

# 基于 GIS 和改进微分进化算法的农网变电站选址定容

许童羽, 孙艳辉

(沈阳农业大学信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110161)

**摘要:** 基于地理信息管理系统将改进微分进化算法引入到变电站优化选址定容求解问题中。利用三个标准的优化算法测试函数对引入惯性加权系数的微分进化改进算法进行了测试, 并与标准微分进化算法进行比较。结果证明对不同函数有目的地调整惯性加权系数  $F$  的取值范围可以提高改进算法的搜索效率。在选址模型中考虑了地理因素对投资费用的影响, 并综合考虑了农网特点和其所处的复杂地理环境和对变电站选址的影响, 使结果更具科学性和可行性。

**关键词:** 变电站选址; 微分进化算法; 惯性加权; 地理信息系统

## Substation locating and sizing in rural power system based on GIS and modified differential evolution algorithm

XU Tong-yu, SUN Yan-hui

(Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** A modified differential evolution (MDE) algorithm is introduced to solve the problems of substation location optimization based on GIS. Numerical study is carried out using three benchmark functions to the introduced inertia scaling factor MDE algorithm, and the result is compared with that of dynamic differential evolution. Analysis results show that the efficiency of modified differential evolution is significantly improved for adjusting the inertia scaling factor  $F$  scope purposefully to different function. The model of the problem involving the geographic information, the rural power network characteristic and its located complex geographical environment make the given solution more effective and feasible.

**Key words:** substation location; differential evolution algorithm; inertia scaling fact; GIS

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0034-06

## 0 引言

变电站选址和定容是电网规划工作的一个重要环节, 其结果将影响到未来电网的网络结构、供电质量和运行经济性。国内外在变电站选址方面已经开展了大量卓有成效的研究。微分进化 (DE—differential evolution) 是一种实数编码的基于种群进化的全局优化算法。本文是在文献[4]的基础上, 提出应用惯性加权系数策略的微分进化改进算法与 GIS 相结合的农村配电网变电站优化选址方法。应用此方法通过引入在计算中呈线性变化的加权系数, 使种群中的个体能更广泛寻优, 以加快算法的收敛速度。在计算过程中, 本文在变电站选址的数学模型描述中引入地理因素对投资费用的影响因子, 结合农网规划地块的地理属性的特点, 绕开了不可能建站的区域, 综合地考虑农网变电站选

址的特点, 使最终规划方案科学可行。

## 1 DE 算法的数学描述与惯性加权系数策略

微分进化算法 DE 是 1995 年由 Rainer Storn 和 Kenneth Price 首先提出。DE 已被证明在求解过程中具有高效性、收敛性、鲁棒性等优点<sup>[5,6]</sup>。它在许多优化问题中都表现出优于自适应模拟退火算法、POS 算法、GA 算法的性能。DE 利用实数值参数向量作为每一代的种群, 它的自参考种群繁殖方案与其他优化算法不同。设待求的问题为  $\min_{x \in R^n} f(x)$ <sup>[8]</sup>, 其算法描述如下:

(1) (初始化) 输入进化参数: 种群规模  $NP$ , 交叉概率  $CR \in [0, 1]$ , 交叉因子  $F$ , 自变量的下届  $l_b$  和上界  $u_b$ , 随机生成初始种群  $\bar{x}(0) = \{X_1(0), \dots, X_N(0)\}$ , 其中  $X_i(0) = \{x_1^{(i)}(0), \dots, x_n^{(i)}(0)\}$ ;

(2) (个体评价) 计算每个个体  $X_i(t)$  的目标值

$f(X_i(t))$ ;

(3) (繁殖) 对种群中的每个个体  $X_i(t)$ , 随机生成三个互不相同的随机整数  $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N\}$  和随机整数  $j_{rand} \in \{1, 2, \dots, n\}$ , 如果  $\text{rand}[0, 1] < P_c$  或  $j = j_{rand}$  则  $x_j^{(i)'}(t) = x_j^{(r_1)}(t) + F(x_j^{(r_2)}(t) - x_j^{(r_3)}(t))$ , 否则  $x_j^{(i)'}(t) = x_j^{(i)}(t)$ ;

