

# 基于主从交互式萤火虫群优化算法的船舶航向分数阶 PID 控制

薛 晗, 赵 强, 马 峰, 李丽娜, 杨神化

(集美大学 航海学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了改善船舶航向控制的效果, 文章首次运用了分数阶 PID 控制方法, 并提出一种新的主从交互式萤火虫优化算法, 以优化控制器参数, 使得达到控制性能指标最优的目标; 根据船舶动力学模型, 以船舶实际参数作实验, 实验结果表明经过 FA 优化的分数阶 PID 控制器, 比 PSO 算法具有更好的控制性能; 通过敏感性分析验证了算法求出的 FOPID 参数具有鲁棒性, 当系统参数大幅度变化时不需要重新设置; 证明了经萤火虫算法优化的分数阶 PID 控制器能够更好地满足船舶航向控制的需求。

**关键词:** 萤火虫算法; 分数阶 PID 控制; 航向控制; 自动舵

## A Principal and Subordinate Cooperative Firefly Algorithm for Optimizing Fractional-order PID Controller in Tracking Control of Ship Steering

Xue Han, Zhao Qiang, Ma Feng, Li Lina, Yang Shenhua

(Navigation Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To improve the effect of course control, the Fractional-order Proportional-Integral-Derivative (FOPID) has been introduced to tracking control of ship steering for the first time in this paper, and a principal and subordinate cooperative Firefly Algorithm (FA) has been proposed for optimizing the controller gains and obtaining best performance index. Based of the dynamics mode and practical ship parameters, the results of experiment shows that the FOPID controller optimized by firefly algorithm has better control ability than PSO algorithm. Sensitivity analysis has been carried out to see the robustness of the optimum FOPID gains obtained at nominal, which need not be reset for wide changes in system parameters. It is proved that the FOPID optimized by firefly algorithm can provide better control performance in tracking control of ship steering.

**Keywords:** firefly algorithm; fractional-order PID controller; course control; autopilot

### 0 引言

FA 算法是一种基于种群的启发式优化算法, 模拟了萤火虫的交流行为, 灵感来自于萤火虫闪烁的行为, 最先由杨新社教授于 2008 年提出<sup>[1-2]</sup>。FA 算法的综述见文献<sup>[3-5]</sup>。

尽管各种复杂的控制理论和技术的涌现, 超过 95% 的闭环控制仍然使用比例-微分-积分控制 (PID)<sup>[6]</sup>。最近几年分数阶 PID 控制 (FOPID) 获得了越来越多的关注<sup>[7-10]</sup>。分数阶 PID 控制是 PID 控制的一种推广<sup>[11]</sup>, 利用分数阶微分和积分, 能提供比传统的整数阶 PID 更好的控制性能和鲁棒性<sup>[12]</sup>。

在船舶自动舵系统中, 先测量船舶的偏航角, 这些信号反馈给船舶的 PID 控制系统。自动舵比较期望航向和测量的实际航向之间的误差, 计算舵的指令, 传送给方向舵伺服来调整航向。

### 1 分数阶 PID 概述

分数阶计算是积分和微分在非整数阶的推广, 使用分数算

子 ${}_a D_t^\alpha$ , 其中  $t$  和  $a$  是操作算子的上、下限,  $\alpha$  ( $\alpha \in \mathbf{R}$ ) 是算子的阶数。普遍使用 Grunwald-Letnikov (GL) 定义和 Riemann-Liouville (RL) 定义, 其中 GL 定义如下:

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\alpha} \sum_{j=0}^{\lceil (t-a)/h \rceil} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh) \quad (1)$$

式中,  $\lceil \cdot \rceil$  表示取整。RL 定义如下:

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (2)$$

式中,  $n-1 < \alpha < n$ ,  $\Gamma(\cdot)$  是 Euler 的 Gamma 函数。

在零初始条件下 RL 分数阶微分/积分的拉氏变换如下:

$$L\{ {}_a D_t^\alpha f(t) \} = s^\alpha F(s) \quad (3)$$

1991 年 Oustaloup 利用零点和极点的递归分布, 给出近似函数如下:

$$s^\alpha \approx k \prod_{n=1}^N \frac{1+(s/\omega_{z,n})}{1+(s/\omega_{p,n})}, \alpha > 0 \quad (4)$$

