic algorithm

模糊控制器处理精确的输入和输出数据,而模糊逻辑控制关注的是模糊变量的处理,这要求模糊化。为了简化模糊规则并增强其易懂性,误差 e 和误差变化率 e_c 的量化范围设定在 $(-3, 3)$ 之间。同样,将 ΔK_p 、 ΔT_i 和 ΔT_d 的量化界限定为 $(-3, 3)$,并细分为七类语言变量:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB),使用三角形作为隶属度函数。利用重心法经过解模糊化才能得到 PID 参数的精确值 V :

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n M_i F_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (20)$$

式中: M 、 F 分别为隶属度和模糊量化值。

3.3 复合控制及仿真

整合前馈和反馈控制方法,初始阶段利用前馈控制器补偿迟滞非线性效应,随后通过反馈控制器修正模型误差和外部干扰,构建了图 12 所示的复合控制方案。

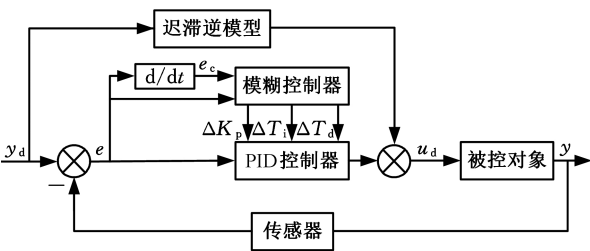


图 12 复合控制原理

Fig.12 Composite control principle

为了验证上述复合控制方案,对各控制方案的结果进行了对比,如图 13 所示。在仅仅使用前馈控制时,系统由于结构弹性可能在阶跃信号下产生振荡,约 0.23 s 后稳定。前馈-PID 系统达到稳态所需时间大概为 0.11 s,前馈-模糊 PID 系统则需约 0.08 s。在实现设定位移的过程中,前

馈-PID 可能会振荡,而前馈-模糊 PID 系统未见振荡现象。面临干扰时,前馈控制的超调率为 26.59%,与之相比,前馈-PID 和前馈-模糊 PID 系统的超调率分别减至 10.11% 和 8.34%。

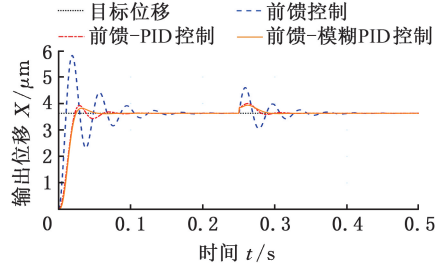


图 13 不同控制方案下输出位移响应

Fig.13 Output displacement response under different control schemes

为加快系统反应速率,实施了针对模糊 PID 控制器的 K_p 、 T_i 和 T_d 参数的遗传算法离线优化,采用以下适应度函数:

$$F_{\text{fit}} = 1 - \frac{1}{\int_0^{\infty} t_0 t |e(t)| dt} \quad (21)$$

式中: t_0 、 e 分别为响应时间和系统误差。

经过优化,得到 K_p 为 0.991,积分系数 T_i 为 77.013,微分系数 T_d 为 0.0140。将优化后的初始参数配置入控制系统中,得到图 14 所示结果。

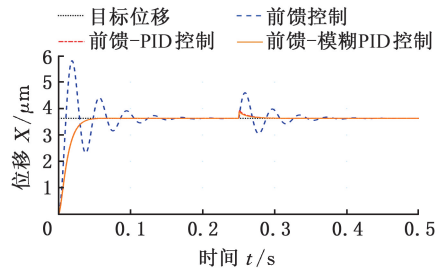
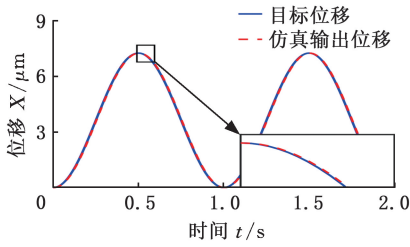


