

6-1-2020

Cascade PID Parameter Optimization of Main Steam Temperature Control System Based on Imperialist Competitive Algorithm

Liu Shuai

1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;;

Changliang Liu

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Cascade PID Parameter Optimization of Main Steam Temperature Control System Based on Imperialist Competitive Algorithm

Abstract

Abstract: Thermal power plants for the main steam temperature are difficult to control, using *Imperialist Competitive Algorithm* to accomplish main steam temperature cascade control strategy simulation optimization. The main steam cascade PID control system *with limiting and speed actuator* as simulation object determined the appropriate error indicator function *ITAE criterion*. Several types of Cascade PID control scheme were compared. Simulation results show that Imperialist Competitive Algorithm is convenient and effective method of parameter optimization, and PID-PI cascade type system has better balanced dynamic performance, anti-interference ability.

Keywords

the main steam system, cascade PID, Imperialist Competitive Algorithm, control constraints

Recommended Citation

Liu Shuai, Liu Changliang. Cascade PID Parameter Optimization of Main Steam Temperature Control System Based on Imperialist Competitive Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(2): 368-373.

基于帝国竞争算法的主汽温控制系统参数优化研究

刘帅¹, 刘长良²

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对火电厂主汽温难以控制的特点, 利用帝国竞争算法对主汽温串级控制策略进行了仿真优化研究。以带有限幅和限速执行器的主汽温串级 PID 控制系统为仿真对象, 确定了合适的误差指标函数 ITAE; 对几种类型的串级 PID 控制方案进行了对比研究。仿真结果表明帝国竞争算法是一种便捷有效的参数优化方法, PID-PI 型串级控制系统动态性能指标较均衡, 抗干扰能力更强。

关键词: 主汽温系统; 串级 PID; 帝国竞争算法; 控制约束

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 02-0368-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201702018

Cascade PID Parameter Optimization of Main Steam Temperature Control System Based on Imperialist Competitive Algorithm

Liu Shuai¹, Liu Changliang²

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Thermal power plants for the main steam temperature are difficult to control, using *Imperialist Competitive Algorithm* to accomplish main steam temperature cascade control strategy simulation optimization. The main steam cascade PID control system with *limiting and speed actuator* as simulation object determined the appropriate error indicator function *ITAE criterion*. Several types of Cascade PID control scheme were compared. Simulation results show that Imperialist Competitive Algorithm is convenient and effective method of parameter optimization, and PID-PI cascade type system has better balanced dynamic performance, anti-interference ability.

Keywords: the main steam system; cascade PID; Imperialist Competitive Algorithm; control constraints

引言

随着我国经济的快速发展, 电能早已是我们日常生活中必不可少的能源之一。我国各发电企业也通过积极的措施来推动电力生产加快发展, 同时产业结构调整取得明显成效。在未来的几年至十一年中, 600 MW 超超临界机组将会取代 300 MW 机组

而成为我国电力行业的骨干机组。而超超临界机组中汽温控制长久以来就是难点, 蒸汽温度直接影响到全厂的热效率和设备的安全运行, 所以汽温控制系统是电厂的重要控制系统之一。电厂现场一般采用串级 PID 控制系统保证主汽温温度跟随设定值。近年来, 主汽温串级 PID 控制系统研究不断发展, 刘吉臻^[1]在基于 RBF 网络整定主汽温 PID 串级控制系统中, 对比传统 PID-P 控制策略取得了良好的效果。张立群^[2]研究了基于串级 PID 控制器参数稳定约束的内外 PID 控制器的最优组合, 文中分别设计出基于稳定域的设定值跟踪最优 PID-PI 和 PID-P1,



收稿日期: 2015-07-02

修回日期: 2015-09-11;

作者简介: 刘帅(1990-), 男, 河北保定, 博士, 研究方向为热力系统建模与仿真; 刘长良(1965-), 男, 河北沧州, 博士, 教授, 研究方向为火电机组节能、热力系统建模与仿真、故障诊断等。

<http://www.china-simulation.com>

• 368 •

设定值跟踪和内扰加权最优 PID-P2, 但三种方法各有利弊, 不能达成统一。黄宇^[3]将内模控制与模糊控制相结合, 对比传统的 PID-P 控制策略, 仿真结果表明新方法的调节时间和衰减率较为理想。

