

基于果蝇优化算法的广域阻尼控制器设计

刘宇凯, 胡志坚, 索江镭, 陈珍

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对大规模互联电网区间低频振荡问题, 提出了基于果蝇优化算法(Fruit Fly Optimization Algorithm, FOA)的广域阻尼控制器设计方法。以标准16机68节点系统为例, 对系统进行线性化, 并进行模态分析, 找出系统区间振荡模式及阻尼比。根据区域低频振荡模式下参与因子选择广域反馈信号。分析了广域控制器结构, 并采用FOA算法对其参数进行优化。仿真结果表明, 提出的广域控制器方法能有效地提高区间振荡阻尼比, 为电力系统低频振荡优化控制提供了新的思路。

关键词: 低频振荡; 广域阻尼控制器; 阻尼比; 参与因子; FOA优化算法

Design method of wide-area damping controller based on FOA algorithm

LIU Yu-kai, HU Zhi-jian, SUO Jiang-lei, CHEN Zhen

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With regard to the inter-area low-frequency oscillation problems in large-scale interconnected power system, a design method based on Fruit fly Optimization Algorithm (FOA) for the wide-area damping controller is proposed. The 16-machine 68-bus power system is employed to validate the effectiveness of the method presented. The system is linearized at first, and modal analysis is conducted to find out the interval oscillation modes and corresponding damping ratios, under which the rotor speed participation factors are obtained. Through the participation factors the wide-area feedback signal is selected appropriately. Afterwards, the structure of the wide-area controller is analyzed and the FOA algorithm is adopted to optimize the parameters. Finally, the simulation results show that the proposed design method of wide-area controller can better improve the inter-area oscillation damping ratios, which provides a new thought for the optimal control of low-frequency oscillation.

Key words: low-frequency oscillation; wide-area damping controller; damping ratio; participation factor; Fruit fly Optimization Algorithm (FOA)

中图分类号: TM571; TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0025-05

0 引言

随着互联电网的发展, 机组单机容量不断增大, 以及快速励磁系统(Automatic Voltage Regulator, AVR)的广泛应用, 在系统遭受扰动时, 并列运行的发电机组之间转子角出现相对摇摆, 当系统缺乏阻尼时, 输电线功率将持续的波动, 其频率在0.1~2.5 Hz, 称之为低频振荡, 严重时甚至导致系统解列。低频振荡会严重限制电力系统区间和区内主要联络线的送电能力, 容易引发安全稳定事故。因此, 必

须对电网进行稳定协调控制以增大阻尼, 确保系统优质、安全的运行^[1]。

传统的电力系统稳定控制器(Power System Stabilizer, PSS)分散布置在各同步发电机的励磁系统处, 利用本地信息进行反馈控制, 但对于抑制区域振荡效果并不理想, 而当阻尼控制器设计采用了一个或多个远方信号, 在抑制区域振荡时, 系统动态性能将得到改善^[2]。广域测量系统(Wide-Area Measurement System, WAMS)是基于相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU), 利用GPS的时钟同步特点, 实时采集系统母线和节点电压、电流、相角以及频率等, 获得系统动态数据, 便于对全网状态进行分析计算及监控。

近年来国内外学者在广域PSS的安装位置、参

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110141110032); 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室资助(EIPE13205)

数整定以及控制器鲁棒性方面做了大量研究, 极点配置法、线性最优控制理论以及人工智能优化算法等广泛应用于 PSS 设计。随着计算机技术的运用, 人工智能优化算法得到了较快发展。智能算法设计简单, 适用于规模大、维数高, 解析解无法准确得到的情况。文献[3]运用遗传算法(Genetic Algorithm, GA), 分别设置各阻尼控制器参数; 文献[4]结合了序优化与 GA, 保证了各控制器的协调工作; 文献[5]采用了免疫遗传算法, 利用免疫系统的多样性和维持机制寻找全局最优解, 从而设计阻尼控制器; 文献[6]结合了粒子群和遗传算法设计附加阻尼控制器, 但使用以上方法迭代次数多, 收敛速度较慢。