(4) (选择) 如果  $f(x_j^{(i)'}(t)) < f(x_j^{(i)}(t))$  则  $x_j(t+1) = x_j^{(i)'}(t)$ , 否则  $x_j(t+1) = x_j^{(i)}(t)$ ;

(5) (终止检验) 如果种群  $x_i(t+1)$  满足终止准则, 则输出  $x_i(t+1)$  中最具有最小目标值的个体作为最优解。否则转 (2)。算法流程图如图 1 所示。

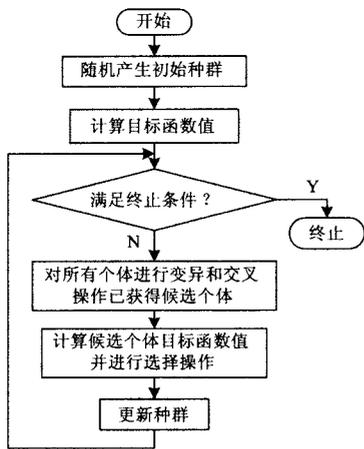


图 1 DE 算法流程图

Fig. 1 DE algorithm flowchart

DE 算法中的有三个控制参数: 种群规模  $NP$ 、加权系数  $F$  和交叉概率  $CR$ 。 $NP$  取值一般为变量维数  $D$  的 2 倍~20 倍, 且至少应大于 4。 $CR$  相对容易确定, 一般取(0.2, 0.8)中常量即可。加权系数  $F$  对算法的影响较大, 如果取值较大, 种群中个体的振荡幅度越大, 有利于产生多样化的变量但是不利于最后算法的收敛, 应用于大型复杂线性系统最优逼近过程中容易导致收敛速度慢、计算量巨大的问题; 取值较小虽然有利于提高算法的收敛速度, 但是容易陷于局部最优点。因此在计算初期加权系数  $F$  取较大值, 末期取较小值较为合适<sup>[4]</sup>。借鉴粒子群算法中惯性权重的思想<sup>[7]</sup>, 本文提出了惯性加权系数的策略, 即第  $i$  次进化过程中加权系数  $F$  按公式(1)取值,

$$F_i = F_{\min} + \frac{(G_{\max} - i)}{G_{\max}} \times (F_{\max} - F_{\min}) \quad (1)$$

其中:  $F_{\max}$  为  $F$  最大值,  $F_{\min}$  为  $F$  最小值,  $G$  为最大进化代数。加权系数  $F$  按式(1)在计算过程中线性变化, 能够大大提高算法的收敛速度。

## 2 算法的性能分析

通过三个经典函数优化算法测试函数来测试改进 DE 算法, 并和标准 DE 算法进行比较。这三个函数分别是表达式见式(2)~式(4)。除函数  $f_1(x)$  和  $f_3(x)$  是 2 维函数外,  $f_2(x)$  用 30 维变量进行测试。

$$\min(f_1(x)) = 100 \times (x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad |x_i| \leq 100 \quad (2)$$

$$\min(f_2(x)) = \sum_{i=1}^{n-1} (100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2) \quad |x_i| \leq 30 \quad (3)$$

$$\min(f_3(x)) = 0.5 + \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{(1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2))^2} \quad |x_i| \leq 100 \quad (4)$$

本文应对改进 DE 算法与 DE 基本算法的进行比较, 还分析  $F$  取值对运算的结果, 各算法仿真结果见表 1, 每个算法对 3 个测试函数都运行 20 次。本文对 3 个测试函数设置的种群数量为 60 个, 最大迭代次数为 10000 次。DE7 代表 DE 基本算法 DE/rand/1/bin, DE 其他参数设置为:  $F = 0.5$ ,  $CR = 0.5$ 。