帝国竞争算法^[4](Imperialist Competitive Algorithm, ICA)是 Atashpaz-Gargari E 和 Lucas C 于 2007 年提出, 是受启发于历史中各帝国之间的力量角逐, 最强大的帝国将最终达到统一各帝国的一种智能算法。国外学者中, Niknam T^[5]将改进之后的帝国竞争算法和 K 均值聚类算法融合, 称为 K-MICA 算法, 经过算例对比表明所提算法鲁棒性强、能够避免陷入局部最优点。Talatahari S^[6]在帝国竞争算法中加入混沌映射提出了 CICA 算法, 算例结果表明了 CICA 算法的优越性。Lucas C^[7]利用帝国竞争算法成功建立了直线感应电动机模型, 经过和遗传算法设计结果的对比, 验证了帝国竞争算法的快速性和准确性。在国内, 杨楠^[8]将帝国竞争算法应用于电力系统供需侧联合随机调度, 算例仿真证明了所建模型的正确性。颜波^[9]将帝国竞争算法中偏移角度进行改进, 加快了算法的收敛速度, 应用于多产品供应链优化, 为企业做出了合理建议。

本文主要工作有: (1) 采用带有限幅和限速执行器的主汽温串级 PID 控制系统为仿真对象, 更加贴近工程应用中的实际情况; (2) 使用帝国竞争算法进行参数优化研究, 充分挖掘参数优化潜力; (3) 使用上述仿真对象及算法进行仿真, 以不同指标为目标函数, 通过对比确定了有效合理的目标函数; (4) 使用上述仿真对象及算法进行仿真, 对比不同类型串级 PID 控制器的控制效果, 找到了更适用于主汽温系统的串级 PID 类型。

1 帝国竞争算法

1.1 算法介绍

帝国竞争算法的主要步骤如下:

(1) 在定义域内随机选择一些点作为“国家”, 并初始化各帝国(包含一个帝国主义国家和若干殖民地);

(2) 将殖民地所属帝国主义国家移动;

(3) 若某殖民地的结果优于所属帝国主义国家, 则将殖民地和帝国主义国家转换位置, 原来帝国主义国家为殖民地, 殖民地变为帝国主义国家;

(4) 将各帝国进行排序;

(5) 选择最弱帝国的最弱的殖民地, 分配给更有可能占有它的帝国;

(6) 若最弱帝国只剩一个国家, 则此帝国消亡;

(7) 如果只剩一个帝国, 则算法结束; 否则返回至(2)。

1.2 帝国竞争算法优势

在帝国竞争论文^[4]中, 将帝国竞争算法与 PSO(粒子群算法)和 GA(遗传算法)针对同一个问题进行了仿真实验, 实验结果表明帝国竞争算法能够以更少的迭代次数寻找到全局最优点。同时, Forouharfard^[10]在研究越库作业调度问题中使用 GA 和帝国竞争算法进行了比较, 研究结果显示了帝国竞争算法在解决此类问题上的显著优势。

1.3 帝国竞争参数设置

本文中帝国竞争算法参数为初始国家数量 200 个, 帝国数量 8 个, 迭代次数为 1 000 次, 同化系数 $\beta = 2$, 偏移角度 $\gamma = \pi/4$, 帝国势力大小系数 $\varepsilon = 0.02$ 。

2 仿真对象分析

2.1 基本仿真对象

主汽温控制系统模型的被控对象由两部分组成: 一部分是主汽温导前区, 另一部分是主汽温惰性区, 串级 PID 控制器通过调节减温水流量, 保证过热器尾部蒸汽温度跟随设定值。本文研究的主汽温控制系统模型结构如图 1。

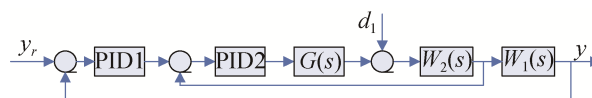


图 1 串级控制系统结构

Fig. 1 Cascade PID control system structure

图 1 中, $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$ 分别为汽温模型的外回路和内回路被控对象传递函数, $G(s)$ 为执行器(理想情况下 $G(s)=1$), PID1 和 PID2 分别表示外回路和内回路的 PID 控制器。 y_r 为串级控制系统输入, d_1 为外部扰动, y 为系统闭环输出。范永胜^[11]对喷水扰动下的汽温动态特性进行研究, 用机理建模法得到某超临界 75% 负荷下主汽温的传递函数:

导前区传递函数:

$$W_2(s) = \frac{-1.657}{(1+20s)^2} \quad (1)$$

惯性区传递函数:

$$W_1(s) = \frac{1.202}{(1+27.1s)^7} \quad (2)$$

导前区输入为流量(kg/s), 输出为温度(°C), 惯性区输入输出都是温度(°C)。 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$ 模型的整体含义是输入减温水流量的变化对输出过热器尾部温度的影响。

本文以上述主汽温系统为例进行研究, 使用的 PID 控制器结构如下:

$$PID(s) = \frac{1}{\delta} \times \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + 0.1 \times T_d s} \right) \quad (3)$$

2.2 考虑执行器限制后的仿真对象

实际中, 串级 PID 控制器之后的执行器 $G(s)$ 为饱和和非线性环节, 执行器的物理特性决定了串级 PID 控制器的输出并不能全部如实输出到被控对象上。串级 PID 的输出对应阀门的开度, 阀门的开度直接反映了减温水流量的大小。由于模型输入为减温水流量, 所以对执行器的限幅和限速的约束就是对减温水流量的限幅和限速。某厂 600 MW 机组设计负荷下的减温水流量约为 22 kg/s, 假定阀门全开到全关所用时长为 30 s, 稳定运行时阀门开度为 50%, 则串级 PID 输出限幅设置为上限为 11 kg/s, 下线为 -11 kg/s, 控制升降速率为 ± 0.73 kg/s。

假设系统满负荷稳定运行, 过热器尾部蒸汽温度为 560 °C, 喷水减温阀门开度 50%, 使用帝国竞争算法优化含有理想执行器的 PID-PI 类型串级控制器参数, 优化结果为 $\delta_1=1.523$, $T_{i1}=116.993$,

$T_{d1}=43.681$, $\delta_2=0.291$, $T_{i2}=22.024$ 。将优化结果分别在含有理想执行器的串级控制系统、含有限幅限速执行器的串级控制系统中应用, 在 20 s 时加入幅值为 3 的阶跃响应, 仿真时间为 800 s, 系统闭环输出曲线、减温水流量曲线, 如图 2。

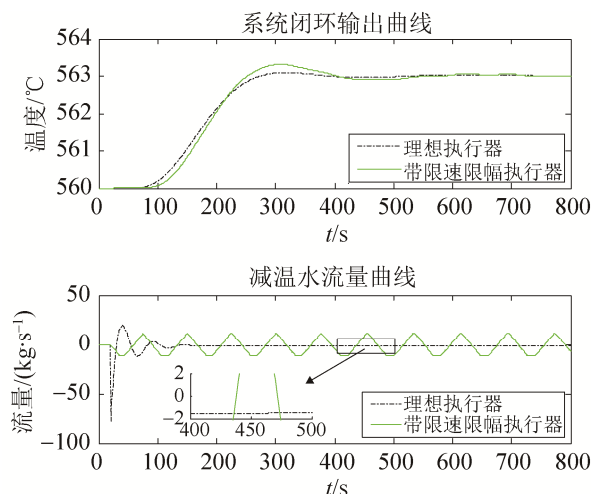


图 2 仿真曲线

Fig. 2 Simulation curve

从系统闭环输出曲线看出, 由于优化参数是在含理想执行器的串级控制系统中优化的结果, 应用到含限幅限速执行器的控制系统中动态性能参数会劣化。从减温水流量可以看出理想执行器输出变化剧烈, 而含限幅限速执行器的仿真才能反映实际情况, 有现场应用价值。故本文以含有限幅限速执行器的控制系统进行仿真研究。

3 目标函数优化仿真

3.1 目标函数简介

目标函数的不同, 决定了被控对象的调节品质好坏。ITAE 指标(integrated time absolute error criterion)是目标函数的一种表达式, 如下:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4)$$

式中: $e(t)$ 为误差。ITAE 指标着重于避免整定参数动态过渡时间较长, 误差和调节时间兼顾。

为了对比不同的目标函数, 使用不同于 ITAE 指标的目标函数: ISTAE 指标(integrated square of

time absolute error criterion), 其表达式如下:

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

ISTAE 是在 ITAE 指标的基础上强调稳态偏差的重要性, 将稳态误差控制在极小的范围内。

IITAE 指标(integrated inverse of time absolute error criterion), 其表达式如下:

$$\text{IITAE} = \int_0^T (T-t)^2 |e(t)| dt \quad (6)$$

式中: T 是仿真时间; IITAE 是在 ITAE 指标的基础上强调初始偏差的重要性, 对稳态误差要求比 ITAE 指标要低, 能够以更快的速度达到稳态。

3.2 仿真方法与步骤

假设系统稳定运行, 过热器尾部蒸汽温度为 560°C , 喷水减温阀门开度 50%, 使用串级 PID 控制器类型为: PID-PI, 对以上三种目标函数统计 10 次优化结果取平均值, 优化结果见表 1, 性能指标(单位阶跃响应)见表 2。

