

# 基于混沌菌群优化的智能微网经济投运分析

卢 旻<sup>1</sup>, 谢剑锋<sup>1</sup>, 董颖华<sup>2</sup>, 孙一航<sup>1,3</sup>

(1.江苏淮安供电公司, 江苏 淮安 223002; 2.中国电力科学研究院, 国家太阳能发电研发(实验)中心, 江苏 南京 210042; 3.华锐风电科技集团, 北京 100872)

**摘 要:** 在计算初期建设成本和维护费用的条件下, 估测独立混合供电系统投资总价。提出运用菌群算法进行目标函数寻优。菌群算法对复杂问题具有良好的准确度和较快的收敛速度, 并在寻优末期引入具有“奇异因子”特性的混沌优化, 避免了菌群算法早熟现象的发生。MATLAB仿真实验表明混沌BCC算法在估算混合供电系统投资成本领域的有效性和可行性。

**关键词:** 可再生能源; 混合风光能源系统; 经济运行; 菌群体优化算法; 电力系统

## 0 引言

江苏电网规划至2020年全省风电规模将达到1000万千瓦, 成为我国八大千万千瓦级风电基地之一, 江苏首个分布式光伏发电项目也于常州并网成功。光伏能与风能作为可再生能源在时间和空间上具有很强的互补性, 将二者相结合组成混合供电系统是目目前低碳经济下独立微网供电的新形式。

文献[1]简述了独立风光互补系统在模拟、机组优化、控制技术的现状。文献[2]考虑用户负荷在不确定时间段内的特殊性, 提出适当扩大发电容量范围且增加第三种发电方式来保障供电稳定, 并运用改进型算法进行了系统总值估算。文献[3]提出基于Fuzzy/PID控制的风光互补能源系统, 在周密考虑了各项因素对蓄电池影响的基础上, 通过专家数据完善了模糊规则库, 建立了合理的模糊充电控制结构。文献[4]提出在发电容量突发性下降后, 利用超级电容器向孤岛提供短时功率缺额, 以维持用户负荷稳定。文献[5]提出一种风光互补发电中的超级电容器与蓄电池混合储能系统, 充分利用蓄电池能量密度大和超级电容器功率密度大、循环寿命长的优点, 大大提升了储能系统的性能。文献[6-7]采用遗传算法及粒子群算法等新型智能优化算法解决混合能源互补问题, 在一定程度上提高了问题寻优的速度, 但依然未能保证解的全局收敛性。文献[8]运用改进退火算法优化风光互补供电系统, 该算法基于随机梯度搜索的启发式方法寻求全局最优解, 并将优化结果与以前研究结果进行对比, 发现该算法优于反应曲面分类法。

新能源互补混合供电系统的投资优化问题是一个复杂非线性问题。许多学者提出了一些建设性的构想, 然而在众多研究中还存在没有考虑用户负荷发生突变时的情况。部分文献采用传统的优化方法, 但其收敛速度慢, 容易陷入局部最优。

本文在考虑有用户负荷发生突变的情况下, 提出运用混沌菌群觅食优化算法进行新能源混合互补微网投资优化。在满足独立供电系统基本性能指标的前提下, 构造出以系统投资成本、维护费用可靠性等总投资额最小的目标函数。算法结合了混沌优化和细菌群体优化算法的优点, 能够根据细菌个体的分布情况, 在进化过程停滞于疑似次优点时将个体位置进行混沌处理, 使得优化跳出局部最优, 取得全局最优值。

## 1 混合供电系统描述

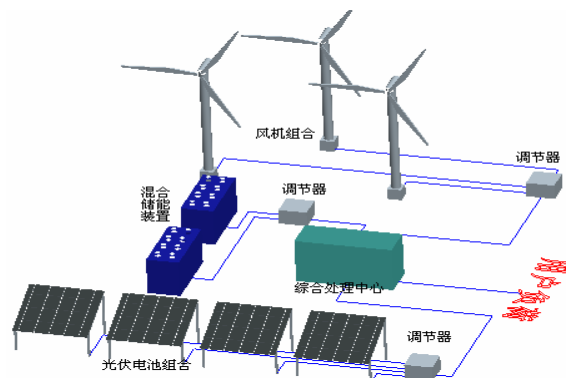


图1 混合能源互补供电系统

Fig.1 Hybrid Power Supply System

如图1 所示, 混合供电系统包含不同厂家、不同型号的风机组合、光伏电池组合和混合储能装置。

这些电源系统具有各自不同的建设成本与维护价格，其对天气状况的要求不同，因此在三者互补集中供电，在保障用户负荷稳定的条件下，经算法优化后便可得出系统最优经济配置方案。