这种近似在频率范围 ( $\omega_L, \omega_H$ ) 内有效。式中增益  $k$  可调整使得 (4) 式等号两边有都有单位增益 1 rad/s。预先选择好极点和零点数量  $N$ 。式中零点和极点的频率如下:

$$\omega_{z,1} = \omega_l \sqrt{\eta} \quad (5)$$

$$\omega_{p,n} = \omega_{z,n} \epsilon, n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$\omega_{z,n+1} = \omega_{p,n} \eta, n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (7)$$

$$\epsilon = (\omega_n / \omega_l)^{\alpha/N} \quad (8)$$

$$\eta = (\omega_n / \omega_l)^{(1-\alpha)/N} \quad (9)$$

$\alpha < 0$  的情况可以通过式 (4) 求逆来处理。对于  $|\alpha| > 1$

收稿日期: 2015-01-23; 修回日期: 2015-03-20。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51109090); 福建省科技计划重点项目 (2012H0030); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目 (JA12181); 厦门市科技计划高校创新项目 (3502Z20123019)。

**作者简介:** 薛 晗 (1982-), 女, 江苏人, 博士, 讲师, 主要从事智能控制方向的研究。

近似效果较差, 此时通常把  $s$  拆分成如下:

$$s^\alpha = s^n s^\delta, \alpha = n + \delta, n \in \mathbf{Z}, \delta \in [0, 1) \quad (10)$$

## 2 主从交互式萤火虫群优化算法

### 2.1 基本 FA 算法

在基本萤火虫算法中, 两个萤火虫  $i$  和  $j$  之间的距离根据式 (11) 的欧几里得距离来衡量, 其中  $D$  是问题的维数,  $x_{id}$  是第  $i$  个萤火虫的第  $d$  个分量值:

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{d=1}^D (x_{id} - x_{jd})^2} \quad (11)$$

萤火虫的吸引力随着距离的增加而指数减小。当距离为  $r_r$  时, 萤火虫的吸引力计算公式如 (12) 所示, 其中  $\gamma$  是吸收系数,  $m$  用来调节距离的度量标准,  $\beta_{(0)}$  是距离为零时的吸引力, 通常设为 1。

$$\beta_r = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, m \geq 1 \quad (12)$$

萤火虫  $i$  被更亮更有吸引力的萤火虫  $j$  吸引, 如式 (13) 计算, 其中  $\alpha \in [0, 1]$  是由用户调节随机度的缩放比例,  $\psi \in [0, 1]$  是随机数。

$$x_{id} = x_{id} + \beta_0 e^{-\gamma r^2} (x_{jd} - x_{id}) + \alpha(\psi - 0.5) \quad (13)$$

### 2.2 主从交互式萤火虫群优化算法

在提出的新算法中, 每个萤火虫根据自身的知识、本群成员共享的信息和其他群提供的社会信息, 来调整自己在搜索空间中的数值。因吸引力的修改如下:

$$\beta_{r,k} = \beta_{0,k} e^{-\gamma r^k m}, m \geq 1 \quad (14)$$

$$x_{id,k} = x_{id,k} + \beta_{0,k} e^{-\gamma r^2} (x_{jd,k} - x_{id,k}) + \alpha(\psi_k - 0.5) \quad (15)$$

