

文章编号:1673-9469(2026)03-0105-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.012

基于参数优化的桥式起重机防摆控制研究

王莉静,陆淞涛,刘智光*,李钰,贾政
(天津城建大学 控制与机械工程学院,天津 300384)

摘要:针对外部未知作用力所导致的桥式起重机起吊过程中负载摆动明显的问题,设计了一种基于改进蜜獾算法参数优化的神经网络滑模控制器(SMC)。首先,使用径向基函数(RBF)神经网络对桥式起重机系统动力学模型中的未知作用力进行有效拟合,再将其拟合值输入SMC,以保证桥式起重机系统起吊过程中的渐进稳定性。然后,引入Chebyshev混沌种群机制和高斯种群变异策略对标准蜜獾算法进行改进,以增强其对RBF滑模控制器(RBFSMC)中速率参数值的寻优能力,从而削弱系统抖振。最后,通过与SMC、RBFSMC、粒子群优化-RBFSMC控制器进行定位跟踪性能、输出驱动力和防摆控制效果对比,证明所设计的控制器在桥式起重机精确定位和消摆方面具有较好的控制效果。

关键词: 蜜獾算法;RBF神经网络;滑模控制器;桥式起重机

中图分类号:TH21

文献标识码:A

Research on Anti-swing Control for Bridge Cranes Based on Parameter Optimization

WANG Lijing, LU Songtao, LIU Zhiguang*, LI Yu, JIA Zheng

(School of Control and Mechanical Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: To address the significant load swing caused by unknown external forces during the hoisting process of bridge cranes, a neural network Sliding Mode Controller (SMC) with parameter optimization based on an improved honey badger algorithm is proposed. First, a Radial Basis Function (RBF) neural network is employed to effectively approximate the unknown external forces in the dynamic model of the crane system. The output of this approximation is then fed into the SMC to ensure the asymptotic stability of the crane system during the hoisting process. Next, the Chebyshev chaos population mechanism and Gaussian mutation strategy are introduced to improve the standard honey badger algorithm, enhancing its optimization ability for the rate parameters of the RBFSMC and thereby reducing system oscillations. Finally, through comparative simulations with SMC, RBFSMC, and particle swarm optimization-RBFSMC controllers, the proposed controller is shown to achieve better positioning, output driving force, and anti-swing control performance, demonstrating its superior effectiveness in precise positioning and sway suppression for the crane system.

Key words: honey badger algorithm; RBF neural network; sliding mode controller; bridge crane

桥式起重机是横架于车间、仓库和料场上空进行物料吊运的一种轨道运行式起重设备^[1],通过装有桥架的大车做纵向运动、装有起升机构的起重小车做横向运动,吊运几吨至几百吨的重物。

桥式起重机的起吊控制系统具有非线性、欠驱动和强耦合性的特点,当工作环境发生变化时,常出现起重小车定位不准和起吊负载摆动明显的问题,易给施工现场带来巨大的潜在安全风险。因

收稿日期:2025-01-07 修回日期:2025-03-20

基金项目:天津市自然科学基金资助项目(20YDTPJC00840)

第一作者:王莉静(1974—),女,山西阳泉人,博士,教授,从事智能控制及智能诊断技术方面的研究。

*通信作者:刘智光(1986—),男,河北昌黎人,博士,讲师,从事机器人技术、多传感器信息融合等方面的研究。

此,采用智能控制方式对桥式起重机中的起吊控制系统进行精准定位和消摆控制,对起重车间的安全生产具有重要意义。

近年来,滑模控制器(Sliding Mode Control, SMC)被广泛应用于起重机的起吊控制器设计中,其具有快速响应输入变换、对系统参量变换和扰动不敏感以及无需系统在线辨识等优点^[2-3]。SMC采用的控制策略为:根据运行系统的当前状态有目的地不断变化,从而迫使系统按照预定的“滑动模态”轨迹进行运动。Liu等^[4]设计了一种非线性滑模跟踪控制器,在快速消除跟踪误差的同时抑制起吊负载摆动,具有良好的跟踪性能和消摆效果。刘忠等^[5]采用两个滑模面分别控制不同的状态变量,再结合等效控制与切换控制设计了一种分层SMC,以实现桥式起重机的有效定位与消摆控制。同时,桥式起重机系统中还存在外部未知作用力对控制系统的干扰作用^[6-7]。针对这种干扰行为,研究者们多利用神经网络所具有的强大鲁棒性和自学习能力来估计未知作用力,从而对控制系统进行补偿^[8-9]。Chen等^[10]提出了一种基于神经网络的部分状态来反馈增量的SMC,即通过神经网络来逼近起重机外部未知非线性动力学项,再结合滑模控制方法消除吊钩和重物的摆动。孙家骏等^[11]引入径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络,结合滑模控制方法对起重机的外部未知作用力进行逼近,并对其防摆效果进行实验验证。上述研究在桥式起重机的定位与防摆控制方面取得了良好效果,但并未考虑SMC参数优化对控制性能的影响,易导致控制过程中出现抖振现象。Hashim等^[12]在2022年提出蜜獾算法(Honey Badger Algorithm, HBA),主要通过模拟蜜獾在自然界中的觅食行为进行寻优,该算法具有较强的搜索能力且收敛速度快,被广泛用于解决多个工程领域的优化问题。但HBA局部开发能力较弱,面对复杂问题时难以跳出局部最优解。为了提高HBA的优化性能,胡涛等^[13]利用Tent映射与正态云模型相结合,来提高蜜獾初始化阶段种群的多样性,改进了算法的优化速度和求解精度。董海等^[14]在蜜獾捕食阶段引入了差分进化变异和交叉策略,增强了算法的搜索能力与收敛速度。上述改进策略仅针对HBA的某一阶段而没有对算法全局进行优化,相较于初始HBA在性能上有一定的提升,但仍有改进空间。