风力发电机可将风能转化成电能，风能推动叶轮旋转，叶轮带动转动轴和增速机，增速机将旋转速度大幅提升，以促使发电机发电。依据目前的风机技术，3m/s的风速度即可启动风机发电。

$$p_{WG} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \vee v > v_{out} \\ \frac{1}{2} \pi \rho d^2 v^3 C_p \eta_m, & v_{in} < v < v_{nom} \\ p_{nom}, & v_{nom} < v < v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $p_{nom}$  是风机的额定输出功率； $\rho$  是风场空气密度（取  $1.29 \text{kg/m}^3$ ）； $d$  是风机叶片长度； $v_{in}$ ,  $v_{reg}$ ,  $v_{out}$  分别为风机的切入、额定和切断风速； $C_p$  是风机功率常数，（取 0.46）； $\eta_m$  发电机的机械效率（取 0.6）。

图 2 所示风力发电机的输出特性曲线

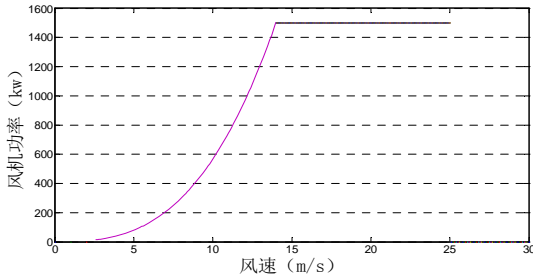


图 2 风机功率输出特性曲线

Fig.2 Curve of Wind Generation power out put characteristic

光伏电池利用半导体光伏效应将太阳辐射能直接转换为电能的转换器件。由若干个这种光伏器件封装成光伏电池组件，再根据需要将若干个组件组合成一定功率、一定工作电压的光伏阵列并与混合储能装置相配套，即构成光伏发电系统。

多篇论文已详尽阐述了阳光入射角与光伏组件功率之间的关系<sup>[9]</sup>，本文便不再赘述。

对于工程应用，需要将一定数量的光伏组件进行串、并联以满足用户对电压和功率的要求。系统的工作电压决定了光伏组件的串联数，而光伏组件串的并联数决定了光伏方阵的容量。光伏方阵组功率可表示为：

$$p_{sigpv} = V_{oc}(t, \beta) \cdot I_{sc}(t, \beta) \cdot FF(t) \quad (2)$$

$$N_{serpv} = \frac{V_{sys}}{V_{sigpv}} \quad (3)$$

$$N_{parpv} = \frac{p_{sys} \cdot h_{sum} \cdot \eta_{sum}}{V_{sys} \cdot Q \cdot \eta_b} \quad (4)$$

$$P_{PV} = N_{serpv} \cdot N_{parpv} \cdot p_{sigpv} \cdot \eta_o \quad (5)$$

式中  $P_{sigpv}$  是单件光伏组件的功率， $N_{serpv}$  是光伏组件的串联数； $N_{parpv}$  是光伏组件串的并联数， $p_{sum}$  是用户负荷， $P_{PV}$  是全部光伏组件的功率， $h$  为有效日照时间， $Q$  为光伏方阵辐射量， $I_{oc}(t, \beta)$  是光伏组件短路电流值， $V_{oc}(t, \beta)$  是光伏组件开路电压值， $FF(t)$  是填充因子， $\eta_{sum}$  为有效光照系数； $\eta_b$ ,  $\eta_o$  均为效率因子。

