

基于帐篷映射的混沌自适应粒子群优化算法 在同步发电机励磁控制中的应用

贺徽, 周建中, 寇攀高, 张孝远

(华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Application Study of Tent Mapping-Based Chaos Adaptive PSO Algorithm in Excitation Control System of Synchronous Generator

HE Hui, ZHOU Jianzhong, KOU Pangao, ZHANG Xiaoyuan

(School of Hydroelectric Digitization Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: To solve the problem that in excitation control system the parameters of proportional integral differential (PID) controller are difficult to be set, a Tent mapping-based chaos adaptive weight particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed to optimize controller parameters. A two-step optimization strategy is adopted: in the first step the fast adaptive particle swarm optimization (APSO) is used for global search; in the second step the Tent mapping-based chaos local search (CLS) is used to perform local ergodic search for the search result from the first step. By means of leading the adaptive weight into PSO algorithm and adopting Tent-mapping in CLS, the chaos particle swarm search algorithm is improved, thus the problems that conventional particle swarm algorithm is apt to fall into local extremum and in the later stage of iteration the convergence is inefficient are solved, and on the basis of establishing a simple model of excitation control system the parameter optimization control of excitation system for synchronous generator is implemented. The proposed method possesses faster convergence speed and better accuracy, thus both no-load energizing of excitation control system and dynamic performance of transient process in isolated network can be effectively improved.

KEY WORDS: excitation control; Tent mapping; chaos; particle swarm optimization; synchronous generator

摘要: 针对励磁控制系统中比例-积分-微分控制参数整定难的问题, 提出了一种基于帐篷映射的混沌自适应权重粒子群优化算法对控制器参数进行优化, 采用 2 级优化策略, 第

1 级采用自适应权重粒子群优化算法执行全局搜索; 第 2 级采用基于帐篷映射的混沌搜索对第 1 级的结果执行局部遍历搜索, 并通过在粒子群算法中引入自适应权重及在混沌局部搜索中采用帐篷映射的方法对混沌粒子群搜索算法进行改进, 解决了常规粒子群算法易陷入局部极值且在迭代后期收敛效率低的问题, 在建立励磁控制系统简单模型的基础上, 实现同步发电机励磁系统的参数优化控制。仿真研究表明, 新方法与传统粒子群方法相比具有更好的收敛速度和精度, 能有效改善励磁控制系统空载起励和孤网过渡过程的动态性能。

关键词: 励磁控制; 帐篷映射; 混沌; 粒子群优化; 同步发电机

0 引言

传统比例-积分-微分 (proportional integral differential, PID) 控制器以其结构简单、具有一定的鲁棒性、容易实现、稳态无静差、控制精度高的特性, 被广泛应用于同步发电机励磁控制中^[1-8]。随着电力工业的不断发展, 传统 PID 控制器的参数调整在复杂电力系统中已难以获取满意的控制效果, 为此许多学者展开了水轮发电机组励磁调节器 PID 参数优化方面的研究。常见方法有: 模糊控制^[5-8]、菌群优化算法^[9]、遗传优化算法^[10]。模糊控制对被控对象模型精度要求不高, 但对隶属度函数及模糊规则的依赖较大; 菌群算法计算精度高, 但算法过程复杂, 不易实现且计算精度受计算步长影响较大; 遗传算法容易陷入局部最优, 产生早熟现象, 并且其性能对参数的选择要求较高。粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)^[11] 算法是一种智能进化算法, 具有很强的全局寻优及局部改

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008BAB29B08); 国家自然科学基金项目(51079057); 科技部水利部公益性行业科研专项基金项目(200701008)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2008BAB29B08); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51079057).