基于以上研究,本文设计了一种结合改进

HBA算法(Improved Honey Badger Algorithm, IHBA)与RBF神经网络的SMC(IHBA-RBFSMC),通过使用RBF神经网络对未知作用力进行非线性拟合后输入SMC中,减少了起吊重物时未知作用力的干扰;通过改进初始化阶段及捕食阶段后HBA算法,对SMC参数进行寻优,增强了桥式起重机系统起吊的稳定性。

1 系统模型建立

本文构建了桥式起重机系统的动力学简化模型,如图1所示。设起重小车和重物负载的位置分别为 (x_M, y_M) 、 (x_m, y_m) ,其中 M 和 m 分别代表起重小车和重物负载的质量(单位:kg)。施加力 F (单位:N)驱动起重小车在桥架上移动的变幅距离为 x (单位:m),作用在起重小车上的未知作用力为 u (单位:N),起重小车运动时重物负载产生的摆角为 θ (单位:rad),假设吊绳长度 l (单位:m)恒定不变。通过寻找驱动力 F 与重物负载摆角 θ 间的耦合关系,将对重物负载的摆动控制转化为对起重小车的运动控制^[15]。

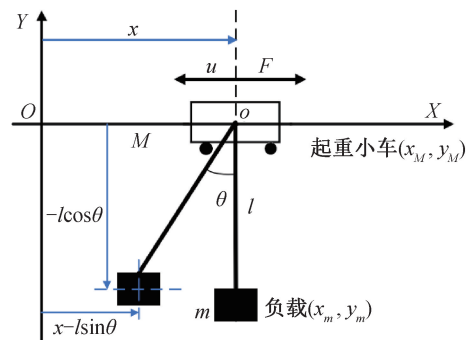


图1 系统动力学简化模型

Fig. 1 Simplified system dynamics model

图1中,若起重小车在 X 方向上运动的速度为 \dot{x} ,则重物负载在 X 、 Y 方向上运动的速度 \dot{x}_m (单位:m/s)、 \dot{y}_m (单位:m/s)分别为

$$\begin{cases} \dot{x}_m = \dot{x} - l \cos \theta \dot{\theta} \\ \dot{y}_m = l \sin \theta \dot{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\theta}$ 为角速度,rad/s。

桥式起重机系统总动能 T (单位:J)和势能 U (单位:J)分别为

$$T = \frac{1}{2} \dot{x}^2 (M + m) + \frac{1}{2} m (l^2 \dot{\theta}^2 - 2 \dot{x} l \dot{\theta} \cos \theta) \quad (2)$$

$$U = -mgl \cos \theta \quad (3)$$

因此,构建拉格朗日算子 L :

$$L = T - U = \frac{1}{2}\dot{x}^2(M + m) + \frac{1}{2}m(l^2\dot{\theta}^2 - 2\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta) + mgl\cos\theta \quad (4)$$

将拉格朗日算子 L 代入第二类拉格朗日方程,可得

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = (M + m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta}\cos\theta + \\ ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F - u \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = l\ddot{\theta} + \dot{x}\cos\theta + g\sin\theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: \ddot{x} 为起重小车在 X 方向上的加速度, m/s^2 ; $\ddot{\theta}$ 为角加速度, rad/s^2 。

根据式(5)可知,桥式起重机系统的动力学方程具有复杂的非线性。若从起吊重物安全的角度考虑,起吊摆角 θ 越趋近 0° ,起吊安全性越高。将 $\theta \approx 0^\circ$ (即 $\cos\theta \approx 1, \sin\theta \approx 0$) 代入式(5),可将系统的动力学方程转换为状态空间方程,即

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{mg}{M}\theta + \frac{1}{M}(F - u) \\ \ddot{\theta} = -\frac{(M + m)g}{Ml}\theta - \frac{1}{Ml}(F - u) \end{cases} \quad (6)$$