当风机和光伏电池的发电功率大于用户负荷时，多余电能被混合储能装置吸收并储存起来，并在无风或弱光时期等互补系统输出功率低时释放出来。

超级电容器的优点是功率密度大、充放电速度快、储能效率高、循环寿命长，但是能量密度低，不适合大容量电力储能应用。因此介于超级电容器与蓄电池在技术上具有较强的互补性，将两者混合使用会给储能设备的性能带来很大的提高。

$$p_{hy\max} = V_{sighy} \cdot I_{\max} \quad (6)$$

$$N_{serhy} = \frac{V_{sys}}{V_{sighy}} \quad (7)$$

$$N_{parhy} = \frac{P_{sysava}}{p_{hy\max} \cdot N_{serhy}} \quad (8)$$

式中  $P_{hy\max}$  为混合储能装置单件的输出峰值功率， $N_{serhy}$  是混合储能组件串联数， $N_{parhy}$  是混合储能组件并联数， $V_{sys}$  为用户系统电压， $V_{sighy}$  为单一组件最大电压值， $I_{\max}$  为单一组件最大电流值， $P_{sysava}$  为用户平均用电量， $P_{sig}$  为混合储能单一件电量

$$P(\Delta t) = \eta_c \cdot \frac{P_{spe}}{V_{sys}} \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中  $P_{spe}$  为某时间段对混合储能装置充放电的需求，根据历史用电负荷可估算备用储能装置数量

## 2 优化问题描述

当前风-光-混合储能装置互补系统构成部件的价格比较昂贵, 现市场上单晶硅太阳能电池每 Wp 的售价视厂家与型号不同在 20-40 元左右; 太阳能控制器、逆变器在市场上也价格不菲; 风机市场中 1.5MW 风机组仅机舱一项就接近 800 万元, 而且由于厂家不同, 不同设备每年的固定维护费用也有较大差异。据估算, 在兆瓦级的大型风光互补系统中, 科学规划比普通的经验估算配制能节省的成本不可小视。因此, 合理的系统规划设计是目前风光互补系统应用环节的重点。

目前, 国内设计风光互补系统配置一般采用经验估算, 往往造成总装机容量产能过剩或不足, 从而造成资金浪费严重。风光互补供电系统的优化配置可看作一个复杂优化问题, 两个对立的问题是极大化供电可靠性和极小化成本。早期对这个问题的研究有非线性规划、整数规划、动态规划等。其研究已较为成熟, 并取得了一定的成果, 但这些方法也有明显的局限性。现代风光互补系统规模越来越大, 控制量越来越多, 其解空间是多维、复杂的, 这些方法不容易实现全局最优。多数情况下只能找到局部最优解。

### 2.1 目标函数

优化设计目标是在满足系统性能指标的前提下, 使系统投资、运行、可靠性等综合成本最小, 其目标函数如下:

$$F_{sum} = \sum_{i=1}^{N_{WG}} N_{WG} \cdot (F_{WG} + M_{WG}) + \sum_{i=1}^{N_{PV}} N_{PV} \cdot (F_{PV} + M_{PV}) + [\sum_{i=1}^{N_{HY}} N_{HY} \cdot (F_{HY} + M_{HY}) + \varphi(N_{pvb})] \quad (10)$$

式中  $F_{sum}$  为系统总成本式中,  $N$  代表部件的数量,  $F_{pv}$ ,  $F_{wg}$ ,  $F_{bat}$  分别表示单件光伏电池, 风机和联合储能装置的成本费用;  $M_{PV}$ ,  $M_{WG}$ ,  $M_{HY}$  分别表示一个光伏组件, 风机和联合储能装置 15 年所需的固定维护费用;  $\varphi(N_{pvb})$  是备用储能装置费用。

### 2.2 约束条件

$$\eta^* N_{WG} \leq N_{WG} \leq N_{WGMAX} \quad (11)$$

$$\eta^* N_{PV} \leq N_{PV} \leq N_{PVMAX} \quad (12)$$

式中:  $N_{WGMAX}$ ,  $N_{PVMAX}$  分别为由 WG, PV 满足用户负荷需求所需要的个数。  $\eta$  为保证系数。

## 3 模糊菌群算法及其应用<sup>[10, 11]</sup>

作为一种从生物行为中获得灵感的优化方法, Chaos-BCC 算法是在结合细菌趋药性(BC)算法与种群优化算法基础上发展而来的。在 Chaos-BCC 算法中, 细菌不再是一个单一的个体, 而是以种群形式出现。

以寻求目标函数最小值的优化过程为例, 细菌趋药性行为运动规律如下:

菌群中每个细菌将根据式(13)确定新位置。

$$\vec{x}_{new} = \vec{x}_{old} + \vec{n}_{\mu} l \quad (13)$$

其中  $\vec{x}_{new}$  为细菌新位置,  $\vec{x}_{old}$  为细菌上一位置,  $\vec{n}_{\mu}$  为正则化后新轨线的单位方向向量。

$\vec{n}_{\mu}$  和  $l$  可通过以下几个步骤求得:

步骤一: 确定算法中系统参数。

在设定期望的计算精度  $\varepsilon$  后, 便可得到如(14-16)所示的三个系统参数。

$$T_0 = \varepsilon^{0.30} \cdot 10^{-1.73} \quad (14)$$

$$b = T_0 \cdot (T_0^{-1.54} \cdot 10^{0.60}) \quad (15)$$

$$\tau_c = \left[ \frac{b}{T_0} \right]^{0.31} \cdot 10^{1.16} \quad (16)$$

步骤二: 确定细菌的移动方向  $\vec{n}_{\mu}$  与步长  $l$ 。

新方向与原来运动轨迹的夹角根据新确定的方向向左或向右偏转分别依据以下高斯概率分布:

$$p(X_i = \alpha_i, v_i = \mu_i) = \frac{1}{\delta_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\alpha_i - v_i)^2}{2\delta_i^2} \right] \quad (17)$$

$$p(X_i = \alpha_i, v_i = -\mu_i) = \frac{1}{\delta_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\alpha_i - v_i)^2}{2\delta_i^2} \right] \quad (18)$$

$\alpha_i$  的范围为  $[0^\circ, 180^\circ]$ , 向左或向右的确定按照式(17-18)所示的统一的概率密度分布:

$$p(X_i = \alpha) = \frac{1}{2} [p(X_i = \alpha, v_i = \mu) + p(X_i = \alpha, v_i = -\mu)] \quad (19)$$

期望 $\mu$ 和方差 $\delta$ 分别由如下的方式决定:

$$\text{如果 } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} < 0, \quad \text{则} \quad \begin{cases} \cos \theta = e^{-\tau_c \tau_{pr}} \\ \mu = 62^\circ (1 - \cos \theta) \\ \delta = 26^\circ (1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{如果 } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} > 0, \quad \text{则}$$

$$\mu = 62^\circ, \delta = 26^\circ \quad (21)$$

式中 $f_{pr}$ 为当前点和上一个点的函数值的差,  $l_{pr}$ 为变量空间中当前点和上一个点的向量的模,  $\tau_{pr}$ 为细菌上一运动轨线的持续时间。

细菌移动时间 $\tau$ 由式(13)所示的概率分布决定:

$$p(X = \tau) = \frac{1}{T} e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (22)$$

$$T = \begin{cases} T_0 & \text{for } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} \geq 0 \\ T_0 (1 + b \left| \frac{f_{pr}}{l_{pr}} \right|) & \text{for } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} < 0 \end{cases} \quad (23)$$

根据所得偏移角度便可求出 $\vec{n}_\mu$ , 设定细菌单位速度为1, 根据 $\tau$ 便可求出移动步长 $l$ 。

步骤三: 在每次移动到新位置之前, 细菌都要感知周围环境, 试探周围是否有其它位置更好的细菌。如果感知到其它更好位置的细菌, 那么将趋向移动到这些拥有更好位置细菌的中心点。假定菌群有全局感知功能, 则在移动步数为 $k$ 时细菌 $i$ 附近有更好位置的同伴的中心点由下:

$$C(x_{i,k}) = A(x_{j,k} \mid f(x_{j,k}) < f(x_{i,k})) \quad (24)$$

$$\text{其中 } A(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n) = \left( \sum_{i=1}^n \vec{x}_i \right) / n \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

将所得中心点与该细菌上一位置求差便得出

$$\vec{n}_\mu, \text{ 移动步 } l = \text{rand}(\cdot) \cdot D(\vec{x}_{i,k}, C(\vec{x}_{i,k})), \quad \text{rand}(\cdot)$$