图 14 参数离线优化后各控制方案的结果对比

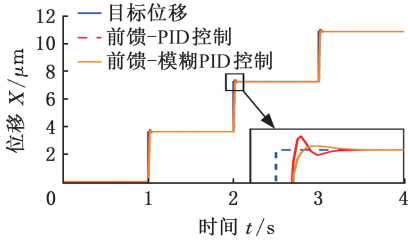
Fig.14 Comparison of the results of each control scheme after offline parameter optimization

由图 14 分析可见,前馈-PID 控制与前馈-模糊 PID 控制在阶跃信号响应上几乎相同,响应时间约为 0.05s,无超调现象,接近目标的过程非常平稳。面对干扰,前馈-PID 与前馈-模糊 PID 系统的超调率分别为 8.17% 与 6.69%。这显示了前馈-模糊 PID 系统快速响应和较小超调率的能力,突出其优异的抗干扰性能。

对控制系统开展跟踪模拟,使用正弦信号和步进微位移作为输入进行模拟跟踪。如图 15 所示,正弦信号的最大相对误差为 0.0573 μm ,平均相对误差为 0.0318 μm ,表明该控制系统具有优秀的跟踪能力。步进微位移的响应时间仅为 0.076 s,定位误差极小,表明前馈-模糊 PID 控制具有快速的响应和高精度的定位特性。



(a) 正弦波跟随仿真



(b) 步进输出位移

图 15 控制系统仿真结果

Fig. 15 Simulation results of the control system

4 压电驱动器迟滞非线性补偿实验

4.1 轨迹跟踪实验

图 16 给出了压电驱动镜头微位移控制实验系统,包含了关键部件,包括主机、压电驱动电源、压电位移放大装置、NI 数据采集卡、感应式微位移传感器和 LVDT 电感测量仪。该系统的协调运作保障了微位移操作的高精度和稳定性。通过 LabVIEW 和 MATLAB 开发的控制平台,实现了主机与数据采集卡间的串口通信,从而控制了压电驱动电源的电压和功率放大过程。此外, LVDT 电感式位移传感器可以将测得的微位移转化为电信号,并传输至数据采集卡,完成控制流程的闭环。

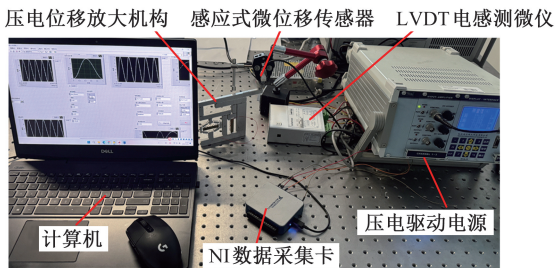


图 16 实验测试平台

Fig. 16 Experimental test platform

通过计算机生成的正弦波信号驱动压电叠堆进行路径跟踪测试,信号在放大 15 倍之后,其最大幅值达到了 150 V。考虑到压电驱动器主要在低频范围内操作,测试仅展示了 1~3 Hz 的控制效果。另外本文通过实验测出压电位移放大机构的一阶固有频率为 55.41 Hz,不存在达到谐振频率下的偶然性。在 1 Hz 和 2 Hz 的条件下,采用

传统的 PID 控制、PI 前馈 PID 控制、改进的 GA-BP 前馈控制以及 GA-BP 前馈 PID 模糊控制进行比较,实验结果包括位移随时间的变化、位移随电压的变化以及误差随时间的变化,结果见图 17。

