



## 基于蜘蛛蜂算法的EHA滑模控制器优化研究

李维波 张浩 徐成虎 张茂杰 方华亮

### Optimization of EHA sliding mode controller based on spider wasp algorithm

LI Weibo, ZHANG Hao, XU Chenghu, ZHANG Maojie, FANG Hualiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03815>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 改进自适应遗传算法优化的船用增压锅炉上锅筒水位滑模控制方法

Sliding mode controller with improved AGA for supercharged boiler drum water level control

中国舰船研究. 2024, 19(2): 181-186 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03228>

#### 基于改进反步滑模控制算法的拖轮自主靠泊控制

Autonomous berthing control of tugboat based on improved backstepping sliding mode control algorithm

中国舰船研究. 2024, 19(1): 119-127 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03227>

#### 基于蝗虫优化算法的大型运输船舶自适应控制

Adaptive control of large transport ship based on grasshopper optimization algorithm

中国舰船研究. 2023, 18(3): 66-74 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02782>

#### 基于参数扰动模型的遥控潜水器滑模控制方法

Sliding mode control method of remotely operated vehicles based on parameter disturbance model

中国舰船研究. 2021, 16(1): 136-142 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01756>

#### 基于FTESO和漂角补偿的船舶航向滑模控制

Ship course sliding mode control system based on FTESO and sideslip angle compensation

中国舰船研究. 2022, 17(1): 71-79 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02267>

#### 水下滑翔机垂直面运动的模糊滑模控制方法

Fuzzy sliding mode control method for vertical motion of autonomous underwater gliders

中国舰船研究. 2022, 17(5): 148-156 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02521>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03815>

期刊网址: [www.ship-research.com](http://www.ship-research.com)

引用格式: 李维波, 张浩, 徐成虎, 等. 基于蜘蛛蜂算法的EHA滑模控制器优化研究[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(4): 246–253.  
LI W B, ZHANG H, XU C H, et al. Optimization of EHA sliding mode controller based on spider wasp algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(4): 246–253 (in Chinese).

# 基于蜘蛛蜂算法的EHA滑模控制器优化研究



扫码阅读全文

李维波<sup>\*1,2</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 徐成虎<sup>1</sup>, 张茂杰<sup>1</sup>, 方华亮<sup>3</sup>

1 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070

2 西北民族大学 电气工程学院, 甘肃 兰州 730124

3 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072

**摘要:** [目的] 为实现电动静液作动器(EHA)的精确位置控制并降低滑模控制器的参数整定难度, 提高滑模控制器的综合性能, 提出采用蜘蛛蜂优化算法(SWO)对控制器参数进行整定。[方法] 建立电动静液作动器的简化模型, 设计相应的滑模控制器, 并利用SWO算法对该控制器的滑模面和趋近率参数进行整定, 进而使用Matlab/Simulink和AMESim仿真软件搭建联合仿真模型进行验证。[结果] 通过手动方式和SWO算法分别整定滑模控制器参数, 其对比仿真结果表明: SWO算法优化后的滑模控制器避免了超调, 提高了抗干扰性, 且收敛速度提高了33.6%, 证明了采用蜘蛛蜂算法优化EHA滑模控制器的滑模面和趋近率参数的可行性。[结论] 研究成果可为EHA滑模控制器设计提供理论参考。

**关键词:** EHA装置; 滑模控制器; 优化; 蜘蛛蜂优化算法; 联合仿真

中图分类号: U665.13

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03815

## 0 引言

电动静液作动器(electro-hydraulic actuation, EHA)是一种一体化的闭式伺服系统, 其主要由伺服电机、双向液压泵、液压缸、蓄能器等元件构成, 通过控制伺服电机的转速及正转/反转来调节液压泵的输出流量, 从而控制液压缸活塞的速度及位置。由于不存在机电作动器(electro-mechanical actuator, EMA)的机械结构所带来的各种问题<sup>[1]</sup>, 所以EHA在具有功率密度高、控制精密、可靠性强等液压系统优势的同时, 还大为简化了传统的液压系统结构, 无须伺服阀、油箱等元件, 从而使EHA体积小巧、维护简单、能量效率高且适应性强<sup>[2]</sup>。如今, EHA已广泛应用于工业生产、航空航天、船舶自动化等领域<sup>[3]</sup>。

作为一种电气、液压混合系统, EHA具有高阶、非线性, 以及EHA参数自身的不确定性等特点, 例如: 由于温度变化引起的油液弹性模量、流动

性的改变, 液压缸内的摩擦和黏性阻尼的改变, 液压缸的泄漏, 以及伺服电机和电控系统在运行过程中因温度变化而带来的参数改变等, 这些特性为控制器性能带来了严苛的挑战。

目前, EHA的主流控制方式包括PID控制、模糊控制、反步控制、自抗扰控制、阻抗控制、滑模控制<sup>[4-8]</sup>等。PID控制作为一种基于误差的经典控制方法, 无须被控对象建模即可实现良好的控制效果, 但是PID控制在超调与收敛时间之间存在无法兼顾的矛盾, 且跟踪能力较差, 故面对未知扰动时的精度较差。Li等<sup>[9]</sup>将PID控制与模糊控制结合, 提高了PID控制的抗干扰能力, 但模糊PID的参数较多, 严重依赖于使用者的经验和专业知识, 其调试过程较困难、计算复杂度高, 故应用难度较高。

