

基于人工鱼群算法的燃气轮机负载突变时的 PID参数寻优

宋明礼,王冰晓,王元龙,马亮

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所,黑龙江哈尔滨150078)

摘要: PID控制中各参数对控制效果作用不同,为了应对燃气轮机负载突变的复杂情况,工程实践中对PID参数的优化至关重要。应用人工鱼群算法对燃气轮机负载突变的PID参数寻优进行了研究。在人工鱼群算法的基础上对燃气轮机负载突变0.1工况的多种情况进行了仿真实验。仿真结果表明:在负载突变0.1工况的定转速控制模式下,利用人工鱼群算法寻优获得的PID参数的控制效果在过渡时间、衰减比等多方面优于通过Z-N临界法计算得到的PID参数所达到的性能指标;通过人工鱼群算法寻优获得的有限组PID参数,可以通过插值的方式得到其他工况满足控制要求的PID参数。

关键词: 人工鱼群;燃气轮机;负载突变;PID控制

中图分类号:TK47;TP18

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.03.004

[引用本文格式]宋明礼,王冰晓,王元龙,等.基于人工鱼群算法的燃气轮机负载突变时的PID参数寻优[J].热能动力工程,2022,37(3):22-27. SONG Ming-li, WANG Bing-xiao, WANG Yuan-long, et al. Optimization of PID parameters of gas turbine during load sudden change based on artificial fish swarm algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 22-27.

Optimization of PID Parameters of Gas Turbine During Load Sudden Change based on Artificial Fish Swarm Algorithm

SONG Ming-li, WANG Bing-xiao, WANG Yuan-long, MA Liang

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: Each parameter in the proportion integration differentiation (PID) control has different influences on the control effect, in order to cope with the complex situation of the sudden change of the gas turbine load, the optimization of the PID parameters in engineering practice is crucial. The artificial fish swarm algorithm is used to study the PID parameter optimization of gas turbine during load sudden change. On the basis of artificial fish swarm algorithm, the simulation experiments are carried out for various conditions of gas turbine during load sudden change of 0.1. The simulation results show that under the constant speed control mode with load sudden change of 0.1, the control effect of the PID parameters obtained by using the artificial fish swarm algorithm is better than the performance index of the PID parameters calculated by the Z-N critical method in many aspects such as transition time and attenuation ratio. The finite set of PID parameters obtained by the artificial fish swarm algorithm optimization can get the PID parameters that meet the control requirements of other working conditions by means of interpolation.

Key words: artificial fish, gas turbines, load sudden change, PID control

引言

PID 控制器以其结构简单、稳定性好及调整方便等优点成为工业控制的主要技术。比例控制 P (Proportion) 是 PID 控制的基础;积分控制 I (Integration) 可消除稳态误差,但可能增加超调;微分控制 D (Differentiation) 可加快大惯性系统响应速度以及减弱超调趋势。PID 控制器就是根据系统的误差,利用比例、积分和微分计算出控制量进行控制。

随着燃气轮机在发电、船舶电力推进领域的广泛应用^[1],对燃气轮机的控制需求日益提高。燃气轮机用于孤网发电时负荷变化频繁,这就要求燃气轮机的机动性在负载突变的情况下能够快速稳定到新的工况点,避免发生超转速停车、压气机喘振和燃烧室熄火等情况。由于负载突变的复杂性,常规 PID 调节得到燃气轮机负载突变的超调量和调节时间不够理想,因此需要对 PID 参数进行寻优。

人工鱼群算法^[2-6]是模仿自然界鱼群行为方式所提出的一种基于动物自治体的优化方法。通过对自然界鱼群运动规律的观察总结出觅食、群聚、追尾和随机等行为。其中,觅食行为奠定了算法收敛基础,群聚行为增强了算法的稳定性和全局性,追尾行为提高了算法的快速性和全局性。这种自下而上的方法具有良好的全局寻优能力。

Z-N 临界法^[7]是由 Ziegler-Nichols 于 1942 年提出的一种很经典的 PID 控制器参数整定方法,在工程上也曾得到过广泛的应用。该方法不依赖于对象模型数学参数,而是通过总结前人的理论和实践经验,由经验公式得到 PID 控制器的优化参数。其中关键是对临界增益 K_u 和临界振荡周期 T_u 的获取。