由仿真数据可以看出, 算法结果的精确度与解的空间维数有关, 解的空间维数 ( $D$ ) 越大则结果的精确度越小; MDE 算法中, 通过调整惯性加权系数  $F$  的取值范围, 对 3 个测试函数都取得了很好的收敛效果。MDE 算法在保证搜索成功率的基础上, 大大降低了收敛所需迭代次数和时间。但也具有其局限性, 当目标函数在全局极小处剧烈震荡时, 改进算法的全局收敛性可能会变差, 并使搜索成功率有所下降。从仿真结果中还可以发现, 对不同的函数, 在一定范围内, 随着  $F$  范围取值的变化, MDE 算法收敛速度也随之变化, 同时, 当  $F$  取得不恰当的范围值时, 算法会产生“早熟”的情况, 在使用该算法进行优化应用时, 需根据实际情况, 应使  $F$  的取值范围从较大的数值 (例如 [0, 2]) 开始, 再逐渐减小其数值以获得最佳效果, 对于较简单的优化问题, 建议  $F$  取值为 0 到 1 的范围之内, 对于相对复杂的优化问题,  $F$  取值范围则不宜过大, 应

控制在 0.5 到 0.8 以内。结果见表 1。

表 1 算法性能分析  
Tab.1 Algorithm performance analysis

| 算法      | 平均搜索结果值      |             |           | 函数评价 (次)  |          |          |       |
|---------|--------------|-------------|-----------|-----------|----------|----------|-------|
|         | $f_1(x)$     | $f_2(x)$    | $f_3(x)$  | $f_1(x)$  | $f_2(x)$ | $f_3(x)$ |       |
| DE7     | 5.170 89e-7  | 92.891 04   | 2.966 8   | 2 974     | 50 000   | 4 000    |       |
| F[0, 2] | 37.898 6e-7  | 10 462.66   | ----      | 3 703     | 20 000   | ----     |       |
| F[0,1]  | 5.019 6e-7   | 8 942.465   | 0.007 264 | 3 561     | 20 000   | 4 000    |       |
| MDE     | F[0.2,0.9]   | 7.362 3 e-7 | 11 818.17 | 0.013 195 | 3 696    | 20 000   | 4 000 |
|         | F[0.5,0.9]   | 2.930 9 e-7 | ----      | 5.588 2   | 3 481    | ----     | 4 000 |
|         | F[0.2,0.6]   | ----        | 225.457 7 | 0.009 7   | ----     | 20 000   | 4 000 |
|         | F[0.45,0.55] | ----        | 86.736 9  | ----      | ----     | 20 000   | ----  |

### 3 改进微分进化算法在变电站选址中的应用

#### 3.1 目标函数

变电站的优化规划选址就是已知规划水平年负荷分布情况，以变电站的负荷能力为约束条件，以变电站和网络近似最小投资和年运行费用为目标函数，确定待建变电站的位置、容量和供电范围。

已知负荷点和负荷大小，新建变电站个数按式

(5) 确定。

$$n = \begin{cases} \left\lceil \frac{S_n}{S_N} \right\rceil & S_n > 0 \\ 0 & S_n \leq 0 \end{cases}$$

$$S_n = S - S_o - \sum_{i=1}^m S_t \quad (5)$$

式中： $n$  为规划区新建变电站个数； $S_n$  为新建变电站总容量，MVA； $S_N$  为标准变电站容量，MVA； $S$  为水平年规划区所需变电总容量； $P$  为规划区水平年负荷预测总负荷； $r$  为变电站容载比； $S_o$  为已有变电站容量； $m$  为已有变电站个数； $S_t$  为第  $t$  个已有变电站在规划水平年所增容量； $[ ]$  为取整计算。

