

文章编号: 1673-3193(2024)03-0326-08

# 基于改进蚁狮优化的火炮随动系统控制方法

王韵<sup>1,2</sup>, 张艳兵<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 针对防空火炮对随动控制系统跟踪精度高和强鲁棒性的要求, 提出一种基于改进粒子群蚁狮优化(Improved Particle Swarm Optimization-Antlion Optimization, IPSO-ALO)算法的火炮随动系统控制策略。首先在建立火炮交流伺服系统模型的基础上, 分析了位置控制器结构; 其次, 利用改进的蚁狮算法优化了位置环PI控制器, 为解决算法迭代后期蚁狮的多样性降低导致陷入局部最优的问题, 并且为保证得到最优参数, 将PSO算法与ALO算法融合, 利用粒子群算法更新蚁狮位置, 进一步更新蚁狮算法的精英主义阶段, 并且分别在粒子群算法中引入自适应非线性递减惯性权重系数, 加强算法在后期的局部搜索能力, 在蚁狮算法中引入动态比例系数和非线性动态权重, 提高了算法的全局搜索能力; 最后, 在MATLAB/Simulink建模仿真并分析了各控制器作用下系统的稳定性、跟踪性及鲁棒性。仿真结果表明, IPSO-ALO算法对于PI控制的各种性能指标最优, 其调节时间较IPSO和IALO分别提升18.2%和33.1%, 所设计的控制器能够使火炮随动系统获得更好的响应特性和跟踪精度, 抗干扰能力强, 有较强的鲁棒性, 证明了该方法的有效性。

**关键词:** 防空火炮; 随动系统; 蚁狮算法; 粒子群算法; 鲁棒性

**中图分类号:** TP301.6; TJ303 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.03.010

**引用格式:** 王韵, 张艳兵. 基于改进蚁狮优化的火炮随动系统控制方法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 326-333.

WANG Yun, ZHANG Yanbing. A control method for artillery servo system based on improved antlion optimization[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(3): 326-333.

## A Control Method for Artillery Servo System Based on Improved Antlion Optimization

WANG Yun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yanbing<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement(North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of high tracking accuracy and strong robustness for the servo control system of anti-aircraft artillery, a control strategy for the artillery servo system based on an improved particle swarm antlion optimization algorithm was proposed. Firstly, based on the establishment of the artillery AC servo system model, analyzed the structure of the position controller; Secondly, the improved antlion algorithm was used to optimize the position loop PI controller. In order to solve the problem that the diversity of antlions decreases in the late iteration of the algorithm and leads to local optimization.

**收稿日期:** 2023-11-27

**作者简介:** 王韵(1997-), 女, 硕士生, 主要从事智能控制技术的研究。

**通信作者:** 张艳兵(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事动态测试与智能控制等方面的研究。E-mail: zhyb\_1126@nuc.edu.cn。

tion, and to ensure the optimal parameters, the PSO algorithm and ALO algorithm were integrated, using particle swarm optimization algorithm to update the antlion position, further updating the elitist stage of the ant-lion algorithm, and introducing adaptive nonlinear decreasing inertia weight coefficients in the particle swarm algorithm to enhance the algorithm's local search ability in the later stage, introducing dynamic proportion coefficients and nonlinear dynamic weights in the antlion algorithm to improve the algorithm's global search ability; Finally, model and simulate in MATLAB/Simulink, and analyze the system stability, tracking performance, and robustness under the action of each controller. The simulation results show that the IPSO-ALO algorithm is the best for various performance indicators of PI control, with an increase of 18.2% and 33.1% in adjustment time compared to IPSO and IALO, respectively. The designed controller can achieve better response characteristics and tracking accuracy for the artillery servo system, with strong anti-interference ability and strong robustness, proving the effectiveness of this method.

