

检定炉炉温的阶跃响应试验建模与 MCP-PID 实时控制

杨帆^{1,2}, 杨平¹, 彭道刚¹

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: MCP-PID 控制新技术常用于改进检定炉炉温的控制。为改进对检定炉炉温的控制效果, 首先, 采用基于 PSO 的阶跃响应试验建模方法对检定炉炉温进行过程建模, 然后, 使用 MCP-PID 技术对模型实现控制。在管式检定炉自动温度控制试验装置上进行的实时控制试验表明: 基于 PSO 的阶跃响应试验建模方法是有效的; 与传统的 ZN-PID 相比, MCP-PID 控制具有超调量更小的优势。结果显示利用 deploytool 软件开发的 PID 实时控制程序获得成功。

关键词: PSO; 阶跃响应; 检定炉; MCP 传递函数; PID 控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.025 中图分类号: TP273 文章编号: 1673-9140(2020)06-0187-07

Step response modeling of calibrated furnace temperature and its MCP-PID real-time control

YANG Fan^{1,2}, YANG Ping¹, PENG Daogang¹

(1. Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The new MCP-PID control technology is often used to improve the calibrated furnace temperature control. In order to improve the control effect, this paper firstly adopts the PSO-based step response test modeling method to model the calibrated furnace temperature and then uses MCP-PID technology to control the model. The real-time control test carried out on the automatic temperature control test device of the tube calibrated furnace shows that the PSO-based step response test modeling method is effective. Compared with the traditional ZN-PID, the MCP-PID control has the advantage of small overshoot. Results show that the PID real-time control program developed on deploytool software is successful.

Key words: PSO; step response; calibrated furnace; MCP transfer function; PID control

用于热电偶检定的管式检定炉是国家和企业计量部门中常见的设备, 检定炉炉温控制是计量时最费时间的一项工作。为了提高效率、减低能耗, 改进

检定炉炉温控制技术一直是控制工程师的研究课题。近年来一种新的控制器 MCP-PID 受到关注, 该控制器的设计依据一种新的标准传递函数, 即多

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2018-03-05

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”高新技术领域项目(16111106300)

通信作者: 杨帆(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事市政排水工程仪表设计方面的研究; E-mail: yangfan3462@hotmail.com

容惯性(multiple capacity process, MCP)标准传递函数^[1],设计结果证明控制器具有超调量小、不限系统阶数和不限系统型次的优良特性^[2],即使限定采用PID结构,所设计的MCP-PID控制器^[3]也具有较优越的性能,并被多个工程应用案例证实有效^[4-6]。但是,这些案例多为仿真实验,因此,该文进行MCP-PID控制器在实际检定炉炉温控制系统上的应用案例分析。由于MCP-PID控制器的参数整定依赖于被控过程模型,所以被控过程模型的建立就是首先要解决的问题,为此该文利用经典阶跃响应试验建模方法,采用一种智能优化算法进行建模优化计算。这种智能优化算法就是粒子群算法(particle swarm optimization, PSO),应用于系统辨识中十分有效^[7-11]。

1 检定炉炉温实时控制试验装置

1.1 检定炉实时控制试验装置

实时控制实验中所使用的管式检定炉自动温度控制试验装置如图1所示,该装置由GL-3型热电偶卧式检定炉、KEITHLEY 2000数字万用表、VST. R-99测控仪、VST. R-99伺服器和LenovoPC机构成,系统框图如图2所示。系统工作原理:数字万用表将控温热电偶所测得的热电势信号模拟量转换成数字量,并通过RS232通讯接口传送给计算机;计算机中运转的炉温实时控制应用软件程序将热电偶热电势量转换成温度量,并进行PID控制运算,再通过RS232通讯接口将控制器控制量传递给测控仪;测控仪将控制量信号变换为伺服器的可控硅触发信号;伺服器为检定炉提供相应的加热功率电流,从而改变检定炉内的温度^[12]。