变电站选址问题可表述为如下的优化问题：

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in J_i} W_j \leq S_i e(S_i) \cos \varphi \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$l_{ij} \leq R_i$$

$$\sum_{i=1}^N g_{ij} = 1 \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$j \in J_i \quad J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_N = J$$

$$g_{ij} \in \{0, 1\}$$

式中： $N$  为已有和待建变电站的总数； $W_j$  为负荷  $j$  点的负荷值大小； $l_{ij}$  为变电站  $(x_i, y_i)$  与负荷  $(x_j, y_j)$  之间的线路长度， $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ ； $J_i$  为第  $i$  个变电站所供负荷的集合； $J$  为全体负荷点的集合； $R_i$  为第  $i$  个变电站供电半径； $e(S_i)$  为第  $i$  个变电站的负载率； $S_i$  为第  $i$  个变电站的容量； $g_{ij}$  为  $j$  负荷点是否由  $i$  变电站供电的标志， $g_{ij} = 0$  表示“否”， $g_{ij} = 1$  表示“是”； $C_1$  为折算到每年的变电站投资及年运行费用； $C_2$  为折算到每年的变电站低压侧线路综合投资年费用； $C_3$  为估算的变电站低压侧线路年网损费用。

$$C_1 = \sum_{i=1}^n (\eta_j T(S_i) \frac{(1+k)^m k}{(1+k)^m - 1} + u(S_i)) \quad (7)$$

$$C_2 = \alpha \left[ \frac{k(1+k)^t}{(1+k)^t - 1} \right] \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} l_{ij} \quad (8)$$

$$C_3 = \beta \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} W_j^2 l_{ij} \quad (9)$$

式中： $n$  为新建变电站个数； $T(S_i)$  为第  $i$  个待建变电站的投资费用； $u(S_i)$  为第  $i$  个待建变电站的运行费用； $m$  为变电站的折旧年限； $t$  为变电站低压侧线路折旧年限； $k$  为资金回收率或称贴现率； $\eta_j$  为待建变电站建在第  $j$  块地中，地块  $j$  的地理因素对此变电站投资费用的影响因子， $\eta_j = \eta_{j1} \eta_{j2} \eta_{j3} \eta_{j4}$ ，

其中:  $\eta_{j1}$  为地块  $j$  用地性质影响因子;  $\eta_{j2}$  为地块  $j$  交通状况影响因子;  $\eta_{j3}$  为地块  $j$  施工条件影响因子;  $\eta_{j4}$  为地块  $j$  其他因素影响因子;  $\alpha$  为单位长度线路的投资费用;  $\beta$  为线路网损折算系数,  $\beta = \beta_1\beta_2\beta_3/(U^2 \cos^2 \varphi)$ ,  $\beta_1$  为当前电价;  $\beta_2$  为 10 kV 线路每公里电阻;  $\beta_3$  为年损耗小时数;  $U$  为线电压。

在考虑应用 MDE 算法进行变电站选址定容时, 以各个变电站实数坐标向量作为一组解, 通过考虑投资及运行费用来确定变电站选址的优劣, 直接用外点法构造适应度函数, 将状态变量约束以罚函数形式计入函数中, 目标函数为:

$$f = C_1 + C_2 + C_3 + \lambda\phi(\sum_{j \in J_i} W_j - S_i e(S_i) \cos \varphi) + \omega \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} \phi(l_{ij} - R_i) \quad (10)$$

其中:  $\lambda$ 、 $\omega$  为很大的正整数, 用作惩罚因子,  $\phi$  函数定义如下:

$$\phi(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

### 3.2 GIS 中地理信息的分析处理

GIS 的地理数据库是地理实体的集合。一般, 变电站被看作是点状实体, 而其坐落的地块被看作是一个闭合区域。地块的属性数据包括, 负荷密度、地块面积、用地性质、交通情况、施工条件、地址地形等信息, 这些信息为变电站选址提供了决定性的依据。在规划区域内, 先明确不可建站区域, 再结合规划地区市政建设规划确定可以建设变电站的区域, 并以规则图形的形式将它们表示出来, 判断出变电站点的落点和各区域的关系应用垂线法。