刘玄等<sup>[10]</sup>采用反馈-前馈变增益迭代学习方法对系统进行了反复学习和训练, 从而在不需要精确模型的情况下实现了运动轨迹跟踪; 然而, 该

收稿日期: 2024-03-08 修回日期: 2024-04-12 网络首发时间: 2024-07-15 10:54

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1506802); 国家自然科学基金面上项目(51977164)

作者简介: 李维波, 男, 1973年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 电力电子技术 in 能源系统中的应用。

E-mail: liweibo@whut.edu.cn

张浩, 男, 1999年生, 硕士生。研究方向: 电力电子与电力传动。E-mail: subaru.zhang@qq.com

\*通信作者: 李维波

方法需要对每一个设备进行专门训练, 故不具备普适性。

自抗扰控制虽然克服了传统 PID 控制器在处理扰动和模型不确定性方面的局限性, 但其非线性函数导致了控制器参数整定多而复杂, 故难以得到广泛应用; 赵爽等<sup>[11]</sup>通过使用线性自抗扰控制, 基于控制器带宽的线性误差反馈整定了控制器参数, 从而大为简化了控制器设计。

滑模控制作为一种鲁棒控制方法, 在对抗系统内部参数变化以及外部扰动方面的优势明显, 且其原理简单、理论支撑充足; 但滑模控制器为确保系统状态能够快速沿着滑模面收敛至期望状态, 一般会引入一个具有陡峭斜率的滑模面, 这可能会导致控制信号的高频率成分增加, 从而产生抖动。随着系统阶数的增加, 模型的不确定性所带来的影响将更加明显, 同时高阶导数计算的误差较大, 作为控制器输入时将对控制器性能造成不利影响。针对上述问题, 付永领等<sup>[12]</sup>设计了一种自适应变阻尼滑模控制器 (adaptive damp variable sliding-mode control, ADV-SMC), 然而, 该方法较为复杂, 抑制了控制器的响应速度, 其快速性欠佳。

侯利民等<sup>[13]</sup>将改进麻雀搜索算法应用于电机调速系统的滑模控制器中, 解决了参数整定困难等问题, 提高了系统的整体性能。谢鹏等<sup>[14]</sup>采用自适应遗传算法整定了 EHA 系统控制器的参数, 验证了智能算法对于控制系统优化的有效性。

为了提高控制器的抗扰动能力和响应速度, 并降低滑模控制器的参数整定难度, 本文拟利用蜘蛛蜂优化<sup>[15]</sup> (spider wasp optimizer, SWO) 算法对滑模控制器的滑模面和趋近率参数进行整定和优化, 并将使用 Matlab/Simulink 和 AMESim 软件进行联合仿真验证, 以证明蜘蛛蜂算法优化 EHA 滑模控制器的滑模面和趋近率参数的可行性, 从而提升控制器的综合性能, 对 EHA 滑模控制器设计提供理论参考。

## 1 EHA 系统模型

EHA 系统可以分为电气部分和液压部分, 其由驱动器控制电机旋转, 带动液压泵工作, 然后将油液注入或抽出液压缸, 从而带动液压杆作直线伸缩运动, 最终到达指定位置。图 1 所示为 EHA 系统的组成框图。其中:  $x_d$  表示目标位置;  $u$  表示电机驱动器的输出电压;  $i$  表示电机电流;  $x_l$  表示活塞杆位移;  $p_1, p_2$  分别表示液压缸两侧的压强;  $\theta$  表示电机的机械角度; PWM 表示脉宽调

制 (pulse-width modulation)。

### 1.1 电机模型

电机采用表贴式永磁同步电机, 其电压方程为

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P & -\omega_e \\ \omega_e & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $U_d, U_q$  分别为电机 d, q 轴的电压;  $R$  为电机等效电阻;  $i_d, i_q$  分别为电机 d, q 轴的电流;  $P$  为电机的极对数;  $\omega_e$  为电角速度;  $\psi_d, \psi_q$  分别为电机 d, q 轴的磁通。其中,

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $L_d, L_q$  分别为电机 d, q 轴的电感;  $\psi_f$  为电机磁链。

电机的电磁转矩  $T_e$  的表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} P [\psi_f i_q - (L_q - L_d) i_d i_q] \quad (3)$$

对于表贴式电机而言, 其电机 d, q 轴的电感相等, 即

$$L_d = L_q \quad (4)$$

则式 (3) 可以简化为

$$T_e = \frac{3}{2} P \psi_f i_q \quad (5)$$

电机的运动方程为

$$T_e - T_L = J \dot{\omega}_m + B_m \omega_m \quad (6)$$

式中:  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为电机转动惯量;  $\omega_m$  为电机转子的机械角速度;  $B_m$  为电机的黏性阻尼。

### 1.2 液压系统模型

设定  $V_{10}, V_{20}$  分别为液压缸活塞左侧、右侧的初始容积;  $A_1, A_2$  分别为活塞左侧、右侧的有效作用面积。为简化分析, 本文采用了对称式液压缸, 且设定液压活塞初始位置为活塞缸的中心处, 则

$$V_{10} = V_{20} = V \quad (7)$$

$$A_1 = A_2 = A \quad (8)$$

式中:  $V$  为活塞左侧、右侧的初始容积;  $A$  为活塞左侧、右侧的有效作用面积。

考虑液压缸的外泄漏以及油液的可压缩性, 液压缸的流量连续性方程为<sup>[16]</sup>

$$Q_1 = A \dot{x}_l + ((V + A x_l) / \beta_e) \cdot \dot{p}_1 + C_{ip} (p_1 - p_2) \quad (9)$$

$$Q_2 = A \dot{x}_l + ((V - A x_l) / \beta_e) \cdot \dot{p}_2 + C_{ip} (p_1 - p_2) \quad (10)$$