在图 17a 和图 17b 中,通过对比控制曲线和理想曲线的吻合度能够判断压电驱动器的输出滞后水平。当两个压电叠堆共同工作时,驱动器的最大输出位移达到 558.3 μm 。在固定采样率下,驱动频率的升高会导致压电驱动器的输出滞后增加。在高频率条件下,使用 GA-BP 前馈-模糊 PID 控制能较好地补偿这种滞后。在图 17c 和图 17d 中,通过传统的 PID 控制、PI 前馈-PID 控制、改进的 GA-BP 前馈控制以及 GA-BP 前馈-模糊 PID 控制实现了压电驱动器的近似线性位移输出,且本文采用的 GA-BP 前馈-模糊 PID 控制效果明显优于传统 PID 控制效果。由图 17e 和图 17f 的对比分析可知,在低频范围内,误差主要源于非线性因素,而在高频范围内,滞后效应成为误差较大的主要原因。

表 2 给出了不同控制方案的平均绝对误差,可见 GA-BP 前馈-模糊 PID 控制的绝对误差最小,精度最高。随着频率的增大,控制误差增大,原因是本研究设计的压电驱动器为多级放大机构,当频率较高时,结构响应不及时,因此控制效果减弱。

4.2 动态响应实验

动态响应对压电驱动器的精度产生重要影响,本研究使用阶跃信号作为目标位移,探讨了在 150V 驱动电压条件下压电驱动器的动态反应。图 18 展示了在最大驱动电压情况下的动态反应,传统控制采用 PI 前馈加 PID 反馈控制方式,而改进策略融合了经遗传算法优化的 BP 神经网络前馈及遗传算法优化的模糊 PID 反馈控制方法。实验数据显示,该改进控制策略的输出结果与理想值最为吻合。

为探索压电驱动器在特定目标位移下的动态表现,本研究采用 400 μm 和 200 μm 作为目标位移,分析各种控制策略的动态表现,如图 19 所示。进一步,为了检验不同负载条件下的控制性能,实验中在输出端分别附加 100 g 和 200 g 砝码作为负载,并以 400 μm 为目标位移进行了测试,相关结果见图 20。通过图 19 和图 20 可知:当没有控制措施时,压电材料的迟滞属性导致系统对阶跃信号的响应存在延迟,影响了微位移系统的反应效率。前馈控制通过补偿迟滞效应来减少响应