农村电网的特点是供电距离远, 负荷点间距离大, 呈散落分布, 单一电源, 放射性结构, 负荷点之间多数由线路“串接”, 电网分支少。其所处的地理位置复杂, 但对于某地区所处的地块属性较为一致, 所以本文先以负荷较密的地区抽象成单点来处理, 以所有抽象负荷点外接圆的直径来验证结论是否满足所建变电站供电半径。根据此圆也确定了此变电站周围的地块属性, 确定地理因素影响因子。

### 3.3 基于 MDE 算法的变电站选址定容

变电站选址定容步骤如下:

步骤 1: 初始化算法参数(变量维数  $D$ 、种群数量  $n$ 。最大迭代次数  $k$ 、杂交因数  $CR$  和比例因数  $F$

的范围等), 根据规划区域变电站可选容量及总的负荷量和容载比确定变电站数量的变化区间。

步骤 2: 随机初始化 DE 群体中个体的位置(变电站的落点)。

步骤 3: 根据地理信息(湖泊信息、街道信息、建筑物信息等), 判断变电站落点的可行性(绕过障碍物), 并且把落点在不可行区域内的个体按照就近原则重新给定位置。

步骤 4: 对种群中的个体, 根据变异因数进行变异操作。

步骤 5: 对种群中的个体, 根据交叉因数进行交叉操作。

步骤 6: 对变异及交叉后的种群, 根据个体的位置, 判断变电站落点的可行性并把落在不可行区域内的个体按就近原则重新给定位置。

步骤 7: 由就近原则把负荷分配到各个变电站。再由变电站所带负荷的大小确定其容量, 再由变电站的容量、位置、地理信息等因素, 用式(10)计算个体的适应度值, 并找出全局极值点  $x_{gbest}$ 。

步骤 8: 判断算法是否收敛, 如果收敛, 执行步骤 9, 否则对新种群中除最优个体以外的其他个体按局部增强算子重新计算并替代这些个体, 转向步骤 4。

步骤 9: 输出全局极值  $x_{gbest}$  和对应变电站的容量及所带负荷情况, 搜索结束。

## 4 算例分析

某县经济开发区无已有变电站。全区占地面积约 31.45 平方公里, 规划基础年 2007 年, 水平年为 2020 年, 预测 2020 年负荷将达到 52.99 MW, 负荷大小及位置分布情况见表 2。单台变压器容量为 50 MVA, 容载比取 1.6。根据公式 (5) 计算, 需新建变电站一座。

表 2 负荷大小及位置分布表  
Tab.2 Load size and position distribution

| 负荷点 | 坐标/km  |          | 负荷/MW |
|-----|--------|----------|-------|
|     | X      | Y        |       |
| 1   | 550.1  | 4 615.35 | 11.34 |
| 2   | 549.64 | 4 613.91 | 10.34 |
| 3   | 550.74 | 4 612.11 | 13.34 |
| 4   | 553.79 | 4 610.96 | 9.26  |
| 5   | 554.64 | 4 612.80 | 8.71  |

其中计算参数如下：功率因数  $\cos\varphi=0.9$ ；资金贴现率  $k=0.08$ ；变电站的综合投资费用为 28 万元/MVA；资金回收年限  $m=20$ ；变电站的运行费用为投资费用的 10%；线路网损折算系数  $\beta=0.2$ ；单位长度线路的投资费用  $\alpha=50$  万元/km；惩罚因子  $\lambda=400$  万元。

应用论文方法计算结果见图 2 所示。变电站的坐标(550.9, 4 612.6)，变电站各两个主变 50 MVA。总投资费用为 321.981 1 万元。基本 DE 与论文改进算法的优化结果比较见表 3。改进算法通过动态调整惯性权重，即在每次循环结束时，通过加权系数在计算过程中线性变化调整其大小，有效平衡了全局寻优与局部寻优的关系。由表 3 中数据可以看出，改进微分进化算法迭代次数明显少于基本 DE 算法的迭代次数，充分显示本改进算法的有效性。

