

航空电动静液作动器神经网络模糊滑模控制^{*}胡逸雯¹ 陈银超² 马波¹ 谢磊²

(1. 飞行器数字敏捷设计全国重点实验室 成都 610091;

2. 中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所 成都 610091)

摘要:针对航空器中电动静液作动器(EHA)的高控制性能需求,传统控制策略难以解决参数自适应整定与滑模控制中常见的抖振问题,为平衡抖振抑制与控制性能,进一步提升控制稳定性与精度,设计了一种新型的神经网络模糊滑模控制器(NN-FSMC)。首先针对航空 EHA 位置环构建积分滑模控制器;其次通过模糊控制的策略整定滑模趋近律中的关键参数,然后利用 BP 神经网络的自适应优化能力进一步抑制滑模控制中的抖振现象;最后,在 MATLAB/Simulink 平台上进行仿真实验,对比分析不同控制算法下的位置跟踪性能。仿真结果表明,NN-FSMC 能有效提升航空 EHA 系统的响应速度与位置跟踪精度,并在频率变化情况下提供更为平滑的响应。

关键词:电动静液作动器;滑模控制;模糊控制;神经网络

中图分类号: TM3;V245.1;V249.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Neural network fuzzy sliding mode control for aero electro-hydraulic actuator

Hu Yiwen¹ Chen Yinchao² Ma Bo¹ Xie Lei²

(1. National Key Laboratory of Digital and Agile Aircraft Design, Chengdu 610091, China;

2. Avic Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract: In the context of the high control performance requirements for electro-hydraulic actuator (EHA) in aircraft, traditional control strategies often struggled with parameter adaptation and the chattering problem commonly associated with sliding mode control. To balance chattering suppression and control performance, and to further enhance control stability and precision, a novel neural network fuzzy sliding mode controller (NN-FSMC) was proposed. First, an integral sliding mode controller was designed for the position loop of the EHA. Next, a fuzzy control strategy was used to tune the key parameters in the sliding mode reaching law. Then, the adaptive optimization capability of a BP neural network was employed to further mitigate chattering in the sliding mode control. Finally, simulation experiments were conducted on the MATLAB/Simulink platform, comparing the position tracking performance under different control algorithms. The simulation results demonstrated that NN-FSMC effectively improved the response speed and position tracking accuracy of the EHA system, and provided a smoother response under varying frequencies.

Keywords: electrostatic-hydraulic actuator; sliding mode control; fuzzy control; neural network

0 引言

电动静液作动器(electro-hydrostatic actuator, EHA)是现代飞机功率电传作动器主要类型之一,由于其高集成度、高功率密度和高可靠性等优势被用于航空机载作动系统,作为飞机舵面控制的重要装置^[1]。航空 EHA 系统存

在着机电液耦合的复杂非线性与大量不确定性^[2],而精确稳定的 EHA 控制对于确保飞机的安全和性能至关重要^[3-4],因此航空 EHA 系统的高性能控制策略亟需实现。

目前,已有多种先进控制算法被用于提升 EHA 的控制性能,综合考虑响应速度、控制精度和鲁棒性等指标,多种控制策略的融合研究显著增多^[5-8]。文献^[9]提出了一

收稿日期:2024-09-21

^{*} 基金项目:国防科研项目(JCKY2021205A004)资助

种基于反向传播(backpropagation, BP)神经网络的比例积分(proportional integral, PI)控制器,以应对温度变化对EHA控制精度的影响。滑模控制(sliding mode control, SMC)作为一种具有强鲁棒性和快速响应特性的先进控制策略,在航空EHA系统中得到广泛应用。文献[10]提出了一种基于PID控制和滑模变结构控制的复合控制策略,结果表明所提控制策略能够提高系统的快速性。文献[11]在积分滑模控制器(integral sliding mode control, ISMC)的基础上设计了一种新型非线性变阻尼机制,能够有效提高EHA位置跟踪性能,并增强对外部扰动的鲁棒性。