本文在构建燃气轮机数学模型的基础上,采用人工鱼群算法,优化燃气轮机控制器 PID 参数,通过仿真实验与传统的 Z-N 法进行比较,并展开分析。

1 燃气轮机模型

采用容积法搭建某型三轴燃气轮机模型,利用模块化建模方法,建立压气机、燃烧室、涡轮、容积和转子等模型^[8]。图 1 为燃气轮机模型结构框图。

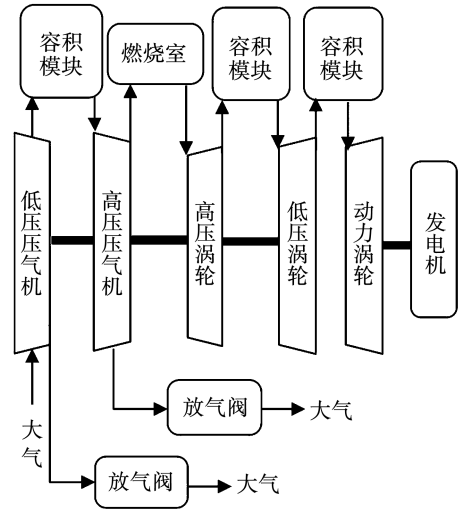


图 1 燃气轮机模型结构框图

Fig. 1 Structure diagram of gas turbine model

2 人工鱼群算法

2.1 人工鱼群行为描述

人工鱼群算法通过对自然界鱼群运动规律的观察,总结出与寻优有关的鱼群运动行为,包括:觅食行为、群聚行为、追尾行为和随机行为。其中,觅食行为奠定了算法收敛基础,群聚行为增强了算法的稳定性和全局性,追尾行为提高了算法的快速性和全局性。

设人工鱼 i 个体状态为 X_i ,当前位置食物浓度即目标函数为 $Y = f(X_i)$, Visual 表示人工鱼感知距离, $X_{i,next}$ 为人工鱼下一时刻状态, Step 表示人工鱼移动的最大步长, δ 为拥挤度因子, Rand 为一个 $(0,1)$ 随机数, r 为与 X_i 同维数的随机单位向量。

随机行为:随机行为通常作为觅食行为的补充,在个体不满足觅食行为条件时,进行随机运动。其数学表达式为:

$$X_{i,next} = X_{i,sui} = X_i + \text{Visual} \cdot \text{Rand} \cdot r \quad (1)$$

觅食行为:人工鱼当前状态为 X_i 在其感知距离 Visual 内随机选择一个状态 X_j ,若 $Y_i < Y_j$ (按正值极大值问题讨论,极小值判断条件相反),则向该方向前进随机距离(不超过最大步长);若条件不满足则重新选择状态 X_j ,直到选择出符合条件的 X_j ,或在选择次数 number 达到限制次数 try_number 后随机移动随机进行随机行为。其数学表达式为:

$$X_{i,next} = X_{i,mi} =$$

$$\begin{cases} X_i + \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} \cdot \text{Rand} \cdot \text{Step}, Y_i < Y_j \\ X_{i,\text{sui}}, Y_i < Y_j \end{cases} \quad (2)$$

聚集行为:人工鱼搜索当前邻域内 ($d_i < \text{Visual}$) 的其他个体数目 n_f 及中心位置 X_c , 若 $\frac{Y_c}{n_f} > \delta Y_i$ (Y_i 负值域注意不等号方向以及 δ 的取值), 表明中心位置有较多食物并且不太拥挤, 则向中心位置前进随机距离 (不超过最大步长), 否则执行觅食行为。其数学表达式为:

$$X_{i,\text{next}} = \begin{cases} X_i + \frac{X_c - X_i}{\|X_c - X_i\|} \cdot \text{Rand} \cdot \text{Step}, \frac{Y_c}{n_f} > \delta Y_i \\ X_{i,\text{mi}}, \frac{Y_c}{n_f} \leq \delta Y_i \end{cases} \quad (3)$$

追尾行为:人工鱼搜索当前邻域内 ($d_i < \text{Visual}$) 的其他食物浓度最高的个体 X_{max} , 若 $Y_{\text{max}}/n_f > \delta Y_i$ (负值域注意不等号方向以及 δ 的取值), 则表明 X_{max} 有较高的食物浓度且周围不太拥挤, 则朝 X_{max} 方向移动随机距离 (不超过最大步长), 否则执行觅食行为。其数学表达式为:

$$X_{i,\text{next}} = \begin{cases} X_i + \frac{X_{\text{max}} - X_i}{\|X_{\text{max}} - X_i\|} \cdot \text{Rand} \cdot \text{Step}, \frac{Y_{\text{max}}}{n_f} > \delta Y_i \\ X_{i,\text{mi}}, \frac{Y_{\text{max}}}{n_f} \leq \delta Y_i \end{cases} \quad (4)$$