**Key words:** anti-aircraft artillery; follower system; antlion algorithm; particle swarm optimization; robustness

## 0 引言

对于现代火炮火力控制系统,火炮随动系统是其重要的组成环节之一。现代战争和军事技术的发展对火炮随动系统的性能提出了更高的要求,其跟踪性能直接影响火炮的射击精度和动态特性。压制火炮本身具有机动性强、负载大、惯量大等特点<sup>[1]</sup>,由于受战场环境约束、冲击、传动摩擦、测量延迟等各种因素的影响,火炮随动控制系统具有非线性 and 不确定性<sup>[2]</sup>。为了使其获得更好的动静态性能,一般采用三闭环控制结构,当系统参数发生较大变化时,采用传统控制策略难以取得理想的控制效果,因此,需要采用先进控制策略来设计具有更高鲁棒性和抗干扰能力的控制算法<sup>[3]</sup>,从而使系统满足跟踪精度的要求。

为解决火炮随动控制系统中存在的外部干扰和参数扰动等问题,已有研究人员采用基于 $K$ -均值与惯性权重指数递减的粒子群优化算法对随动系统调节器参数进行优化<sup>[4]</sup>。张高生等<sup>[5]</sup>针对防空火炮传统滑模控制中抖振的缺点,设计了一种连续滑模控制算法,对火炮随动系统的运动轨迹进行控制。雷曙遥等<sup>[6]</sup>针对无人战车火炮速度环设计了一种自抗扰控制器,并对PID控制算法、复合内模控制算法以及自抗扰控制算法的控制精度和抗扰能力进行了仿真对比。Zheng等<sup>[7]</sup>在建立电机-机构耦合动力学模型的基础上构造了一个计算转矩的控制器,其不确定性利用径向基函数神经网络来进行估计,使用一种改进的自适应算

法来估计RBFNN的权值,并通过补偿控制器来补偿不确定观测器的估计误差。荀盼盼等<sup>[8]</sup>利用回路整形法设计了一种QFT鲁棒控制器用于带有不确定参数的火炮随动系统模型上,有效改善了随动系统由于非线性扰动等因素导致的控制精度不高的现象。王继超等<sup>[9]</sup>将经自适应模拟退火粒子群优化算法优化参数后的模糊控制器和传统PID控制器分别运用在火炮随动控制系统的位置环上,并对比了两种控制器的位置响应、抗转矩扰动能力和目标跟踪能力。以上控制方法均取得了较好的目标跟踪性能。

蚁狮算法(Antlion Optimization, ALO)<sup>[10]</sup>原理比较简单,在一些优化求解问题上具有优势。为进一步提高火炮随动系统的控制精度,本文提出IPSO-ALO算法优化随动系统的位置环PI控制,加快ALO算法整体寻优速度,帮助算法跳出局部最优。所提算法同时具有ALO和PSO算法的特点,这种组合改进了整体优化机制,从而可以提升系统控制精度和鲁棒性。

## 1 火炮随动系统模型的建立

火炮伺服系统通常采用位置环、速度环和电流环三闭环控制结构。该受控系统主要包括执行电机、减速器、火炮身管和角度传感器等<sup>[11]</sup>。火炮伺服系统结构如图1所示。

图1中: $\theta_i$ 为目标位置; $\omega_{ref}$ 为角速度参考值; $L$ 为电机电枢电感; $R$ 为绕组电阻; $K_c$ 为转矩系数; $K_e$ 为电机反电动势系数; $T_e$ 为电磁转矩; $T_L$



$b_u$ 、 $b_l$ 分别为搜索空间的上下边界。

蚂蚁的随机游走会受到蚁狮陷阱的影响,对这一假设进行数学建模,即

$$h'_i = Antlion'_j + h', \quad (6)$$

$$c'_i = Antlion'_j + c', \quad (7)$$

式中:  $h'$ 和 $c'$ 分别为第 $t$ 次迭代时所有蚂蚁搜索区间的上下边界;  $Antlion'_j$ 为第 $t$ 次迭代时第 $j$ 只蚁狮的位置;  $h'_i$ 和 $c'_i$ 分别为第 $t$ 次迭代时第 $i$ 只蚂蚁搜索区间的上下边界。

当蚂蚁在随机游走过程中掉入陷阱后,蚁狮会缩减陷阱规模来困住蚂蚁,该过程可建模为蚂蚁随机游走超球面的半径会自适应地减小,即

$$b_l = \frac{b_l}{I}, \quad (8)$$

$$b_u = \frac{b_u}{I}, \quad (9)$$

式中:  $I$ 为比率,  $I = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq 0.1t_{max}, \\ 10^\omega \times \frac{t}{t_{max}}, & t > 0.1t_{max} \end{cases}$