针对控制器参数选取依赖人工经验的问题,国内外研究者探索结合粒子群优化算法^[12-13]、模糊控制^[14-15]、神经网络^[6]等技术,致力于实现控制器参数自适应整定。模糊控制通过将系统输入和输出映射到模糊集合,并利用基于经验的模糊规则进行推理,解决了复杂工况下控制器参数自整定的问题^[17]。文献[18]提出了一种基于模糊PID和主动抗扰控制的控制策略,在提高作动器系统鲁棒性的同时提升抗干扰能力。针对滑模控制中的抖振抑制方法,传统上通常采用复杂的滤波器^[19]或使用多种技术组合,如高阶滑模控制^[20]、滑模观测器^[21]等。随着神经网络技术的发展,研究人员开始利用神经网络的学习能力自适应调整滑模面和控制律,以求进一步减小高频抖振。文献[22]提出了一种基于多层神经网络的快速终端滑模控制策略,实现了控制器的参数自适应性。文献[23]在模糊滑模控制的基础上融合径向基(radial basis function, RBF)神经网络,对控制精度进行逼近,大幅提升液压缸控制系统的自适应调节能力。在实际工程应用过程中,RBF神经网络需要计算基函数的响应,导致计算复杂度较高^[24]。相比之下,BP神经网络能够实现非线性函数的逼近和系统状态的动态优化,从而在不同的工作条件下提供稳定的控制效果^[25]。现有研究虽然解决了控制器参数选取依赖人工经验、不易自适应整定的问题,但仍存在计算复杂度高、抗扰性能欠缺等不足。

针对上述问题,本文提出了一种神经网络模糊滑模控制器(neural network fuzzy sliding mode controller, NN-FSMC)。在现有研究的基础上,充分利用模糊控制与神经网络的优势,将模糊控制引入滑模控制器中关键参数的整定,并结合神经网络的自适应调节能力进一步削弱抖振现象,最终实现滑模控制器的优化设计,以强化航空EHA系统位置控制的鲁棒性和自适应性。

1 航空EHA系统模型

本文航空EHA系统的主要元件包括永磁同步电机、液压泵以及双作用液压缸。航空EHA系统以电信号作为位置控制指令,驱动永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)工作,并通过电机产生的机械能带动液压泵旋转,控制液压泵的输出液压油压力及其

流量,进而推动液压缸活塞杆的位移,实现航空EHA的精准控制,从而满足飞机对位置和运动的要求。航空EHA的控制系统示意图如图1所示。

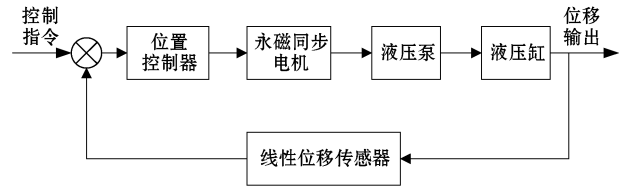


图1 航空EHA控制系统示意图
Fig.1 Aero EHA control system diagram

1.1 液压泵模型

本文航空EHA的动力元件为液压泵,假设液压泵进油口的流量为 Q_{pi} ,出油口的流量为 Q_{po} ,则液压泵流量模型为:

$$\begin{cases} Q_{pi} = \omega D_p + \frac{V_i}{\beta_e} \dot{p}_i - Q_{ii} + Q_{oi} \\ Q_{po} = \omega D_p - \frac{V_o}{\beta_e} \dot{p}_o - Q_{ii} - Q'_{oi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为PMSM的转速; D_p 为液压泵的排量; V_i 和 V_o 分别为泵回油腔与出油腔的等效容积; β_e 为液压油弹性模量; p_i 和 p_o 分别为泵进油口压力与出油口压力; Q_{ii} 为泵内泄露流量; Q_{oi} 和 Q'_{oi} 分别为泵入油口外泄露流量和出油口外泄露流量。

1.2 液压缸模型

本文航空EHA的执行元件为双作用液压缸,其A腔与液压泵出油口相连,B腔与液压泵进油口相连,假设液压缸A腔从液压泵吸入的液压油流量为 Q_{ci} ,液压缸B腔向液压泵排出的液压油流量为 Q_{co} ,则液压缸的流量模型为:

$$\begin{cases} Q_{ci} = A \dot{x} + \frac{(V_a + Ax)}{\beta_e} \dot{p}_a + Q_{cii} \\ Q_{co} = A \dot{x} - \frac{(V_b - Ax)}{\beta_e} \dot{p}_b + Q_{cii} \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为液压缸活塞的有效工作面积; x 为活塞杆位移; V_a 和 V_b 分别为A腔和B腔的初始容积;假设初始阶段 $V_a = V_b = V$; p_a 和 p_b 分别为A腔与B腔压力; Q_{cii} 为液压缸内泄露流量。此外,根据系统液压油容积守恒的原理,液压泵出油腔的容积 V_o 与液压缸A腔的吸油容积一致,即 $V_o = V_a + Ax$,同样地 $V_i = V_b - Ax$ 。