良能力，且算法简单、计算效率高，因此非常适合处理复杂对象的参数优化问题，成为学者研究的热点。但由于传统 PSO 算法本身存在容易早熟和迭代后期收敛较慢的缺陷，其应用受到限制^[12-14]。

为克服 PSO 算法的不足，本文引入一种 2 级分段搜索的策略，第 1 级采用自适应权重粒子群优化算法(adaptive particle swarm optimization, APSO)执行全局搜索；第 2 级采用基于帐篷映射的混沌搜索(chaos local search, CLS)对第 1 级的结果执行局部搜索。这种基于 2 级分段搜索策略的新方法被称为混沌自适应粒子群优化算法(chaos adaptive particle swarm optimization, CAPSO)。混沌搜索的轨道遍历性能够避免搜索陷入局部极值，而第 1 级 APSO 算法又可以缩短全局寻优时间，提高寻优效率。另外为保持种群的多样性，加强搜索的分散性，在保留一定数量优秀粒子的同时，算法根据群体的最佳位置动态收缩搜索区域，并用在收缩区域内随机产生的粒子替代性能相对较差的粒子。

本文建立励磁系统模型，并将 CAPSO 算法与 PID 相结合设计出一种基于 2 级分段搜索的混沌自适应 CAPSO-PID 控制器。将新控制器应用于同步发电机励磁控制系统并将其与常规 PSO-PID 控制器的仿真结果进行比较。

1 励磁控制系统的模型描述

1.1 同步发电机数学模型及传递函数

典型励磁系统一般包括同步发电机，电压测量和励磁功率单元^[15-16]。由于励磁同步发电机具有机械结构环节，因此可以用一阶滞后环节来描述其传递函数，即

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1 + T_{d0}'s} \quad (1)$$

式中： K_G 为发电机的放大系数； T_{d0}' 为时间常数； s 为复数变量。

1.2 电压测量单元

电压测量单元是用来检测发电机输出电压，并根据指定的调节准则对励磁功率单元发出控制信号实现控制功能的。其中，整流滤波电路略有延时，可用一阶惯性环节近似描述，因此，电压测量单元的传递函数可表示为

$$G_M(s) = \frac{K_C}{1 + T_R s} \quad (2)$$

式中： K_C 为电压传感器的输入输出比例系数； T_R 为滤波器滤波回路时间常数，一般在 0~0.06 s 之间

取值。

1.3 励磁功率单元

功率单元的主要作用是放大励磁控制信号，以达到合适的控制功率，即功率转换作用。该单元可以认为是一个一阶惯性环节，其传递函数表示为

$$G_A(s) = \frac{K_A}{1 + T_A s} \quad (3)$$

式中： K_A 为功率放大单元的电压比例系数； T_A 为放大单元的时间常数，一般 $T_A \approx 0$ 。

2 CAPSO 优化算法及其控制器设计

2.1 APSO 算法

PSO 算法是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种基于群体智能的随机寻优算法，它模仿鸟类觅食行为，将问题的解空间类比于鸟群的觅食区域，将每只鸟抽象为一个无质量无体积的粒子，表征问题的一个候选解，PSO 算法通过简单的规则使每个粒子迭代进行寻优，进而用于求解复杂优化问题。PSO 算法中以 v_i 和 x_i 分别表示第 i 个粒子在搜索空间中的速度和位置。通过评价各粒子的目标函数来确定 t 时刻每个粒子所经过的最佳位置 p_i 以及群体所发现的最佳位置 p_g ，并按照如下公式迭代更新粒子的速度和位置。

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1[p_{ij} - x_{ij}(t)] + c_2r_2[p_{gj} - x_{ij}(t)] \quad (4)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (5)$$

式中： w 为惯性权重； c_1 和 c_2 为正的加速常数； r_1 和 r_2 为[0,1]之间的随机数； d 为每个粒子的维数。另外，粒子的最大速度和位置也要有所限制，防止跳出最优解，一般设置范围 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 和 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 。

w 惯性权重是影响 PSO 算法收敛速度的重要因素，反映了粒子全局与局部搜索能力的关系。因此对其选择的好坏将直接影响 PSO 算法的寻优效果。在许多文献中采用的是[0.2,1.2]之间的常数，也有采用线性递减权重的 $w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \times g/e$ ，其中 g 为迭代执行最大次数， e 为当前迭代次数。考虑到 PSO 算法在解空间的寻优是一个非线性运动过程，用线性递减权重也不能很好适应，因此，本文采用的是和粒子当前目标函数值相关的自适应惯性权重，表达式为

$$w = \begin{cases} w_{\min} + \frac{(w_{\max} - w_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ w_{\max}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