2.2 人工鱼群算法参数设定

将燃气轮机 PID 控制器中的 P、I、D 参数定义为个体鱼的空间位置 $X_i = (K_p^i, K_i^i, K_d^i)$, Visual 为人工鱼感知距离, Step 为人工鱼移动的最大步长, δ 为拥挤度因子, Gen 为迭代次数, Maxgen 为最大迭代次数。

2.3 人工鱼群算法目标函数及解空间设定

目标函数 Y , 即评价函数, 以仿真过程中燃气轮机 N_3 转速误差的平方与时间的乘积积分 (ISAE) ^[9-11] 的相反数为性能指标。该性能指标在兼顾缩短调节时间的基础上, 可以抑制大误差的产生。

$$J(\text{ISAE}) = \int_0^\infty t e^2(t) dt \quad (5)$$

$$Y = -J(\text{ISAE}) \quad (6)$$

由于算法中会有发散 PID 数据的仿真, 为避免系统发散崩溃, 在 Simulink 仿真中引入了发散判断

条件, 当判断其发散时, 程序会提前终止该次 PID 数据仿真, 并赋予这组 PID 参数差的评价值:

$$Y = -(100 - T_s) \cdot \text{fsxs} \quad (7)$$

式中: T_s —终止时间; fsxs —发散评价系数。

K_p 、 K_i 、 K_d 解空间以 Z-N 法整定的 PID 参数 K_p^* 、 K_i^* 、 K_d^* 为基准^[12], τ 取 0.05。

$$\begin{cases} \tau K_p^* < K_p < (1 + \tau) K_p^* \\ \tau K_i^* < K_i < (1 + \tau) K_i^* \\ \tau K_d^* < K_d < (1 + \tau) K_d^* \end{cases} \quad (8)$$

2.4 人工鱼群算法流程

人工鱼群算法在初始化后, 每个个体首先进行聚集行为和追尾行为的目标函数比较, 取较大的状态作为个体下一时刻的运动方向, 所有个体状态更新后, 再次进入第二次的目标函数比较, 重复整个过程, 直到达到最大迭代次数, 输出最优解。图 2 为人工鱼群算法流程图^[13]。图中 X_{next1} 为个体鱼执行聚集运动后的位置, Y_{next1} 为个体鱼执行聚集运动后的位置的食物浓度, 同理 X_{next2} , Y_{next2} 分别为个体鱼执行追尾运动后的位置以及该位置的食物浓度。

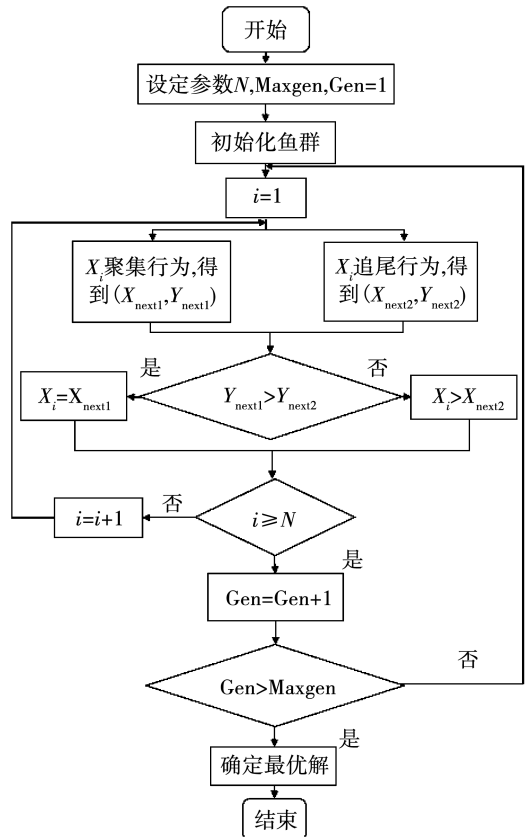


图 2 人工鱼群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of artificial fish algorithm