1.3 系统状态方程

根据牛顿第二定律,建立液压缸的负载力平衡方程:

$$m \ddot{x} = A \Delta p - B \dot{x} - F_L \quad (3)$$

式中: m 为活塞、活塞杆与负载总质量; Δp 为液压缸两腔压力差, $\Delta p = p_a - p_b$; B 为液压缸与负载的动摩擦系数; F_L 为施加在活塞杆上的外负载力。

为建立航空EHA系统状态方程,定义状态变量 $\mathbf{X} =$

$[x_1, x_2, x_3]^T = [x, \dot{x}, \Delta p]^T$, 联立式(1)~(3), 由于液压泵到液压缸的管路较短, 且各连接部位无明显压降, 因此假设管路的压力损失为0, 即 $p_i = p_b, p_o = p_a$, 则系统状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(Ax_3 - Bx_2 - F_L) \\ \dot{x}_3 = \frac{\beta_c}{V}(\omega D_P - Ax_2 - C_L x_3 + Q_c) \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_L 为液压泵与液压缸的总泄露系数; Q_c 为各阀门流量损失。

针对航空 EHA 位置子系统, 控制输入为电机转速 ω , 状态变量和输出变量为活塞杆位移 x , 为进一步明确系统控制输入与状态变量之间的方程关系, 对系统状态方程进行降阶简化, 式(4)改写为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_1 u + k_2 \dot{x}_1 + F_d \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: u 表示控制变量, $u = \omega$; y 表示输出变量; $k_1 = (mC_L)^{-1}AD_p$; $k_2 = -m^{-1}(C_L^{-1}A^2 + B)$; F_d 表示不确定干扰; $F_d = m^{-1}(AC_L^{-1}Q_c - F_L)$ 。

2 神经网络模糊滑模控制器设计

针对航空 EHA 的位置子系统, 设计一种神经网络模糊滑模控制器, 在滑模控制律的基础上引入模糊控制, 调整控制律的趋近速率, 并通过神经网络自适应优化控制器的增益参数, 该控制器能够有效处理系统中的非线性和不确定性, 使得航空 EHA 实际位置能够有效跟踪目标位置, 提升系统的鲁棒性和响应速度, 确保在多种飞行条件下的控制稳定性和精确性。航空 EHA 神经网络模糊滑模控制器设计流程如图 2 所示。

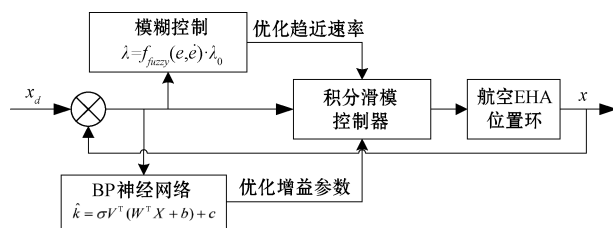


图 2 神经网络模糊滑模控制器设计流程

Fig. 2 NN-FSMC design flow chart

2.1 改进滑模控制设计

考虑到航空 EHA 系统在实际飞行环境中面临的各种不确定性和外部扰动, 以及对高精度位置控制的需求, 本文采用积分滑模控制对控制器进行初步设计。定义航空 EHA 位置误差:

$$e = x - x_d \quad (6)$$

式中: x_d 为期望位移输出。

设计积分滑模面:

$$s = \dot{e} + k_p e + k_i \int_0^t e d\tau \quad (7)$$

式中: $k_p > 0$ 与 $k_i > 0$ 是控制器增益参数。

对滑模面的两边求导得:

$$\dot{s} = (k_1 u + k_2 \dot{x} + F_d - \ddot{x}_d) + k_p \dot{e} + k_i e \quad (8)$$

根据上式, 控制器设计为:

$$u = k_1^{-1}(k_2 \dot{x} - F_d + \ddot{x}_d) - k_p \dot{e} - k_i e + \ddot{x}_d \quad (9)$$

