

基于改进粒子群算法的励磁系统参数辨识

查卫华^{1,2}, 袁越¹, 张涛²

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210024; 2. 核电秦山联营有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘要: 励磁系统模型参数的求取一般采用频域测试方法, 但是电力系统是一个非线性系统, 因此频域测试方法需要做线性化处理, 而时域辨识方法中的参数模型辨识方法也存在线性化处理的问题。利用时域非参数模型辨识的方法, 对待测系统受到阶跃扰动时, 记录被调量的变化曲线, 辨识出非线性特性, 用动态拟合技术, 利用被测信号采用改进的粒子群算法, 根据目标函数, 动态调整粒子飞行速度的惯性权重, 从动态曲线求取模型参数, 实现参数辨识。试验证明, 新的算法能够很好地平衡调节粒子群算法的局部搜索与全局搜索的能力, 克服了基本粒子群算法容易陷入局部最优的缺点。

关键词: 参数辨识; 粒子群算法; 改进; 惯性权重; 励磁

Particle swarm optimization algorithm based excitation system parameters identification

ZHA Wei-hua^{1,2}, YUAN Yue¹, ZHANG Tao²

(1. College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Nuclear Power Qinshan Joint Venture Co., Ltd, Haiyan 314300, China)

Abstract: Frequency-domain test methods are generally used to obtain excitation system model parameters, but the power system is a nonlinear system, so testing needs to be done in frequency domain linear process, while parameter line model identification methods in time-domain identification method exist linear processing problem. Time-domain non-parametric model identification method is used to record transferred volume curve when step disturbance. First, non-linear characteristics is identified, and then using dynamic fitting technique and adopting improved particle swarm algorithm used by the measured signal, depending on the target function, it dynamically adjusts the inertia weight of particles flying speed and gets the model parameters from the dynamic curves to achieve parameter identification. Experiment proved that the new algorithm can be a good balance between local search and global search ability of particle swarm algorithm to overcome the shortcomings that the elementary particle swarm optimization algorithm is vulnerable to local optimum.

Key words: parameter identification; PSO; improved; inertia weight; excitation system

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0029-04

0 引言

系统辨识就是通过观测一个系统, 或一个过程的输入与输出的关系, 确定描述该系统或过程的动态特性的数学模型。按照对待测系统的认知程度, 可以将待测系统分为黑箱系统、灰箱系统、白箱系统。励磁系统属于灰箱系统, 可以按照其物理机理建立数学模型, 再用系统辨识求出参数。本文用时域辨识的方法, 对待测系统首先辨识出非线性特性, 得出时域响应, 再用动态拟合技术, 从动态特性曲线求取模型参数。

在电力系统正常运行或事故状态下, 同步发电机励磁系统起着重要的作用。它具有控制电压, 控制无功功率的分配, 提高同步发电机并联运行的稳

定性, 改善电力系统的稳定性的能力^[1-2]。电力系统仿真软件大多自带一些励磁系统标准模型供仿真分析时使用, 然而实际系统原模型往往不是这些软件中的标准模型。所以必须用参数辨识的方法将原实际模型转换为仿真软件模型库中的标准模型或按实际系统结构自定义建模。也就是说, 要确定仿真软件中的模型参数, 使之具有和励磁系统实际模型相同或相近的特性, 以供计算使用。粒子群优化(PSO)算法最早是由 Eberhart 和 Kennedy 博士于 1995 提出的^[3-4]。由于操作简单、易实现和鲁棒性强的特点, 如今已经被应用到很多领域。但是, 基本 PSO 算法在平衡全局搜索和局部搜索上存在不足。PSO 的粒子度更新公式中的惯性权重对系统的全局和局部搜索起着重要作用^[4-8]。励磁系统模型参数的求取一般

采用频域测试方法，但是电力系统是一个非线性系统，因此频域测试方法需要做线性化处理，而时域辨识方法中的参数模型辨识方法也存在线性化处理的问题。为了更加贴近工程实际，本文利用时域非参数模型辨识方法，对待测系统受到阶跃扰动时，记录被调量的变化曲线，首先辨识出非线性特性，再用动态拟合技术，利用被测信号，根据目标函数，采用一种衰减记忆惯性权重策略动态，调整粒子飞行速度，从动态曲线求取模型参数，实现参数辨识。这种方法可以直接对非线性系统进行辨识，而且采用新的算法能够很好地平衡调节粒子群算法的局部搜索与全局搜索的能力，克服了基本粒子群算法容易陷入局部最优的缺点。