表3 优化结果

Tab.3 Results of optimization

| 方法     | 最优解       | 函数评价(次) |
|--------|-----------|---------|
| DE算法   | 321.981 1 | 10 000  |
| 论文改进算法 | 321.981 1 | 4 000   |

在规划中考虑用地性质，施工条件，地质地形等的计算结果如图 2。可见，考虑地理信息后的变电站规划结果实际、可行。

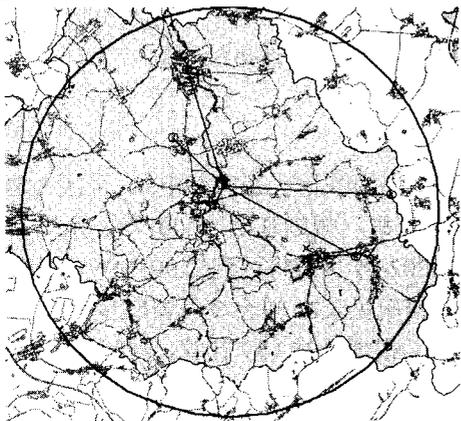


图 2 变电站选址结果图

Fig.2 Result of substation location

## 5 结论

农村配电网变电站选址是一个多约束、多目标、非线性的组合优化问题，本文依据农村电网的特点，并受微分进化算法及其改进算法的启发，通过对经典函数优化问题和某开发新区规划实例的寻优解试验，得出如下结论：

(1) 惯性加权系数  $F$  的取值范围对 MDE 算法收敛速度存在影响，对于不同的函数，需根据实际情况，应使  $F$  的取值范围从较大的数值（例如[0, 2]）开始，再逐渐减小其数值以获得最佳效果，从而提高了寻优能力；

(2) MDE 计算速度快，全局寻优能力强，与 DE 相比，具有较好的综合寻优能力；

(3) 本文在分析变电站选址时充分地考虑了建站投资，线路投资和网络运行费用对站址的影响，并在变电站投资运算中引入了地理信息系统的地理信息影响因子，使规划结果更科学、合理。

## 参考文献

- [1] 赵光权,彭喜元,孙宁.带局部增强算子的微分进化改进算法[J].电子学报,2007,35(5):849-853.  
ZHAO Guang-quan, PENG Xi-yuan, SUN Ning. A Modified Differential Evolution Algorithm with Local Enhanced Operator[J]. Chinese Journal of Electronics, 2007,35(5):849-853.
- [2] 刘自发,张建华.基于改进多组织粒子群体优化算法的配电网变电站选址定容[J].中国电机工程学报,2007,27(1):105-111.  
LIU Zi-fa, ZHANG Jian-hua. Optimal Planning of Substation Locating and Sizing Based on Refined Multi-team PSO Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1):105-111.
- [3] 胡鹏,黄杏元,华一新.地理信息系统教程[M].武汉:武汉大学出版社,2002.  
HU Peng, HUANG Xing-yuan, HUA Yi-xin. GIS Tutorial [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.
- [4] 姜立强,邱迎锋,刘光斌.利用改进微分进化算法实现线性系统逼近[J].电光与控制,2008,15(5):35-37.  
JIANG Li-qiang, QIU Ying-feng, LIU Guang-bin. A Modified Differential Evolution Algorithm for Linear System Approximation[J]. Electronics Optics & Control, 2008,15(5):35-37.
- [5] Storn R, Price K. Differential Evolution-a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces[J].Journal of Global Optimization, Kluwer Academic Publishers, 1997, 11:341-359.
- [6] Storn R. System Design by Constraint Adaptation and Differential Evolution[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1999, 3(1):22-34.
- [7] 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 Jun-wei, WANG Ding-wei. Experiments and Analysis on Inertia Weight in Particle Swarm Optimization [J]. Journal of Systems Engineering,2005,