式中： w_{\max} 和 w_{\min} 分别为 w 的最大和最小值； f 为粒子当前目标函数值； f_{avg} 和 f_{\min} 分别为所有粒子的平均值和最小目标值。

在 PSO 算法中引入自适应权重的新算法称为自适应粒子群算法，该算法能有利于全局范围内产生很好的搜索能力，但是一旦到达局部极小值附近就有可能出现收敛速度慢，甚至会在极小点附近振荡等现象。为了增强算法的局部搜索能力，平衡全局搜索和局部搜索，考虑引入基于混沌机制的局部搜索，提高算法的快速有效性。

2.2 帐篷映射特性及其混沌局部搜索

基于混沌搜索的优化主要包括 2 个关键步骤：

1) 将混沌空间映射到优化问题的解空间；2) 利用混沌动态特性来实现对解空间的搜索。

帐篷映射相比最常用的 Logistic 映射具有更好的遍历均匀性^[17]，其数学表达式为

$$x^{k+1} = \begin{cases} 2x^k, & 0 \leq x^k \leq 0.5 \\ 2(1-x^k), & 0.5 < x^k \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 k 为迭代步数， $k=0,1,\dots,n$ 。

混沌局部搜索步骤如下：

1) 将初始决策变量 x_j^k 按照式(8)映射到 0~1 之间的混沌变量 cx_j^k ：

$$cx_j^k = \frac{x_j^k - x_{\min,j}}{x_{\max,j} - x_{\min,j}}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (8)$$

式中 $x_{\max,j}$ 和 $x_{\min,j}$ 分别为第 j 维变量的搜索上下界。

2) 根据式(7)计算得到下步迭代混沌变量 cx_j^{k+1} ，并将其按式(9)转化为新的决策变量 x_j^{k+1} ：

$$x_j^{k+1} = x_{\min,j} + cx_j^{k+1}(x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (9)$$

3) 根据决策变量 x_j^{k+1} ，计算新解的适应度值。

4) 若新解达到混沌搜索最大步数 C_{\max} ，则将新解作为 CLS 的搜索结果，否则返回步骤 2)。

2.3 CAPSO-PID 控制器设计

本文采用基于帐篷映射的混沌 PSO 算法来对 PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 3 个控制参数进行优化。另外，采用常用的时间误差积分指标作为适应度函数^[18]，其表达式为

$$f_{\text{ITAE}} = \int_0^{t_s} t |e(t)| dt \quad (10)$$

式中： t 为时间； t_s 为积分上限时间； $e(t)$ 为系统电压偏差。

控制参数求解的具体步骤如下：

1) 根据 3 个控制参数的经验解空间范围，初始化候选解，混沌搜索参数，包括种群规模 N 、候

选解的位置和速度及进化代数 g 。

2) 按照给定的适应度函数计算各候选解的适应度值，将当前代候选解中适应度值最佳解的位置及速度保存在 P_i ，将所有候选解中适应度最佳解的位置及速度保存在 P_g 。

3) 按照式(4)—(6)更新各候选解的位置及速度。

4) 计算各候选解的适应度，并保留这一代候选解中适应度值最好的 20% 的解。

5) 使用 CLS 搜索算法对 20% 的最佳解进行搜索，并更新其 P_i 及 P_g 。

6) 按照式(11)和(12)收缩搜索区域。

$$x_{\min,j} = \max \{x_{\min,j}, x_{g,j} - r(x_{\max,j} - x_{\min,j})\} \quad (11)$$

$$x_{\max,j} = \min \{x_{\max,j}, x_{g,j} + r(x_{\max,j} - x_{\min,j})\} \quad (12)$$