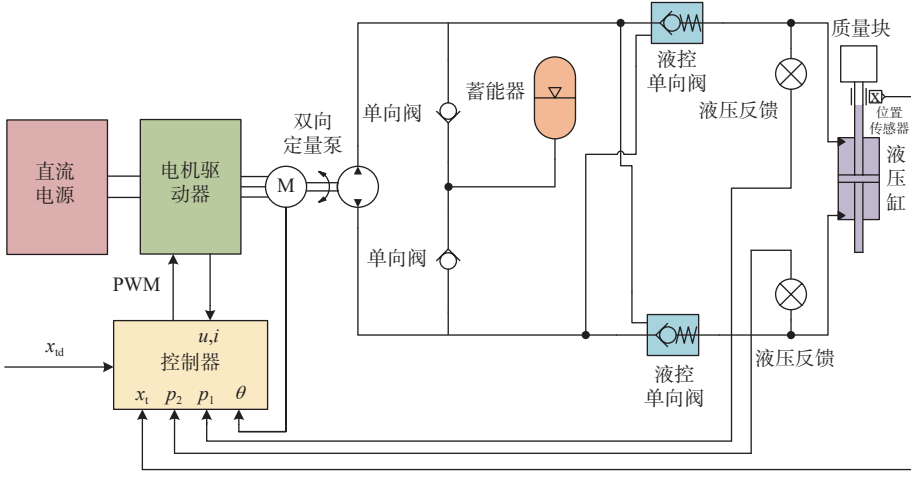


图 1 EHA 系统的结构

Fig. 1 Structure of EHA system

式中:  $Q_1$ ,  $Q_2$  分别为液压缸的进口、出口流量;  $\beta_e$  为液压油的弹性模量;  $C_{ip}$  为液压缸内的泄漏系数。

令  $\Delta p = p_1 - p_2$ , 则液压缸的运动方程为

$$A \cdot \Delta p = m \ddot{x}_1 + B_c \dot{x}_1 + k x_1 + F_f \quad (11)$$

式中:  $m$  为液压杆和负载的总质量;  $B_c$  为液压缸的黏性阻尼;  $k$  为弹簧刚度;  $F_f$  为静摩擦。

考虑 EHA 系统中未知泄漏和未知力损失的影响, 液压缸模型可以表示为

$$\begin{cases} D \omega_m = A \dot{x}_1 + V / (2\beta_e) \cdot \Delta \dot{p} + C_{ip} \Delta p + Q_{un} \\ A \Delta p = m \ddot{x}_1 + B_c \dot{x}_1 + k x_1 + F_f + F_{un} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $D$  为液压泵排量;  $Q_{un}$  为未知流量损失;  $F_{un}$  为未知力的损失。

分析式 (12) 的液压缸模型可知, EHA 系统由一个一阶系统和一个二阶系统组成, 故其系统的状态变量  $x_1, x_2, x_3$  可以表示为

$$[x_1, x_2, x_3]^T = [x_1, \dot{x}_1, \Delta p]^T \quad (13)$$

联立式 (12) 和式 (13), 则系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{B_c}{m} x_2 - \frac{k}{m} x_1 + \frac{A}{m} x_3 - F_d \\ \dot{x}_3 = -\frac{2A\beta_e}{V} x_2 - \frac{2\beta_e C_{ip}}{V} x_3 + \frac{2\beta_e D}{V} \omega_m - Q_d \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $F_d = F_f/m + F_{un}/m$ , 并且  $F_d$  存在一个上界  $D_1$ ;  $Q_d = -2\beta_e/(VQ_{un})$ , 并且  $Q_d$  存在一个上界  $D_2$ 。

## 2 EHA 控制器设计

基于式 (14) 可以将 EHA 系统视为三阶系统, 且需考虑未知泄漏、摩擦等非线性因素的影响。对于非线性系统的控制, 在工程实践中一般先将模型局部或全局线性化, 然后利用线性系统理论

来分析设计控制器, 但这种方法将产生很大的偏差, 最终影响控制效果。而滑模控制器作为一种非线性控制器, 其最大的优点是可以克服系统的不确定性; 同时, 滑模控制器通过参数优化之后, 其对外界的干扰和系统参数的变化具有鲁棒性。由于高阶滑模控制器的设计较为复杂, 为简化设计, 本文将采用级联滑模控制器。

### 2.1 液压系统的滑模控制器设计

定义系统误差  $e_1, e_2$  及其导数的表达式为

$$\begin{cases} e_1 = x_{1d} - x_1 \\ \dot{e}_1 = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 \\ e_2 = \int \Delta p_d - \Delta p \\ \dot{e}_2 = \Delta p_d - \Delta p \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\Delta p_d$  为液压缸的给定压差。

滑模面  $s_1, s_2$  的表达式为

$$\begin{cases} s_1 = c_1 e_1 + \dot{e}_1 \\ s_2 = c_2 e_2 + \dot{e}_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中, 参数  $c_1 > 0, c_2 > 0$ , 且需满足 Hurwitz 条件<sup>[17]</sup>。