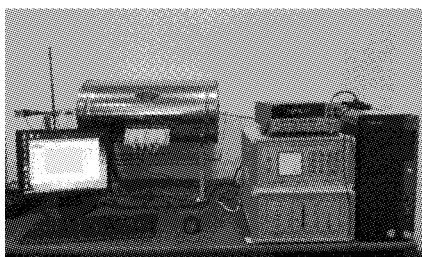


图1 检定炉实时控制试验装置

Figure 1 The calibrated furnace real-time control device

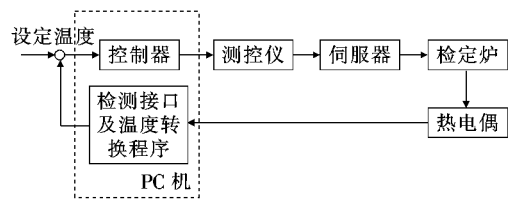


图2 检定炉炉温实时控制系统

Figure 2 The temperature control of horizontal calibrated furnace block diagram

1.2 炉温实时控制应用软件

在检定炉实时控制试验中,计算机中运转的炉温实时控制应用软件程序主要有三部分:测温元件自动检定软件、PID实时控制程序和阶跃响应试验程序。测温元件自动检定软件是成熟的商用软件,即LK3000测温元件自动检定软件,其主要功能为测温元件的信息录入、检定过程的参数设定、炉温实时控制、测温元件检定数据检测与记录以及检定数据的处理与结果展示。LK3000测温元件自动检定软件的炉温实时控制功能依靠自带的后台运行实时控制程序实现,该文在检定炉实时控制试验中,改用专门设计的PID实时控制程序及阶跃响应试验程序来实现炉温实时控制功能。PID实时控制程序和阶跃响应试验程序的编制和生成利用了MATLAB软件的deploytool工具软件。deploytool工具软件具有将所设计的MATLAB类的m文件生成exe应用程序的功能。利用deploytool工具软件,可以将PID实时控制程序的m文件置于新建的开发工程deployment project,再按下Deploytool Tool的build按钮生成exe应用程序。

PID实时控制程序是测温元件自动检定软件主程序调用的后台程序,按计算机时钟定时循环运行。设定每1s完成一次热电偶热电势的检测,每5s完成一次PID控制量更新计算,并通过读取硬盘文件方式与主程序交换数据信息。

阶跃响应试验程序也是测温元件自动检定软件主程序调用的后台程序,与PID实时控制程序类似,也是按计算机时钟定时循环运行的。不过,阶跃响应试验程序定时完成的主要是热电偶热电势的检测和阶跃响应数据的记录,控制量保持为一个定值。

2 基于 PSO 的检定炉阶跃响应试验建模

2.1 检定炉阶跃响应试验

对于被控过程的模型建立,常用的方法是机理建模法和实验建模法,而实验建模法中最常用的是阶跃响应试验法^[13]。在卧式检定炉动态特性模型的阶跃响应试验时,所记录的卧式检定炉温度变化曲线如图 3 所示。试验时通过阶跃响应试验程序设置伺服器的输出电压恒定为 50 V,通过阶跃响应试验程序实时记录检测到的检定炉温度(采样周期为 1 s),直至炉温趋于稳态。由图 3 可见,卧式检定炉炉温升高的过程是一个十分缓慢的过程,经过 13 h 的加热升温,炉温才收敛到 650 °C 左右。

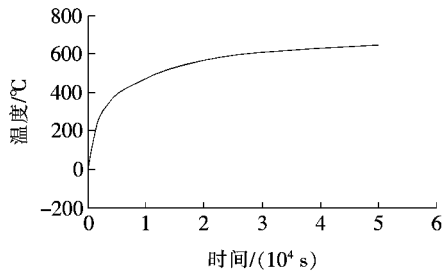


图 3 卧式检定炉阶跃响应试验温度变化曲线
Figure 3 Temperature change curve of horizontal calibrated furnace in step response test

2.2 基于 PSO 的检定炉阶跃响应试验建模

对于阶跃响应试验建模,虽然已有传统的切线法或两点法以及利用 MATLAB 软件的曲线拟合工具的方法,但是在传统的两点法和切线法辨识中,存在着测量不准确以及只能近似描绘对象的缺点,而 PSO 方法用于系统辨识的有效性已得到认可,并且相对于传统方法更为精确^[7]。因此,该文选择利用 PSO 方法进行阶跃响应试验建模。