表 1 ITAE、ISTAE 和 IITAE 优化结果

Tab. 1 Optimization results of ITAE、ISTAE and IITAE

	δ_1	T_{i1}	T_{d1}	δ_2	T_{i1}
ITAE	1.650	114.060	42.403	0.585	13.088
ISTAE	1.786	111.930	36.799	0.237	16.120
IITAE	1.557	113.214	51.737	1.212	11.246

表 2 ITAE、ISTAE 和 IITAE 优化结果性能指标

Tab. 2 Optimization results performance evaluation of ITAE、ISTAE and IITAE

	Mp(%)	tr(s)	ts(s)	φ	Tp(s)
ITAE	3.387	261	346	0.662	313
ISTAE	1.857	292	275	0.799	333
IITAE	5.399	235	651	0.358	297

注: Mp 是超调量; tr 是上升时间; ts 是过渡时间; φ 是衰减率; Tp 是振荡周期(两个波峰之间的时间)。

然后, 针对三种目标函数的优化结果进行幅值为 3 的阶跃仿真, 系统仿真时间 3 000 s, 在 1 500 s 处加入外部阶跃扰动, 系统闭环输出曲线、减温水流量曲线如图 3、图 4。

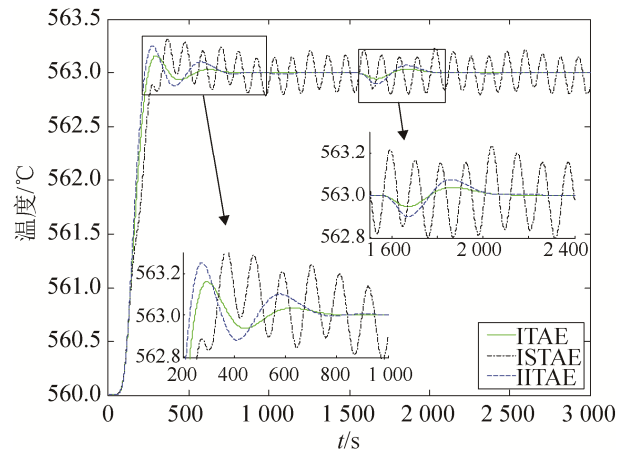


图 3 系统闭环输出曲线

Fig. 3 System closed-loop output curve

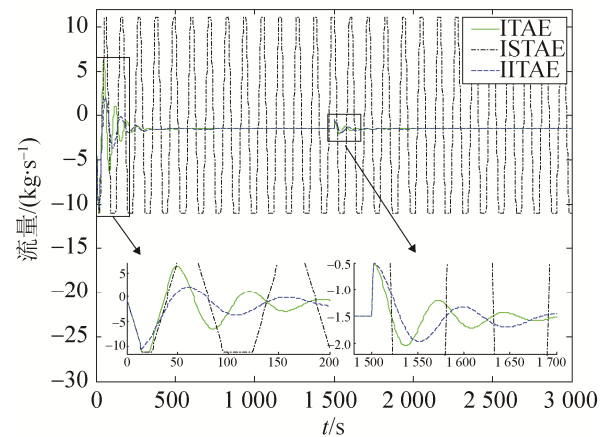


图 4 减温水流量曲线

Fig. 4 Desuperheating water flow curve

3.3 仿真结果与分析

3 种目标函数优化结果如表 1~2 所示。

针对 3 种目标函数的优化结果进行的仿真曲线如图 3~4 所示。

从仿真结果来看, 3 种不同的目标函数优化串级 PID 参数均有效果。通过性能指标可以看出, ITAE 作为目标函数的阶跃响应曲线超调量、上升时间和过渡时间适中, 性能指标整体均衡, 从仿真曲线可以看出 ITAE 指标的阶跃扰动响应幅值很小, 适应能力较强; ISTAE 指标的性能指标超调量最小, 上升时间较大, 但过渡时间最小, 在扰动阶跃响应中幅值最小, 但在幅值为 3 的阶跃响应曲线中可以看出 ISTAE 指标的优化结果出现了震荡;