2 桥式起重机控制器设计

2.1 RBFSMC 设计及稳定性分析

设起重小车的理想轨迹为 x_d (单位:m), 将其与起重小车在桥架上移动的变幅距离 x 的差值定义为控制系统跟踪误差 e (单位:m), 即 $e = x_d - x$ 。定义控制系统跟踪误差的线性滑模面 s 为

$$s = ce + \dot{e} \quad (7)$$

式中: c 为运动点趋近滑模面的速率参数,且 $c > 0$ 。

当系统状态处于滑模面 $s = 0$ (或其附近)时,系统保持稳定。调节参数 c 的大小可改变系统趋近滑模面的速度。 c 越大系统速度越快,但易导致运动点在趋近过程中穿过滑模面,进而造成系统抖振;若在接近滑模面时减小 c ,则易导致系统趋近时间过长^[16-17]。因此,参数 c 的正确选取有助于解决系统抖振问题。

对式(7)求导,可得

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{x}_d - \ddot{x} \quad (8)$$

对桥式起重机系统的状态空间方程式(6)做移项处理,可得

$$M\ddot{x} = mg\theta + F - u \quad (9)$$

令 $f(u) = mg\theta - u$, 并将其代入式(9),可得

$$M\ddot{x} = F + f(u) \quad (10)$$

将式(8)代入式(10)中,可得

$$M\dot{s} = M(c\dot{e} + \ddot{x}_d) - M\ddot{x} = -F - f(u) + M(c\dot{e} + \ddot{x}_d) \quad (11)$$

令 $\dot{s} = 0$, 则等效驱动力 F_{eq} (单位:N) 为

$$F_{eq} = -f(u) + M(c\dot{e} + \ddot{x}_d) \quad (12)$$

在式(12)中增加滑模控制增益系数 k ($k > 0$) 和基于滑模面 s 的符号函数 $\text{sgn}(s)$ 来修正 SMC, 以减少桥式起重机系统在起吊重物时出现的抖振现象,其中 $\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ -1 & s < 0 \end{cases}$ 。

SMC 的输出控制律 F_a (单位:N) 为

$$F_a = -f(u) + M(c\dot{e} + \ddot{x}_d) + ks + \mu\text{sgn}(s) \quad (13)$$

式中: μ 为滑模控制补偿系数。

式(13)中含有未知作用力 u 产生的不确定项 $f(u)$, 这会影响系统的输出稳定性。本文利用 RBF 神经网络的非线性拟合能力,对 $f(u)$ 进行有效拟合,再将其拟合值输入 SMC,以减少起吊重物时未知作用力的干扰。

RBF 神经网络是包含三层的前向型结构,如图2所示。第一层为输入层,设输入向量为 $z = [e, \dot{e}]^T$ 。第二层为隐藏层,其激活函数采用高斯函数 $h_j = \exp(-\frac{\|z - v_j\|^2}{2b_j})$, 其中 h_j 为第 j 个神经元高斯函数的输出, v_j 为第 j 个神经元高斯函数的中心向量, b_j 为第 j 个神经元高斯函数的宽度。若取节点个数 $j = 4$, 对输入向量 z 进行空间非线性映射变换,则输出向量 $h = [h_1, h_2, h_3, h_4]^T$ 。第三层为输出层,设隐藏层与输出层之间的连接权值向量 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]$, 对输出向量 h 进行线性加权后输出 $f(u)$:

$$f(u) = \omega^T h + \varepsilon \quad (14)$$

式中: ε 为 RBF 神经网络逼近误差。

设 $\hat{\omega}$ 为权值向量 ω 的估计值,考虑其自适应律 $\dot{\hat{\omega}}$ 与滑模面 s 、输出向量 h 有关,即 $\dot{\hat{\omega}} = \gamma sh$, 其中 γ 为自适应增益,且 $\gamma > 0$ 。

通过自适应律 $\dot{\hat{\omega}}$ 对 RBF 神经网络进行不断更新,使式(14)中的 ε 趋近 0,以保证 RBF 神经网络在更新过程中的拟合稳定性,则其输出转换为对未知作用力 u 的估计值 $\hat{f}(u)$ (单位:N):

$$\hat{f}(u) = \hat{\omega}^T h \quad (15)$$

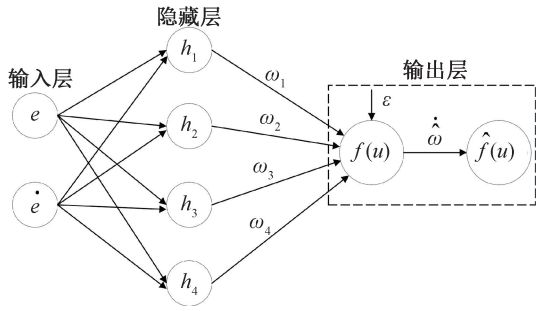


图2 RBF神经网络结构图

Fig. 2 RBF neural network architecture diagram

将式(15)代入式(13),则SMC的输出驱动力 F_r (单位:N)为

$$F_r = -\hat{f}(u) + M(c\dot{e} + \ddot{x}_d) + ks + \mu \text{sgn}(s) \quad (16)$$