设定粒子群算法的搜索空间为 D ,搜索的种群大小为 N ,每次迭代寻优中将产生第 i 个粒子的最优位置 p_i 、速度 v_i 以及最优种群位置 p_g ,可以运用公式将粒子的速度和位置从 j 代更新到 $j+1$ 代^[8-9],即

$$v_{id}^{j+1} = \omega \cdot v_{id}^j + C_1 \cdot rand_1 \cdot (p_{id} - x_{id}^j) + C_2 \cdot rand_2 \cdot (p_{gd} - x_{id}^j) \quad (1)$$

$$v_{id}^{j+1} \begin{cases} v_{\max d}, & v_{id}^{j+1} > v_{\max d} \\ v_{id}^{j+1}, & -v_{\max d} \leq v_{id}^{j+1} \leq v_{\max d} \\ -v_{\max d}, & v_{id}^{j+1} < -v_{\max d} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{id}^{j+1} = x_{id}^j + v_{id}^{j+1} \quad (3)$$

式中 C_1 、 C_2 为加速因子; ω 是惯性权重参数; $i=1,2,\dots,n$; $d=1,2,\dots,D$ 。

C_1 越大,粒子自身经验在 PSO 算法中所占的比重越大^[14]; C_2 越大,粒子群的成功经验在 PSO 算法所占的比重越大。文献^[15]提出,当 $C_1 > C_2$ 且 $C_1 + C_2 \leq 4$ 时可取得更好的结果。

在 PSO 算法中,惯性权重的选择决定了算法的开发以及探索能力^[16]。文献^[17]分析了固定权重和时变权重的选择问题,并提出大多数小种群问题都能够在适当固定的权重下得到较好的优化效果。根据文献^[17],结合仿真试验效果,最终采用的 PSO 算法参数值如表 1 所示。

表 1 PSO 算法参数值

Table 1 The parameters of PSO

搜索空间	种群数	惯性权重	加速因子 C_1	加速因子 C_2
4	10	0.7	1.5	1.494 45

系统辨识的目标是在相同的输入条件下系统模型的输出 $y(t)$ 尽量接近实际的系统输出 $y_0(t)$,选定 PSO 算法的个体适应度函数为残差平方和^[18]:

$$f = \sum_t [y(t) - y_0(t)]^2 \quad (4)$$

一般常用单容时滞模型来描述工业加热设备的动态过程^[11],因此,选择单容时滞模型为检定炉炉温模型结构。检定炉炉温模型为

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (5)$$

最终利用 PSO 方法完成的检定炉炉温模型阶跃响应试验建模结果为

$$G(s) = \frac{215.9}{1\ 800.5s + 1} e^{-80.8s} \quad (6)$$

由式(6)所示的模型参数可见,该检定炉炉温模型具有大惯性和小时滞的特点。适应度函数值的变化曲线如图 4 所示,可知迭代次数不到 40 次时已完成 PSO 优化建模的任务;实际模型和辨识模型响应