通常为了提高算法收敛能力,  $\omega$ 常被定义为分段函数

$$\begin{cases} \omega = 2, & 0.1t_{max} < t \leq 0.5t_{max}, \\ \omega = 3, & 0.5t_{max} < t \leq 0.75t_{max}, \\ \omega = 4, & 0.75t_{max} < t \leq 0.9t_{max}, \\ \omega = 5, & 0.9t_{max} < t \leq 0.95t_{max}, \\ \omega = 6, & 0.95t_{max} < t \leq t_{max} \end{cases} \quad (10)$$

蚂蚁通过随机游走来更新它们的位置,因此对蚂蚁建立随机游走模型

$$X'_{i,d} = [0, cumsum(2r(t_1) - 1), cumsum(2r(t_2) - 1), \dots, cumsum(2r(t_n) - 1)], \quad (11)$$

式中:  $cumsum$ 为随机游走步长的累加和;  $n$ 为最大游走次数;  $r(t)$ 为随机函数。

为了将随机游走保持在搜索空间内,采用式(12)对蚂蚁随机游走进行归一化处理。

$$X'_{i,d} = \frac{(X'_{i,d} - a_i) \times (h'_i - c'_i)}{b_i - a_i} + c'_i, \quad (12)$$

式中:  $b_i$ 和 $a_i$ 分别为第 $t$ 次迭代时,第 $i$ 只蚂蚁游走范围的最大值和最小值。

蚂蚁最终的位置更新会受到轮盘赌策略决定出的蚁狮和当前适应度值最优的精英蚁狮的影响,即

$$Ant'_i = \frac{R'_A + R'_E}{2}, \quad (13)$$

式中:  $R'_A$ 和 $R'_E$ 分别为蚂蚁围绕轮盘赌策略选出的蚁狮和精英蚁狮游走获得的位置<sup>[13]</sup>;  $Ant'_i$ 为第 $t$ 次迭代时第 $i$ 只蚂蚁的位置。

蚁狮捕捉蚂蚁后要求蚁狮将其位置更新为被猎杀蚂蚁的位置,即通过蚂蚁位置更新蚁狮位置,规则为

$$Antlion'_j = Ant'_i \text{ if } f(Antlion'_j) > f(Ant'_i). \quad (14)$$

粒子群算法(PSO)常用于解决连续优化问题,它概念简单,易于实现,同时它也存在早熟收敛的问题。而ALO算法在迭代后期时,蚂蚁的随机游走会受到精英蚁狮的高度约束,容易使算法陷入局部最优<sup>[14]</sup>。

考虑ALO、PSO的优缺点,本文提出一种将ALO、PSO结合的优化算法,将PSO算法用于更新蚁狮位置步骤,从而进一步更新ALO算法的精英主义阶段<sup>[15]</sup>,避免蚂蚁的随机游走侧重于精英蚁狮周围而陷入局部最优。本文还分别针对PSO算法和ALO算法进行了改进,在PSO算法中引入自适应非线性递减惯性权重系数,加强算法在后期的局部搜索能力;在ALO算法中引入动态比例系数和非线性动态权重,提高ALO算法的全局搜索能力,降低算法陷入局部最优的可能性。

### 2.2 自适应非线性递减惯性权重系数的引入

传统PSO算法虽然具有较快的收敛速度,但其后期容易陷入局部最优,求解精度低。惯性权重 $\omega$ 较大有利于全局搜索,但会造成解的准确度下降,而惯性权值较小则更利于局部搜索,缺点是收敛速度降低易出现“早熟”现象。本文引入自适应非线性递减惯性权重系数,在粒子迭代的过程中,非线性递减惯性权重系数随着迭代次数的增加而减小,使得算法在后期局部搜索能力变强,从而提高了算法的求解精度。

自适应非线性递减惯性权重系数定义为

$$\omega_i(k) = \begin{cases} \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \frac{f(x_i^k) - f_{min}^k}{f_{average}^k - f_{min}^k}, & f(x_i^k) \leq f_{average}^k \\ \omega_{max}, & f(x_i^k) > f_{average}^k \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 是设置的最大、最小惯性系数，取 $\omega_{\max}=0.9$ ， $\omega_{\min}=0.4$ ； $f_{\text{average}}^k = \sum_{i=1}^n f(x_i^k)/n$ 为第 $k$ 次迭代时所有粒子的平均适应度值； $f(x_i^k)$ 为第 $k$ 次迭代时，种群中 $n$ 个个体中，第 $i$ 个个体的适应度值。