上式表示群间的信息共享。在多种群进化中引入学习机制。每个群最差的解被随机从任选群中的最优解替代:

$$X_{k,worst} = \begin{cases} X_{1,top} & , rand_k \in [0, 1/s) \\ X_{2,top} & , rand_k \in [1/s, 2/s) \\ \vdots & \vdots \\ X_{s,top} & , rand_k \in [(s-1)/s, 1) \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $X_{k,worst}$  是第  $k$  个群的最差解,  $X_{j,best}$  随机选至第  $j$  个群的最优  $T$  个解,  $rand_k$  是在  $[0, 1]$  上均匀分布的随机数。这表示不同种群之间的社会交流。参数  $T$  随迭代进行而减小如下:

$$T = ceil[\frac{N}{2}(1 - \frac{g-1}{nGen})] \quad (17)$$

主从交互式萤火虫群优化算法参数如表 1 所示。

表 1 FA 算法参数表

参数	符号
萤火虫总数	N
种群数	S
问题维数	D
最大迭代次数	nGen
当前迭代序数	g

本算法的伪代码如下所示。

- 1: Setting the parameters of FA
- 2: Generate initial population of fireflies  $X_i(i=1, 2, \dots, N)$
- 3: Divide the population into S swarms
- 4: Calculate corresponding objective function  $f(X_i)$
- 5: Calculate light intensity  $L_i$  according to  $f(X_i)$
- 6:  $t=0$
- 7: while  $g < nGen$

- 8: for  $k=1:S$
- 9: for  $i=1:n$  all n fireflies
- 10: for  $j=1:n$  all n fireflies
- 11: if  $(L_{jk} > L_{ik})$
- 12: move firefly ik towards jk in all D dimensions
- 13: end if
- 14: Attractiveness varies with the distance  $r$  via  $e^{-r^2}$
- 15: Evaluate new solutions and update new light intensity  $L_{ik}$
- 16: end for j
- 17: end for i
- 18: end for k
- 19: for  $k=1:S$
- 20: Sort all the swarms and update the T top-ranked individuals  $X_{k,top}$  in each swarm
- 21: end for k
- 22: for  $k=1:S$
- 23: Generate a random number  $randk$ , suppose  $(n-1)/S < randk < n/S, 0 < n < S$
- 24: Replace the worst solution  $X_{k,worst}$  with  $X_{n,top}$
- 25: end for k
- 26: update the parameter T
- 27:  $g=g+1$
- 28: end while
- 29: Output the global solution in all swarms.

## 3 实例验证

Nomoto 提出的船舶一阶动力学模型如下<sup>[14]</sup>:

$$T\dot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta \quad (18)$$

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (19)$$

式中, 系统参数  $T, K$  是已知常量,  $\delta$  是舵角即控制系统的输入,  $\psi$  是偏航角。

通常使用 PID 控制器产生需要的舵角以使船舶稳定。其中微分用来预测船舶的偏航趋势, 克服由惯性引起的偏航 (又称反舵角), 改善船舶操纵的动态性能; 积分用于降低甚至消除船舶不对称的偏航 (又称压舵), 改善船舶操纵的静态特性。

分数阶 PID 控制器形式如下:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (20)$$

式中,  $K_p, K_d, K_i$  为正数的增益。

FOPID 可以写成如下形式:

$$C(s) = k_p \left( 1 + \left[ \frac{T_I}{s} \right] \cdot \frac{1}{s^{m_I}} + [T_D s] \cdot s^{m_D} \right) \quad (21)$$

式中,  $\left[ \frac{T_I}{s} \right]$  是一阶积分,  $\frac{1}{s^{m_I}}$  是分数阶积分,  $0 < m_I < 1$ ,  $[T_D s]$  是一阶微分,  $s^{m_D}$  是分数阶微分,  $0 < m_D < 1$ 。该控制器可被近似为下式:

$$C_D(s) = k_p \left\{ 1 + \left[ \frac{T_I}{s} \right] K_I \frac{\prod_{i=0}^{N-1} (1 + s/z_0(ab)^i)}{\prod_{i=0}^N (1 + s/p_0(ab)^i)} + [T_D s] K_D \frac{\prod_{i=0}^N (1 + (s/z_0(ab)^i))}{\prod_{i=0}^N (1 + (s/p_0(ab)^i))} \right\} \quad (22)$$

$PI^{\lambda}D^{\mu}$  自动舵的模块图如下所示:

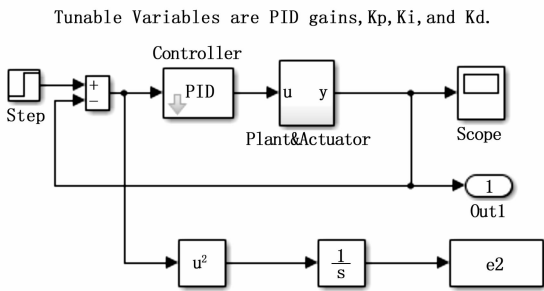


图 2  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  自动舵模块图

本文提出一种性能指标来评估 FOPID 控制器, 包括输入的积分以及预期与输出之间误差的积分, 积分区间  $t_f$  选择为足够大。性能指标  $J$  定义如下:

$$J = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} ((\Psi_a - \Psi_d)^2 + \lambda \delta^2) dt \quad (23)$$

## 4 结果分析

### 4.1 不同控制器性能比较

利用船舶跟踪控制模型验证主从交互式萤火虫群优化算法优化 FOPID 控制器的有效性。系统参数为  $K = 7.9269$ ,  $T = 13.88$ 。

将使用主从交互式萤火虫群优化算法优化 FOPID 控制器的系统, 和不带控制器的系统对阶跃响应的性能指标进行对比, 列于表 2。不带控制器的系统阶跃响应如图 3 所示。

表 2 使用 FA-FOPID 控制器和不带控制器的系统阶跃响应性能指标对比

Controller	$\sigma/(\%)$	Ess	tr	ts	tp
without	85.9	0	2.15	108	4.24
FA-FOPID	5.42	0	1.63	8.33	3.03

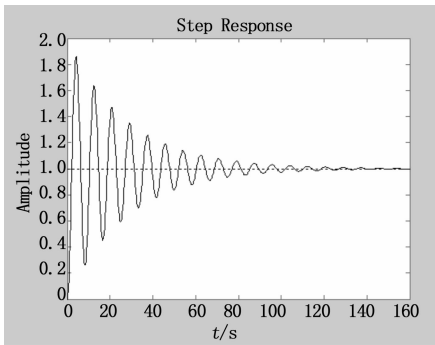


图 3 无控制器时阶跃响应

以下是用来对比的 PSO 算法的参数: 种群大小  $n = 50$ ; 最大迭代次数  $bird\_setp = 100$ ; PSO 参数  $c1 = 1.2$ ; PSO 参数  $c2 = 0.12$ ; PSO 惯量  $\omega = 0.9$ 。

使用上述评价函数计算得出的最优解列于表 3, 包括超调量  $\sigma\%$ 、上升时间  $tr$ 、调节时间  $ts$ 、稳态误差  $ESS$  和峰值时间  $tp$ 。使用主从交互式萤火虫群优化算法优化 FOPID 控制器的系统, 和 PSO 算法优化 FOPID 控制器的系统的动态响应  $\psi$  曲线对比见图 4 所示。FA-FOPID 提供了更好的性能, 例如大家关注的响应时间的快速性。FA-FOPID 控制器的输入  $\delta$  的收敛曲线如图 5 所示。

表 3 FA 和 PSO 优化 FOPID 控制器的结果对比

Controller	FA-FOPID	PSO-FOPID
$K_p$	0.2316	0.2316
$K_i$	0.0057	0.0125
$K_d$	2.6875	2.1569
$\mu$	0.8047	0.7891
$\lambda$	0.5042	0.4642
Ess	0	0
$\sigma/(\%)$	5.42	7.83
$T_s$	8.33	9.17
$T_r$	1.63	1.86
$T_p$	3.03	3.38