将式(16)代入式(11),可得

$$M\dot{s} = -F_r - f(u) + M(c\dot{e} + \ddot{x}_d) = \hat{f}(u) - f(u) - ks - \mu \text{sgn}(s) \quad (17)$$

将式(14)(15)代入式(17),可得

$$M\dot{s} = \tilde{\omega}^T h - \omega^T h - \varepsilon - ks - \mu \text{sgn}(s) \quad (18)$$

令 $\tilde{\omega} = \hat{\omega} - \omega$,则式(18)变为

$$M\dot{s} = \tilde{\omega}^T h - \varepsilon - ks - \mu \text{sgn}(s) \quad (19)$$

基于滑模面 s 和 $\tilde{\omega}$,构建Lyapunov函数 V

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2M\gamma}\tilde{\omega}^T \tilde{\omega} \quad (20)$$

由于 $\gamma > 0$,判定函数 V 为正定函数。对函数 V 求一阶导数,即

$$\dot{V} = s\dot{s} + \frac{1}{M\gamma}\tilde{\omega}^T \dot{\tilde{\omega}} \quad (21)$$

在式(21)的两边同乘以 M ,再将式(19)代入,可得

$$M\dot{V} = Ms\dot{s} + \tilde{\omega}^T \dot{\tilde{\omega}} = s\varepsilon - ks^2 - \mu \text{sgn}(s) + \tilde{\omega}^T (sh - \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\omega}}) \quad (22)$$

将自适应律 $\dot{\tilde{\omega}} = \gamma sh$ 代入式(22),可得

$$\dot{V} = \frac{1}{M}(s\varepsilon - ks^2 - |s|\mu) \quad (23)$$

因为起重小车质量 $M > 0$,所以当 $\mu > \varepsilon$ 时, $\dot{V} \leq 0$,即 \dot{V} 为半负定函数。根据Lyapunov稳定性理论,当Lyapunov函数 V 为正定函数且其导数 \dot{V} 为半负定函数时,判定RBF SMC是稳定的。

若式(23)中的 $\dot{V} = 0$,可推导出线性滑模面 $s =$

0。根据LaSalle不变集原理可知,本文设计的RBF SMC可保证桥式起重机系统起吊过程中的渐近稳定性。

2.2 基于IHBA的SMC参数优化

速率参数 c 对于SMC驱动桥式起重机系统快速趋近滑模面 s 和削弱系统抖振至关重要。本文使用IHBA对RBF SMC中的速率参数 c 进行优化。

2.2.1 HBA算法

HBA算法源于自然界的蜜獾觅食行为特性——捕猎和搜寻蜂蜜,这两种行为在算法中分别对应全局搜索和局部搜索^[18]。蜜獾个体位置代表可能的解,通过不断探索和更新,逐渐接近最优解。HBA基本步骤分为以下4个阶段。

(1) 种群初始化

在设定范围内,随机生成初始蜜獾种群及其个体所处位置 x_i ,即

$$x_i = l_b + r_1 \cdot (u_b - l_b) \quad (24)$$

式中: u_b 、 l_b 分别为寻优范围的上界和下界; r_1 为(0,1)内的随机数。

(2) 确定嗅觉因子

嗅觉因子用于控制蜜獾在搜索空间中的移动步长。气味强度 I_i 越大,蜜獾在搜索空间中的移动步长越大,反之同理,即

$$\begin{cases} I_i = r_2 \cdot \frac{S_i}{4\pi d_i^2} \\ S_i = (x_i - x_{i+1})^2 \\ d_i = x_{\text{prey}} - x_i \end{cases} \quad (25)$$

式中: r_2 为(0,1)内的随机数; S_i 为猎物的密集程度; x_{i+1} 为蜜獾个体下一次更新的位置; d_i 为蜜獾与猎物间的距离; x_{prey} 为猎物位置。

(3) 更新密度因子

通过密度因子 α 来模拟蜜獾在寻找食物源过程中对环境的感知和反应。随着迭代次数增加, α 值不断减小,即算法在搜索空间中由探索平滑过渡为采集。密度因子 α 为

$$\alpha = 2 \exp\left(\frac{-N_t}{N_{\max}}\right) \quad (26)$$

式中: N_t 为当前迭代次数; N_{\max} 为最大迭代次数。

(4) 更新个体位置

在挖掘阶段,蜜獾以心形线轨迹挖掘,其更新后的位置 x_{new} 为

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + 6KI_i x_{\text{prey}} + Kr_3 \alpha d_i |\cos(2\pi r_4)| [1 - \cos(2\pi r_5)] \quad (27)$$

式中: r_3 、 r_4 和 r_5 为 $(0,1)$ 内的随机数; K 为搜索方向改变的标志,即 $K = \begin{cases} 1 & r_6 \leq 0.5 \\ -1 & r_6 > 0.5 \end{cases}$,其中 r_6 为 $(0,1)$ 内的随机数。