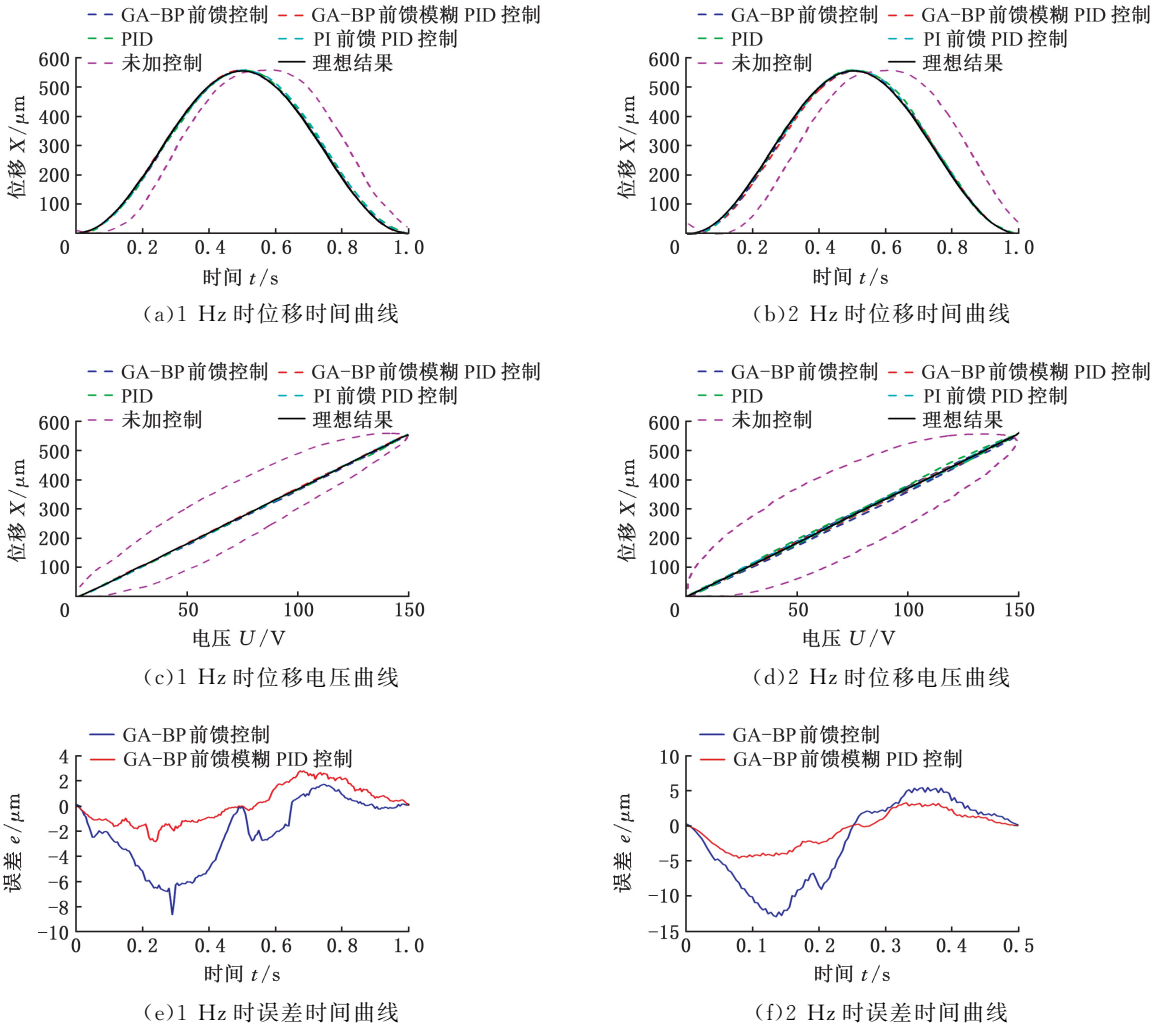


图 17 改进控制方案下压电驱动器输出特性

Fig.17 Output characteristics of piezoelectric driver under the improved control scheme

表 2 各控制策略的平均绝对误差

Tab.2 The average absolute error of each control strategy

工作时的频率	无控制状态	PID 控制	PI 前馈-PID 控制	GA-BP 前馈控制	GA-BP 前馈-模糊 PID
1 Hz	62.323	2.378	1.295	2.505	1.272
2 Hz	95.562	4.945	2.210	5.051	2.136
3 Hz	127.837	15.985	11.836	12.504	3.882

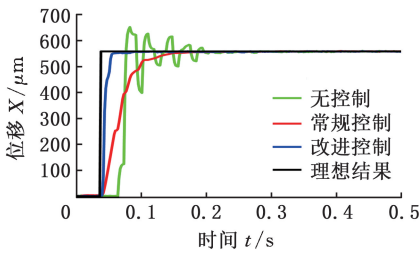
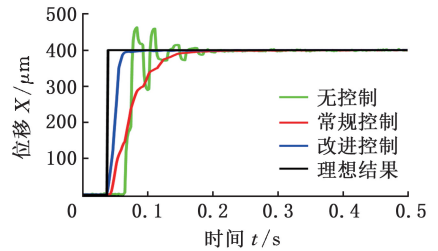
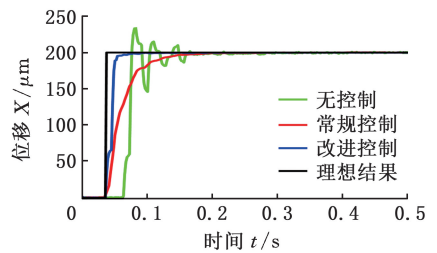