式中: \ddot{x}_d 为指数趋近律, $\ddot{x}_d = -\lambda s - \epsilon \text{sgn}(s)$, 其中 $\lambda > 0$ 为趋近速率, $\epsilon > 0$ 为非线性增益。

本文取李雅普诺夫函数 $V = s^2/2$, 对控制器的稳定性进行分析:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -ks^2 - \epsilon |s| \leq 0 \quad (10)$$

可知所设计的积分滑模控制器是稳定的。

2.2 模糊滑模控制器设计

为优化滑模控制器中的趋近速率的调节过程, 本文将模糊控制引入滑模控制器的设计。模糊控制对位置误差 e 与误差变化率 \dot{e} 进行模糊化, 调整滑模控制器中趋近速率中的趋近速率 λ , 调整后的趋近速率表示为:

$$\lambda = f_{fuzzy}(e, \dot{e}) \cdot \lambda_0 \quad (11)$$

式中: $f_{fuzzy}(e, \dot{e})$ 为调整系数, 即模糊控制的输出; λ_0 为调整前的趋近速率。模糊控制输入变量与输出变量的模糊集合如表 1 所示。

表 1 变量模糊集合
Table 1 Fuzzy set of variables

| 参数 | 模糊集 |
|-------------------------|---------------------------|
| e | NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB |
| \dot{e} | NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB |
| $f_{fuzzy}(e, \dot{e})$ | Z, S, MS, M, ML, L |

其中, NB, NM, NS, Z, PS, PM 和 PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。而 Z, S, MS, M, ML, L 分别表示零、小、中小、中、中大、大。模糊集合均服从三角形隶属度函数。

根据输入输出变量间的关系, 制定 $f_{fuzzy}(e, \dot{e})$ 的模糊规则, 如表 2 所示。

表 2 模糊规则
Table 2 Fuzzy rule

| \dot{e} | e | | | | | | |
|-----------|-----|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB |
| NB | L | ML | M | MS | M | ML | L |
| NM | ML | M | MS | Z | MS | M | ML |
| NS | MS | MS | S | Z | S | MS | MS |
| Z | L | ML | MS | Z | MS | ML | L |
| PS | MS | MS | S | Z | S | MS | MS |
| PM | ML | M | MS | Z | MS | M | ML |
| PB | L | ML | M | MS | M | ML | L |

本文采用 Mamdani 模糊系统进行模糊推理,根据输入变量 e 和 \dot{e} 的模糊集合和模糊规则,得到输出变量 $f_{fuzzy}(e, \dot{e})$ 的模糊集合。然后,将模糊推理的结果通过去重心法转换为具体的数值输出。最终通过式(11)计算得到调整后的趋近速率 λ 。

2.3 自适应神经网络设计

针对滑模控制中常见的抖振现象,本文选取 BP 神经网络对滑模控制器中的增益参数 k_p 和 k_i 进行自适应优化。对于航空 EHA 位置子系统,在系统需要快速响应且外部扰动较小的情况下,适度增大滑模控制器的增益参数可以提高控制精度。而在系统存在较强抖振现象时,减小增益参数有助于平滑控制信号,降低抖振的强度。

本文设计的 BP 神经网络共 3 层,包括输入层、隐藏层和输出层,网络输入为位置误差 e 和滑模面 s ,输出为优化后的增益参数 k_p 和 k_i ,通过网格搜索法将隐藏层的节点数设置为 12。自适应 BP 神经网络的输出表达式为:

$$\hat{k} = \sigma \mathbf{V}^T (\mathbf{W}^T \mathbf{X} + \mathbf{b}) + \mathbf{c} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{X} = [e, s]^T$ 为网络输入; $\hat{k} = [k_p, k_i]^T$ 为优化后的增益向量; \mathbf{W} 为输入层到隐藏层的 12×2 权重矩阵; \mathbf{b} 为输入层到隐藏层的 12×1 偏置向量; \mathbf{V} 为隐藏层到输出层的 2×12 权重矩阵; \mathbf{c} 为隐藏层到输出层的 2×1 偏置向量; σ 为 sigmoid 激活函数。本文设计的 BP 神经网络结构示意图如图 3 所示。