在采蜜阶段,蜜獾直接通过向导鸟找到蜂巢,其更新后的位置 x'_{new} 为

$$x'_{new} = x_{prey} + Kr_7\alpha d_i \quad (28)$$

式中: r_7 为 $(0,1)$ 内的随机数。

2.2.2 IHBA 算法

标准 HBA 算法采用随机方法对种群进行初始化,易导致搜索过程无法稳定获取目标精度,并在挖掘阶段和采蜜阶段产生局部收敛和个体早熟等问题。因此,本文引入 Chebyshev 混沌种群机制和高斯种群变异策略对标准 HBA 算法进行改进,以增强其寻优能力。

(1) Chebyshev 混沌映射

混沌映射具有随机性、遍历性、规律性等特点,在处理初始种群问题时能够保持种群的多样性,避免算法过早收敛。本文使用 Chebyshev 映射产生混沌序列 p^i 初始种群,尽可能使初始解均匀分布于空间中,即

$$p^{i+1} = \cos(i \cdot \cos^{-1}(p^i)) \quad (29)$$

式中: p 为 $[-1,1]$ 内的随机数; i 为阶次。

设蜜獾种群规模为 N ,空间维度为 D ,利用式 (29) 生成规模为 $N \times D$ 的初始种群混沌序列矩阵 Z ,则种群中蜜獾个体 i 在第 j 维的初始位置 x_i^j 可表示为:

$$x_i^j = l_b + (1 + Z_i^j) \cdot \frac{(u_b - l_b)}{2} \quad (30)$$

$i \in [1,N], j \in [1,D]$

式中: Z_i^j 为第 i 个蜜獾个体在第 j 维上的混沌映射值。

(2) 高斯种群变异策略

随着 HBA 迭代次数增加,种群中个体的多样性逐渐减少,个体逐渐收敛到最优解附近,导致算法无法继续有效搜索更优解。为解决上述问题,利用高斯种群变异策略,引入随机性来增加种群的多样性,有助于跳出局部最优解,继续搜索更广阔的解空间。因此,在式 (28) 中赋予高斯变异算子 $G(0,1)$,蜜獾个体位置更新为

$$x''_{new} = x'_{new} \left[1 + \frac{|w_s|}{2} \cdot G(0,1) \right] \quad (31)$$

式中: w_s 为衰减因子。

2.2.3 IHBA 算法的性能验证

本文采用时间误差绝对值积分准则 (Integral of Time-Weighted Absolute Error, ITAE) 来验证 IHBA 算法的有效性。ITAE 中适应度 J 结合了误差与时间的积分, J 值越小,系统的稳定性越强,动态响应越快。适应度 J 的函数表达式为

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (32)$$

由图 3 可看出,在达到最大迭代次数 200 次时,IHBA 算法 J 值为 0.14,而标准 HBA 算法 J 值为 0.22,由此可知,IHBA 算法的动态稳定性更强,有效改善了系统的动态性能。

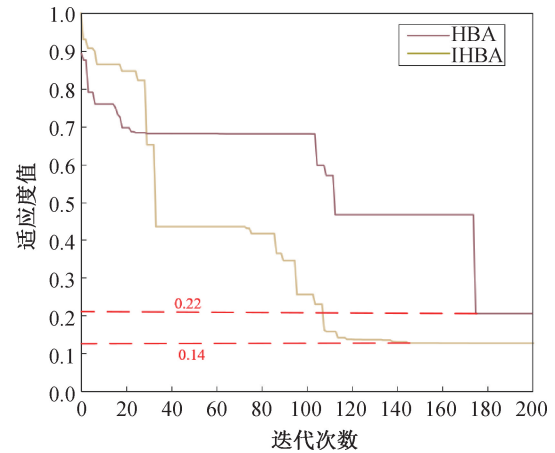


图 3 HBA 算法改进前后性能对比

Fig. 3 Performance comparison of the HBA algorithm before and after improvement

2.2.4 RBFSMC 参数优化

本文采用 IHBA 算法对 RBFSMC 控制器的趋近速率 c 值进行优化,优化步骤如下。

步骤 1 设定初始种群规模 $N=50$,最大迭代次数 $N_{max}=200$,基于 Chebyshev 混沌映射在解空间中随机生成一组 SMC 速率参数 c 。

步骤 2 基于嗅觉因子 I_i 探索猎物位置 x_{prey} 。

步骤 3 基于猎物位置,在挖掘阶段通过式 (27) 更新个体位置,在采蜜阶段通过式 (28) 调整个体位置,寻找蜜獾最优位置 x'_{new} 。

步骤 4 根据适应度函数表达式 (32) 更新蜜獾当前最优位置适应度 J 值,并对 J 值记录排序。

步骤 5 根据式 (31) 对当前最优位置进行高斯种群变异,跳出局部最优解,更新蜜獾最优位置,得到 x''_{new} 。

步骤 6 若达到最大迭代次数则寻优结束,输出最优 SMC 速率参数 c 的值,否则返回步骤 3 遍历蜜獾种群直至迭代结束。

3 仿真分析

为验证本文设计的 IHBA-RBFSCM 的定位稳定性和防摆控制效果,利用 MATLAB 中的 Simulink 模块对桥式起重机系统进行仿真分析,其参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