式中： $x_{g,j}$ 表示当前 P_g 的第 j 维变量值； r 为 [0,1] 间的随机数。

7) 在收缩后的空间内随机产生群体剩余 80% 的候选解。

8) 若达到终止条件(本文采用迭代步数 g 作为限制)，则输出最优结果；若未满足终止条件，则返回步骤 2) 继续执行程序。

3 系统仿真

3.1 系统仿真实验数据

借鉴文献[2]中对励磁系统建模仿真的思想，本文给出了励磁系统的控制模型，并对模型各环节的参数进行合理的设定。通过模拟励磁系统控制中空载起励及稳态抗干扰试验来验证本文提出方法的有效性。图 1 为励磁控制系统结构图。

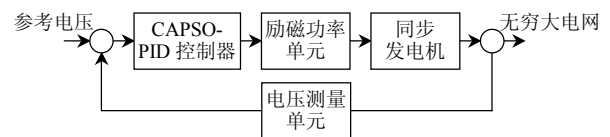


图 1 CAPSO-PID 励磁控制系统结构图

Fig. 1 System structure diagram of CAPSO-PID controller

仿真时 PSO 参数设定为：种群规模 $N=50$ ，线性权重 w 根据式(6)求得，其中 $w_{\max}=0.9$ ， $w_{\min}=0.4$ ，进化代数 $g=200$ ， $c_1=c_2=2.0$ ， $v_{\min}=-0.15$ ， $v_{\max}=0.15$ ， $x_{\min}=-0.01$ ， $x_{\max}=0.01$ ；混沌最大步数 $C_{\max}=40$ 。

基本 PSO 参数输入为阶跃信号，控制参数的搜索空间范围分别设为 [0,5]、[0,3]、[0,3]。为便于比较，除 $w=1.0$ 外 PSO-PID 的其他初始化参数与本文方法一致。CAPSO-PID 控制器优化结果和 PSO-PID 控制器的比较见表 1。表中： T_i 为迭代次数； M 为

表 1 迭代次数为 100/150/200 下的控制器优化结果比较
Tab. 1 Comparison of the optimization results of two controllers under 100/150/200 iterative times

T_i	控制器	K_p	K_i	K_d	时间误差积分指标	$M/\%$	T_r/s
100	PSO-PID	1.489 8	0.528 3	0.198 2	0.262 0	16.3	1.20
	CAPSO-PID	0.984 6	0.390 8	0.259 3	0.237 0	10.9	0.90
150	PSO-PID	1.297 8	0.520 3	0.178 5	0.243 5	15.8	0.87
	CAPSO-PID	0.898 6	0.354 2	0.293 4	0.236 1	2.4	0.61
200	PSO-PID	1.076 5	0.482 2	0.188 7	0.229 0	10.2	0.84
	CAPSO-PID	0.955 1	0.357 0	0.298 5	0.217 9	0.6	0.50

系统机端电压超调量； T_r 为阶跃响应上升时间。由表 1 对比分析知，随着迭代次数的增加 2 种算法都趋向最优位置，且具有相同迭代次数的 CAPSO 算法优化的控制器获得比 PSO 更好的时间误差积分指标、超调量和上升时间。

3.2 空载起励仿真实验

按照上述参数设置进行仿真实验，模拟零起升压时励磁系统的稳态过程，初始时刻系统给定幅值为 1 V 的阶跃响应作为参考电压输入进行仿真，仿真时间为 10 s，分析比较 CAPSO-PID 与 PSO-PID 的控制效果如图 2 所示，适应度收敛曲线如图 3 所示。