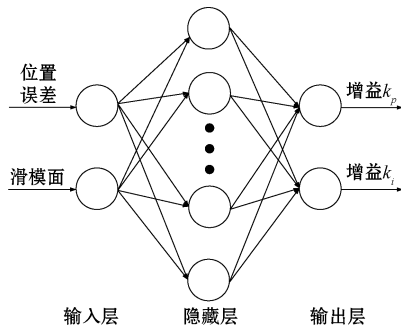


图 3 BP 神经网络结构

Fig. 3 BP neural network structure diagram

对于航空 EHA 多种工况下的输入信号和系统响应数据,划分其中 70% 为训练集,15% 为测试集,剩余 15% 为验证集。本文通过反向传播算法对网络进行训练,并使用均方误差损失函数。训练完成后,利用验证集对超参数进行调整,确保网络在处理增益参数时具有良好的鲁棒性和准确性。最终,将训练好的 BP 神经网络集成至滑模控制器中,以实时优化增益参数,提升控制系统的稳定性。

3 航空 EHA 仿真分析

为验证神经网络模糊滑模控制算法的有效性,本文在 MATLAB/Simulink 平台上构建航空 EHA 仿真模型进行实验分析。航空 EHA 系统仿真参数如表 3 所示。

表 3 航空 EHA 系统仿真参数

Table 3 Aero EHA system simulation parameters

| 参数 | 值 |
|--|----------------------|
| PMSM 额定转速 $\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ | 300 |
| 泵排量 $D_p / (\text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1})$ | 2.5×10^{-6} |
| 活塞有效工作面积 A / m^2 | 1.5×10^{-3} |
| 活塞负载总质量 m / kg | 80 |
| 缸与负载动摩擦系数 $B / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s})$ | 100 |
| 泵与缸总泄露系数 $C_l / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa})$ | 2×10^{-4} |

本文选取传统 PI 控制^[26]与新型 ISMC 控制^[11]作为对比算法,将其与 NN-FSMC 控制器的控制性能进行比较分析。针对航空 EHA 位置子系统,NN-FSMC 的增益参数的初始值设置为 $k_p = 20, k_i = 16.5$,趋近速率的初始值设置为 $\lambda = 2.5$,非线性增益设置为 $\epsilon = 0.5$ 。

3.1 阶跃实验分析

为验证 NN-FSMC 控制器在航空 EHA 系统阶跃工况下的位移跟踪性能,本文选取 10 mm 阶跃信号作为目标位移,仿真位移输出结果如图 4 所示,性能指标对比如表 4 所示。

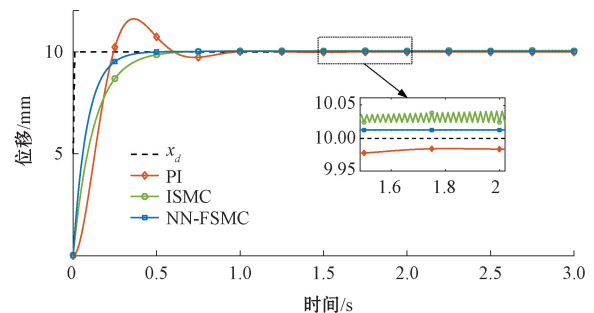


图 4 10 mm 阶跃工况位移输出对比曲线

Fig. 4 Displacement output comparison curve under 10 mm step condition

表 4 10 mm 阶跃工况控制性能指标对比

Table 4 Comparison of control performance indexes under 10 mm step condition

| 控制器 | 上升时间/s | 调节时间/s | 稳态误差/mm |
|---------|--------|--------|---------|
| PI | 0.219 | 1.247 | 0.01 |
| ISMC | 0.281 | 0.928 | 0.04 |
| NN-FSMC | 0.197 | 0.541 | 0.008 |

在 10 mm 的阶跃工况下,传统 PI 控制在起始阶段出现了 15% 的超调,虽然最终能够跟踪目标位移,但存在一定的稳态误差。ISMC 控制虽然能够减小超调,但在稳态时存在部分抖振现象。而 NN-FSMC 控制表现出显著的优越性,不仅能在 0.2 s 内迅速跟踪目标位移,而且大大削弱了稳态抖振,跟踪误差极小。由图 4 放大图可知,NN-FSMC 控制的抖振幅度最小,维持在 ± 0.01 mm 以内,相