Tab. 1 Simulation parameters

参数名称/单位	参数值
起重小车质量 M/kg	20
负载质量 m/kg	50
绳索长度 l/m	1.5
重力加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8
时间 t/s	40

设外部未知作用力 u 为起重小车在轨道上运行的非线性摩擦力与负载所受风阻之和,其中非线性摩擦力 F_{rx} (单位: N) 为

$$F_{rx} = f_{rx} \tanh(\dot{x}/\varepsilon_x) + k_{rx} |\dot{x}| \dot{x} \quad (33)$$

式中: $f_{rx}, k_{rx}, \varepsilon_x \in R$, 表示摩擦相关系数(取 $f_{rx} = 4.4, k_{rx} = 0.5, \varepsilon_x = 0.01$)。

负载所受风阻 F_{rz} (单位: N) 为

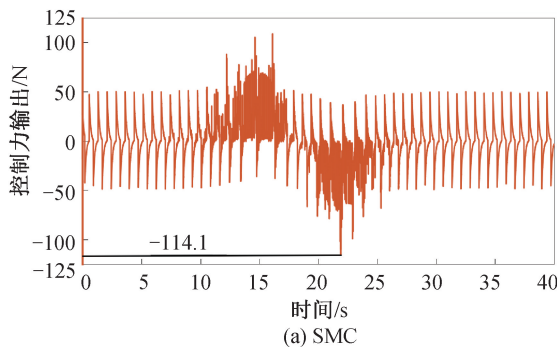
$$F_{rz} = 0.5\rho\dot{x}^2 A t_d \quad (34)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; A 为负载的有效横截面积, m^2 ; t_d 为风阻系数(取 $\rho = 1.205 \text{ kg}/\text{m}^3, A = 0.1 \text{ m}^2, t_d = 1$)。

3.1 定位跟踪性能分析

设起重小车的理想轨迹 x_d 为

$$x_d = \frac{p_d}{2} + \frac{v_{\max}}{4a_{\max}} \ln \left[\frac{\cosh\left(\frac{2a_{\max}}{v_{\max}}t - a_d\right)}{\cosh\left(\frac{2a_{\max}}{v_{\max}}t - a_d - \frac{2a_{\max}}{v_{\max}}p_d\right)} \right] \quad (35)$$



式中: p_d 为起重小车的目标位置, m ; a_{\max} 为起重小车的最大加速度, m/s^2 ; v_{\max} 为起重小车的最大速度(a_{\max} 和 v_{\max} 均为正数), m/s ; a_d 为轨迹初始加速度参数, m/s^2 。

为验证本文设计的 IHBA-RBFSCM 控制器的定位跟踪性能,设定工况: $p_d = 20 \text{ m}, a_{\max} = 0.5 \text{ m}/\text{s}^2, v_{\max} = 3 \text{ m}/\text{s}, a_d = 5 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

由图 4 可看出,本文设计的 IHBA-RBFSCM 控制器实现了对设定工况的理想轨迹跟踪,具备良好的定位跟踪性能。

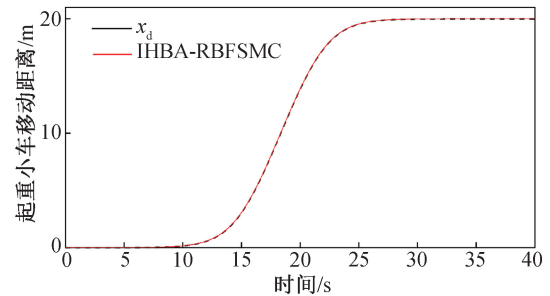


图 4 设定工况下轨迹跟踪情况

Fig. 4 Trajectory tracking situation under the set condition

3.2 输出驱动力分析

将本文设计的 IHBA-RBFSCM 控制器与 SMC、RBFSCM、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)-RBFSCM 控制器输出的驱动力情况进行比较。参数优化前的驱动力输出如图 5 所示, SMC 控制器输出的控制力峰值为 114.1 N, RBFSCM 控制器输出的控制力峰值为 109.2 N, 两者相差不大, 但 RBFSCM 控制器输出的控制力更加紧凑, 这说明 RBF 神经网络对系统的未知作用力进行了有效拟合。参数优化后的驱动力输出如图 6 所示, PSO-RBFSCM、IHBA-RBFSCM 控制器输出的控制力峰值分别为 73.1、48.3 N, 远小于 SMC、RBFSCM 控制器, 并且输出的控制力更加饱满平稳, 这说明参数优化可有效提高控制器的工作性能。

