

基于人工鱼群算法的配电网开关优化配置研究

张红霞, 赵秀明, 齐晓娜

(河北金融学院计算机科学与技术系, 河北 保定 071051)

摘要: 配电网开关优化配置是配电网自动化和配电系统优化的重要方面。开关优化就是确定馈线上开关设备的最佳位置和数量, 以提高系统可靠性, 减少停电损失, 提高资金的使用效率。该文对配电网开关优化配置进行了分析并建立了数学模型, 应用人工鱼群算法来确定配电网馈线相应位置的开关种类和数量。仿真实验结果表明, 人工鱼群算法收敛速度快, 具有很好的全局搜索能力, 将该算法应用到配电网开关优化配置中是可行且有效的。

关键词: 配电网; 开关优化配置; 人工鱼群算法; 可靠性; 综合费用; 分段开关

Switching optimization in distribution networks based on artificial fish swarm algorithm

ZHANG Hong-xia, ZHAO Xiu-ming, QI Xiao-na

(Department of Computer Science and Technology, Hebei College of Finance, Baoding 071051, China)

Abstract: Optimal switching device is one of the important aspects of distribution network automation and distribution network optimization. Switching optimization is used to confirm the best position and amount of switching equipments on feeders to improve the reliability, cost-benefit efficiency, and decrease the break out lost. The paper analyses optimal switching devices in the distribution networks, sets up a model to decide to judge types and numbers of switches in proper location of distribution networks and applies to artificial fish swarm algorithm to compute. According to the emulational experiment of material instance, it improves the AFSA's feasibility and validity.

Key words: power distribution network; switching optimization; artificial fish swarm algorithm; reliability; comprehensive cost; disconnect switch

中图分类号: TM76; TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)17-0027-04

0 引言

近年来, 随着电力市场的逐步形成, 用户对电能质量、供电可靠性和经济性的要求越来越高; 同时电力运营商为了提高自身的竞争力, 必须考虑在满足系统运行安全性的前提下, 提高系统运行的经济性。而配电系统处于电力系统的末端, 直接与用户相连, 因此配电系统的安全经济运行尤为重要。配电网开关优化配置已成为国内外研究的热点^[1-3]。配电网开关优化就是确定馈线上开关设备的最佳位置和数量, 以提高系统可靠性, 减少停电损失, 提高资金的使用效率。开关优化配置是非线性、连续-离散混合, 目标函数无法用决策变量解析表达的模型^[4]。因此, 开关优化配置问题常可描述为离散与连续混合的数学规划模型, 但由于配电网的规模通常比较大, 待求变量的维数非常高, 所以直接用数学规划方法进行求解几乎不可能。本文提出了将

基于“现代启发式”随机搜索寻优技术的人工鱼群算法 AFSA (Artificial Fish Swarm Algorithm) 应用到该问题上来。算例计算表明, 该算法收敛速度快, 具有很好的全局搜索能力, 是可行且有效的。

1 配电网开关优化配置的数学模型

通常, 配电系统的可靠性越高, 其投资就相应越大, 但高可靠性可以减少用户的停电损失。所以, 开关优化配置的目的就是从综合年费用最少的角度, 确定一种优化的开关配置方案。由于设备使用寿命可能不同, 故选择等年值法进行经济评价, 从而避免设备寿命差异带来的影响。

1.1 投资费用

开关设备总投资现值对应的等年值 C_s 由式(1)给出。

$$C_s = \sum_{j=1}^M [N_j C_{sj} \frac{(1+i)^{p_j} i}{(1+i)^{p_j} - 1}] \quad (1)$$

式中: M 为开关类型总数 (开关类型有断路器, 隔

离开关、负荷开关、熔断器以及切换开关等); N_j 为第 j 种开关增装的台数; C_{sj} 为第 j 种开关单台投资现值, 即现值单价; i 为贴现率; P_j 为第 j 种开关设备的使用寿命。

1.2 运行维修费用

开关设备每年的运行维修费用 C_M 按其投资的百分数给出

$$C_M = C_{s0} C_0 \quad (2)$$

式中: C_0 为运行费用占投资的比例系数。

1.3 停电损失费用

系统每年的停电损失费用 C_L 可用式 (3) 表示

$$C_L = \sum_{j=1}^{n_{LP}} \sum_{t=1}^{T_j} E_{ENS_{jt}} C_{L_{jt}} \quad (3)$$

式中: n_{LP} 为负荷点总数; T_j 为第 j 个负荷点有 T_j 种停电持续时间分类; $E_{ENS_{jt}}$ 为负荷点 j 第 t 停电持续时间对应的失电量; $C_{L_{jt}}$ 为负荷点 j 第 t 停电持续时间对应的单位停电损失。