本文采用了一种新的智能果蝇优化算法 (Fruit fly Optimization Algorithm, FOA) 设计广域控制器, 利用多机系统的转子角速度参与因子选择控制器的输入信号, 具有收敛速度快, 精度高的优点, 能够有效地抑制系统的区间低频振荡。

1 含广域阻尼控制器的电力系统模型

1.1 广域反馈信号选择方法

本文以标准 16 机 68 节点系统为原型, 对其进行广域控制。在多机电力系统动态行为分析中, 该系统较为常用, 其包括 16 台发电机、86 条线路及 68 条母线, 共分为五个区域, 区域 1(G1~G9)为新英格兰标准系统, 区域 2(G10~G13)为新纽约标准系统, 区域 3、4、5(G14~G16)分别为与纽约系统邻接的动态等值发电机, 如图 1 所示。

对系统进行线性化和模态分析, 结果表明在不加广域控制器时, 系统存在区域间低频振荡的可能, 得出区间振荡模式及其对应特征值、频率以及阻尼比如表 1 所示。

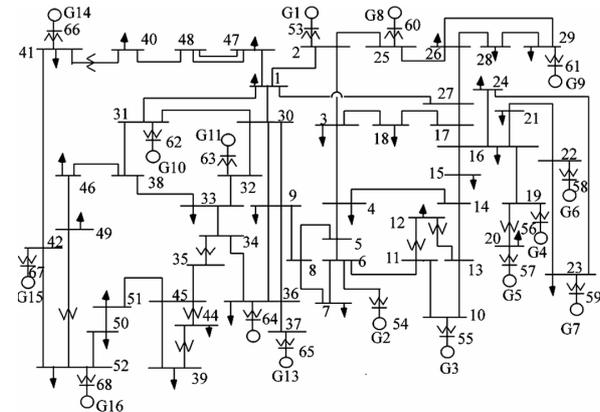


图 1 16 机 68 节点标准系统

Fig. 1 The 16-machine 68-bus power system

由表 1 可知系统有 4 个区间振荡模式。其中模式 1 为发电机 G1~G13 与 G14、G15、G16 振荡,

表 1 低频振荡模式

Table 1 Inter-area lower frequency oscillation modes

| 区间振荡模式 | 特征值 | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|--------|---------------------------------|-------|-------|
| 1 | $\lambda_1 = -0.178 \pm 4.219i$ | 0.671 | 4.22 |
| 2 | $\lambda_2 = -0.225 \pm 2.393i$ | 0.381 | 9.36 |
| 3 | $\lambda_3 = -0.429 \pm 4.986i$ | 0.793 | 8.58 |
| 4 | $\lambda_4 = -0.278 \pm 3.280i$ | 0.522 | 8.45 |

其频率及阻尼比都较小, 本文设计广域阻尼控制器主要针对模式 1。在广域控制器的设计中, 参与因子是选择 PSS 最优安装位置的有用指标^[7], 它给出了系统特征值对状态矩阵 A 对角线元素变化的灵敏度, 如式(1)所示。

$$P_{ki} = \frac{v_{ki}u_{ki}}{v_i^T u_i} \quad (1)$$

式中: v_{ki} 、 u_{ki} 分别为左、右特征向量 v 、 u 的第 k 行 i 列元素; v_i 、 u_i 分别为左、右特征向量第 i 行相量。

模式 1 下转子角速度参与因子如图 2 所示。

由图 2 知, 区域 1 和区域 2 分别可选择 6 号和 13 号发电机作为广域 PSS 的安装位置, 通过控制其励磁电压达到提高区域阻尼的效果, 同时选择区域重要联络线 1-27 和 8-9 作为反馈输入信号。