采用指数趋近率, 则有

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -k_1 s_1 - \varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) \\ \dot{s}_2 = -k_2 s_2 - \varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $k_1, k_2$  为收敛增益系数;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为鲁棒增益系数, 且  $\varepsilon_1 > D_1, \varepsilon_2 > D_2$ 。

构造 Lyapunov 函数, 即

$$V_\ell = \frac{1}{2} s_\ell^2 \quad (18)$$

式中,  $V_\ell$  为能量函数, 其中  $\ell = 1, 2$ 。

联立式 (16) 和式 (18), 得

$$\dot{V}_\ell = s_\ell \dot{s}_\ell = -k_\ell s_\ell^2 - \varepsilon_\ell |s_\ell| < 0 \quad (19)$$



由式 (19) 可知, 系统实现了收敛。为了避免因符号函数  $\text{sgn}(\ast)$  带来的输出抖振, 需采用饱和函数  $\text{sat}(\ast)$  予以代替:

$$\text{sat}(\ast) = \begin{cases} 1, & \ast \geq 1 \\ \ast, & -1 \leq \ast \leq 1 \\ -1, & \ast \leq -1 \end{cases} \quad (20)$$

## 2.2 驱动电机的 PI 控制器设计

相较于液压泵和液压缸, 电机的响应速度更快, 仅使用 PI 控制器即可取得较好的效果<sup>[18]</sup>, 因此电机可以采用电流-转速双闭环控制模式, 其控制率  $u(t)$  为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (21)$$

式中:  $K_p$  为比例系数;  $e(t)$  为误差, 其中  $t$  为时间变量;  $K_i$  为积分系数。

## 3 SWO 算法优化的滑模控制器

蜘蛛蜂是膜翅目中最大的有刺黄蜂之一, 广泛分布于世界大部分地区, 其中热带地区最为常见。蜘蛛蜂是独居的捕食性昆虫, 它们利用蜘蛛作为其后代的最佳食物来源。基于自然界中雌性蜘蛛蜂的狩猎、筑巢和交配行为, SWO 元启发式算法应运而生, 该算法具有多种独特的更新策略, 适用于不同开发要求的广泛优化问题。

### 3.1 SWO 算法原理

SWO 算法模拟了蜘蛛蜂的行为, 包括搜索、追捕、筑巢和交配 4 个阶段。

初始种群的计算公式为

$$SW_i^t = L + r \times (H - L) \quad (22)$$

式中:  $SW_i^t$  为当前时刻  $t$  的解, 其中  $i$  为种群数量;  $L, H$  分别为初始解的下界和上界;  $r$  为  $[0, 1]$  之间的随机向量。

在搜索阶段, 蜘蛛蜂将随机进入定步长的随机探索模式或变步长的小范围探索模式, 其中定步长随机探索模式的计算公式为

$$SW_i^{t+1} = SW_i^t + \mu_1 \times (SW_a^t - SW_b^t) \quad (23)$$

式中:  $SW_i^{t+1}$  为下一时刻  $t+1$  的解;  $\mu_1$  为系数;  $SW_a^t$  和  $SW_b^t$  均为总体中随机选取的个体。其中

$$\mu_1 = |r_n| \cdot r_1 \quad (24)$$

式中:  $r_n$  为一个使用正态分布生成的随机数;  $r_1$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。

变步长小范围探索模式的计算公式为

$$SW_i^{t+1} = SW_c^t + \mu_2 \times (L + r_2 \times (H - L)) \quad (25)$$

式中:  $SW_c^t$  为总体中随机选择的个体;  $\mu_2$  为系数;  $r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机向量。其中

$$\mu_2 = B \cdot \cos(2\pi l) \quad (26)$$

式中, 系数  $B = \frac{1}{1+e^l}$ , 其中  $e$  为自然常数。

在进入追捕阶段之后, 分为成功捕杀和远离猎物 2 个状态, 其计算公式为

$$SW_i^{t+1} = SW_i^t + C \cdot |2 \cdot r_5 \cdot SW_a^t - SW_i^t| \quad (27)$$

式中:  $C$  为决定黄蜂速度的距离因子, 当  $C > 0.5$ , 即代表蜘蛛蜂的速度比猎物快; 反之,  $C < 0.5$  则代表蜘蛛蜂的速度比猎物慢;  $r_5$  为  $[0, 1]$  之间的随机向量。其中

$$C = \left( 2 - 2 \times \left( \frac{f}{f_{\max}} \right) \right) \times r_6 \quad (28)$$

式中:  $f, f_{\max}$  分别为当前适应度和最大适应度;  $r_6$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。

当猎物逃离蜘蛛蜂时, 蜘蛛蜂和猎物之间的距离逐渐增加。随着距离的增加, 追捕阶段将转入探索阶段, 其计算公式为

$$SW_i^{t+1} = SW_i^t \times v_c \quad (29)$$

式中,  $v_c$  为  $[-k, k]$  之间根据正态分布生成的向量, 其中  $k = 1 - (f/f_{\max})$ 。

在筑巢阶段, 蜘蛛蜂的行为分为 2 种: 第 1 种是将蜘蛛拖入最适合蜘蛛的区域, 其计算公式为

$$SW_i^{t+1} = SW^* + \cos(2\pi l) \times (SW^* - SW_i^t) \quad (30)$$

式中,  $SW^*$  为目前的最优解。

第 2 种行为是随机选择一个雌性蜘蛛蜂的区域, 其计算公式为

$$SW_i^{t+1} = SW_a^t + r_3 \cdot |\gamma| \cdot (SW_a^t - SW_i^t) + (1 - r_3) \cdot U \cdot (SW_b^t - SW_c^t) \quad (31)$$