为服从0到2间均匀分布的随机值,  $D(\vec{x}_{i,k}, C(\vec{x}_{i,k}))$

表示 $\vec{x}_{i,k}$ 与 $C(\vec{x}_{i,k})$ 间的距离。

当菌群觅食寻优最优值差值在连续多步内不大于算法规定的最小误差值, 则将进入混沌搜索环节。例如在移动步数为 $p$ 时, 首先根据目标数量随机生成 $L$ 维初始向量

$$\vec{Y}_p = (\vec{y}_{p1}, \vec{y}_{p2}, \dots, \vec{y}_{pL}) \quad \vec{y}_{pL} \text{ 为 } 0 \text{ 到 } 1 \text{ 之间随机数, 随即带入经典混沌系统方程 Logistic 中}$$

$$Z_{k+1} = \varepsilon \cdot Z_k (1 - Z_k) \quad k = 1, 2, \dots, K, n \quad (25)$$

进行迭代 $m$ 次后得到第 $m$ 次混沌序列得

$$\vec{Y}_p^m = (\vec{y}_{p1}^m, \vec{y}_{p2}^m, \dots, \vec{y}_{pL}^m) \text{ 并将其通过(26)式映射到细菌群体空间。}$$

$$\vec{x}_{new p-i} = \vec{x}_{p-i} + 2 \cdot D_{p-i} \cdot (\vec{y}_{p-i}^m - 1) \quad (26)$$

式中 $\vec{x}_{p-i}$ 是第 $p$ 步第 $i$ 个细菌个体的位置,  $D_{p-i}$ 是第 $p$ 步第 $i$ 个细菌映射半径向量的平均值, 若经过混沌化后第 $i$ 个细菌个体的适应值 $F(\vec{x}_{new p-i})$ 较为混沌化前的适应值 $F(\vec{x}_{p-i})$ 小, 则此时空间最优值即为 $F(\vec{x}_{new p-i})$ , 并继续进; 反之, 则优化结束, 最优值即为 $F(\vec{x}_{p-i})$ 。