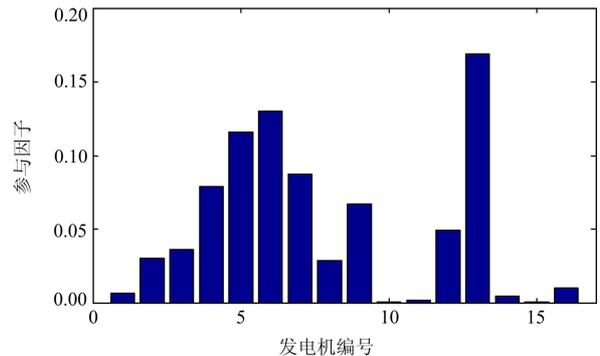


图 2 模式 1 下转子角速度参与因子

Fig. 2 Rotor speed participation factors under mode 1

1.2 系统降阶

随着电力系统规模的不断增大, 系统方程的阶次越来越高, 导致系统分析和控制非常复杂, 可能导致“维数灾难”。因此对复杂电力系统进行降阶^[8], 使高阶系统转化为易于理解的低阶系统, 同时保持原系统的动态行为是非常有必要的。

常用的平衡截断降阶方法已有文献进行叙述^[9], 本文仅给出降阶后的结果如图 3 所示。

降阶后系统由 235 阶变为 19 阶, 从图 3 可以看出在 0.1~1 Hz 频率范围内原系统和降阶后 bode 图

基本重合, 说明降阶后系统能够较好地拟合全阶系统, 保证了低频段降阶前后系统的一致性。

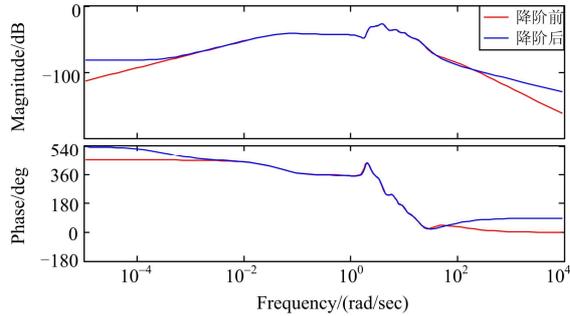


图3 降阶前后频率响应

Fig. 3 Frequency responses of the full and reduced model

2 广域阻尼控制器设计

2.1 优化目标函数的选取

由于系统运行状况由闭环状态矩阵特征值所决定, 系统阻尼比越大, 系统受扰后振荡衰减到稳态所需的次数越少, 系统动态性能越好。使用线性矩阵不等式 (Linear Matrix Inequality, LMI) 中 D 稳定域对增益 K_w 及时间常数 T_1, T_2, T_3, T_4 进行优化^[10], 如图 4 黑实线内部。 α_0 和 ξ_0 分别为特征值最大实部和最小阻尼比, 令 $\alpha_0=0.2, \xi_0=0.1$, 优化目标为

$$f_1 = \min_{i \in \{1, \dots, n\}} (\xi_i) \quad (2)$$

$$f_2 = \min_{i \in \{1, \dots, n\}} (-\alpha_i) \quad (3)$$

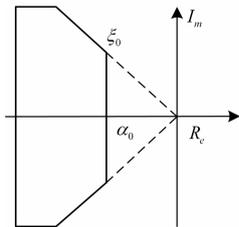


图4 复平面 D 稳定域

Fig. 4 D -shape sector in the s -plane

综上, 优化问题可用式(4)描述。

$$\begin{cases} \max & F = f_1 + f_2 \\ \text{s.t.} & K_w^{\min} \leq K_w \leq K_w^{\max} \\ & T_{i,j}^{\min} \leq T_{i,j} \leq T_{i,j}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中: j 为时间常数下标 ($j=1, 2, 3, 4$); $K_w^{\min} = 0$; $K_w^{\max} = 100$; $T_{i,j}^{\min} = 0$; $T_{i,j}^{\max} = 10$; 具体参数设置见文献^[11]。

2.2 FOA 优化算法

果蝇优化算法是台湾学者潘文超在 2011 年开

发的新一代智能优化算法^[12], 由动物觅食行为发展而来, 果蝇在嗅觉和视觉方面非常敏锐, 在寻找食物的过程中, 先由嗅觉感知空气中的气味, 在飞近食物后通过视觉迅速定位到食物和同伴的位置。