式中:  $r_3$  为  $[0, 1]$  之间的随机数;  $\gamma$  为根据莱维飞行 (Levy flight) 模型所生成的数;  $U$  为一个随机全为 0 或 1 的向量;  $SW_c^t$  为总体中随机选择的个体。

交配繁殖出的新个体的计算公式为

$$SW_i^{t+1} = \text{Crossover}(SW_i^t, SW_m^t, C_R) \quad (32)$$

式中: Crossover 为均匀交叉算子;  $SW_m^t$  为雄性蜘蛛蜂的向量;  $C_R$  为交叉概率。

SWO 算法的基本流程如图 2 所示。其中:  $r_4$  为  $[0, 1]$  之间的随机数;  $N$  为初始种群;  $T$  为当前迭代次数;  $T_{\max}$  为最大迭代次数。

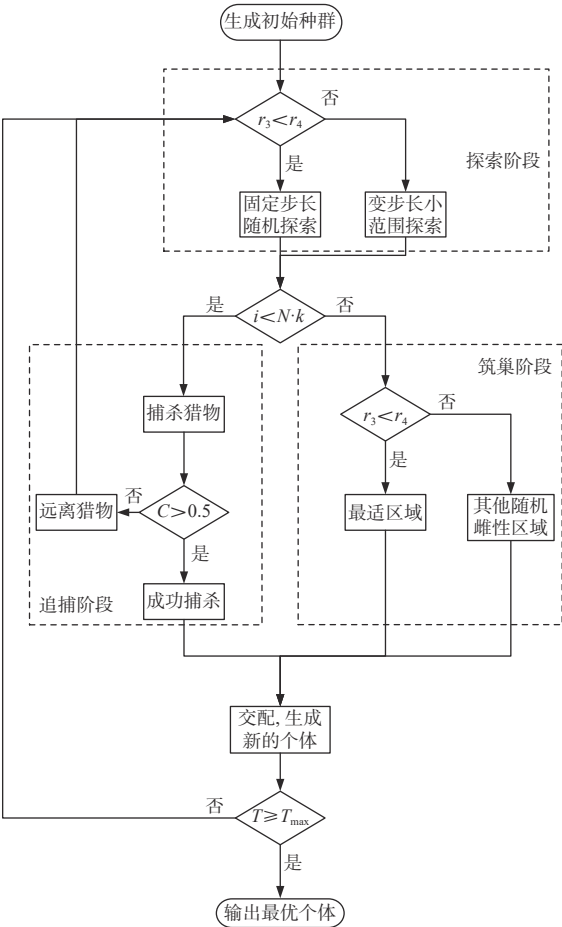


图2 SWO算法的基本流程图  
Fig. 2 Flow chart of SWO algorithm

3.2 蜘蛛蜂算法性能对比

为了验证蜘蛛蜂算法的性能优势, 本节将选择麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)和遗传算法(genetic algorithm, GA)开展对比测试, 3种算法采用了同一种适应度函数, 如图3所示, 其中 $X$ 和 $Y$ 为适应度函数的输入。

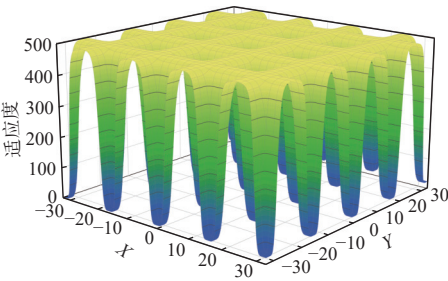


图3 3种算法的适应度函数  
Fig. 3 The fitness functions of three algorithms

设定初始种群为 $N=300$ , 最大迭代次数为 $T_{\max}=500$ , 3种智能算法的运行时间如图4所示, 可知SWO算法的运行时间仅为SSA和GA的0.386%和0.429%, 其显著降低了算法的寻优时间。图5所示为SWO, SSA, GA的最小适应度, 可知SWO的寻优能力与SSA和GA基本相同。

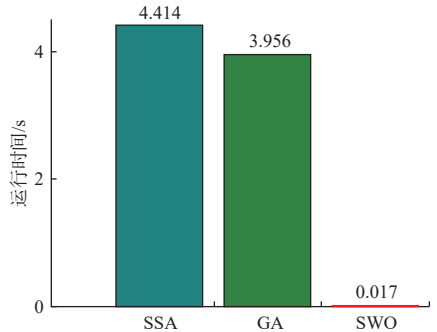


图4 3种算法的运行时间  
Fig. 4 Algorithm running time of three algorithms

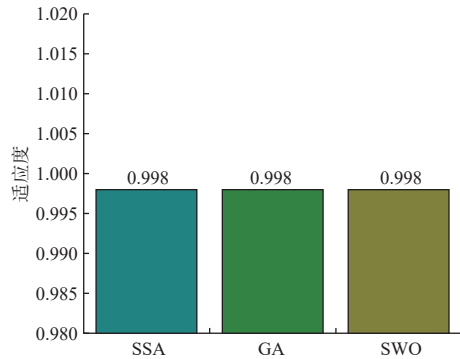


图5 3种算法的最小适应度  
Fig. 5 Minimum fitness of of three algorithms

综上所述, SWO在拥有良好寻优能力的同时, 可显著缩短运行时间, 因其整体性能优越, 故本文将选用SWO算法来优化滑模控制器(sliding-mode control, SMC)的滑模面和趋近率参数。