而 IITAE 作为目标函数的性能指标中上升时间最短,但过渡时间较长,在扰动阶跃响应中幅值较大。综合来看 ITAE 指标的优化结果更加合理,能适应复杂工况,易于现场实施。

4 串级 PID 类型优化仿真

4.1 仿真方法与步骤

首先,使用帝国竞争算法优化三种串级 PID 类型:PID-P、PID-PI 和 PI-PI,假设系统稳定运行,过热器尾部蒸汽温度为 560°C ,喷水减温阀门开度 50%,以 ITAE 为目标函数统计 10 次优化结果取平均值,优化结果见表 3,性能指标(单位阶跃响应)见表 4。

表 3 PID-PI、PID-P 和 PI-PI 优化结果

Tab. 3 Optimization results of ITAE、ISTAE and IITAE

	δ_1	T_{i1}	T_{d1}	δ_2	T_{i2}
PID-PI	1.650	114.060	42.403	0.585	13.088
PID-P	1.357	133.006	46.619	0.167	0
PI-PI	2.894	97.363	0	0.116	156.902

表 4 PID-P、PID-PI 和 PI-PI 优化结果性能指标

Tab. 4 Optimization results performance evaluation of

ITAE、ISTAE and IITAE

	Mp(%)	tr(s)	ts(s)	ϕ	Tp(s)
PID-PI	3.387	261	346	0.662	313
PID-P	3.242	269	475	0.512	307
PI-PI	1.617	432	404	0.944	613

注:表 4 中: Mp 是超调量; tr 是上升时间; ts 是过渡时间; ϕ 是衰减率; Tp 是振荡周期。

然后,针对三种串级 PID 类型的优化结果进行幅值为 3 的阶跃仿真,系统仿真时间 3 000 s,在 1 500 s 处加入外部阶跃扰动,系统闭环输出曲线、减温水流量曲线如图 5、图 6。

4.2 仿真结果与分析

3 种串级 PID 类型优化结果如表 3~4 所示。

针对 3 种串级 PID 类型的优化结果的仿真曲线如图 5~6 所示。

通过性能指标可以看出, PID-PI 衰减率适中,

超调量较大,振荡周期较小,在幅值为 3 的阶跃响应曲线中超调量适中,在外部阶跃扰动响应曲线中动态响应快速; PID-P 性质指标较均衡,衰减率较差,在幅值为 3 的阶跃响应中的曲线和 PID-PI 相近,外部阶跃扰动响应中幅值最大; PI-PI 的性能指标中响应较缓慢,超调量较小,衰减率较大,在外部阶跃扰动响应中响应速度较慢,幅值适中。三种串级 PID 类型在被控对象输出中消除扰动的时间大致相同。

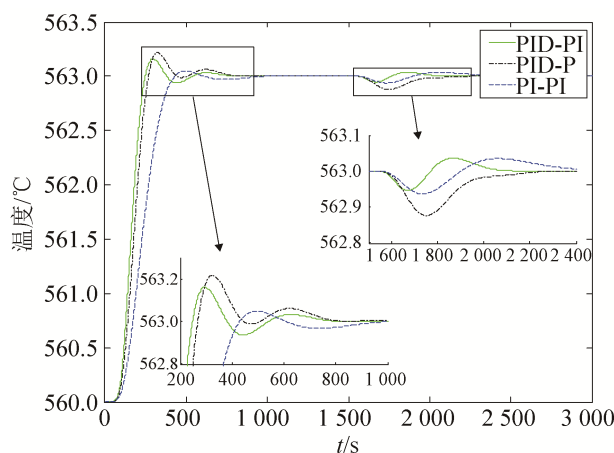


图 5 系统闭环输出曲线

Fig. 5 System closed-loop output curve

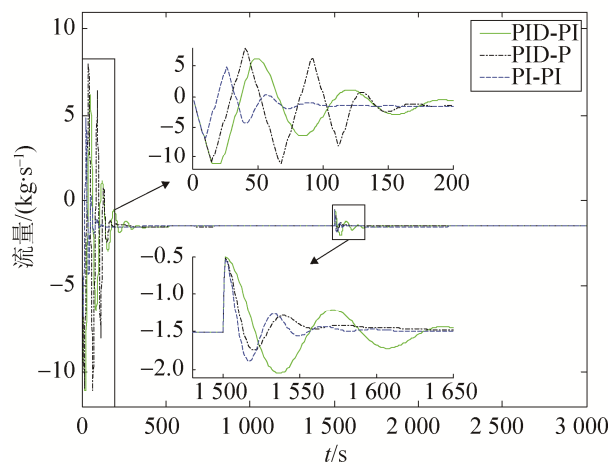


图 6 减温水流量曲线

Fig. 6 Desuperheating water flow curve

综合本次优化结果来看,三种类型的串级 PID 控制器优化结果各项指标良好, PID-PI 类型的串级 PID 控制器要好于 PID-P 类型和 PI-PI 类型的串级 PID 控制器,其过渡时间小,适应能力较强,动态