1.4 数学模型

目标函数

$$\text{Min} C = C_S + C_M + C_L \quad (4)$$

约束条件:

(1) 配电网潮流的约束

$$P_{in(i)} = \sum P_{H(i)} + \sum_{m \in D_i} (P_{(im)} + P_{l(im)}) \quad (5)$$

$$Q_{in(i)} = \sum Q_{H(i)} + \sum_{m \in D_i} (Q_{(im)} + Q_{l(im)}) \quad (6)$$

其中: D_i 为节点 i 上所连的出线的集合; $P_{in(i)}$, $Q_{in(i)}$ 为节点 i 的注入有功功率和无功功率; $\sum P_{H(i)}$, $\sum Q_{H(i)}$ 为节点 i 的有功负荷和无功负荷; $P_{(im)}$, $Q_{(im)}$ 为连在节点 i 上的第 m 条支路上流过的有功功率和无功功率; $P_{l(im)}$, $Q_{l(im)}$ 为连在节点 i 上的第 m 条支路上流过的有功功率损耗和无功功率损耗。

(2) 馈线的容量约束

$$S_i \leq S_{i\max} \quad (7)$$

(3) 线路电流的约束

$$I \leq I_{\max} \quad (8)$$

式中的 I_{\max} 为支路安全电流。

(4) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (9)$$

式中: V_{\min} , V_{\max} 分别为节点电压最低值和最高值。

(5) 可靠性约束

随着电力市场的逐步形成, 用户可以选择不同的可靠性要求, 作为直接与用户相连的配电网必须保证满足用户的要求,

$$R \geq R_0 \quad (10)$$

式中: R 为某种开关配置下系统可靠性指标; R_0 为用户要求的最低可靠性指标。

(6) 配电网运行约束

$$g \in G \quad (11)$$

式中: g 为实际的网络线损, G 为网络运行时允许的网络线损。

其中, 约束条件 (3) 和 (6) 主要针对有联络开关优化的情形。

2 基本人工鱼群算法的概述

2.1 人工鱼群算法简介

在一片水域中, 鱼往往能自行或尾随其他鱼找到营养物质多的地方, 因而鱼生存数目最多的地方一般就是本水域中营养物质最多的地方。人工鱼群算法就是根据这一特点, 通过构造人工鱼来模仿鱼群的觅食、聚群及追尾行为, 从而实现寻优^[5]。以下是鱼的几种典型行为:

1) 觅食行为: 一般情况下鱼在水中随机地自由游动, 当发现食物时, 则会向食物逐渐增多的方向快速游去。

2) 聚群行为: 鱼在游动过程中为了保证自身的生存和躲避危害会自然地聚集成群。鱼聚群时所遵守的规则有三条: ①分隔规则: 尽量避免与临近伙伴过于拥挤; ②对准规则: 尽量与临近伙伴的平均方向一致; ③内聚规则: 尽量朝临近伙伴的中心移动。

3) 追尾行为: 当鱼群中的一条或几条鱼发现食物时, 其临近的伙伴会尾随其快速到达食物点。

2.2 人工鱼群算法描述

文献[5]采用基于行为的多并行通路结构来构造人工鱼个体的模型, 模型封装了人工鱼的自身状态和行为模式。算法的进行也就是人工鱼个体的自适应行为活动, 个体每活动一次就是算法的一次迭代。

2.2.1 相关定义

人工鱼个体的状态可表示为向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, 其中 $x_k (k=1, 2, \dots, K)$ 为欲寻优的控制变量; 人工鱼当前位置的食物浓度为 FC ; 人工鱼个体之间的距离表示为 $d_{ij} = \|X_i - X_j\|$, 即向量 $(X_i - X_j)$ 的二范数; $VISUAL$ 表示人工鱼的感知距离; $STEP$ 表示人工鱼移动步长的最大值; δ 表示拥挤度因子; A_q 表示安全度系数。