1 励磁系统参数辨识机理

参数辨识的任务就是确定标准模型中的参数，使励磁系统的原模型与标准模型的输入与输出保持在一定的误差范围之内。辨识原理如图 1。

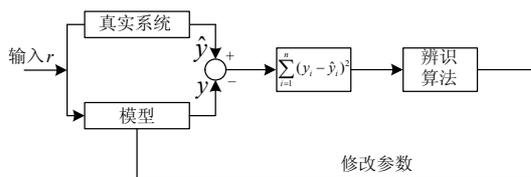


图 1 辨识过程示意图

Fig.1 Process of identification

参数辨识过程为，在同一激励信号 r 的作用下，励磁系统的实际模型产生输出 \hat{y} ，励磁系统标准模型产生输出信号 y ，两者误差为 E ，经过辨识算法不断调整优化标准模型参数，直至误差 E 小于给定值为止^[9-10]。

2 基本 PSO 算法

PSO 的基本思想是，在解空间随机初始化一个种群，其中含有若干个粒子，这些粒子在解空间中的位置代表所求问题的解，粒子在解空间中根据自身目前取得的最佳位置 p_i 和整个种群中的当前最佳位置 p_g 来确定飞行路线，步步逼近最佳区域。

设 $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{id}, \dots, z_{iD})$ 为第 i 个粒子 ($i = 1, 2, \dots, m$) 的 D 维位置矢量，根据事先设定的适应值函数计算 z_i 当前的适应值，即可衡量粒子位置的优势； $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$ 为粒子 i 的飞行速度，即粒子移动的距离； $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}, \dots, p_{iD})$ 为粒子迄今为止搜索

到的最优位置； $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd}, \dots, p_{gD})$ 为整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置。

在每次迭代中，粒子根据式 (1)、式 (2) 更新速度和位置：

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(p_{id} - z_{id}^k) + c_2r_2(p_{gd} - z_{id}^k) \quad (1)$$

$$z_{id}^{k+1} = z_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

其中： $i = 1, 2, \dots, m$ ； $d = 1, 2, \dots, D$ ； k 为迭代次数； r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。 c_1 和 c_2 为学习因子，其使粒子具有自我总结和向群体中优秀个体学习的能力，从而向自己的历史最优点以及群体内历史最优点靠近。第一项是惯性权重，起着权衡局部最优能力和全局最优能力的作用；第二项是“认知”部分，代表了粒子对自身的学习；第三项是“社会”部分，代表了粒子间的协作。

3 改进的 PSO 算法

在粒子群算法的可调整参数中，惯性权重 w 是最重要的参数，较大的 w 有利于提高算法的全局搜索能力，而较小的 w 会增强算法的局部搜索能力。

为了观察惯性权重对粒子群算法性能的影响，Shi 和 Eberhart 把此算法应用到 Schaffer's f6 函数中，因为这个函数是比较著名的评价优化算法的基准函数。他们改变惯性权重 w 的大小，通过大量的实验得到一些结论，当 $w < 0.8$ 时，如果粒子群算法能找到最优的话，它所经历的搜索时间是很短的，即所有粒子会快速汇集。若最优解在初始的搜索空间内，粒子群算法将会很容易找到全局最优，否则它将不会找到全局最优。当 $w > 1.2$ 时，粒子群算法的全局搜索能力加强，总是在探索新的区域。这时需要更多的迭代达到全局最优，且有可能找不到全局最优。粒子群算法采用惯性权重进行平衡全局搜索和局部搜索。大的惯性权重倾向于全局搜索，而小的惯性权重倾向于局部搜索^[11-16]。

粒子群算法的搜索过程是非线性且是复杂的过程，一个从全局搜索到局部搜索的线性变化并不能真实地反映搜索全局最优。所以，为了拥有更好的搜索性能，惯性权重必须是非线性的，且能够动态权衡全局搜索和局部搜索^[16]。