3 人工鱼群算法整定仿真结果

3.1 Ziegler-Nichols 临界法与基于人工鱼群算法整定仿真对比

仿真实验中令 $K_d = 0$, 额定转速 $N = 3\ 600\ \text{r/min}$, 额定功率 $P = 30\ \text{MW}$, 分别在 0.5 工况点突增突减 0.1 工况(该突变情况为实际生产任务要求)对 PID 寻优。

根据 Z-N 临界法可得 $K_u = 115$ 、 $T_u = 2.7\ \text{s}$, 经计算 Z-N 临界法参数整定参数 $K_p = 51.75$ 、 $K_i = 19.02$ 。

在鱼群个体数量 $\text{fishnum} = 50$, 仿真时间 $\text{stopT} = 40\ \text{s}$, $\delta = 0.618$, 步长 $\text{Step} = 10$, 视野 $\text{Visual} = 10$, 最大迭代次数 $\text{Gen} = 10$, 发散评价系数 $\text{fsxs} = 30\ 000$ 的条件下^[14], 经人工鱼群算法寻优后得到的突增 0.1 工况 $K_p = 35.42$ 、 $K_i = 4.145$, 突减 0.1 工况 $K_p = 40.49$ 、 $K_i = 5.120$ 。

二者仿真控制效果与 Z-N 临界法优化后得到的 PID 仿真控制效果, 如图 3 和图 4 所示。图 3 为 0.5 ~ 0.6 工况鱼群算法寻优 PID 与 Z-N 临界法 PID 仿真结果对比。图 4 为 0.5 ~ 0.4 工况鱼群算法寻优 PID 与 Z-N 临界法 PID 仿真结果对比。其中粗线为鱼群算法仿真结果, 细线为 Z-N 临界法仿真结果。

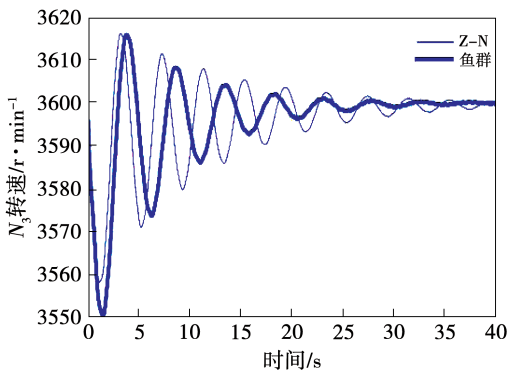


图3 0.5~0.6 工况鱼群算法寻优 PID 与 Z-N 临界法 PID 仿真结果对比

Fig. 3 Simulation result comparison of optimized PID obtained by using fish swarm algorithm and PID calculated by the Z-N critical method during load sudden change of 0.5 to 0.6

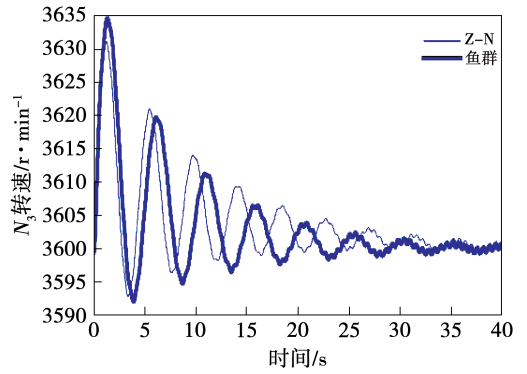


图4 0.5~0.4 工况鱼群算法寻优 PID 与 Z-N 临界法 PID 仿真结果对比

Fig. 4 Simulation result comparison of optimized PID obtained by using fish swarm algorithm and PID calculated by the Z-N critical method during load sudden change of 0.5 to 0.4

3.2 插值拟合各工况负载突变 0.1 工况时 PID 参数仿真结果

由于燃气轮机模型结构复杂、设备性能参数较多、非线性程度高且耦合关系复杂, 通过 Z-N 临界法得到的 PID 参数不适用于所有工况点的突变, 甚至在部分工况点出现发散情况, 这是因为 Z-N 临界法是一种经验公式法, 在实际的生产应用中需要根据实际的控制效果微调 PID 参数。同时, 临界法操作复杂, 不适合在不同工况点重复使用。