从图 2 可以看到，使用 CAPSO 算法优化参数的 PID 控制器比 PSO-PID 具有更好的控制效果，上升时间明显缩短，几乎没有超调。

从图 3 可以看到，PSO 算法的适应度下降速度

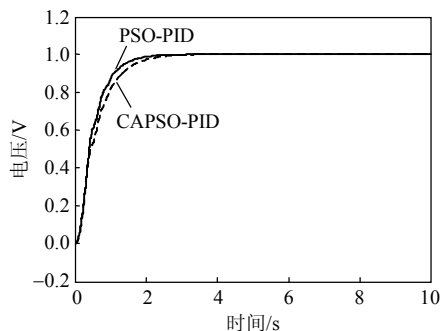


图 2 2 种 PID 控制器的空载阶跃响应曲线
Fig. 2 Step response curves of two PID controllers

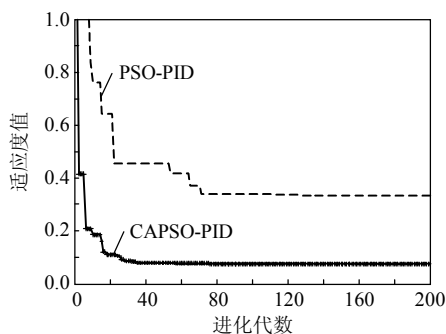


图 3 2 种算法的时间误差积分适应度收敛趋势对比
Fig. 3 Convergence tendency of the ITAE value with two methods

明显不及本文所述 CAPSO 算法，且最终收敛的适应度值也是 CAPSO 算法较小。2 种算法的适应度随进化代数收敛曲线比较结果表明，CAPSO 具有更佳的寻优效率及寻优精度。

3.3 负载电压扰动仿真实验

模拟励磁系统负荷工况下的抗干扰能力。在系统稳定后第 4 s 时，加入正向 10% 的干扰信号，仿真时间为 6 s。对比本文 CAPSO-PID 与 PSO-PID 的控制效果如图 4 所示。

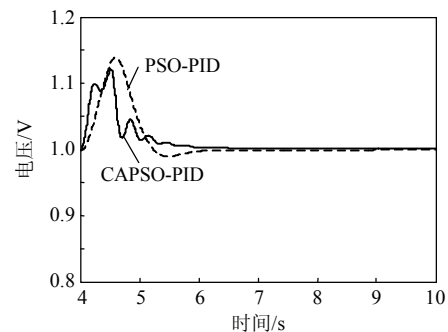


图 4 2 种 PID 控制器的负载抗扰动信号响应曲线
Fig. 4 Response curves with 10% step disturbance of two PID controllers

2 者对比分析可知，在加载了 10% 的外部扰动下 CAPSO-PID 比 PSO-PID 具有更好的鲁棒性。由图 4 可以看出，CAPSO-PID 对电压扰动的调节时间为 2.5 s，PSO-PID 的调节时间为 3.3 s。对比分析可知 CAPSO-PID 控制器具有更强的鲁棒性及抗干扰能力。

4 结论

1) 本文方法在保留了 PSO 算法优点的同时，弥补了其局部寻优能力不足和容易陷入早熟的不足，具有较强的搜索能力和鲁棒性，且算法简单易实现。

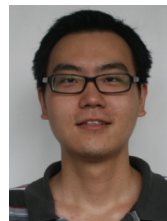
2) 通过对比仿真试验，验证了在 CAPSO-PID 控制器作用下，同步发电机励磁系统在空载起励过程中调节时间较短、超调量较小；在负载电压扰动实验中电压变化幅度较小，调节时间短。

3) 需要指出的是，本文相对于文献[8]简化了算法结构设计；相比文献[13]改善了混沌映射的均匀性。但混沌搜索 2 个参数的值需要根据具体情况由经验来确定，这一点有待于通过试验设计方法给出其一定的选择参考范围。

参考文献

- [1] 程林, 张剑云, 孙元章, 等. 大型电力系统励磁比例-积分-微分调节器的闭环优化方法[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 49-53.