由式(15)可以看出，若当前粒子的适应度值小于粒子平均适应度值时，说明离最优解近，应使其搜索速度减慢，加强局部搜索；反之，说明离最优解远，应该加快搜索速度，加大全局搜索力度<sup>[16]</sup>。

### 2.3 改进的蚁狮优化

原始的ALO算法在迭代后期主要进行局部搜索，随着搜索步长和搜索速度的降低，导致蚁狮的多样性降低<sup>[17]</sup>，这时蚂蚁可能向适应度比较差的蚁狮学习，容易使算法陷入局部最优。为了提高ALO算法的全局搜索能力，引入动态比例系数和非线性动态权重策略。

刘景森等<sup>[18]</sup>采用动态比例系数对蚂蚁围绕轮盘赌选出来的蚁狮游走进行了改进，即

$$\text{Ant}P_i^t = \left(0.8 - 0.8 \times \frac{t}{T} \times \text{rand}(\cdot)\right) R_A^t + \left(0.2 + 0.8 \times \frac{t}{T} \times \text{rand}(\cdot)\right) R_E^t, \quad (16)$$

式中： $t$ 为当前迭代次数； $T$ 为最大迭代次数； $\text{rand}(\cdot)$ 为0~1之间的随机数。

上述改进方法能有效提升了算法前期的搜寻能力和后期的开发能力。针对迭代后期蚂蚁的随机游走侧重于精英蚁狮周围，本文采用非线性动态权重来改进 $R_E^t$ 的比例系数，随着迭代次数的增加，减少精英蚁狮对蚂蚁随机游走的权重。动态权重定义为

$$\omega_t = \omega_{\text{start}} - (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}) \times \left(\frac{t}{T}\right)^2, \quad (17)$$

式中： $\omega(t)$ 为自适应权重； $\omega_{\text{start}}$ 为权值的最大值； $\omega_{\text{end}}$ 为权值的最小值。

综上所述，在本文IALO算法中的蚂蚁位置更新为

$$\text{Ant}P_i^t = \left(0.8 - 0.8 \times \frac{t}{T} \times \text{rand}(\cdot)\right) R_A^t + \omega_t \times R_E^t. \quad (18)$$

### 2.4 IPSO-ALO算法流程

本文采用改进的ALO算法不断优化更新火炮

随动系统的位置环PI控制器的参数并寻求最优解，所提出的IPSO-ALO策略伪代码如算法1所示，算法的流程如图3所示。

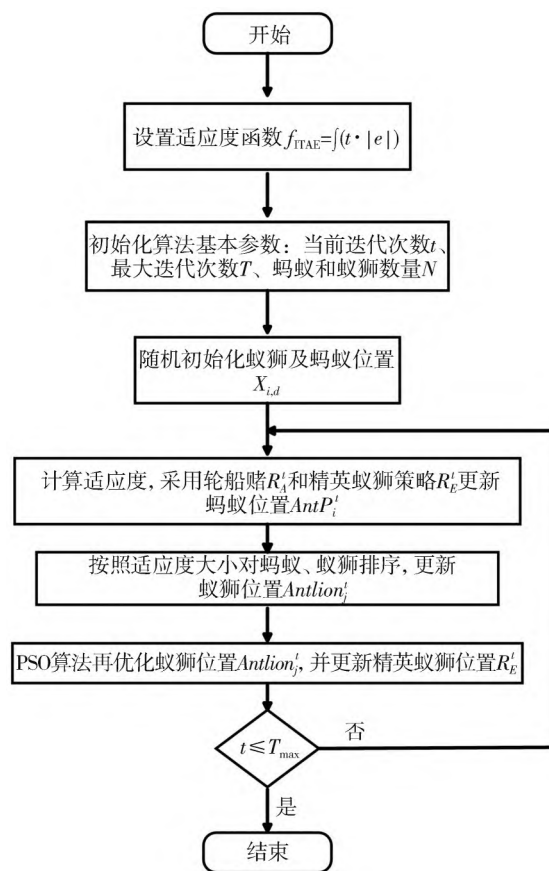


图3 IPSO-ALO算法流程图

Fig. 3 IPSO-ALO algorithm flow chart

#### 算法1: IPSO-ALO模型策略

$t$ —Current iteration loop,

$T$ —The max iters,

$N$ —The number of ants and antlions.