曲线如图 5 所示,可知 19 000 s 以后的模型响应曲线更贴近真实曲线。

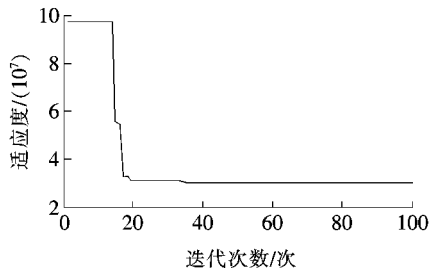


图 4 适应度函数值的变化

Figure 4 The change of fitness function value

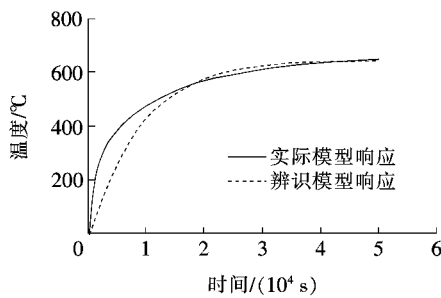


图 5 实际模型和辨识模型响应曲线

Figure 5 The output of identified model and actual model

3 检定炉的 MCP-PID 实时控制

3.1 MCP-PID 参数整定方法

检定炉炉温控制一般选用 PID 控制策略,但是 PID 控制参数整定始终是控制工程师不愿面对的一项费时费力的工作。文献[19]给出的人工整定 PID 控制参数的事例很有代表性,通过 17 次整定试验才找到最佳 PID 控制控温参数;文献[20]中提到,在检定过程中采用一般 PID 控制往往会出现十分严重的积分饱和现象,使得炉温出现较大的超调以及振荡。因此,寻求更好的控制规律及参数整定方法一直是检定炉炉温控制研究的热点课题。

如前所述,MCP-PID 控制器是比传统 PID 控制器更优越的控制器,且 MCP-PID 控制器的参数整定方法简单易行。根据文献[21],系统型次为 M 、阶数为 n 的 MCP 标准传递函数为

$$G_{MCP_{M-n}}(s) = \frac{\sum_{j=0}^{M-1} \beta_j s^j}{s^n + \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i s^i} \quad (7)$$

其函数系数的计算式为

$$\beta_i = \frac{n!}{i! (n-i)! T^{n-i}} \quad (8)$$

式中 T 为惯性单元的惯性时间常数。

针对图 6 所示的 PID 控制系统,容易推出系统的闭环传递函数:

$$\Phi(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} = \frac{Q(s)}{P(s)} \quad (9)$$

其中,分母多项式 $P(s)$ 对应的多项式为

$$P^*(s) = s^n + \alpha_{n-1}s^{n-1} + \dots + \alpha_1s + \alpha_0 \quad (10)$$

考虑 MCP 标准传递函数的特征多项式,有

$$P_\beta(s) = s^n + \beta_{n-1}s^{n-1} + \dots + \beta_1s + \beta_0 \quad (11)$$

令 $P^*(s) = P_\beta(s)$,即令 MCP-PID 控制系统的极点与 MCP 标准传递函数的极点相同,则可得联立方程组:

$$\begin{cases} \beta_{n-1} = \alpha_{n-1} \\ \beta_{n-2} = \alpha_{n-2} \\ \dots \\ \beta_0 = \alpha_0 \end{cases} \quad (12)$$

其中,系数 β_i 中含有参变量 T_β (惯性单元时间常数);系数 α_i 中含有待整定的 PID 参变量 (K_p 、 T_i 和 T_d)。

若考虑:

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \approx \frac{K}{(Ts + 1)(\tau s + 1)} = \frac{\frac{K}{T\tau}}{s^2 + \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{\tau}\right)s + \frac{1}{T\tau}} \quad (13)$$

$$G_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) = \frac{K_p T_d}{s} \left(s^2 + \frac{1}{T_d} s + \frac{1}{T_d T_i}\right) \quad (14)$$

则可导出 MCP-PID 控制器参数的整定公式为

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{K} \left[\frac{(4T + \tau)^3}{64T^2\tau} - 1 \right] \\ T_i = \frac{1.024T^3\tau^2}{(4T + \tau)^4} \left[\frac{(4T + \tau)^3}{64T^2\tau} - 1 \right] \\ T_d = \frac{\left[\frac{(4T + \tau)^2}{10.67T} - T - \tau \right]}{\left[\frac{(4T + \tau)^3}{64T^2\tau} - 1 \right]} \end{cases} \quad (15)$$

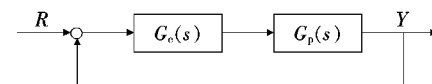


图 6 典型串联校正型控制系统

Figure 6 Typical cascade compensation control system

3.2 仿真试验

为了验证 MCP-PID 的控制性能,并与采用 ZN 参数整定方法的传统 PID 对比,可利用文献[3]给出的 ZN 法 PID 整定参数公式:

$$\begin{cases} K_p = \frac{1.18T}{\tau K}, \\ T_i = 2\tau, \\ T_d = 0.5\tau, \end{cases} \quad \frac{\tau}{T} \leq 0.2 \quad (16)$$