比于 ISMC 控制, NN-FSMC 控制的抖振幅度降低了 80% 以上, NN-FSMC 控制的系统响应最为平稳。

由表 4 可知, NN-FSMC 控制以最短的上升时间和调节时间显著优于其他两种控制算法, 上升时间较 PI 控制和 ISMC 控制分别减少了 10% 和 30%, 这表明 NN-FSMC 控制在响应速度上表现最佳。此外, 虽然 PI 控制和 NN-FSMC 控制的稳态误差都很小, 但 NN-FSMC 控制的稳态误差仅为 0.008 mm, 表现出更高的跟踪精度。由此可知, 通过在 ISMC 控制中引入模糊控制与 BP 神经网络, NN-FSMC 控制器能更好地满足航空 EHA 系统高精度和快速响应的要求。

3.2 正弦实验分析

考虑到实际航空 EHA 系统面临多种复杂的动态工况, 为了全面验证 NN-FSMC 控制器在处理持续变化输入时的跟踪精度和动态响应特性, 进一步进行了正弦工况实验, 以模拟系统在连续周期性变化下的响应能力。本文选取 1 Hz 正弦信号作为目标位移, 仿真位移输出结果如图 5 所示, 性能指标对比如表 5 所示。

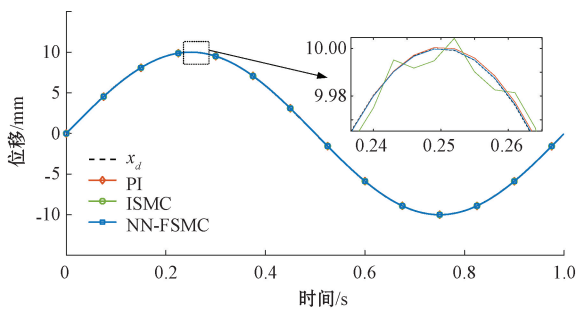


图 5 1 Hz 正弦工况位移输出对比曲线

Fig. 5 Displacement output comparison curve under 1 Hz sine condition

表 5 1 Hz 正弦工况控制性能指标对比

Table 5 Comparison of control performance indexes under 1 Hz sine condition

| 控制器 | RMSE | 最大误差/mm |
|---------|---------|---------|
| PI | 0.007 4 | 0.011 1 |
| ISMC | 0.005 7 | 0.008 9 |
| NN-FSMC | 0.002 8 | 0.004 0 |

在 1 Hz 的正弦工况下, 传统 PI 控制在正弦波的峰值和谷值处存在明显的超调和滞后现象, 且系统在峰值处的抖动较为明显。ISMC 控制相较于 PI 控制, 超调和滞后现象有所减小, 但由于滑模控制的特性, 抖振现象更加明显。而 NN-FSMC 控制在整个正弦波的跟踪过程中表现出最为平滑的响应, 没有明显的超调和滞后, 系统在峰值和谷值处的抖动也最小。

由表 5 可知, 在正弦波响应中, NN-FSMC 控制的 RMSE 与最大误差值均为最小, RMSE 相比 ISMC 控制减

少了 51%, 而最大误差相比 ISMC 控制减少了 55%。综合而言, NN-FSMC 控制器在 1 Hz 的正弦工况下通过神经网络和模糊逻辑的优势, 能够提供最平滑的响应, 最小化超调、滞后和抖动, 同时在误差指标上表现优异。对于航空 EHA 系统的实际工程应用场景, NN-FSMC 控制器在频率变化情况下能够提供更平滑的响应, 具有较强的适应能力和鲁棒性。

4 结论

针对航空 EHA 系统复杂工况环境与高精度位置控制要求, 本文提出一种新型控制器 NN-FSMC, 并在 MATLAB/Simulink 平台上进行仿真实验, 对比分析不同控制算法下的位移输出响应性能, 得到如下结论。

1) 相比于传统的 PI 控制, NN-FSMC 在阶跃与正弦工况下均达到了更快的响应速度与更高的跟踪精度, 同时在阶跃工况下能够实现无超调控制, 在正弦工况下位置跟踪误差大幅缩减 62%。