图 18 最大电压下动态响应

Fig.18 Dynamic response at maximum voltage



(a) 400 μm 期望位移



(b) 200 μm 期望位移

图 19 不同期望位移下动态响应曲线

Fig.19 Curves of dynamic response under different expected displacements

时间,而反馈控制在检测到误差时迅速通过比例调节进行调整,提高了系统的反应速度。在改进控制方案下,不同期望位移和负载下的动态响应均接近理想结果,验证了改进控制算法的优越性。

由于压电材料的非线性特征和结构动力学效应,未施加控制时系统容易出现振动。前馈控制

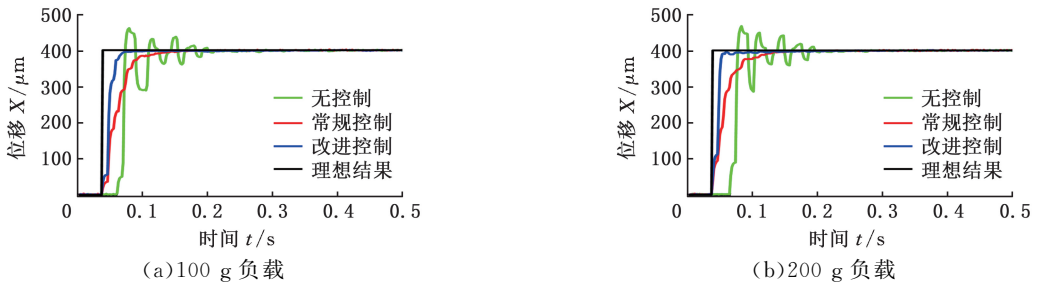


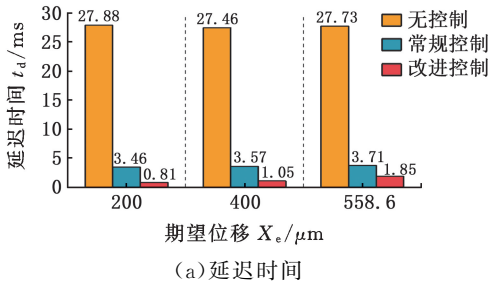
图 20 不同负载下动态响应曲线

Fig.20 Curves of dynamic response under different loads

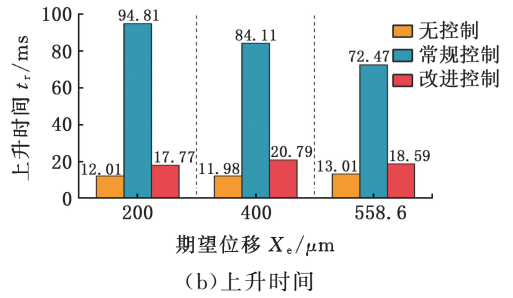
建模时考虑非线性因素和振动现象,有助于更快达到目标值并减少振动;反馈控制将非线性和振动的影响纳入误差补偿中。传统控制方法中,固定的积分系数导致小误差时难以精确达标,而PID控制性能高度依赖于参数调整,可进一步优

化。本研究的改进策略通过对迟滞非线性进行精细建模,并利用自适应反馈控制来调整剩余误差,以便快速而准确地达成目标位置。

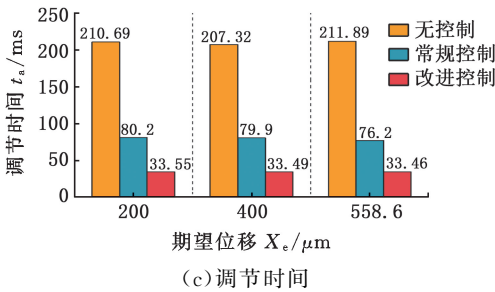
图 21 和图 22 呈现了不同目标位移与负载下各控制方案的动态反应的比较。数据显示,改进