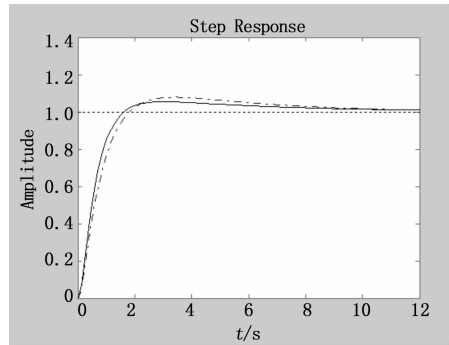


图 4 FA 和 PSO 优化 FOPID 的系统动态响应  $\psi$  曲线对比见图

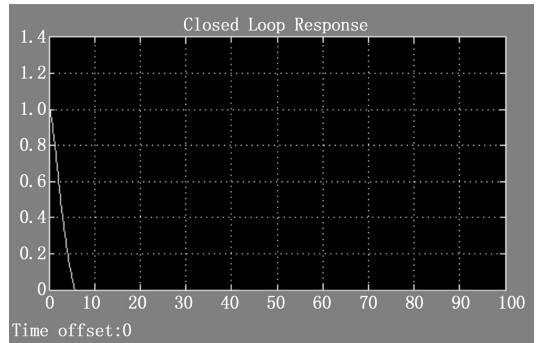


图 5 FA-FOPID 控制器的输入  $\delta$  的收敛曲线

### 4.2 敏感性分析

执行敏感性分析来研究系统的鲁棒性。当系统参数例如  $T$  在正常值附近  $\pm 20\%$  变动时, 观察 FOPID 控制器最优参数  $K_p, K_i, K_d$  的变化情况。表 4 给出了系统参数变化情况下 FOPID 控制器参数最优值。响应结果基本不变, 因此当系统参数发生大幅度变化时, FOPID 控制器参数能保持不需要改变, 仍取正常情况下的最优值。

表 4 系统参数变化情况下 FOPID 控制器参数最优值

	$K_p$	$K_i$	$K_d$
+15%	0.2316	0.0057	2.6875
-15%	0.2316	0.0057	2.6875
+20%	0.2316	0.0057	2.6875
-20%	0.2316	0.0057	2.6875
+25%	0.2359	0.0059	2.6891
-25%	0.2295	0.0053	2.6856

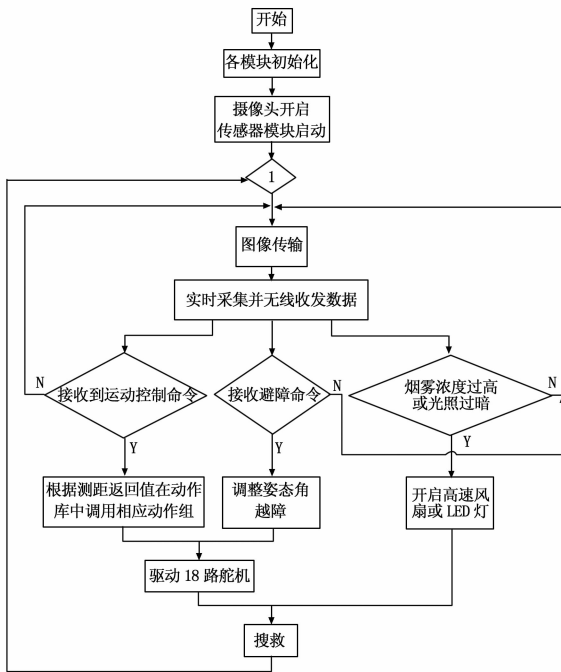


图 7 下位机控制流程图

高 10 cm, 直径为 8 cm 的凸起。机器人通信系统和传感器系统工作正常, 配合高清摄像头能够准确的采集现场环境信息和视频状况, 并实时显示在上位机上。

实验证明, 该机器人兼顾稳定性与足式机器人受地面障碍物的影响小的优点, 可以在更复杂的环境下顺利行进, 整个搜

(上接第 2391 页)

### 5 结论

本文首次将萤火虫优化算法应用于船舶航向跟踪控制器的参数优化, 并提出一种主从交互式萤火虫群优化算法。与 PSO 算法进行比较, 实验证明 FA 优化的 FOPID 控制器有更好的控制效果。敏感性分析证明了算法得出的 FOPID 参数具有鲁棒性, 当系统参数大幅度变化时不需要重新设置。

#### 参考文献:

[1] Yang X-S. Nature-inspired metaheuristic algorithm. Frome [M]. Somerset: Luniver Press.