- Cheng Lin, Zhang Jianyun, Sun Yuanzhang, et al. Closed-loop optimum design method for PID controller of excitation system in large-scale power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 49-53(in Chinese).
- [2] 刘云, 段彩丽. 大型发电机励磁调节系统研究[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊2): 299-303.
- Liu Yun, Duan Caili. Study on excitation regulation system of large generator[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 299-303(in Chinese).
- [3] 韩绪鹏, 孙勇, 李志民, 等. 可控串联补偿的滑模 PID 控制器设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 84-88.
- Han Xupeng, Sun Yong, Li Zhimin, et al. Design of iterative sliding mode PID controller for thyristor controlled series compensation[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 84-88(in Chinese).
- [4] 王锡淮, 张腾飞, 肖健梅. 基于粗糙径向基函数网络的船舶发电机励磁控制[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 66-71.
- Wang Xihuai, Zhang Tengfei, Xiao Jianmei. Ship generator excitation control system based on rough set integrated with radial basis function networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 66-71(in Chinese).
- [5] 贺徽, 周建中, 谭建华, 等. 基于 Mamdani 模糊 PID 的同步发电机励磁控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 34-37.
- He Hui, Zhou Jianzhong, Tan Jianhua, et al. Research and application of a fuzzy PID controller for excitation control systems in synchronous generators using Mamdani model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2010, 38(2): 34-37(in Chinese).
- [6] 姜惠兰, 魏强, 唐晓骏. 基于模糊神经网络的发电机励磁控制器的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 50-55.
- Jiang Huilan, Wei Qiang, Tang Xiaojun. Study on the generator excitation controller based on fuzzy neural network[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 50-55(in Chinese).
- [7] 王德意, 闫伟, 杨国清. 基于模糊评估的同步发电机混合励磁控制策略研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(5): 143-148.
- Wang Deyi, Yan Wei, Yang Guoqing. Study on synchronous generator excitation control tactics based on fuzzy evaluation of power system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5): 143-148(in Chinese).
- [8] 赵俊, 陈建军. 混沌粒子群优化的模糊神经 PID 控制器设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(1): 54-59.
- Zhao Jun, Chen Jianjun. Design of the fuzzy neural PID controller based on hybrid PSO[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(1): 54-59(in Chinese).
- [9] 寇攀高, 周建中, 何耀耀, 等. 基于菌群-粒子群算法的水轮发电机组 PID 调速器参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 101-106.
- Kou Pangao, Zhou Jianzhong, He Yaoyao, et al. Optimal PID governor tuning of hydraulic turbine generators with bacterial foraging particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 101-106(in Chinese).
- [10] 陈奋, 马宏忠, 张利民, 等. 基于遗传算法的直流电机风力发电系统最优励磁控制技术[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 47-51.
- Chen Fen, Ma Hongzhong, Zhang Limin, et al. A genetic algorithm based optimal excitation control for wind power system using DC generator[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 47-51(in Chinese).
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//IEEE Inf. Conf Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [12] Zwe-Lee Gaing. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2004, 19(2): 384-391.
- [13] 肖健梅, 李军军, 王锡淮. 基于微粒群优化的自动电压 PID 调节器[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(增刊2): 1863-1867.
- Xiao Jianmei, Li Junjun, Wang Xihuai. Automatic voltage PID regulators based on particle swarm optimization[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(S2): 1863-1867(in Chinese).
- [14] 何耀耀, 周建中, 杨俊杰, 等. 混沌 PSO 梯级优化调度算法及实现[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 102-105.
- He Yaoyao, Zhou Jianzhong, Yang Junjie, et al. Chaotic PSO cascade optimal dispatch algorithm and implement[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(3): 102-105(in Chinese).
- [15] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 61-71.
- [16] 陆继明, 毛承雄, 范澍, 等. 同步发电机微励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 70-109.
- [17] 程志刚, 张立庆, 李小林, 等. 基于 Tent 映射的混沌混合粒子群优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(1): 103-106.
- Cheng Zhigang, Zhang Liqing, Li Xiaolin, et al. Chaotic hybrid particle swarm optimization algorithm based on Tent map[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(1): 103-106(in Chinese).
- [18] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于 ITAE 指标的 PID 参数整定方法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 206-210.
- Xu Feng, Li Donghai, Xue Yali. Comparing and optimum seeking of PID tuning methods base on ITAE index[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 206-210(in Chinese).



贺徽

收稿日期: 2010-07-01.

作者简介:

贺徽(1984), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水力发电机组励磁控制与参数智能优化;

周建中(1959), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工智能、水电能源相关理论及应用,

E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn;

寇攀高(1985), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水力发电机组控制与系统辨识.

(责任编辑 褚晓杰)