1) 初始化: 使用式(5)随机初始化函数产生蚁狮位置  $X_{i,d}$   
 $\text{antlion} = \text{initialization}(N, d, b_a, b_l)$   
 $\text{ant} = \text{initialization}(N, d, b_a, b_l)$

2) 适应度计算: 使用  $f_{\text{ITAE}} = \int(t \cdot |e|)$  作为适应度函数计算蚂蚁的适应度

$\text{fitness} = \int(t \cdot |e|)$

$\text{sorted\_ant} = \text{sorted}(\text{fitness})$

$\text{elite\_antlion} = \text{sorted\_ant}(1, :)$

3) 迭代更新

while  $t < T$

for every ant  $i=1, 2, \dots, N$

Calculate proportion using roulette

ants walk around elite antlion using Eq.(11)

end for

update ant\_position using Eq.(18)

for every antlion  $i=1, 2, \dots, N$

update antlion using PSO

end for

update the elites library

end while

算法 1 中, IPSO-ALO 策略设置迭代次数  $t$ 、 $T$  及蚂蚁和蚁狮的种群数量  $N$ , 以式(5)随机初始化函数产生蚁狮位置  $X_{i,d}$ 。使用  $f_{ITAE} = \int (t \cdot |e|)$  作为适应度函数计算蚂蚁与蚁狮的适应度, 将当前适应度值最优的蚁狮作为精英蚁狮  $R'_E$ , 通过轮盘赌选出一只蚁狮  $R'_A$ , 通过式(18)更新蚂蚁位置  $AntP'_i$ 。根据蚂蚁与蚁狮的适应度值排序, 更新蚁狮位置  $Antlion'_j$ 。随后引入 PSO 算法对蚁狮位置进一步优化, 并更新精英蚁狮位置  $R'_E$ 。最后, 当达到最大迭代次数  $T_{max}$  时输出精英蚁狮位置, 即为待优化的 PI 控制器的具体参数。

### 3 仿真分析

本文主要对火炮位置随动系统的控制算法进行研究, 采用 IPSO-ALO 算法优化 PI 控制器。为了验证控制算法的有效性, 利用 MATLAB 对交流伺服系统进行仿真。

某火炮随动系统近似时间常数  $T=0.03\text{ s}$ , 射界范围  $0^\circ\sim 60^\circ$ , 最大容许跟踪误差范围  $-2\sim 2\text{ mrad}$ , 执行电机参数如表 1 所示。负载转动惯量  $J=1\ 500\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

表 1 永磁同步电机参数

Tab. 1 Parameters of permanent magnet synchronous motor

主要参数	参数值
额定功率/kW	5.7
额定转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	2 500
额定转矩/( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	8
转动惯量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	0.003 6
电阻/ $\text{m}\Omega$	958
电感/ $\text{mH}$	8.5
永磁磁链/ $\text{Wb}$	0.182
母线电压/ $\text{V}$	353

选择 IPSO 算法、IALO 算法和 IPSO-ALO 算法进行对比分析, 从 3 种算法的迭代曲线(见图 4)中可以看出, IPSO 和 IALO 算法的收敛速度均较为缓慢, 且在迭代过程中都陷入了局部最优, 在相当长一段时间内适应度值保持不变, 采用 IPSO-ALO 优化的随动系统, 其最低适应度值比 IPSO、IALO 算法的均要小。由图 4 中的 IPSO-ALO 迭代曲线可以看出, 算法通过改进蚁狮精英主义阶段, 提高了蚁狮多样性, 从而提高了收敛速度, 找到了最优适应度。

系统输入阶跃信号时, 图 5 为  $1\text{ rad}$  阶跃信号下 3 种控制器的响应曲线。由图 5 可知: IPSO 控制器的位置响应出现较大超调量, 误差较大; IALO 控制器的位置响应没有超调量, 但响应速度较慢, 所需