利用 Matlab/Simulink 仿真平台,可搭建以检

定炉炉温 PID 控制仿真试验系统模型,如图 7 所示。将表 1 的模型参数代入式(15)、(16),可算出如表 2 所示的 PID 整定参数数据。

为保证热电偶在允许误差温度范围内,根据检定规程(JJG351—84),设定控温值为 400 °C,仿真时间为 2 000 s,可以得到 MCP-PID 和 ZN-PID 控制响应曲线,如图 8 所示,可以看出,MCP-PID 和 ZN-PID 响应的超调量分别为 34.5%、78.3%,MCP-PID 和 ZN-PID 响应的调整时间几乎相同。

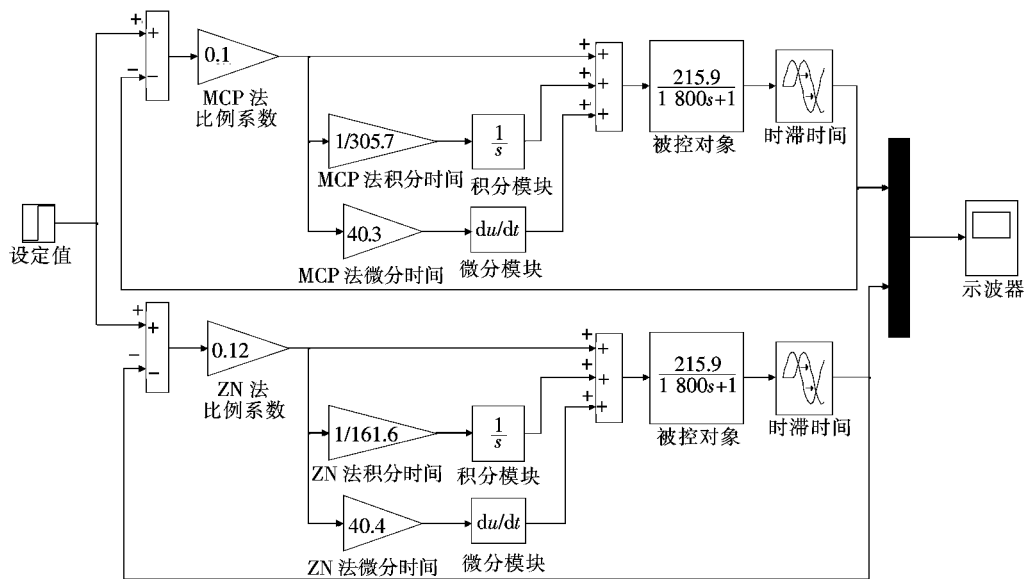


图 7 MCP-PID 与 ZN-PID 的仿真对比模型

Figure 7 The simulation comparison model of MCP-PID and ZN-PID

表 2 MCP 和 ZN 法的控制参数

Table 2 The control parameters of MCP and ZN

控制器	比例系数 K_p	积分时间 T_i/s	微分时间 T_d/s
MCP	0.10	305.7	40.3
ZN	0.12	161.6	40.4

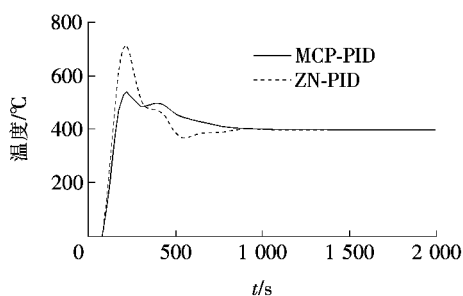


图 8 MCP-PID 和 ZN-PID 的温度控制曲线

Figure 8 The temperature control curve of MCP-PID and ZN-PID

3.3 实际试验

该次实验温度值设定为 400 °C,利用表 2 的 PID 整定参数数据分别进行检定炉炉温 MCP-PID 和 ZN-PID 的控制试验,控制曲线将在检定软件上显示出来,由于软件图像不够清晰,故将所得控制响应数据通过程序保存成文本文件。根据所记录的 2 次响应曲线数据,利用 Matlab 中 plot 函数可绘制对比响应曲线,如图 9 所示。