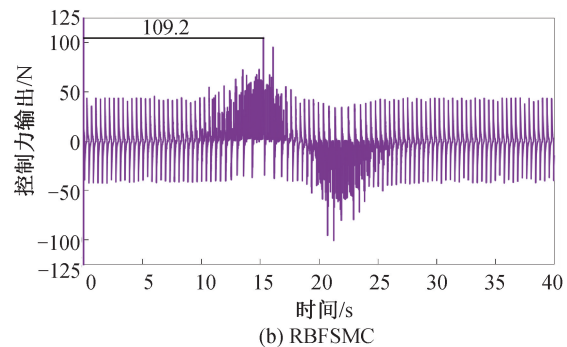


图 5 参数优化前两种控制器的驱动力输出对比

Fig. 5 Comparison of the output driving force for two controllers before parameter optimization

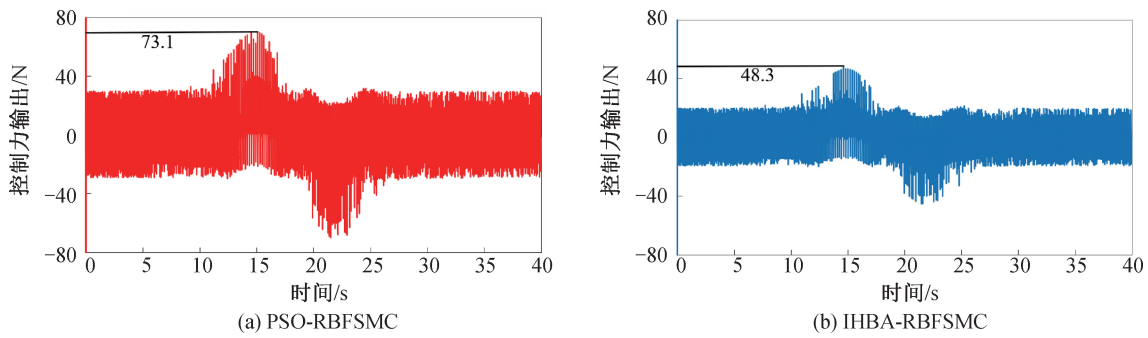


图 6 参数优化后两种控制器的驱动力输出对比

Fig. 6 Comparison of the output driving force for two controllers after parameter optimization

3.3 防摆控制效果分析

对 SMC、RBFSMC、PSO-RBFSMC 和 IHBA-RBFSMC 4 种控制器进行摆角 θ 控制仿真实验,实验结果如图 7 所示。由图可看出,SMC、RBFSMC 控制器对摆角的控制出现了抖振现象,且摆角幅值较大; PSO-RBFSMC、IHBA-RBFSMC 控制器输出的摆角控制曲线较平滑,这说明参数优化后的控制器能较好地削弱系统抖振现象。

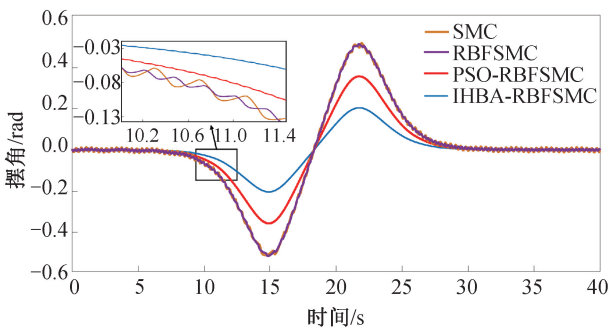


图 7 4 种控制器的负载摆角控制情况

Fig. 7 Load swing angle control performance of four types of controllers

负载摆角仿真结果如表 2 所示, IHBA-RBFSMC 控制器相较于其他 3 种控制器,在运输重物时的正向摆角、反向摆角峰值均更小,其摆角最小值为 0.19 rad,未经优化的 SMC 摆角最大值为 0.58 rad,优化后摆角幅度最高减少 67.2%。说明 IHBA 算法对控制器参数寻优效果更好,可有效控制桥式起重机吊运负载时的摆角。

表 2 4 种控制器摆角控制仿真结果

Tab. 2 Simulation results of swing angle control for four types of controllers

	SMC	RBFSMC	PSO-RBFSMC	IHBA-RBFSMC
正向摆角 /rad	0.54	0.52	0.36	0.20
反向摆角 /rad	0.58	0.56	0.38	0.19

4 结论

本文设计了一种基于 IHBA 参数优化的神经网络 SMC。本方法根据桥式起重机起吊系统模型的特点,利用 RBF 神经网络对外部未知作用力进行有效拟合,并通过 IHBA 对 SMC 的速率参数 c 进行优化,提升了 SMC 在控制过程中的控制性能。

仿真结果表明,本文设计的 IHBA-RBFSMC 对理想轨迹具有良好的定位跟踪性能;速率参数经 IHBA 优化后 SMC 的控制性能得到提高,可有效抑制 SMC 的抖振现象;负载摆角得到有效控制,摆角相较于参数优化前最高减少 67.2%。未来将搭建实验台对本文设计的 IHBA-RBFSMC 控制器进行更全面的实验验证。

参考文献:

[1] 陈鹤,吴庆祥,孙宁,等. 面向大尺寸货物运送的吊车控制方法综述[J]. 智能系统学报,2022,17(4):824-838.
CHEN H, WU Q X, SUN N, et al. Overview of crane control methods for large-size cargo transportation [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2022, 17(4): 824-838.