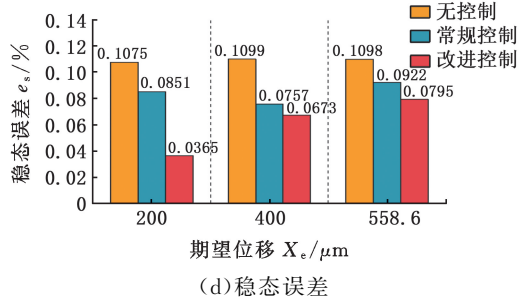
(a) 延迟时间



(b) 上升时间



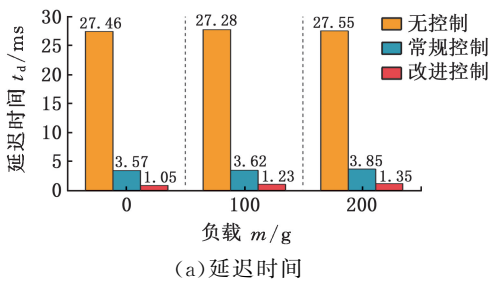
(c) 调节时间



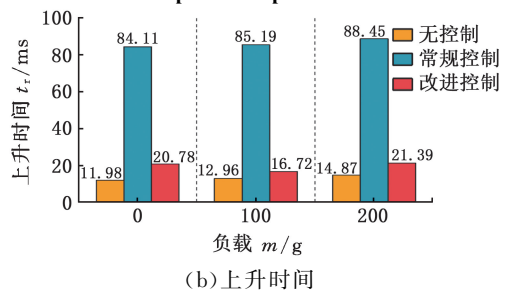
(d) 稳态误差

图 21 不同期望位移下动态响应效果比较

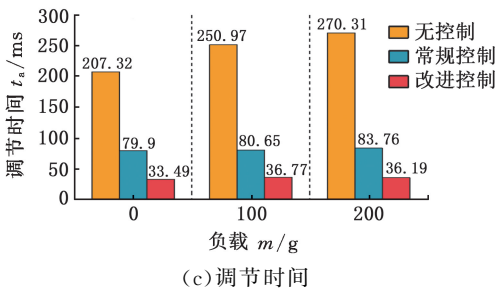
Fig.21 Comparison of dynamic response effects under different expected displacements



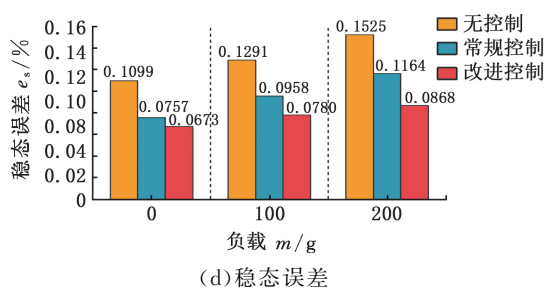
(a) 延迟时间



(b) 上升时间



(c) 调节时间



(d) 稳态误差

图 22 不同负载下动态响应效果比较

Fig.22 Comparison of dynamic response effects under different loads

的控制方案在本文中被证明能将延迟时间减至 2 ms 以内,并在 60 ms 内实现控制反应,同时将稳态误差限制在 0.09% 以下,展示了其快速响应与低稳态误差的能力。

5 结论

本文提出了一种低频大位移多工作模式压电直线驱动器,分析了压电驱动器的工作机制,并依据 PI 迟滞非线性模型,构建了一种基于 PI 的 GA-BP 改进的迟滞非线性模型。开展了三种非线性控制方法研究,并通过搭建迟滞非线性补偿实验平台验证了所提改进模型的优越性。结果表明:

1) 不同负载下,两个压电叠堆同时工作时压电驱动器能实现最大的输出位移 558.3 μm 。随着负载的增大,放大倍数逐渐减小。无负载时,压电驱动器的放大倍数最高,达到 22.566。