算法流程图如图 5 所示。

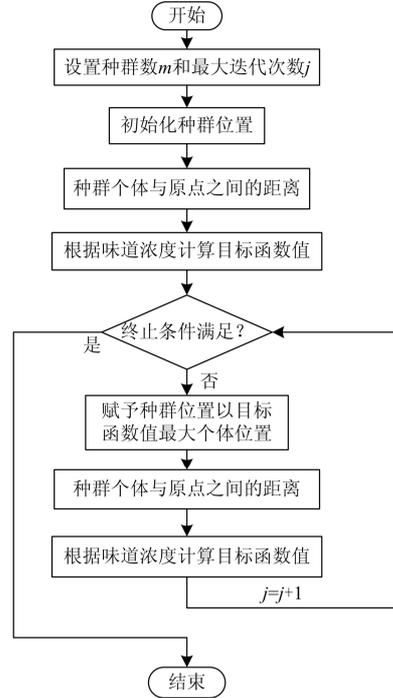


图5 FOA 优化算法流程图

Fig. 5 Flow chart of FOA optimization algorithm

在 Matlab 中编写 FOA 算法程序设计控制器参数 K_w, T_1, T_2, T_3, T_4 , 具体方法和部分程序代码如下:

a) 随机初始化果蝇群体位置 $[X_{axis}, Y_{axis}]$ 。定义最大迭代次数为 50 次, 种群规模为 20。其中,

$$X_{axis} = 10 \cdot \text{rand}() \quad (5)$$

$$Y_{axis} = 10 \cdot \text{rand}() \quad (6)$$

b) 以 $[X_{axis}, Y_{axis}]$ 为基准, 随机初始化果蝇个体的坐标为

$$X(i) = X_{axis} + 2 \cdot \text{rand}() - 1 \quad (i=1, 2, 3, 4, 5) \quad (7)$$

$$Y(i) = Y_{axis} + 2 \cdot \text{rand}() - 1 \quad (i=1, 2, 3, 4, 5) \quad (8)$$

c) 由于果蝇无法准确得知食物位置, 故先求得果蝇个体与原点间的距离, 将此距离求倒数即为味道浓度判定值

$$D(i) = \sqrt{X(i)^2 + Y(i)^2} \quad (9)$$

$$S(i) = 1/D(i) \quad (10)$$

d) 将味道浓度判定值代入目标函数中, 并求得

味道浓度最高的个体，其中，Function为目标函数(4)。

$$Smell(i)=Function(S(i)) \quad (11)$$

e) 求出味道浓度最大的果蝇个体，即目标函数的极大值。

$$[MaxSmell \ Maxindex]=\max(Smell(i)) \quad (12)$$

f) 保留味道浓度最高个体位置 $[X_{axis}, Y_{axis}]$ ，果蝇群体利用视觉向该位置飞去，形成新的果蝇群体。

$$X_{axis}=X(Maxindex) \quad (13)$$

$$Y_{axis}=Y(Maxindex) \quad (14)$$

g) 迭代执行步骤(2)~(5)，并判断新的味道浓度是否优于前一味道浓度，若是则执行步骤(5)。

$$\text{if } MaxSmell > bestSmell \quad (15)$$

$$bestSmell = MaxSmell \quad (16)$$

3 仿真结果

采用 FOA 优化算法，分别以 P_{2-25} 、 ΔV_1 为控制器的输入和输出，对参数 K_w 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 进行优化，得到果蝇寻优的轨迹如图 6 所示。由图 6 看出，每迭代一次果蝇群体向最优位置靠近，迭代进行到 14 次左右的时候，参数 K_w 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 的值达到了稳定，算法收敛速度较快，此时目标函数(4)达到最优，即系统阻尼比最小的区间低频振荡模式获得较大的阻尼。