为了平衡 PSO 算法的全局搜索能力和局部搜索能力，可采用非线性的动态惯性权重系数公式，其表达式如式 (3) 所示：

$$w = \begin{cases} w^k, & p_g^k \leq p_g^{k+1} \\ \alpha w^k, & p_g^k > p_g^{k+1} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\alpha = e^{-\beta k}$, p_g^k 和 p_g^{k+1} 分别为第 k 次和第 $k+1$ 次最佳群体位置对应的目标值。式 (3) 中, 惯性权重随着目标函数值而自动改变。

改进粒子群算法的基本步骤如下:

- ① 随机初始化种群中粒子的位置和速度;
- ② 测量每个粒子的适应度, 将当前各粒子的位置和适应值存储在各粒子的 $pbest$ 中, 将种群中所有 $pbest$ 中适应值最优个体位置和适应值存储于 $gbest$ 中;
- ③ 用式 (1) 和式 (2) 更新粒子的速度和位置;
- ④ 用式 (3) 更新式 (1) 中的惯性权重 w ;
- ⑤ 对种群中每个粒子, 将其适应值与其经历过的最优位置作比较, 若较好, 则将其作为最优位置, 比较当前所有 $pbest$ 和 $gbest$ 值, 更新 $gbest$;
- ⑥ 若满足停止条件(预设的计算精度或迭代次数), 搜索停止, 输出结果, 否则返回③继续搜索。

4 基于改进 PSO 算法的励磁系统参数辨识

4.1 目标函数的建立

将原模型系统与标准模型系统误差函数作为励磁系统参数辨识的目标函数。在同一激励的情况下, 设励磁系统的原模型的输出为 \hat{y} , 标准模型的输出为 y , 对输出的 \hat{y} 以及 y 进行采样, 并按式 (4) 进行计算:

$$E = \sum_{i=1}^T (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

式中: T 为采样点的个数。

励磁系统参数辨识的目标就是使目标函数 E 取最小值。

4.2 参数辨识流程

以下为基于改进粒子群算法的励磁系统参数辨识的具体步骤:

- ① 利用 PSS/E 建立励磁系统的原模型和标准模型, 将式 (4) 作为参数辨识的目标函数;
- ② 确定标准模型中待辨识的参数;
- ③ 输入激励信号, 进行仿真计算, 根据励磁系统的原模型、标准模型的输出误差计算微粒的适应度;
- ④ 找取最小目标值的微粒位置, 否则则回到③。

4.3 确定待辨识的参数和范围

发电机励磁系统待辨识参数和范围如表 1 所示。

表 1 发电机励磁系统待辨识参数和范围
Tab.1 Parameters and its range that need identifying of generator excitation system

参数	范围
调节器超前补偿时间常数 T_{lead} / s	0~0.5
调节器滞后补偿时间常数 T_{lag} / s	0~0.5
调节器一阶增益 K_1	1~10.0
调节器二阶增益 K_2	0~100
调节器积分时间常数 T_i	1~10.0
励磁电流反馈增益 K_f	0~0.02
发电机时间常数 T_{do}'	0~20
励磁机等效时间常数 T_s / s	0~10

4.4 算例分析

为了验证该算法的正确性和有效性, 对于图 2 所示的励磁调节系统, 在受到阶跃扰动时, 记录被调量的变化曲线, 利用被测信号采用改进的粒子群算法实现参数辨识。利用改进的粒子群算法进行辨识的结果如表 2 所示。

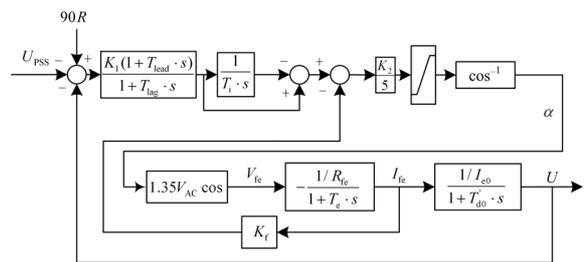


图 2 励磁系统模型

Fig.2 Excitation system model

图 3 与图 4 中, 响应曲线标识为红色最优响应的是原模型的输出; 未标识的为标准系统的输出。对比图 3 和图 4 可以看出, 基本 PSO 算法的寻优能力明显比改进的 PSO 算法的寻优能力差。