调节时间较长; IPSO-ALO 控制器几乎无超调, 到达目标位置时快速调整速度, 逐步逼近目标位置, 体现了较好的跟踪性能。本文所采用的 Matlab 仿真步长为固定步长  $1\times 10^{-5}$ , 通常火炮中电机的 PWM 采样频率为  $10\text{ kHz}$ , 实验设置的步长与其一致, 从仿真结果可以看出算法具有较好的实时性。

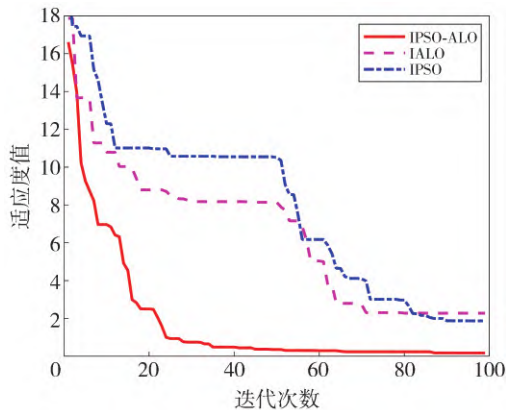


图 4 3 种算法的迭代曲线

Fig. 4 Iterative curves of three algorithms

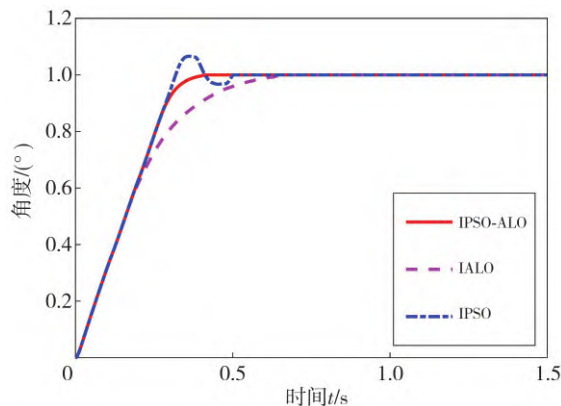


图 5 系统阶跃响应曲线

Fig. 5 System step response curve

表 2 为 3 种算法结果的对比, 调节火炮的目标角度为  $1\text{ rad}$  时, IPSO 控制器的调节时间为  $0.39\text{ s}$ , 超调量约为  $6.6\%$ , IALO 控制器的调节时间为  $0.48\text{ s}$ , IPSO-ALO 控制器调节时间较 IPSO、IALO 分别提升了  $18.2\%$ ,  $33.1\%$ 。总体来讲, IPSO-ALO 算法优化的随动控制系统各项性能明显优于另外两种算法。

表 2 算法性能指标对比

Tab. 2 Comparison of algorithm performance indicators

性能指标	IPSO	IALO	IPSO-ALO
$K_p$	1.26	0.61	2.00
$K_i$	4.74	6.27	8.48
超调量/%	6.60	0	0
上升时间/s	0.32	0.65	0.41
调节时间/s	0.39	0.48	0.32

火炮射击时产生的射击力矩和后坐力会引起炮管较大的扰动,为保证下一次快速又精确地射击,要扰动快速响应并调整到相应位置。如图6,在 $t=0.4$  s时加入干扰信号,比较3种控制器位置响应曲线,由图可以看出,3种控制器均可以克服扰动,其中,IPSO-ALO控制器在出现转矩波动后响应迅速,调节时间较短,仍然能第一个达到稳态,能够最快地将火炮位置调节到相应位置上,使系统最快恢复正常状态。