性能指标和抗干扰能力较均衡, 更适于工程应用。

5 结论

使用帝国竞争算法优化了带限幅限速执行器的主汽温串级 PID 控制系统参数。利用该算法研究了主汽温控制系统的目标函数, 研究了串级 PID 控制系统类型, 经过前述仿真研究, 得出如下结论:

(1) 仿真结果表明带限幅限速执行器的仿真控制系统的实用性和帝国竞争算法的有效性;

(2) 仿真结果表明 ITAE 指标作为主汽温控制系统的目标函数简单有效;

(3) 仿真结果表明 PID-PI 类型的串级 PID 控制器优化结果好于 PID-P 和 PI-PI 类型的串级 PID 控制器, 性能指标较均衡。

参考文献:

- [1] 刘吉臻, 李建强, 张栾英, 等. 用 RBF 网络整定的火电厂主汽温 PID 串级控制系统 [J]. 动力工程, 2006, 25(1): 89-92, 134. (Liu Jiezhen, Li Jianqiang, Zhang Luanying, et al. PID cascade control system of power plant main steam temperature with RBF network tuning [J]. Journal of Power Engineering (S1674-7607), 2006, 25(1): 89-92, 134.)
- [2] 张立群, 李东海, 唐多元, 等. 热力系统串级控制 PID 参数优化研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 16(8): 1848-1850, 1854. (Zhang Liqun, Li Donghai, Tang Duoyuan, et al. Optimum cascade PID controllers for thermal system [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2005, 16(8): 1848-1850, 1854.)
- [3] 黄宇, 韩璞, 李永玲. 主汽温系统模糊自适应内模控制 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 44(23): 93-98. (Huang Yu, Han Pu, Li Yongling. Fuzzy adaptive internal model control in main steam temperature system [J]. Proceedings of the CSEE (S0258-8013), 2008, 44(23): 93-98.)
- [4] Atashpaz-Gargari E, Lucas C. Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition [C]// 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Singapore: IEEE, 2007: 4661-4667.
- [5] Niknam T, Taherian Fard E, Pourjafarian N, et al. An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence (S0952-1976), 2011, 24(2): 306-317.
- [6] Talatahari S, Farahmand Azar B, Sheikholeslami R, et al. Imperialist competitive algorithm combined with chaos for global optimization [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation (S1007-5704), 2012, 17(3): 1312-1319.
- [7] Lucas C, Nasiri-Gheidari Z, Tootoonchian F. Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor [J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2010, 51(7): 1407-1411.
- [8] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 计及大规模风电和柔性负荷的电力系统供需侧联合随机调度方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (16): 63-69. (Yang Nan, Wang Bo, Liu Dichen, et al. An integrated supply-demand stochastic optimization method considering large-scale wind power and flexible load [J]. Proceedings of the CSEE (S0258-8013), 2013, 33(16): 63-69.)
- [9] 颜波, 石平, 王丽川, 等. 基于改进帝国竞争算法的多产品供应链优化 [J]. 系统工程, 2014, 31(4): 15-20. (Yan Ping, Shi Ping, Wang Lichuan, et al. Multi-product supply chain optimization based on improved imperial competitive algorithm [J]. Systems Engineering (S1001-4098), 2014, 31(4): 15-20.)
- [10] Forouharfard S, Zandieh M. An imperialist competitive algorithm to schedule of receiving and shipping trucks in cross-docking systems [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2010, 51(9/12): 1179-1193.
- [11] 范永胜, 徐治皋, 陈来九. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 33(1): 23-28. (Fan Yongsheng, Xu Zhigao, Chen Laijiu. Research on boiler superheated steam temperature adaptive fuzzy control system based on dynamic characteristic mechanism analysis [J]. Proceedings of the CSEE (S0258-8013), 1997, 33(1): 23-28.)