由于通过人工鱼群算法得到的 PID 参数每次都在设定的工况下寻优, 所以得到的参数控制效果均满足要求。然而, 同大多数智能算法一样, 人工鱼群算法每次寻优需要大量时间解算, 不能满足实时要求。为此, 需要提前解算出部分工况下突变时的 PID 参数, 通过插值拟合的方式迅速得到其他工况点突变时的 PID 参数。

每隔 0.1 工况, 通过仿真实验获得不同工况点突增, 突减 0.1 工况时的 PID 参数整定数据, 共计 18 组。图 5 为由 0.55 工况上升至 0.65 工况插值 PID 与人工鱼群算法寻优 PID 仿真结果对比。图 6 为由 0.55 工况下降至 0.45 工况的插值 PID 与人工鱼群算法寻优 PID 仿真结果对比。其中, 实线为鱼群算法得到的仿真结果, 星号为插值得到的仿真结果。由仿真结果可以看出, 通过插值得到的 PID 参

数控制曲线与人工鱼群算法寻优 PID 基本重合。

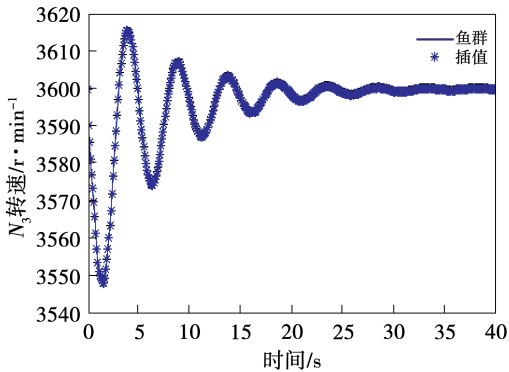


图5 由0.55工况升至0.65工况插值PID与人工鱼群寻优PID效果对比

Fig.5 Effect comparison of optimized PID obtained by using artificial fish swarm algorithm and PID by means of interpolation during load sudden change of 0.55 to 0.65

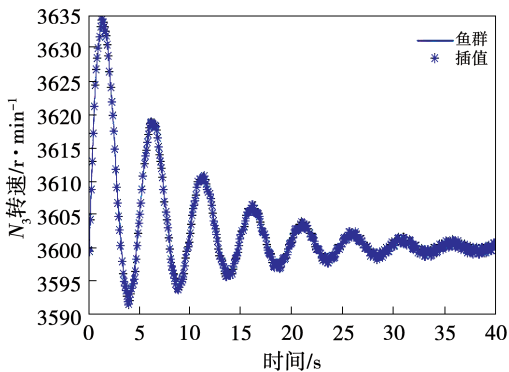


图6 由0.55工况降至0.45工况插值PID与人工鱼群寻优PID效果对比

Fig.6 Effect comparison of optimized PID obtained by using artificial fish swarm algorithm and PID by means of interpolation during load sudden change of 0.55 to 0.45

3.3 仿真结果分析

从图3可以看出,Z-N临界法的过渡时间(以正负5 r/min为标准)为25 s、衰减比为1:1.29;人工鱼群算法的过渡时间为20 s、衰减比为1:1.86。从图4可以看出,Z-N临界法的过渡时间为19 s、衰减比为1:1.32;人工鱼群算法的过渡时间为16 s、衰减比为1:1.53。所以在外界环境相同的条件下,通过

人工鱼群算法获得的PID参数的控制效果在过渡时间和衰减比上均比使用Z-N临界法得到的PID参数控制好。从图5、图6可以看出,利用人工鱼群算法寻优得到的有限组PID参数,可以通过插值方法得到其他工况的PID参数,控制效果与人工鱼群寻找到的PID参数基本相同,且满足任务调节需求。

综合所有仿真结果图可以看出,通过人工鱼群算法寻优得到的PID参数衰减比约为2:1。可以通过更换目标函数、加权多个目标函数^[15]的方式优化评价函数,从而寻找更优解。

4 结 论

在燃气轮机用于孤网发电和舰船动力推进的情况下,负载突变是经常出现的工作状态,频繁的突变对燃气轮机控制要求更高,此时固定的PID参数调节难以满足复杂的突变情况,对PID参数进行灵活的修正寻优是十分必要的。

人工鱼群算法具有克服局部最优、对初值参数选择不敏感、鲁棒性强和收敛速度快等特点,适合寻找复杂工况变化下的PID参数。与大部分智能算法相同,人工鱼群算法无法实时在线计算寻优,但可以通过仿真实验事先得到部分突变情况的PID参数,在实时的仿真中通过插值的方式计算得到PID参数。