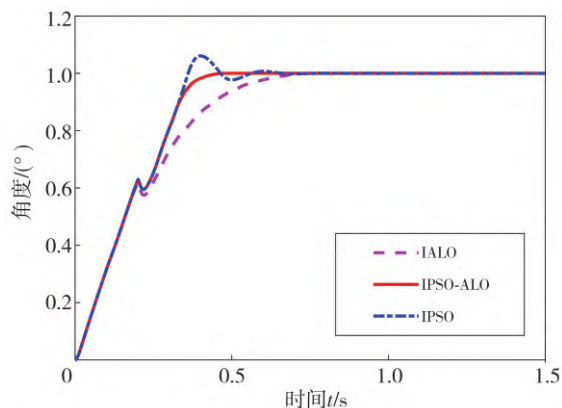


图6 干扰信号响应曲线

Fig. 6 Response curve of interference signal

前面通过阶跃仅验证了IPSO-ALO优化的随动控制系统的静态响应能力,为了验证系统的动态性能,选用幅值为0.5 rad的正弦信号作为输入信号来进行系统仿真,当其频率为0.4 Hz时,实验所得的正弦跟踪性能曲线和跟踪误差曲线如图7和图8所示。由图8可知,IPSO-ALO控制器的误差范围为 $[-1.2 \text{ mrad}, 1.2 \text{ mrad}]$ ,符合控制精度要求。仿真结果表明,本文IPSO-ALO算法在优化PI位置控制器时具有控制精度高和抗干扰能力强的优点。

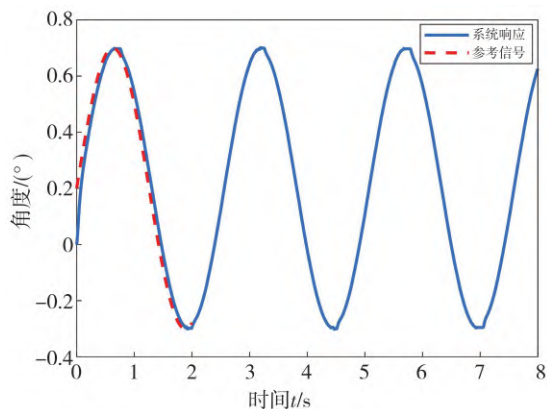


图7 正弦跟踪性能曲线

Fig. 7 The tracking performance curve of the sine

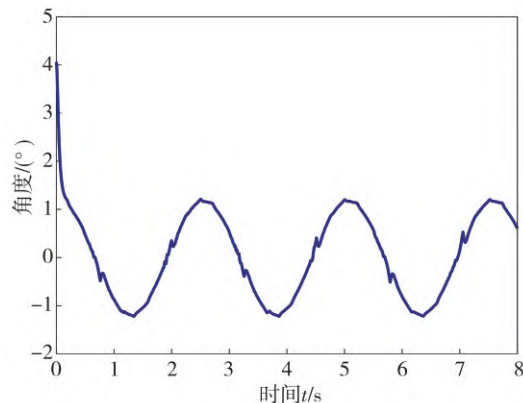


图8 IPSO-ALO跟踪误差曲线

Fig. 8 The tracking error curve of IPSO-ALO

## 4 结 论

本文针对火炮交流伺服系统的位置控制器提出了一种改进的蚁狮(IPSO-ALO)算法。利用PSO算法改进精英蚁狮的位置,避免了PI控制器参数调节陷入局部最优。同时,在ALO中引入动态比例系数和非线性动态权重,加强了算法的局部搜索能力。实验结果表明,IPSO-ALO算法对于PI控制的各种性能指标最优,其调节时间为0.32 s,IPSO-ALO算法调节时间较IPSO、IALO分别提升了18.2%,33.1%,该算法优化的PI控制器获得了更好的响应特性和跟踪精度,抗干扰能力强,具有更好的鲁棒性,可以为火炮随动系统的设计提供一种新思路。

## 参考文献:

- [1] 陈杰,方浩,辛斌,等. 数字化陆用武器系统中的建模、优化与控制[J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 943-962. CHEN Jie, FANG Hao, XIN Bin, et al. Modeling, optimization and control in ground-based digital weapon systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(7): 943-962. (in Chinese)
- [2] 陈宇,谢明亮,景旭文,等. 考虑齿轮啮合的某舰炮随动系统动力学特性分析研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(20): 293-299. CHEN Yu, XIE Mingliang, JING Xuwen, et al. Dynamics simulation of a naval gun servo system considering gear meshing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(20): 293-299. (in Chinese)
- [3] 郝坤鹏,杨国来. 基于快速终端滑模控制的大惯量火炮随动控制算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(4): 697-703. HAO Kunpeng, YANG Guolai. Research on servo control algorithm of large inertia gun based on fast ter-