由图 9 可知,ZN-PID 控制响应的超调量(4%)大于 MCP-PID 的超调量(1%);2 种控制响应的调整时间相差不多,ZN-PID 控制时在 1 415 s 收敛到 401 °C,MCP-PID 控制时在 1 085 s 收敛到 402 °C。实验表明,使用 MCP-PID 控制可以使炉温减少超调量。

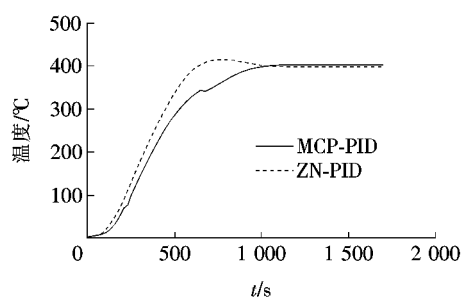


图9 MCP-PID和ZN-PID的实时控制曲线

Figure 9 The real-time temperature control curve of MCP-PID and ZN-PID

4 结语

通过仿真实验以及在实际检定炉系统上的控温实验,发现 MCP-PID 的控制性能优于 ZN-PID。主要表现为超调量小、收敛速度快,甚至可以超调地稳定在给定值附近,完全符合在实际工程中热电偶检定温度点控制的要求,具有重要的指导意义和实践价值。此外,所采用的基于 PSO 的检定炉阶跃响应试验建模技术被证实是可行的,在短时间内就能辨识出较为精确的模型。使用 MATLAB 软件的 deploytool 软件生成应用程序的方法也是有效的。

参考文献:

- [1] 杨平,余洁,孙宇贞. 多容惯性标准传递函数的建立与比较[J]. 上海电力学院学报,2011,27(5): 512-514+518.
YANG Ping, YU Jie, SUN Yuzhen, et al. Establishment and comparison of a multiple capacity process transfer function standard form[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(5): 512-514+518.
- [2] 杨平,陈式跃. 无超调不限阶数的 M 型次多容惯性标准传递函数[J]. 中国测试,2013,39(2):14-18.
YANG Ping, CHEN Shiyue. M-type multiple capacity process transfer function standard form with none overshoot and none order limit characteristics [J]. China Measurement & Test, 2013, 39(2): 14-18.
- [3] 杨平,黄伟,孙宇贞,等. PID 参数整定的 MCP 标准传递函数公式[J]. 上海电力学院学报,2014,30(1): 40-45+70.
YANG Ping, HUANG Wei, SUN Yuzhen, et al. PID parameters tuning formulae derived from the multiple capacity process transfer function standard form[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(1): 40-45+70.
- [4] 方文阳,杨平. 直流电机调速的 MCP-PID 控制[J]. 机电产品开发与创新,2015,28(5):97-99+123.
FANG Wenyang, YANG Ping. MCP-PID control for a DC motors speed regulation system[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2015, 28(5): 97-99+123.
- [5] 李昀,杨平,贺帅鹏. 恒压供水系统的 MCP-PID 控制[J]. 自动化与信息工程,2013,34(5):19-24.
LI Yun, YANG Ping, HE ShuaiPeng. MCP-PID control of pressure for water-supply system[J]. Automation & Information Engineering, 2013, 34(5): 19-24.
- [6] 丁远扬,杨平. 基于 MCP-PID 控制器的电站锅炉汽温控制[J]. 电力科学与工程,2014,30(11):1-6.
DING Yuanyang, YANG Ping. Superheated steam temperature control system of a power plant with the MCP-PID controller[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(11): 1-6.
- [7] 靳其兵,刘子宜. 基于阶跃响应的带纯滞后闭环辨识新方法[J]. 系统仿真学报,2010,22(9):2168-2172.
JIN Qibing, LIU Ziyi. Novel identification method with time delay from step response[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(9): 2168-2172.
- [8] 徐小平,钱富才,刘丁,等. 基于 PSO 算法的系统辨识方法[J]. 系统仿真学报,2008,20(13):3525-3528.
XU Xiaoping, QIAN Fucui, LIU Ding, et al. Method of system identification based on PSO algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13): 3525-3528.
- [9] 牛海明,于佼,丁常富,等. 基于多目标粒子群算法的过热汽温自抗扰控制[J]. 中国电力,2020,53(3):126-133.
NIU Haiming, YU Jiao, DING Changfu, et al. Active disturbance rejection control over superheated steam temperature based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 126-133.
- [10] 徐银凤,罗日成,易生,等. 带混沌搜索的 PSO 算法在变压器局部放电定位中的应用[J]. 电力科学与技术学报,2010,25(1):97-100.