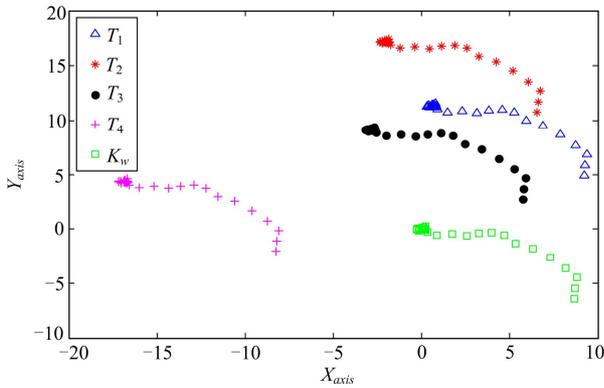


图 6 果蝇寻优轨迹

Fig. 6 Optimal trajectory of fruit flies

优化后系统阻尼比如图 7 所示。由图 7 看出迭代收敛后，对于系统区间振荡模式 1，特征值虚部变化不大，而阻尼比增加较快，对于区内振荡模式特征值稍有增减，变化不大。

将本文方法与现在广泛应用的仿生学算法 PSO 进行比较，如图 8 所示。两种方法最终都收敛到最

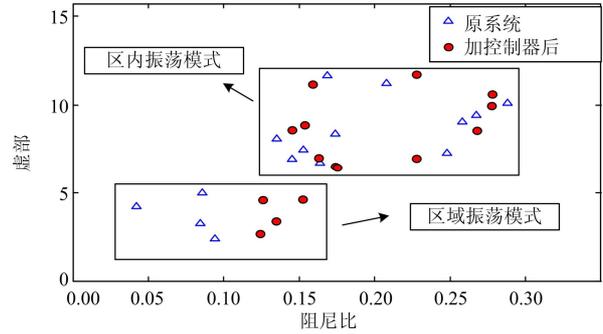


图 7 优化后系统阻尼比

Fig. 7 Damping ratios after optimization

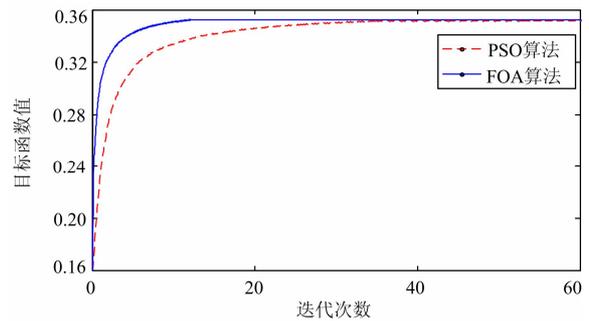


图 8 两种算法对比图

Fig. 8 Comparison chart of two algorithms

优值 0.35，但 FOA 算法在 14 次左右收敛，PSO 算法在 26 次左右收敛，所用迭代次数少，在实际应用中能够减少计算量，节约时间和成本。

以线路有功 P_{1-27} 、 P_{8-9} 为广域输入信号，6 号和 13 号发电机励磁电压为输出信号，冲击响应分别如图 9 所示，可以看出，加入控制器后系统在 8 s 左右能够达到稳定。在系统受到大扰动的情况下，如区域联络线 L_{1-2} 在 1.5 s 时发生单相接地故障，1.6 s 时故障切除，加入控制器前后联络线功率振荡如图 10 所示，加入控制器 10 s 左右系统达到稳定，证明了本方法设计控制器的有效性且具有较好性能。

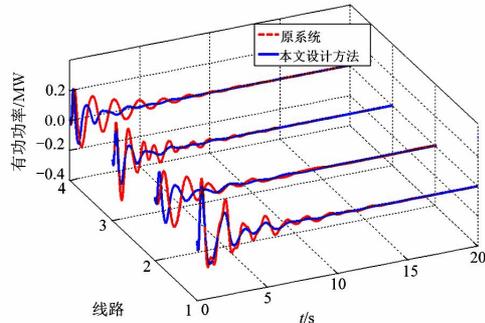
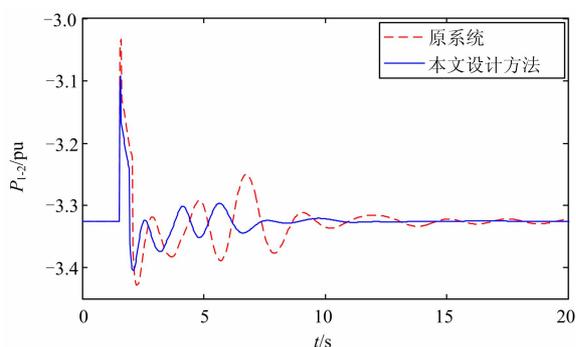