2) 通过在 ISMC 控制中引入模糊控制与 BP 神经网络, 抖振幅度大大降低, 在阶跃工况下抖振幅度降低了 80% 以上, 而在正弦阶跃工况下最大位置跟踪误差减少了 55%, 表明 NN-FSMC 能更好地满足航空 EHA 系统高精度和高鲁棒性的要求。

3) 根据多工况的模拟响应可知, NN-FSMC 在正弦工况下达到了极低的最大误差, 即 0.004 mm, 可知本文设计的控制器在频率变化情况下能够提供更平滑的响应, 对于航空 EHA 系统的实际工程应用场景, NN-FSMC 在处理系统非线性和不确定性方面具有显著优势。

参考文献

- [1] 付永领, 韩旭, 杨荣荣, 等. 电动静液作动器设计方法综述[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(10): 1939-1952.
FU Y L, HAN X, YANG R R, et al. Review on design method of electro-hydrostatic actuator [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(10): 1939-1952.
- [2] 杨荣荣, 马永杰, 付永领, 等. 电动静液作动器的阻尼自适应扰动主动补偿控制方法[J]. 液压与气动, 2023, 47(9): 148-157.
YANG R R, MA Y J, FU Y L, et al. Damping adaptive active disturbance compensation control method for electro-hydrostatic actuator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(9): 148-157.
- [3] JIAO Z, LI Z, SHANG Y, et al. Active load sensitive electro-hydrostatic actuator on more electric aircraft: Concept, design, and control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(5): 5030-5040.

- [4] 潘晋新,景博,焦晓璇,等.基于统计分析与物理模型的批量小样本条件下作动器退化建模[J].仪器仪表学报,2024,45(4): 1-9.
PAN J X, JING B, JIAO X X, et al. Actuator degradation modeling under batch small sample conditions based on statistical analysis and physical model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 1-9.
- [5] 杜伟,汪成文,赵赞魁,等.船舶阀门电动静液作动器混合灵敏度鲁棒控制器设计[J].液压与气动,2022,46(12): 63-70.
DU W, WANG CH W, ZHAO Z K, et al. Design of mixed sensitivity robust controller for marine valve electro-hydrostatic actuator[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2022, 46(12): 63-70.
- [6] 陈浩,基于模糊滑模控制的异步电机转速跟踪误差研究[J].国外电子测量技术,2022,41(11): 67-71.
CHEN H, Research on speed tracking error of induction motor based on fuzzy sliding mode control[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(11): 67-71.
- [7] DUENSING Y, MERKEL A, SCHMITZ K. Degradation identification of an EHA piston pump by analysis of load-holding states [J]. Fluids, 2024, 9(1): 14.
- [8] 赵凯辉, 谯梦洁, 吕玉映, 等. PMSM 无模型超螺旋快速积分终端滑模控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(5): 64-74.
ZHAO K H, QIAO M J, LYU Y Y, et al. Model-free super-twisting fast integral terminal sliding mode control for PMSM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 64-74.
- [9] 黄昊,刘家辉,朱威霖,等.基于神经网络PI的电静液作动器温度补偿控制方法研究[J].液压气动与密封,2024,44(6): 48-56.
HUANG H, LIU J H, ZHU W L, et al. Study on temperature compensation control of electro-hydrostatic actuators with neural network PI controller[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2024, 44(6): 48-56.
- [10] 张英臣,祁晓野.基于PID和滑模控制的电动静液作动器的研究[J].机床与液压,2017,45(21): 122-126.
ZHANG Y CH, QI X Y. Study of electro-hydraulic actuator based on PID and sliding mode control[J]. Machine Tool & Hydraulics,2017,45(21): 122-126.
- [11] 杨荣荣,张玲,赵家黎,等.电动静液作动器的非线性变阻尼积分滑模控制[J].北京航空航天大学学报,2024,50(1): 163-172.
YANG R R, ZHANG L, ZHAO J L, et al. Nonlinear variable damping integral sliding mode control for electro-hydrostatic actuator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024,50(1): 163-172.
- [12] 刘松源,吴伟,靳秋硕,等.基于粒子群优化的直升机飞行控制律设计方法[J].南京航空航天大学学报,2021,53(2): 267-274.
LIU S Y, WU W, JIN Q SH, et al. Design method for helicopter flight control law based on particle swarm optimization [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 267-274.
- [13] 成旭明,段杰,肖息,等.粒子群优化的变论域模糊PI机电作动器控制[J].机械与电子,2022,40(1): 42-47.
CHENG X M, DUAN J, XIAO X, et al. Particle swarm optimization of variable theory domain fuzzy PI electromechanical actuator control [J]. Machinery & Electronics,2022,40(1): 42-47.
- [14] 王艳阳,胡海林,杨杰,等.永磁同步电机模糊自适应低开关频率模型预测电流控制[J].国外电子测量技术,2024,43(6): 191-199.
WANG Y Y, HU H L, YANG J, et al. Fuzzy adaptive low switching frequency model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019,43(6): 191-199.
- [15] 李杰,田俊.基于模糊和反步算法的EHA力控制[J].控制工程,2021,28(7): 1382-1389.
LI J, TIAN J. EHA force control based on fuzzy and backstepping algorithm [J]. Control Engineering, 2019,28(7): 1382-1389.
- [16] 朱栋,陶睿楠,陈威,等.基于LSTM的无人船轨迹跟踪滑模控制算法研究[J].电子测量技术,2024,47(7): 61-68.
ZHU D, TAO R N, CHEN W, et al. LSTM-based sliding mode trajectory tracking control algorithm for unmanned surface vehicles [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(7): 61-68.
- [17] BU X, QI Q, JIANG B. A simplified finite-time fuzzy neural controller with prescribed performance applied to waverider aircraft[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 30(7): 2529-2537.
- [18] YANG J, YANG Z, SUN X. Control design for nonlinear electromechanical actuation system based on fuzzy PID and active disturbance rejection control[C]. 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2018: 1387-1391.
- [19] 余驿,肖友刚,朱毓臻,等.基于卡尔曼滤波器的吊车