3.3 SWO算法优化滑模控制器参数

设定待优化参数为 $c_1, c_2, k_1, k_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ , 初始种群数量 $N=300$ , 初始解的下界 $L=[10, 10, 50, 50, 1, 1]$  初始解的上界 $H=[1\ 000, 1\ 000, 3\ 000, 3\ 000, 500, 500]$ , 迭代次数为 $T_{\max}=500$ 。为优化滑模控制器的综合性能, 适应度函数将采用多目标结构:

$$F = a_1 t_1 + a_2 t_2 + a_3 o_{\max} + a_4 e_{\text{ave}} \tag{33}$$

式中:  $F$ 为适应度;  $a_1, a_2, a_3, a_4$ 均为权重;  $t_1$ 为上升时间, 定义为系统输出首次到达目标值90%所对应的时间;  $t_2$ 为系统收敛时间;  $o_{\max}$ 为系统的最大超调量;  $e_{\text{ave}}$ 为系统的平均稳态误差。本算例取 $[a_1, a_2, a_3, a_4]=[100, 280, 600, 100]$ , 则SWO算法优化的结果为:  $[c_1, c_2, k_1, k_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2]=[84.3, 87.5, 59.2, 76.7, 12.4, 8.7]$ 。

4 EHA系统的联调仿真验证

采用AMESim和Simulink软件进行联合仿真, 其中液压部分由AMESim搭建, 控制部分和电气部分则由Simulink搭建。EHA系统的仿真参数如表1所示。

| 表 1 EHA 系统的关键性仿真参数  |                       |
|---|-----------------------|
| Table 1 Key simulation parameters of EHA system                   |                       |
| 参数名称  | 数值                    |
| 相电阻 $R/\Omega$  | 0.048 5               |
| 相电感 $L/\text{mH}$   | 0.395                 |
| 磁链 $\psi_f/\text{Wb}$   | 0.119 4               |
| 转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$                               | 0.002 7               |
| 电机黏性阻尼 $B_m/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$            | $4.924\times 10^{-4}$ |
| 极对数   | 4                     |
| 泵排量 $D/(\text{mL}\cdot\text{r}^{-1})$                             | 8                     |
| 液压活塞行程 $/\text{m}$  | 0.8                   |
| 活塞有效面积 $A/\text{m}^2$   | $3.78\times 10^{-4}$  |
| 活塞及负载总质量 $m/\text{kg}$  | 100                   |
| 内泄漏系数 $C_{ip}/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$ | 0.135                 |
| 活塞黏性阻尼 $B_d/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$            | 10 000                |
| 油液弹性模量 $\beta_e/\text{MPa}$                                       | 1 700                 |

为验证本文所提方法的有效性, 本节将采用 PI 控制器和 SMC 控制器开展仿真对比研究, 为便于描述, 将 PI 控制器定义为方案一, SMC 控制器定义为方案二, SWO 优化滑模控制器定义为方案三。方案一的相关参数为:  $K_p=440$ ,  $K_i=10$ ; 方案二的相关参数为:  $c_1=98$ ,  $c_2=44$ ,  $k_1=37$ ,  $k_2=55$ ,  $\varepsilon_1=14$ ,  $\varepsilon_2=10$ ; 方案三的相关参数为:  $c_1=84.3$ ,  $c_2=87.5$ ,  $k_1=59.2$ ,  $k_2=76.7$ ,  $\varepsilon_1=12.4$ ,  $\varepsilon_2=8.7$ 。对于给定目标位置  $x_{id1}=0.1\text{ m}$  的小阶跃响应和  $x_{id2}=0.6\text{ m}$  的大阶跃响应, 3 种控制器的响应结果如图 6 所示。

由图 6 可知: 1) 当方案一采用固定参数时, 无法完全适应不同幅值的阶跃信号, 相较于方案二和方案三而言, 出现了较大的稳态误差; 2) 方案一和方案二均出现了不同程度的超调, 而且随着阶跃响应幅值的增加, 超调也更加明显, 而方案三在大阶跃响应和小阶跃响应中均同时避免了超调; 3) 从收敛时间来看, 方案一和方案二无明显区别, 而方案三的收敛时间则相较于方案一和方案二分别提升了 42.5% 和 33.6%。

当 3 种控制器到达稳态之后, 给系统突增负载, 3 种控制器的响应曲线如图 7 所示: 方案一不仅波动最大, 且恢复后出现了更大的误差; 方案三比方案一和方案二的系统波动更小且恢复时间最短, 故其抗干扰性更强。

3 种控制器的稳态误差如图 8 所示, 可知在进入稳态之后, 方案一和方案二的稳态误差分别为 0.44% 和 0.14%, 而方案三的稳态误差仅为 0.11%, 且避免了抖动。