[2] Yang X-S. Firefly algorithms for multimodal optimization. In Stochastic algorithms: Foundations and applications, SAGA 2009 [C]. Lecture notes in computer sciences, 5792, 169-178.

[3] Fister I, Fister I, Jr, Yang X-S. et al. A comprehensive review of firefly algorithms [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2013, 13: 34-46.

[4] Fister I, Yang X-S, Brest J, et al. Modified firefly algorithm using quaternion representation [J]. Expert System with Applications, 2013, 40: 7220-7230.

[5] Yang X-S, He X. Firefly algorithm: Recent advances and applications. International Journal of Swarm Intelligence, 2012, 1: 36-50.

[6] Astrom K J, Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, second ed [M]. Instrument Society of America, Re-

search Triangle Park, North Carolina, USA, 1995.

### 7 结束语

本系统利用仿生学原理设计了六足机器人的机械结构, 基于传感器模块的信息采集系统和基于远程上位机的运动控制系统构成了一个完整的搜救系统, 体现了本设计的智能性与实用性。六足搜救机器人系统的创新之处在于自主设计的硬件结构并针对救灾现场地形与环境状况研究了搜救机器人的步态规划与越障能力, 对于今后进一步研究机器人在灾后搜救过程中的应用有着重要的意义。

#### 参考文献:

[1] 毛丽民, 刘叔军, 徐本连, 等. 蚂蚁机器人的群智搜救系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (11): 3051-3053.

[2] 王立忠, 孙汉林, 张为家, 等. 可视无线搜救机器人控制系统研制 [J]. 吉林师范大学学报 (自然科学版), 2013, 2013, 34 (4): 101-103.

[3] 王鹏, 李鑫, 江文浩. 地震搜救机器人构型设计综述 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17 (1): 15-19.

[4] 王忠民. 灾难搜救机器人研究现状与发展趋势 [J]. 现代电子技术, 2007, 30 (17): 152-155.

[5] 董晓坡, 王绪本. 救援机器人的发展及其在灾害救援中的应用 [J]. 防震减灾工程学报, 2007, 27 (1): 112-117.

[6] 李斌. 蛇形机器人的研究及在灾难救援中的应用 [J]. 机器人技术与应用, 2003 (3): 22-26.

[7] 金波, 胡厦, 俞亚新. 新型六足爬行机器人设计 [J]. 机电工程, 2007, 24 (6): 23-25, 36.

[8] 王倩, 陈甫, 臧希, 等. 新型六足机器人机构与控制系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2008 (3): 148-150.

[7] Oustaloup A, Levron F, Mathieu B, et al. Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2000, 47: 25-40.

[8] Samko S G, Kilbas A A, Marichev O I. Fractional integrals and derivatives: theory and applications [M]. Gordon & Breach Science Publishers Inc, Philadelphia, Pennsylvania, 1993.

[9] Yousfi N, Melchior P, Rekić C, et al. Path tracking design by fractional prefilter using a combined QFT/H $\infty$ -design for TDOF uncertain feedback systems [J]. Journal of Applied Nonlinear Dynamics 1, 2012, 239-261.

[10] Miller K, Ross B. An Introduction to the Fractional Calculus and Fractional Differential Equations [M]. Wiley-Blackwell, New York, 1993.

[11] Podlubny I. Fractional-order systems and PI-D $\alpha$ -controller [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44: 208-214.

[12] Li H S, Luo Y, Chen Y Q. A fractional order proportional and derivative (FOPD) motion controller: tuning rule and experiments [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18: 516-520.

[13] Swarm intelligence based dynamic obstacle avoidance for mobile robots under unknown environment using WSN [J]. Journal of Central South University of technology, 2008, 15 (6): 860-868.

[14] Nomoto K. On the steering quality of ships [J]. International Ship building Progress, 1957, 35: 354-370.