[2] 梁慧慧,吴炜,楼旭阳,等. 二维桥式起重机的滑模控制[J]. 控制与决策,2022,37(8):2163-2169.
LIANG H H, WU W, LOU X Y, et al. Sliding mode control of two-dimensional overhead crane [J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 2163-2169.

[3] 程文明,张道裕,谏庆荣,等. 欠驱动起重机的神经网络直接鲁棒自适应控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(5):120-128+144.
CHENG W M, ZHANG D Y, CHEN Q R, et al. A directly robust adaptive neural network controller for an under-actuated crane [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 120-128+144.

- [4] LIU Z Q, SUN N, WU Y M, et al. Nonlinear sliding mode tracking control of underactuated tower cranes [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, 19(2): 1065-1077.
- [5] 刘忠, 温雨柔, 楼旭阳. 一类二维桥式起重机系统的分层滑模控制[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2022, 25(6): 32-39.
LIU Z, WEN Y R, LOU X Y. Hierarchical sliding mode control for a class of two-dimensional overhead crane systems [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2022, 25(6): 32-39.
- [6] ABOSSERRE L T, EL-BADAWY A A. Robust integral sliding mode control of tower cranes [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2021, 27(9/10): 1171-1183.
- [7] 何育民, 韩莹, 周晶. 基于改进果蝇优化算法的塔机自适应滑模控制研究[J]. *工程设计学报*, 2023, 30(3): 271-280.
HE Y M, HAN Y, ZHOU J. Research on adaptive sliding mode control of tower crane based on improved fruit fly optimization algorithm [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2023, 30(3): 271-280.
- [8] 刘乃志, 张艳兵. 基于改进遗传算法优化的 RBFNN 防摆控制研究[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(9): 116-120.
LIU N Z, ZHANG Y B. Research on anti-swing control of RBFNN optimized by improved genetic algorithm [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(9): 116-120.
- [9] 魏效玲, 陈蕊, 李波. 基于神经网络的 NURBS 曲线插补改进研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2013, 30(4): 91-93.
WEI X L, CHEN R, LI B. The improvement research of NURBS curve interpolation based on neural network [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2013, 30(4): 91-93.
- [10] CHEN Q R, CHENG W M, DU R. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC), Shenyang, China, July 27-29, 2020 [C]. New York: IEEE, 2020.
- [11] 孙家骏, 柴琳, 郭启航, 等. 三维运动模式下的桥式吊车神经网络滑模控制[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(11): 2071-2079.
SUN J J, CHAI L, GUO Q H, et al. Neural network sliding mode control of overhead crane in three-dimensional motion mode [J]. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(11): 2071-2079.
- [12] HASHIM F A, HOUSSEIN E H, HUSSAIN K, et al. Honey Badger Algorithm: new metaheuristic algorithm for solving optimization problems [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, 192: 84-110.
- [13] 胡涛, 蒋全. 基于改进蜜獾优化算法的 PID 参数整定[J]. *电子科技*, 2023, 36(12): 46-54.
HU T, JIANG Q. PID parameter tuning based on improved honey badger optimization algorithm [J]. *Electronic Science and Technology*, 2023, 36(12): 46-54.
- [14] 董海, 林国栋. 基于改进 HBA 算法的生鲜闭环供应链网络鲁棒优化设计[J]. *计算机应用研究*, 2022, 39(10): 3020-3025.
DONG H, LIN G D. Robust optimization design of fresh closed-loop supply chain network based on improved honey badger algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(10): 3020-3025.
- [15] 张京军, 段瑶瑶, 高瑞贞. 基于 AGA 的智能桁架结构模糊振动控制[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(2): 5-9.
ZHANG J J, DUAN Y Y, GAO R Z. Fuzzy control for intelligent truss structure based on AGA [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2016, 33(2): 5-9.
- [16] 刘汉东, 刘惠康, 柴琳. 桥式吊车智能降抖振滑模控制[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(23): 85-89.
LIU H D, LIU H K, CHAI L. Intelligent control of de-buffeting sliding mode for bridge crane [J]. *Modern Electronic Technique*, 2020, 43(23): 85-89.
- [17] 闵令岗, 石怀涛, 陈璐, 等. 基于轨迹规划的欠驱动桥式起重机防摆控制[J]. *控制工程*, 2024, 31(10): 1889-1898.
MIN L G, SHI H T, CHEN L, et al. Anti-swing control of underactuated overhead crane based on trajectory planning [J]. *Control Engineering of China*, 2024, 31(10): 1889-1898.
- [18] 董红伟, 李爱莲, 解韶峰, 等. 多策略改进的蜜獾优化算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2024, 45(2): 293-300.
DONG H W, LI A L, XIE S F, et al. Multi strategy improved honey badger optimization algorithm [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2024, 45(2): 293-300.

(责任编辑 王利君)