为了验证方案三的跟踪性能, 采用频率为 0.5 Hz 的正弦信号作为给定值, 其与方案二的对

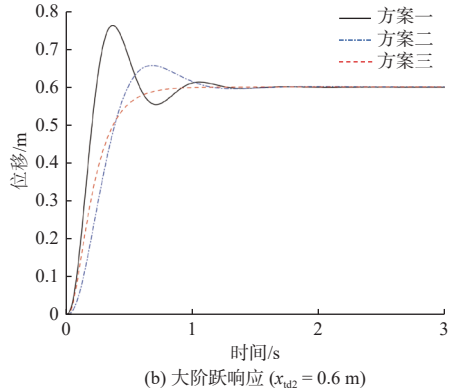
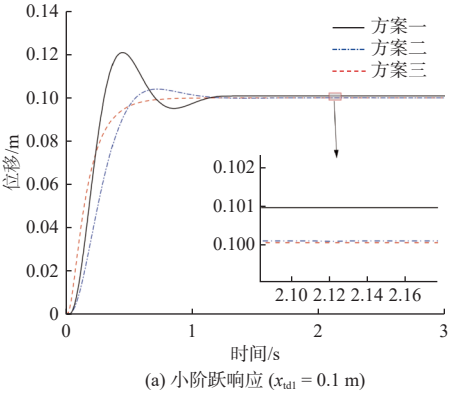


图 6 3 种控制器的阶跃响应结果  
Fig. 6 Step response results for three controllers

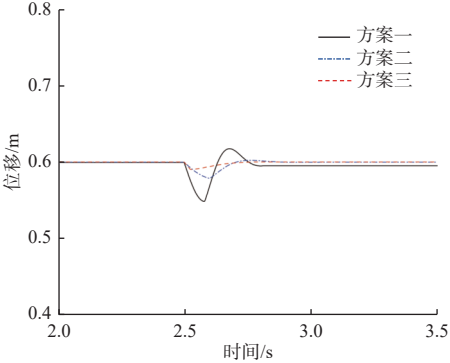


图 7 3 种控制器的突增负载响应  
Fig. 7 Surge load response for three controllers

比结果如图 9 所示。方案二的累计误差为 0.366 m, 而方案三的累计误差为 0.199 m(比方案一降低了 45.6%), 即方案三的跟踪误差更小, 具备更优的正弦跟踪性能。

5 结 语

EHA 作为一个高阶系统, 在泄漏、摩擦、系统参数变化等非线性因素的影响下, 控制器的设计难度较大。为此, 本文提出了基于 SWO 算法优化滑模控制器的方法: 首先, 通过对滑模控制器的滑模面和趋近率参数进行优化, 实现了精确的位置跟踪, 提高了控制器的性能; 然后, 使用 AMESim 和 Simulink 软件进行联合仿真, 并使用

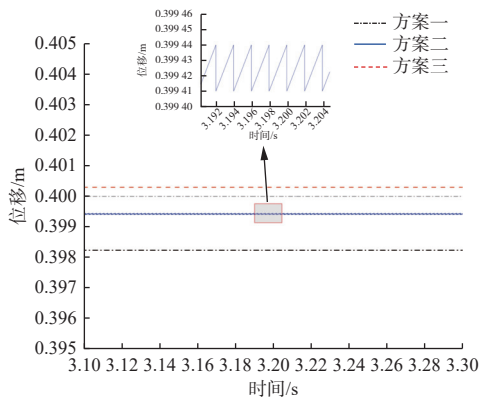
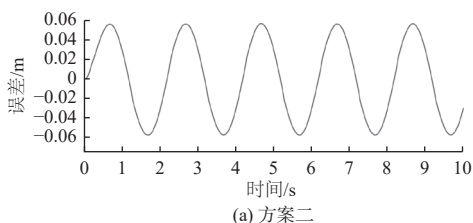
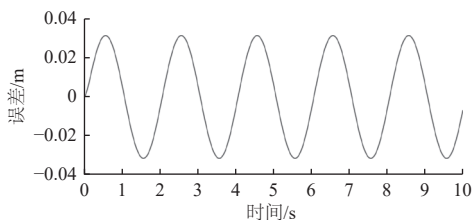


图 8 3 种控制器的稳态误差

Fig. 8 Steady state error for three controllers



(a) 方案二



(b) 方案三

图 9 2 种方案的跟踪误差曲线

Fig. 9 Sinusoidal tracking error curves for two schemes

SMC 控制器和 PI 控制器作为对比, 仿真结果验证了使用 SWO 算法优化 SMC 控制器参数的可行性, SWO 算法优化的滑模控制器在阶跃响应、抗干扰性以及正弦跟踪等方面均表现出了更优秀的性能, 可为该控制器的实践设计提供理论参考。