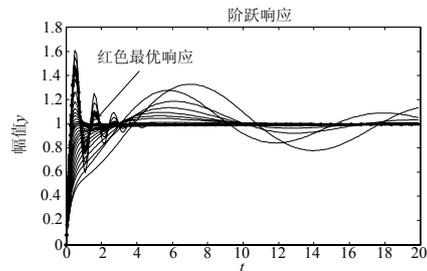


图 3 PSO 算法输出曲线拟合趋势图

Fig.3 PSO algorithm output trend curve fitting

辨识结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，在同 说明 IPSO 的收敛速度更快。
样的适应度下，IPSO 收敛代数比基本 PSO 的少。

表 2 参数辨识结果

Tab.2 Parameter identification results

算法	误差	收敛代数	T_{lead}	T_{lag}	K_1	K_2	T_i	K_f	T'_{d0}	T_c
PSO	2.0e-7	102	0.191	0.116	4.01	15.1	7.1	0.003	10.0	3.1
	2.0e-8	110	0.201	0.118	3.81	14.2	6.8	0.002	9.81	2.8
	2.0e-9	132	0.211	0.119	3.62	13.2	6.2	0.002	9.51	2.6
	2.0e-10	156	0.212	0.121	3.56	11.9	6.0	0.001	8.92	2.3
	2.0e-11	252	0.213	0.123	3.41	11.2	5.6	0.001	8.41	2.2
	2.0e-12	312	0.213	0.123	3.35	10.5	5.3	0.001	8.51	2.1
IPSO	2.0e-7	98	0.205	0.119	3.41	11.6	5.6	0.002	9.81	2.8
	2.0e-8	100	0.211	0.121	3.36	11.0	5.4	0.001	8.92	2.6
	2.0e-9	118	0.212	0.123	3.35	10.5	5.2	0.001	8.41	2.3
	2.0e-10	137	0.213	0.122	3.34	10.3	4.9	0.001	8.51	2.2
	2.0e-11	239	0.213	0.122	3.34	10.1	5.1	0.001	8.68	2.1
	2.0e-12	276	0.213	0.122	3.34	10.0	5.0	0.001	8.65	2.1
设计值			0.214	0.122	3.34	10	5	0.001	8.61	2.14
搜索上限			0.5	0.5	10	100	10	0.02	20	10
搜索下限			0	0	1	0	1	0	0	0

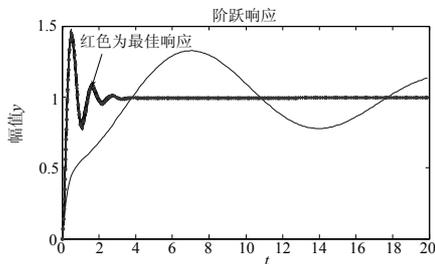


图 4 IPSO 算法输出曲线拟合趋势图

Fig.4 IPSO algorithm output trend curve fitting

5 结论

根据目标函数，动态调整粒子飞行速度的惯性权重，能够很好地平衡调节 PSO 的局部搜索与全局搜索能力，避免了粒子群过早陷入局部最优。通过与基本 PSO 对励磁系统参数的辨识对比，证明了改进粒子群算法的有效性、正确性。

参考文献

[1] Kundar P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
 [2] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
 [3] Eberhart R C, Kennedy J. Particle swarm

optimization[C].//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth(Australia): 1995.1942-1948.
 [4] Angeline P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization and philosophy and performance difference[C].//Proceedings of 7th annual Conference on Evolutionary Programming. San Diego(USA): 601-610.
 [5] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C].//Proc 6th Int Symp Micro Machine and Human Science.1995.39-45.
 [6] Boeringer D W, Werner D H. Particle swarm optimization versus genetic algorithm for phased array synthesis[J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 2004: 771-779.
 [7] Conradie A, Miikkulainen R. Aldrich C. Adaptive control utilizing neural swarming[C].//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. New York(USA).
 [8] Cai T, Pan P, Chen J. Adaptive particle swarm optimization algorithm[C].//Proceedings of the Fifth World on Intelligent Control and Automation. Hangzhou(China): 2004. 2245-2247.
 [9] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

(下转第 54 页 continued on page 54)

Nonlinear control strategy applied to a shunt active power filter[C].//Power Electronics Specialists Conference. 2001.1877-1882.