2) 通过计算 MPI 模型、RBF 神经网络、BP 神经网络以及 GA-BP 神经网络算法的相对误差、均方根误差和最大绝对误差,结果显示 GA-BP 神经网络在整体和局部误差方面均明显优于其他模型,表现出最佳的拟合性能。

3) 压电驱动器在正弦信号下轨迹跟踪的最大相对误差为 0.0573 μm 。改进的模糊 PID 反馈控制方法能将压电驱动器的延迟时间减少至 2 ms 以内,并在 60 ms 内实现控制反应,同时将稳态误差限制在 0.09% 以下,验证了压电驱动器的快速响应与低稳态误差的性能。

参考文献:

[1] GU Yi, LU Xinzhen, XU Yongjia. A Deep Ensemble Learning-driven Method for the Intelligent Construction of Structural Hysteresis Models[J]. *Computers & Structures*, 2023, 286:107106.

[2] ZHANG Chen, YU Yewei, ZHOU Miaolei. Finite-time Adaptive Quantized Motion Control for Hysteretic Systems with Application to Piezoelectric-driven Micropositioning Stage [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(5):2541-2552.

[3] WANG Jianhui, ZHANG Hongkang, MA Kemao, et al. Neural Adaptive Self-triggered Control for Uncertain Nonlinear Systems with Input Hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(11):6206-6214.

[4] SABARIANAND D V, KARTHIKEYAN P, MUTHURAMALINGAM T. 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.

- [5] NGUYEN P B, CHOI S B, SONG B K. A New Approach to Hysteresis Modelling for a Piezoelectric Actuator Using Preisach Model and Recursive Method with an Application to Open-loop Position Tracking Control [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 270:136-152.
- [6] JUHÁSZ L, MAAS J, BOROVAC B. Parameter Identification and Hysteresis Compensation of Embedded Piezoelectric Stack Actuators [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(1):329-338.
- [7] GHAFARIRAD H, REZAEI S M, ZAREINEJAD M, et al. Disturbance Rejection-based Robust Control for Micropositioning of Piezoelectric Actuators [J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2013, 342(1):32-45.
- [8] KHADRAOUI S, FAREH R, RAKOTONDRABE M. Nonlinear Tracking Differentiator and PD Controller for Piezoelectric Actuators in a Robotic Hand [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2023, 56(2):7808-7813.
- [9] AGUIRRE G, JANSSENS T, van BRUSSEL H, et al. Asymmetric-hysteresis Compensation in Piezoelectric Actuators[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 30:218-231.
- [10] SALAH M, SALEEM A. Hysteresis Compensation-based Robust Output Feedback Control for Long-stroke Piezoelectric Actuators at High Frequency [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 319:112542.
- [11] 张连生, 张鹏程, 郝爽, 等. 基于电荷泵的压电致动器迟滞非线性改善研究[J]. *计量学报*, 2023, 44(11):1646-1651.
- ZHANG Liansheng, ZHANG Pengcheng, HAO Shuang, et al. Research on Hysteresis Nonlinearity Improvement of Piezoelectric Actuator Based on Charge Pump[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(11):1646-1651.
- [12] WANG Ruijin, WANG Wen, CHEN Zhanfeng, et al. Modeling and Compensation for Dynamic Hysteresis of Piezoelectric Actuators Based on Lissajous Curve[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 335:113353.
- [13] GU Guoying, ZHU Limin. Modeling of Rate-dependent Hysteresis in Piezoelectric Actuators Using a Family of Ellipses[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 165(2):303-309.
- [14] 杨浩, 娄军强, 杨依领, 等. 压电纤维致动器的率相关偏置迟滞建模及补偿[J]. *振动、测试与诊断*, 2023, 43(3):531-538. (下转第 514 页)