图 9 线路有功功率

Fig. 9 Active power response of transmission lines

图 10 短路状况下线路 L_{1-2} 有功功率Fig. 10 Active power response of transmission lines L_{1-2} under a short circuit condition

4 结语

1) 本文以新英格兰系统为例, 分析了系统在低频振荡模式下转子角速度参与因子, 通过此方法选择的广域反馈输入信号具有较好的性能。

2) 采用平衡截断降阶方法, 求解可控和可观李亚谱诺夫方程, 作系统频率响应 bode 图, 结果表明降阶后系统能够保留原系统关键信息。

3) 采用 FOA 优化算法对广域控制器参数 K_w 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 进行优化, 并与现今广泛应用的仿生学算法 PSO 进行对比, 仿真验证了该方法收敛速度快, 控制性能好, 能够较大提高区间低频振荡模式的阻尼比。

参考文献

- [1] 杨春生, 周步祥, 林楠, 等. 广域保护研究现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 147-150.
YANG Chun-sheng, ZHOU Bu-xiang, LIN Nan, et al. Research current status and prospect of wide-area protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 147-150.
- [2] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.
JU Ping, XIE Huan, MENG Yuan-jing, et al. Online identification of low-frequency oscillations based on wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60.
- [3] DO BOMFIM A L B, TARANTO G N, FALCAO D M. Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 163-169.
- [4] PADHY B P, SRIVASTAVA S C, VERMA N K, et al. A coherency-based approach for signal selection for wide area stabilizing control in power systems[J]. IEEE System Journal, 2013, 7(4): 807-816.

- [5] KYANZADEH S, FARSANGI M M, NEZAMABADI-POUR H, et al. Design of power system stabilizer using immune algorithm[C] // Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP 2007, International Conference on: IEEE, 2007: 1-6.
- [6] FARSANGI M M, NEZAMABADI-POUR H, LEE K Y. Multi-objective VAR planning with SVC for a large power system using PSO and GA[C] // Proc IEEE PES Power Syst Conf Expo, Atlanta, GA, October 29-November 1, 2006.
- [7] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑时滞影响的 SVC 广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 239-246.
YAO Wei, WEN Jin-yu, CHENG Shi-jie, et al. Design of wide-area supplementary damping controller of SVC considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 239-246.
- [8] 李奎奎, 王克文, 邱磊, 等. 大系统特定模式动态降阶方法的误差分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 67-71.
LI Kui-kui, WANG Ke-wen, QIU Lei, et al. Error analysis of the dynamic order reduction approach for specific mode in large-scale systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 67-71.
- [9] 张喆, 赵洪山, 李志为, 等. 平衡格莱姆方法在电力系统线性模型降阶中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 201-207.
ZHANG Zhe, ZHAO Hong-shan, LI Zhi-wei, et al. Power system linear model reduction based on the balanced Gramian method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 201-207.
- [10] MA Jing, WANG Tong, WANG Zeng-ping, et al. Adaptive damping control of inter-area oscillations based on federated Kalman filter using wide area signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1627-1635.
- [11] KHALEGHI M, FARSANGI M M, NEZAMABADI-POUR H, et al. Pareto-optimal design of damping controllers using modified artificial immune algorithm[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2011, 41(2): 240-250.
- [12] 潘文超. 果蝇最佳化演算法[M]. 台湾: 沧海书局, 2011.
PAN Wen-chao. Fruit flies optimization algorithm[M]. Taiwan: Tsang Hai Book Publishing, 2011.

收稿日期: 2014-03-12; 修回日期: 2014-05-07

作者简介:

刘宇凯(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路参数带电测量; E-mail: hubeilyk0522@126.com

胡志坚(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为输电线路参数带电测量, 新能源与分布式发电。