[11] 章勇高, 康勇, 刘黎明, 等. 统一潮流控制器并联变换器的改进型双环控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 40-46.
ZHANG Yong-gao, KANG Yong, LIU Li-ming, et al. Improved double close-loop control system for shunt inverter of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 40-46.

[12] 刘培国, 戴珂, 熊健, 等. 一种基于 DSP 的三相电压型变换器电流控制技术[J]. 电力电子技术, 2003, 37(3): 31-33.
LIU Pei-guo, DAI Ke, XIONG Jian, et al. A current control technology of three-phase VSC based on DSP[J]. Power Electronics, 2003, 37(3): 31-33.

[13] Verdelho P, Marques G D. An active power filter and unbalanced current compensator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(3): 321-328.

[14] Yun C, Xiaoming Z. A novel active power filter topology based on coordinate transformation[C]. //4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2009.197-200.

[15] Xiaoming Z, Mei Y. A novel active power filter based on injection of $\alpha\beta$ current components to power system[C].//PESC '06. 37th IEEE. 2006. 1-6.

[16] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1984, 20(3): 625-630.

[17] Peng Fang-zheng, Lai Jih-sheng. Generalized instantaneous reactive power theory for three phase power systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 293-297.

[18] 王辉, 李庆民, 吴明雷. 用于强非线性负荷的瞬时无功与谐波电流检测算法研究[J]. 继电器, 2006, 34(21): 18-23.
WANG Hui, LI Qing-min, WU Ming-lei. Investigation on a new algorithm for instantaneous reactive power and harmonics currents detection applied to intensively nonlinear loads[J]. Relay, 2006, 34(21): 18-23.

收稿日期: 2009-08-04; 修回日期: 2009-08-13

作者简介:

王辉(1974-), 女, 副教授, 博士生, 主要从事电力电子技术领域的教学与科研工作; E-mail: soldlwh@sdu.edu.cn

段玉兵(1980-), 男, 博士生, 从事微电网控制、电能质量等领域的研究工作;

龚宇雷(1973-), 男, 博士生, 研究方向为微型电力网。

(上接第 32 页 continued from page 32)

[10] 鞠平. 电力系统非线性辨识[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
JU Ping. Nonlinear parameter identification of power system[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1999.

[11] Carlisle A, Dozier G. Tracking changing extrema with adaptive particle swarm optimizer[C].//Proceedings of WAC. Florida:2002.

[12] Carlisle A J. Applying the particle swarm optimizer to non-stationary environments, Doctoral Dissertation[D]. Auburn University, 2002.

[13] Feng H. Hybrid stages particle swarm optimization learning fuzzy modeling systems design[J]. Tamkang Journal of Science and Engineering, 2(9):167-176.

[14] Heo J S, Lee K Y, Garduno R. Multiobjective control of power plants using particle swarm optimization techniques[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2(21): 552-561.

[15] Huang C, Wang M. A particle swarm optimization to identifying the ARMAX model short-term load forecasting[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2(20):1126-1133.

[16] 黄席樾, 向长城, 殷礼胜. 现代智能算法理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[17] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[18] Jun Z, Xin F, Huayong Y, et al. A particle swarm optimization approach for pid parameters in hydraulic servo control system[C].//Proceedings of the Sixth World congress on Intelligent Control and Automation. Dalian(China):2006.7725-7729.

[19] Ke J, Li Q, Qian J. Particle swarm optimization based nonlinear observe[C].//Proceedings of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou(China): 2004.1580-1583.

收稿日期: 2009-11-06; 修回日期: 2010-04-19

作者简介:

查卫华(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统规划与控制; E-mail: chawh@npqjvc.cn

袁越(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析与控制、电力经济技术与运营管理;

张涛(1968-), 男, 教授级高工, 研究方向为核电机组运行分析与控制、核电运营与管理。