- New Load Transfer Index (U_M^*) with Considering Six Degrees of Freedom and Its Application in Structural Design and Analysis [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2018, 46(4):410-424.
- [15] NAITO T, KOBAYASHI H, URUSHIYAMA Y, et al. Introduction of New Concept U^* Sum for Evaluation of Weight-efficient Structure[J]. *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems*, 2011, 4(1):30-41.
- [16] ZHAO Shengjie, WU Nan, WANG Quan. Deep Residual U-net with Input of Static Structural Responses for Efficient U^* Load Transfer Path Analysis[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 46:101184.
- [17] WANG Qingguo, ZHANG Geng, SUN Chenchen, et al. High Efficient Load Paths Analysis with U^* Index Generated by Deep Learning[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 344:499-511.
- [18] WANG Zhaohua, WU Nan, WANG Qingguo, et al. Novel Bionic Design Method for Skeleton Structures Based on Load Path Analysis[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(22):8251.
- [19] WANG Zhaohua, WANG Qingguo, WU Nan, et al. Structural Improvement of Vehicle Component Based on the Load Path and Load Distribution Analysis[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2021, 22(3):787-798.
- [20] 王万林. 基于断面优化和传力路径分析的铝合金车架轻量化设计[D].长沙:湖南大学,2018.
WANG Wanlin. *Lightweight Design of Aluminum Vehicle Frame Based on the Section Optimization and Load Path Analysis* [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [21] WANG Enyang, NOHARA T, ISHII H, et al. Load Transfer Analysis Using Indexes U^* and U^{**} for Truck Cab Structures in Initial Phase of Frontal Collision [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 156/157:1129-1140.
- [22] 郭奕呈. 考虑传力路径的航天结构多部段协同优化设计[D].大连:大连理工大学, 2020.
GUO Yicheng. *Collaborative Optimization of Aerospace Multi-stage Structure Considering Load Path*[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2020.
- [23] WANG Xi, QIN Ruixian, ZHANG Xu, et al. Quasi-static and Dynamic Behavior of Additively Manufactured Metamaterial Structures with Layered-hybrid Topologies [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 183:110434.
- [24] YIN Zhongyuan, JIANG Binhui. Predicting Equation of Quasi-static and Dynamic Failures of Steel Columns under Fire[J]. *Engineering Structures*, 2023, 276:115348.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介:林家辉,男,1995年生,博士研究生。主要研究方向为智能算法、结构设计与优化。李 军*(通信作者),男,1965年生,教授、博士研究生导师。E-mail:leejun_orcid@163.com.
- 本文引用格式:
林家辉,李壮壮,李学霖,等.一种路径-吞噬拓扑优化新方法[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(3):504-514.
LIN Jiahui, LI Zhuangzhuang, LI Xuelin, et al. A New Method for Path-engulfment Topology Optimization[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(3):504-514.
-
- (上接第 503 页)
- YANG Hao, LOU Junqiang, YANG Yiling, et al. Dynamic Modeling and Feedforward Compensation of the Rate-dependent Bipolar Bias Hysteresis Nonlinearity of Marco Fiber Composites Actuators [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(3):531-538.
- [15] 王琴琴,周孟德,孙晨晋,等. 压电叠堆作动器率相关迟滞非线性建模研究[J]. *压电与声光*, 2022, 44(6):907-912.
WANG Qinqin, ZHOU Mengde, SUN Chenjin, et al. Modeling on Rate-dependent Hysteresis Nonlinear Characteristics of Piezoelectric Stack Actuators [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2022, 44(6):907-912.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介:李 冲*,男,1988年生,博士、副教授。主要研究方向为压电驱动与控制。E-mail:lichong@just.edu.cn.
- 本文引用格式:
李冲,栢新,童玉健,等.低频大位移多工作模式压电直线驱动器非线性迟滞控制及实验研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(3):493-503.
LI Chong, BAI Xin, TONG Yujian, et al. Nonlinear Hysteresis Control and Experimental Study of Low-frequency Large Displacement Multi-mode Piezoelectric Linear Actuators[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(3):493-503.