## 参考文献:

- [1] 王明康, 付永领, 赵江澳, 等. 电动静液作动器的新型变阻尼级联滑模控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1612–1618.  
WANG M K, FU Y L, ZHAO J G, et al. Novel damping-variable sliding mode cascade control for electro-hydrostatic actuator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(8): 1612–1618 (in Chinese).
- [2] 张敏捷. 电动静液作动器 (EHA) 自抗扰控制方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023.  
ZHANG M J. Research on active disturbance rejection control method of EHA[D]. Taiyuan: North University of China, 2023 (in Chinese).
- [3] 杜伟. 船舶阀门电动静液作动器设计及控制研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [4] 洪辉, 高斌, 李晶. 飞机电静液作动器滑模-PID 控制器设计 [J]. 民用飞机设计与研究, 2018(4): 42–46.  
HONG H, GAO B, LI J. Sliding mode-PID control for aircraft electro-hydrostatic actuator[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2018(4): 42–46 (in Chinese).
- [5] 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 of China, 2021, 28(7): 1382–1389 (in Chinese).
- [6] 陈宗斌, 廖健, 刘帮会. 新型电液舵机的自抗扰控制算法及试验研究 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 166–175.  
CHEN Z B, LIAO J, LIU B H. Application research on active disturbance rejection control algorithm and test of electro-hydraulic steering gear[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(1): 166–175 (in both Chinese and English).
- [7] 周捷. 基于远程控制的电动静液作动器 (EHA) 的阻抗控制研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.  
ZHOU J. Research on impedance control of electro-hydrostatic actuator (EHA) based on remote control[D]. Shenyang: Northeast University, 2019 (in Chinese).
- [8] GUO Q, CHEN Z L, YAN Y, et al. Terminal sliding mode velocity control of the electro-hydraulic actuator with lumped uncertainty[J]. Aerospace Systems, 2021, 4(4): 345–352.
- [9] LI R Z, DU Y H, YU Y. Research on refined modeling and fuzzy control of electro-hydrostatic actuator with co-simulation method[J]. Energies, 2022, 15(23): 9129.
- [10] 刘玄, 李维波, 邹振杰, 等. 反馈-前馈变增益迭代学习法在某型电液位置伺服系统中的应用 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 148–154.  
LIU X, LI W B, ZOU Z J, et al. Feedback-feedforward variable gain iterative learning method adopted in electro-hydraulic position servo system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(6): 148–154 (in Chinese).
- [11] 赵爽, 史红伟, 刘小松, 等. 三阶线性自抗扰控制器的液压伺服流量控制 [J]. 液压与气动, 2021, 45(5): 149–156.  
ZHAO S, SHI H W, LIU X S, et al. Hydraulic servo flow control based on third order LADRC[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(5): 149–156 (in Chinese).
- [12] 付永领, 李宇鹏, 王明康, 等. 电动静液作动器的自适应变阻尼滑模控制 [J]. 北京理工大学学报, 2023, 37(12): 156–165.  
HOU L M, WEI Z Q, CAO S H, et al. Fixed time model-free sliding mode control of PMSM based on sparrow search algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(12): 156–165 (in Chinese).
- [13] 侯利民, 韦卓庆, 曹生辉, 等. 麻雀搜索算法的 PMSM



固定时间无模型滑模控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12): 156–165.

HOU L M, WEI Z Q, CAO S H, et al. Fixed time model-free sliding mode control of PMSM based on sparrow search algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(12): 156–165 (in Chinese).

[14] 谢鹏, 张红梅. 基于自适应遗传算法的 EHA 控制器优化设计 [J]. 传感技术学报, 2016, 29(6): 909–914.

XIE P, ZHANG H M. Optimum design of electro-hydrostatic actuator controller based on adaptive genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(6): 909–914 (in Chinese).

[15] ABDEL-BASSET M, MOHAMED R, JAMEEL M, et al. Spider wasp optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm[J]. [Artificial Intelligence Review](#), 2023, 56(10): 11675–11738.

[16] 韩小霞, 谢建, 冯永保, 等. 基于模型信息的电静液作动器降阶线性自抗扰控制 [J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 681–689.

HAN X X, XIE J, FENG Y B, et al. Reduced order linear active disturbance rejection control based on model information of electro-hydrostatic actuator[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 681–689 (in Chinese).

[17] 王燕平, 王艳芳. 自动控制原理 [M]. 人民邮电出版社, 2015: 192.

WANG Y P, WANG Y F. Principle of automatic control [M]. Posts and Telecommunications Press, 2015: 192.

[18] 詹锦皓, 李维波, 高佳俊, 等. 基于串级前馈 PID 协调控制的汽轮发电机组建模方法 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(增刊 1): 149–156.

ZHAN J H, LI W B, GAO J J, et al. Modeling method of steam turbine generator setbased on cascade feedforward PID coordinated control system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(Supp 1): 149–156 (in Chinese).

# Optimization of EHA sliding mode controller based on spider wasp algorithm

LI Weibo<sup>\*1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, XU Chenghu<sup>1</sup>, ZHANG Maojie<sup>1</sup>, FANG Hualiang<sup>3</sup>

1 School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

2 College of Electrical Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730124, China

3 School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract:** [ **Objective** ] This paper proposes using the Spider Wasp Optimization (SWO) algorithm to achieve precise position control of an electro-hydrostatic actuator (EHA) while reducing the parameter tuning difficulty of the EHA sliding mode controller and improving its comprehensive performance. [ **Methods** ] A simplified model of an EHA is established and its sliding mode controller is designed. The sliding mode surface and reaching rate parameters of the controller are then adjusted by the SWO algorithm, and Matlab/Simulink and AMESim simulation software is used to build a co-simulation model for verification. [ **Results** ] The parameters of the sliding mode controller are adjusted manually and by the SWO algorithm respectively. The comparative simulation results show that the sliding mode controller optimized by the SWO algorithm avoids overshoot and has enhanced anti-interference properties, and its convergence speed is improved by 33.6%, proving the feasibility of optimizing the sliding surface and reaching rate parameters of an EHA sliding mode controller using the SWO algorithm. [ **Conclusion** ] The results of this study can provide theoretical references for the design of EHA sliding mode controllers.

**Key words:** EHA equipment; sliding-mode control; optimization; spider wasp optimizer; joint simulation