- 20(2): 194-198.
- [8] 阳明盛, 罗长童. 最优化原理、方法及求解软件[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
YANG Ming-sheng, LUO Chang-tong. Optimization Principles, Methods and Software to Solve[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [9] 李伟伟, 罗滇生, 姚建刚, 等. 基于受约束区优先处理的配电网规划变电站选址方法[J]. 广东电力, 2007, 20(2): 14-19.  
LI Wei-wei, LUO Dian-sheng, YAO Jian-gang, et al. A Substation Location Method of Urban Distribution Network Planning Based on Limited Areas Handling Firstly[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(2): 14-19.
- [10] 王成山, 刘涛, 谢莹华. 基于混合遗传算法的变电站选址定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 30-47.  
WANG Cheng-shan, LIU Tao, XIE Ying-hua. Substation Locating and Sizing Based on Hybrid Genetic Algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 30-47
- [11] 牛卫平, 刘自发, 张建华, 等. 基于 GIS 和微分进化算法的变电站选址定容[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 82-86.  
NIU Wei-ping, LIU Zi-fa, ZHANG Jian-hua, et al. Substation Locating and Sizing in Power System Based on GIS and Differential Evolution Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 82-86.
- [12] 徐珍霞, 顾洁. 离散粒子群优化算法在变电站选址中的应用[J]. 电力应用, 2006, 25(4): 35-38.  
XU Zhen-xia, GU Jie. Application of Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm to Substation Location[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(4): 35-38.
- [13] 杨丽徙, 王家耀, 贾德峰, 等. GIS 与模糊模式识别理论在变电站选址中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 87-89.  
YANG Li-xi, WANG Jia-yao, JIA De-feng, et al. Application of GIS and Fuzzy Pattern Recognition Theory in Substation Locating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 87-89.
- [14] 王成山, 王赛一. 2004. 基于空间 GIS 和 Tabu 搜索技术的城市中压配电网规划[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 68-73.  
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi. Urban Medium-voltage Distribution Network Planning Based on Spatial GIS and Tabu Search[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 68-73.
- 
- 收稿日期: 2008-11-30; 修回日期: 2009-01-12
- 作者简介:  
许童羽 (1967-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力企业信息化; E-mail: yatongmu@163.com  
孙艳辉 (1982-), 女, 硕士, 研究方向为电力企业信息化。
- 
- (上接第 21 页 continued from page 21)
- [6] Li H Y, Li Y Z, Zhang S H. A Multi-period Energy Acquisition Model for a Distribution Company with Distributed Generation and Interruptible Load[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 588-596.
- [7] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of Conditional Value-at-risk[J]. The Journal of Risk, 2000, 2(3): 21-41.
- [8] 张富强, 周浩. 电力市场中的电价分布问题[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (4): 22-28.  
ZHANG Fu-qiang, ZHOU Hao. Probability Distribution of Prices in Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 22-28.
- [9] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑输电约束的期权市场与现货市场联合均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 35-39.  
WANG Rui-qing, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. Joint Equilibrium of Option and Spot Markets Considering Transmission Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 35-39.
- [10] Wang J F, LI Y Z. Effects of Interruptible Load on Purchasing Portfolio for Load Serving Entities[A]. in: The 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies[C]. Nanjing: 2008. 297-300.
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.  
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithm—Theory, Application and Software Programming[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- 
- 收稿日期: 2008-11-25; 修回日期: 2008-12-20
- 作者简介:  
王瑞庆 (1965-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力市场风险管理、电力金融衍生产品和电力市场均衡; E-mail: ayqrwang@163.com  
李渝曾 (1947-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场输电定价、可中断负荷管理、博弈分析等研究;  
张少华 (1966-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场风险管理、远期合同定价、可中断负荷管理等研究。