仿真实验表明:在负载为0.5工况突增0.1工况的情况下,Z-N临界法得到的PID参数的过渡时间为25 s、衰减比为1:1.29,而人工鱼群算法的过渡时间为20 s、衰减比为1:1.86;在负载为0.5工况突减0.1工况的情况下,Z-N临界法得到的PID参数的过渡时间为19 s、衰减比为1:1.32,而人工鱼群算法的过渡时间为16 s、衰减比为1:1.53;通过人工鱼群算法寻优获得的PID参数在过渡时间、衰减比等多方面优于通过Z-N临界法计算得到的PID参数;在负载突变0.1工况的情况下,通过人工鱼群算法寻优获得的有限组PID参数可以进一步通过插值的方式得到其他工况点突变时的PID参数,通过插值得到的PID参数满足基本控制要求。

参考文献:

- [1] 林汝谋. 燃气轮机发电动力装置及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- LIN Ru-mou. Gas turbine power generation power plant and application[M]. Beijing:China Electric Power Press,2006.
- [2] 李晓磊,邵之江,钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(11):32-38.
- LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, QIAN Ji-xin, An optimizing method based on autonomous animats: fish-swarm algorithm[J]. Theory and Practice of Systems Engineering,2002,22(11):32-38.
- [3] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法——人工鱼群算法[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- LI Xiao-lei. A new intelligent optimization method—artificial fish algorithm[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2003.
- [4] 王联国,洪毅,施秋红. 全局版人工鱼群算法[J]. 系统仿真学报,2009,21(23):7483-7486.
- WANG Lian-guo, HONG Yi, Shi Qiu-hong. Global edition artificial fish swarm algorithm[J]. Journal of System Simulation,2009,21(23):7483-7486.
- [5] 魏立新,张峻林,刘青松. 基于改进人工鱼群算法的神经网络优化[J]. 控制工程,2014,21(1):84-87.
- WEI Li-xin, ZHANG Jun-lin, LIU Qing-song. Optimization of neural network based on improved fish algorithm[J]. Control Engineering of China,2014,21(1):84-87.
- [6] 王联国,洪毅,赵付青,等. 一种改进的人工鱼群算法[J]. 计算机工程,2008,34(19):192-194.
- WANG Lian-guo, HONG Yi, ZHAO Fu-qing, et al. Improved artificial fish swarm algorithm[J]. Computer Engineering,2008,34(19):192-194.
- [7] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers[J]. Transaction of ASME,1942,64:759-768.
- [8] 李淑英. 燃气轮机性能分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.
- LI Shu-ying. Analysis of gas turbine performance[M]. Harbin: Harbin University of Engineering Press,2017.
- [9] VANDECURSEN J M, PEPERSRTATE J A. Internal model control with improved disturbance rejection[J]. Int. J control,1995,62(4):983-999.
- [10] 夏红. PID参数自整定方法综述[J]. 浙江科技学院学报,2003,15(4):236-240.
- XIA Hong. Summary of PID parameter self-regulation methods[J]. Journal of Zhejiang Institute of Science and Technology,2003,15(4):236-240.
- [11] ZHUANG M, ATHERTON P. Automatic tuning of optimum PID controllers[J]. IEE proceedings Control and Application,1993,140:216-224.
- [12] 付月园,许琪斌. 基于人工鱼群算法的PID参数优化研究[J]. 计算机与数字工程,2018(9):1755-1758.
- FU Yue-yuan, XU Qi-bin. Research on optimization of PID parameters based on artificial fish swarm algorithm[J]. Computer & Digital Engineering,2018(9):1755-1758.
- [13] 史峰,王辉,郁雷,等. MATLAB智能算法30个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2019.
- SHI Feng, WANG Hui, YU Lei, et al. MATLAB intelligent algorithm 30 case studies[M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2019.
- [14] 李小培,张洪伟,邹书蓉. 基于全局人工鱼群算法的函数优化[J]. 成都信息工程学院学报,2014,29(S1):5-9.
- LI Xiao-pei, ZHANG Hong-wei, ZOU Shu-rong. Function optimization based on global artificial fish algorithm[J]. Journal of Chengdu Institute of Information Engineering,2014,29(S1):5-9.
- [15] 于明莉. PID控制器确定性性能评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- YU Ming-li. PID controller deterministic performance evaluation study[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2015.

(金圣迪 编辑)