- minal sliding mode control[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(4): 697-703. (in Chinese)
- [4] 韩超, 段纬然, 贾长治, 等. 基于改进多种群 PSO 算法的火炮随动系统调节器参数优化[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(6): 56-61.  
HAN Chao, DUAN Weiran, JIA Changzhi, et al. Parameter optimization of gun follower system based on improved multi-group PSO algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(6): 56-61. (in Chinese)
- [5] 张高生, 韩崇伟, 张志鹏, 等. 火炮随动系统连续滑模控制算法[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 91-94.  
ZHANG Gaosheng, HAN Chongwei, ZHANG Zhipeng, et al. Continuous sliding mode control algorithm for gun servo system [J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(12): 91-94. (in Chinese)
- [6] 雷曙遥, 潘军. 无人战车火炮速度环自抗扰设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2023, 44(2): 52-57.  
LEI Shuyao, PAN Jun. Active disturbance rejection control design of speed loop for unmanned ground vehicle gun [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2023, 44(2): 52-57. (in Chinese)
- [7] ZHENG H Q, RUI X T, ZHANG J S, et al. Nonlinear motor-mechanism coupling tank gun control system based on adaptive radial basis function neural network optimised computed torque control [J]. ISA Transactions, 2022, 131: 222-235.
- [8] 荀盼盼, 韩崇伟, 赵宇和, 等. 基于定量反馈理论的火炮随动系统鲁棒控制研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(10): 1841-1846.  
XUN Panpan, HAN Chongwei, ZHAO Yuhe, et al. Research on robust control of gun servo system based on quantitative feedback theory [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(10): 1841-1846. (in Chinese)
- [9] 王继超, 冷育明, 戚延辉, 等. 基于 ASAPSO 的火炮随动系统模糊控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(4): 53-57.  
WANG Jichao, LENG Yuming, QI Yanhui, et al. Fuzzy control strategy of artillery servo system based on ASAPSO [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(4): 53-57. (in Chinese)
- [10] MIRJALILI S. The ant lion optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2015, 83: 80-98.
- [11] 王春忠, 杨忠国, 荣明, 等. 基于陀螺仪的坦克炮控稳定精度检测仪设计[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(1): 85-87.  
WANG Chunzhong, YANG Zhongguo, RONG Ming, et al. Design of test instrument for stabilization accuracy of tank gun control system using gyroscope [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(1): 85-87. (in Chinese)
- [12] 李祥功, 朱立军, 陈猛. 改进最小二乘法在永磁同步电机参数辨识中的应用[J]. 物联网技术, 2022, 12(7): 107-110.  
LI Xianggong, ZHU Lijun, CHEN Meng. Application of improved least squares method in parameter identification of permanent magnet synchronous motor [J]. Internet of Things Technologies, 2022, 12(7): 107-110. (in Chinese)
- [13] 王柏林, 李云伍, 赵颖, 等. 基于蚁狮算法优化的 LQR 横向跟踪控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(4): 27-38.  
WANG Bolin, LI Yunwu, ZHAO Ying, et al. LQR lateral tracking control strategy based on ALO algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(4): 27-38. (in Chinese)
- [14] QING F, SHYANG J P, GANG Z D, et al. Multi-strategy improved parallel antlion algorithm and applied to feature selection [J]. Journal of Intelligent Fuzzy Systems, 2022, 43(2): 2155-2166.
- [15] SAMALA R K, KOTAPURI M R. Optimal allocation of distributed generations using hybrid technique with fuzzy logic controller radial distribution system [J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(2): 191.
- [16] 岳有军, 邵子藁, 赵辉, 等. 基于改进 IBAS-PSO 的永磁同步电机控制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(4): 120-124.  
YUE Youjun, SHAO Zigao, ZHAO Hui, et al. Study on PMSM control based on improved IBAS-PSO [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(4): 120-124. (in Chinese)
- [17] 张振兴, 杨任农, 房育寰, 等. 自适应 Tent 混沌搜索的蚁狮优化算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(5): 152-159.  
ZHANG Zhenxing, YANG Rennong, FANG Yuhuan, et al. Ant lion optimization algorithm based on self-adaptive Tent chaos search [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(5): 152-159. (in Chinese)
- [18] 刘景森, 霍宇, 李煜. 优选策略的自适应蚁狮优化算法[J]. 模式识别与人工智能, 2020, 33(2): 121-132.  
LIU Jingsen, HUO Yu, LI Yu. Preferred strategy based self-adaptive ant lion optimization algorithm [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2020, 33(2): 121-132. (in Chinese)