- 消摆定位滑模控制[J]. 控制工程, 2021, 28(6): 1049-1054.
- YU Y, XIAO Y G, ZHU CH ZH, et al. Sliding mode control of crane offset positioning based on Kalman filter [J]. Control Engineering, 2021, 28(6): 1049-1054.
- [20] 唐家勇, 张博, 刘洋, 等. 基于扩张状态观测器的PMLSM高阶自适应非奇异快速终端滑模控制[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(4): 124-132.
- TANG J Y, ZHANG B, LIU Y, et al. High-order adaptive non-singular fast terminal sliding mode control of PMLSM based on extended state observer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(4): 124-132.
- [21] 徐浩力, 葛文庆, 李波, 等. 基于滑模观测器的PMSM改进无差拍电流预测控制[J]. 机床与液压, 2023, 51(16): 19-24.
- XU H L, GE W Q, LI B, et al. Improved deadbeat current predictive control of PMSM based on sliding mode observer [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 51(16): 19-24.
- [22] 魏科鹏, 胡健, 姚建勇, 等. 航空机电作动器神经网络快速终端滑模控制[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 116-125.
- WEI K P, HU J, YAO J Y, et al. Fast terminal sliding mode control of neural network for aeromechanical actuator [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 116-125.
- [23] 邓子阳. 采用神经网络模糊滑模控制的液压驱动活塞位置控制研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(5): 179-183.
- DENG Z Y. Research on positioning control of hydraulic driving piston with neural network fuzzy sliding mode control [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(5): 179-183.
- [24] 曹萌萌, 胡健, 周海波, 等. 基于神经网络的机电作动器滑模输出反馈控制[J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 357-365.
- CAO M M, HU J, ZHOU H B, et al. Sliding mode output feedback control of electromechanical actuator based on neural network [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(10): 357-365.
- [25] QIAN Z, LIANG Y, MA C, et al. Modeling and fitting of aircraft fly-by-wire control system based on improved BP neural network[C]. 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). IEEE, 2022, 10: 2250-2256.
- [26] 龙云, 杜锦华, 布家宝, 等. 含实时电流补偿的开关磁阻式机电作动器自适应PI控制[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(2): 184-194.
- LONG Y, DU J H, BU J B, et al. An adaptive PI controller with real-time current compensation for the electromechanical actuator driven by switched reluctance motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 58(2): 184-194.

作者简介

胡逸雯, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞机设计。

E-mail: huyiwen27@163.com

陈银超, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞机设计。

马波, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机设计。

谢磊, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机设计。