- XU Yinfeng, LUO Richeng, YI Sheng, et al. Chaos search based PSO algorithm application in transformer partial discharge location[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(1): 97-100.
- [11] 张海燕, 王东, 樊平, 等. 基于加权 Voronoi 图和 GA-PSO 的电动汽车充电站最优规划[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(5): 77-82.
- ZHANG Haiyan, WANG Dong, FAN Pin, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on weighted voronoi diagram and GA-PSO[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(5): 77-82.
- [12] 孟毅男, 张健, 赵玉文, 等. 热电偶、热电阻全自动检定装置[J]. 电测与仪表, 2000, 37(5): 40-43.
- MENG Yinan, ZHANG Jian, ZHAO Yuwen, et al. Automatic calibrator for thermocouple and thermal resistance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2000, 37(5): 40-43.
- [13] 马一鸣, 周理兵, 王晋, 等. 基于直流阶跃电压试验与 NSGA II 算法的同步电机动态参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23): 4890-4900.
- MA Yiming, ZHOU Libing, WANG Jin, et al. A method for synchronous machine dynamic parameters identification based on DC step voltage test and NSGA II algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4890-4900.
- [14] 李强, 史元浩, 曾建潮, 等. 基于 PSO-Elman 神经网络的燃煤机组受热面清洁状态预测[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 48-53.
- LI Qiang, SHI Yuanhao, ZENG Jianchao, et al. Forecast of heating surface cleanliness of coal-fired power plants based on PSO-Elman neural network[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 48-53.
- [15] Tuppadung Y, Kurutach W. Comparing nonlinear inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[J]. International Journal of Knowledge based and Intelligent Engineering, Systems, 2011, 15(2): 65-70.
- [16] 黄新波, 王享, 田毅, 等. 基于 PSO-ELM 融合动态加权 AdaBoost 的变压器故障诊断方法[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 39-46.
- HUANG Xinbo, WANG Xiang, TIAN Yi, et al. Transformer fault diagnosis algorithm based on PSO-ELM fusion dynamically weighted AdaBoost[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 39-46.
- [17] 王俊伟, 汪定伟. 粒子群算法中惯性权重的实验与分析[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 194-198.
- WANG Junwei, WANG Dingwei. Experiments and analysis on inertia weight in particle swarm optimization [J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(2): 194-198.
- [18] 罗荣慧, 马志斌. 遗传算法在用户感知评估建模中的应用[J]. 中兴通讯技术, 2014(2): 49-52.
- LUO Ronghui, MA Zhibin. Genetic algorithms application in customer experience evaluation model[J]. ZTE Technology Journal, 2014(2): 49-52.
- [19] 刘伟明. 热电偶检定炉的程序控温[J]. 计量技术, 1990(12): 30-32.
- LIU Weiming. Program temperature control of thermocouple verification furnace[J]. Measurement Technique, 1990(12): 30-32.
- [20] 薛光辉, 柴敬轩. 热电偶传感器温控系统误差研究[J]. 中国测试, 2019, 45(9): 100-104.
- XUE Guanghui, CHAI Jingxuan. Temperature control error research based on thermocouple sensor[J]. China Measurement & Test, 2019, 45(9): 100-104.
- [21] 杨平, 邓亮, 徐春梅. PID 控制器参数整定方法及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.