## 4 算例分析

以华东某沿海地区为例进行计算, 该地区月平均风速数据、年气温数据、年日照时间数据、平均每日系统用户负荷数据见图3-6。

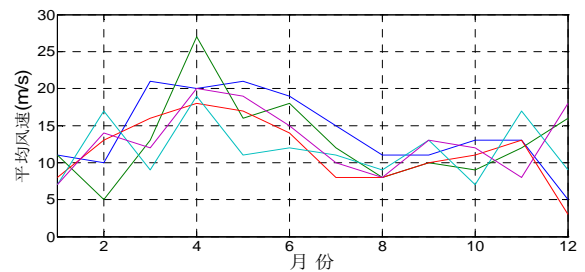


图3 01-04年平均风速

Fig.3 Curves of annual average wind speed

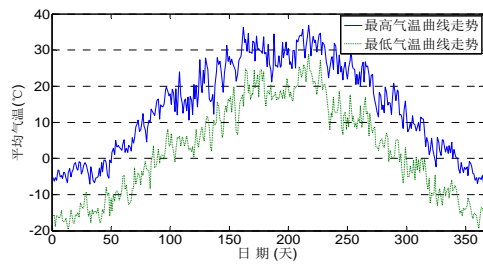


图4 该地区平均气温

Fig.5 Average daily temperature

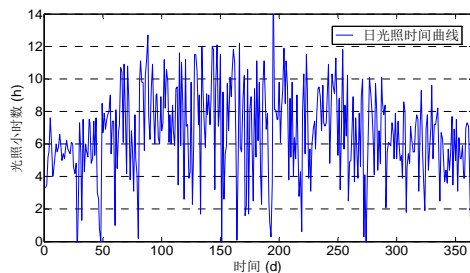


图5 平均日照小时数

Fig.6 Average daily sunshine hours

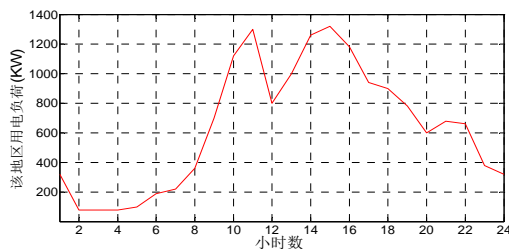


图6 日平均负荷

Fig.6 Average daily load

混合互补供电系统中不同容量、不同厂家的风机、光伏组件、混合储能装置组件优化组合后的总投资额在Chaos-BCC算法中的寻优过程如图7所示。

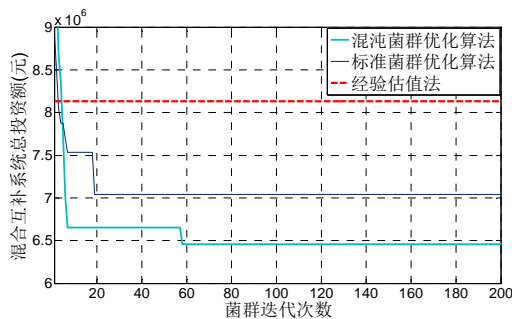


图7 优化算法收敛特性曲线

Fig.7 Convergence curves of all algorithms

由表1可见用经验估值法估算系统总费用为810万元，标准菌群优化算法估算系统总费用为705.8万元，混沌菌群优化算法估算系统总费用为648.2

万元。相对于其他智能算法两种菌群算法在收敛速度快，分别于20代和56代收敛。且混沌菌群优化算法较标准菌群优化算法更加容易跳出局部最小值，从而取到目标函数最优值。

表1 计算结果比较

Tab.1 Comparison of Calculation results

| 算法类型   | 互补系统总投资额/万元 |
|--------|-------------|
| 经验估值法  | 810         |
| 标准菌群优化 | 705.8       |
| 混沌菌群优化 | 648.2       |

## 5 结论

在风-光-混合储能装置互补新能源混合供电系统中，系统的优化配置是一个复杂优化问题，风能、光伏能、混合储能装置与用户负荷之间有直接的联系，科学合理的配置不同功能的各个组件不但可以有效降低前期建设成本和后期维护费用，还可以提高设备利用率，保护供电安全。本文在保障用户负荷安全稳定的前提下，考虑各种互补设备的综合费用，提出运用混沌菌群算法进行多目标寻优。并用实例表明混沌菌群算法在估算混合供电系统投资成本领域的有效性和可行性。

## 参考文献：

- [1] Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, et al. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems[J]. Applied Energy,2010, 87 (1):380-389.
- [2] Ali Naci Celik. Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods[J]. Energy Conversion and Management ,2003 ,44 (1).
- [3] 计长安, 张秀彬, 赵兴勇.基于模糊控制的风光互补能源系统[J].电工技术学报,2007,22(10).
- [4] 鲁鸿毅, 何奔腾.超级电容器在微型电网中的引用[J].电力系统自动化,2009, 33(2):87-91.
- [5] 李少林, 姚国兴. 风光互补发电蓄电池超级电容器混合储能研究[J].电力电子技术,2010,44(2).
- [6] WANG L , SINGH C. PSO-based multi-criteria optimum design of a grid connected hybrid power with multiple renewable source sources of energy Proceedings of 2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium[C]. April 25 , 2007 ,

- Honolulu , HI ,USA. Piscataway , NJ , USA : IEEE , 2007 : 250-257.
- [7] 徐大明,康龙云,曹秉刚.基于 NSGA2 II 的风光互补独立供电系统多目标优化 [J]. 太阳能学报 ,2006,27 (6) :593-598.
- [8] Orhan Ekren, Banu Y. Ekren ,Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing Applied Energy [J]. 2010,87 (1):592-598
- [9] L. E.Hartley,J.A.Martnez Lozano,M.P.Utrillas, , et al . The optimisation of the angle of inclination of a solar collector to maximise the incident solar radiation. Renewable Energy[J].2009, 17 (4):180-298.
- [10] 付晓刚,俞金寿.基于混沌迁移策略的多种群差分进化算法[J].华东理工大学学报(自然科学版),2009,35(2).
- [11] 卢旻, 吴华仁, 李晓惠.运用细菌群体算法的电力系统广域阻尼控制器设计 [J]. 电力系统保护与稳定,2010,38(15) :7-11.

---

**作者简介:**

卢 旻 (1985-), 男, 江苏淮安人, 硕士, 工程师, 研究方向为智能算法在智能电网中的应用, 高压电气试验, E-mail: automanlm@163.com。