2.2.2 行为描述

(1) 觅食行为

人工鱼当前状态为 X_i , 在其可见域内 (即 d_{ij}

$\leq VISUAL$) 随机选择一个状态 X_j , 当该状态食物浓度 FC_j 大于当前状态的食物浓度 FC_i 时, 则向该方向前进一步; 反之, 则重新随机选择状态 X_j , 判断是否满足前进条件; 反复几次后, 如果仍不满足前进条件, 则随机移动一步。用数学表达式表示为:

$$\begin{cases} x_{inextk} = x_{ik} + \text{Random}(\text{STEP})(x_{jk} - x_{ik}) / \|X_j - X_i\| & FC_j > FC_i \\ x_{inextk} = x_{ik} + \text{Random}(\text{STEP}) & FC_j \leq FC_i \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k=1, 2, \dots, K$; x_{jk} , x_{ik} 和 x_{inextk} 分别表示状态向量 X_j , X_i 及人工鱼下一步状态向量 X_{inext} 的第 k 个元素, $\text{Random}(\text{STEP})$ 表示 $[0, \text{STEP}]$ 间的随机数。以下各式中的符号含义与此相同。

(2) 聚群行为

人工鱼当前状态为 X_i , 设其可见域内的伙伴数目为 n , 形成集合 KJ_i , 且

$$KJ_i = \{X_j / \|X_j - X_i\| \leq VISUAL\} \quad (13)$$

若 $KJ_i \neq \phi$ (ϕ 为空集), 表明其可见域内存在其他伙伴, 即 $n \geq 1$, 则按式 (14) 探索伙伴中心位置 X_c 。

$$x_{ck} = \left(\sum_{j=1}^n x_{jk} \right) / n \quad (14)$$

式中: x_{ck} 表示中心位置状态向量 X_c 的第 k 个元素; x_{jk} 表示第 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 个伙伴 X_j 的第 k 个元素。计算该中心位置的食物浓度值 FC_c , 如果满足式 (15)

$$e^{A_q} (FC_c / \delta) > FC_i \quad (A_q \leq 1, \delta > 1) \quad (15)$$

表明伙伴中心位置安全度较高并且不太拥挤, 则执行式 (16); 否则人工鱼执行觅食行为

$$x_{inextk} = x_{ik} + \text{Random}(\text{STEP})(x_{ck} - x_{ik}) / \|X_c - X_i\| \quad (16)$$

若 $KJ_i = \phi$, 表明可见域内不存在其他伙伴, 则执行觅食行为。

(3) 追尾行为

人工鱼当前状态为 X_i , 探索可见域内的所有伙伴中 FC 最大的伙伴 X_{max} , 如果满足式 (17)

$$FC_{max} > \delta FC_i \quad (17)$$

表明伙伴 X_{max} 的食物浓度高且其周围不太拥挤, 则执行式 (18); 否则执行觅食行为

$$x_{inextk} = x_{ik} + \text{Random}(\text{STEP})(x_{maxk} - x_{ik}) / \|X_{max} - X_i\| \quad (18)$$

式中: x_{maxk} 表示状态向量 x_{max} 的第 k 个元素。

若人工鱼当前可见域内没有其他伙伴, 也执行觅食行为。

(4) 公告板

算法中设立一个公告板, 用以记录最优人工鱼

个体状态及该人工鱼位置的食物浓度值。每条人工鱼在行动一次后就将自身当前状态与公告板进行比较, 如果优于公告板则用自身状态取代公告板状态。

2.2.3 行为选择

对人工鱼当前所处的环境进行评价, 即模拟执行聚群、追尾行为, 然后选择行动后食物浓度值较大的动作来执行, 缺省行为方式为觅食行为。

3 基本人工鱼群算法在配电网开关优化配置中的应用

本文中提出的配电网开关优化配置数学模型是一个多约束多变量的数学规划模型。问题的规模对于一般计算机求解将显得过大, 在这里采用人工鱼群算法^[6]的思想, 先分析简化模型得到子系统, 然后对子系统和总模型进行多次模拟运行, 通过算法求解得到配电网开关优化配置数学模型的最优解。

利用人工鱼群算法来求解配电网开关优化配置问题, 可按以下步骤进行:

(1) 输入原始数据, 获取节点信息和支路信息, 获得控制变量的个数及各自的取值范围, 获取人工鱼群的群体规模 N , 最大迭代次数 G_{enmax} , 人工鱼的可见域 $VISUAL$, 人工鱼的移动步长最大值 $STEP$, 拥挤度因子 δ , 安全度系数 A_q 等参数。

(2) 当前迭代次数 $G_{en}=0$, 利用随机数发生器在控制变量可行域内随机生成 N 个人工鱼个体, 形成初始鱼群。人工鱼个体的控制变量取值序列为 $X=[T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{iN_i}, V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{GN_g}, Q_{c1}, Q_{c2}, \dots, Q_{CN_c}]$, 每个个体按以下方法产生:

① 成 $N_i + N_g + N_c$ 个 (设共为 K 个) $[0, 1]$ 区间内的随机数, 并根据 (19) 式计算出控制变量值:

$$X_k = \text{Random}(X_{kmax} - X_{kmin}) + X_{kmin} \quad (19)$$

式中: $X_k(k=1, 2, \dots, K)$ 为控制变量; $\text{Random}(X_{kmax} - X_{kmin})$ 为 $[X_{kmin}, X_{kmax}]$ 区间的随机数; X_{kmin} , X_{kmax} 为各控制变量的上限及下限。

② 根据每个控制变量的取值进行潮流计算, 若收敛, 则保留初始人工鱼个体, 否则转本步①。

③ 已生成 N 个人工鱼, 转步骤(3), 否则转本步①。

(3) 计算初始鱼群各个人工鱼个体当前位置的食物浓度值, 并比较大小, 取 FC 为最大值者进入公告板, 保存其状态及 FC 值。

(4) 各人工鱼分别模拟执行①追尾行为; ②聚群行为; 选择行动后 FC 值较大者的行为实际执行, 缺省行为方式为觅食行为。

(5) 各人工鱼每行动一次后, 检验自身状态与

公告板状态, 如果优于公告板状态, 则以自身状态取代之。

(6) 中止条件判断: 判断 G_{en} 是否已达到预置的最大迭代次数 G_{emmax} , 若是, 则输出计算结果 (即公告板的值), 否则 $G_{en}=G_{en+1}$, 转步骤(4)。

4 仿真实验

某地 35 kV 配电线路, 有 14 个节点, 8 个负荷节点, 其中计量站 5 个 (合计变压器 18 台), 注水站一个 (合计变压器 2 台), 馈线结构见图 1, 线路参数与负荷见表 1。线路故障率为 6%, 每段线路修复时间取 4h, 联络开关倒闸时间为 1h, 开关设备综合投资为 10 万元/台, 单位停电损失与停电时间的关系及取值见文献[7]。用人工鱼群算法进行优化, 算法的参数选择分别为: 人工鱼群体规模 $N=48$, 移动步长 $STEP=0.005$, 人工鱼的可见域 $VISUAL=$

0.025, 拥挤度因子 $\delta=1.618$, 安全系数 $A_q=0.9$ 。该算例中参数的选择原则: 在保证算法快速收敛并且能取得全局最优解的前提下, 进行反复实验得到的数据。应用 VC++ 编程实现该算法, 配电网馈线开关优化结果及可靠性指标见表 2。按优化结果装设分段开关, 总投资为 20 万元, 与不装分段开关相比, 预计年减少用户停电损失 65 407 元。

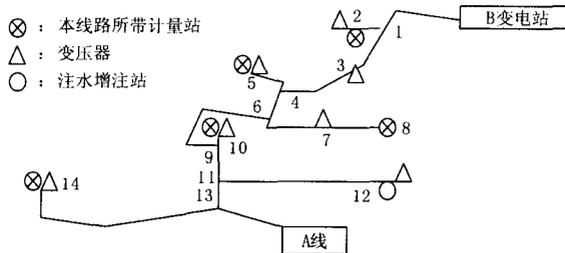


图 1 某 35 kV 配电线路

Fig.1 35 kV distribution network line

表 1 馈线负荷与长度

Tab.1 Load and length of feeder

负荷线路	长度 l/km	视在功率 S/kVA	负荷率 β	功率因数 $\cos\phi$	主线路	长度 l/km
2 (1-2)	0.60	400	0.60	0.83	1 (0-1)	0.60
3 (1-3)	0.50	785	0.65	0.85	4 (3-4)	0.30
5 (4-5)	0.60	1795	0.68	0.90	6 (4-6)	0.30
7 (6-7)	0.90	400	0.60	0.85	9 (6-9)	0.90
8 (7-8)	0.30	760	0.65	0.85	11 (9-11)	0.20
10 (9-10)	0.50	500	0.63	0.85	13 (11-13)	0.20
12 (11-12)	0.80	1800	0.70	0.90		
14 (13-14)	1.20	200	0.60	0.85		

表 2 分段开关配置前后馈线可靠性指标

Tab.2 Sub switch configuration around the feeder

reliability index

分段开关位置	FAIFI 值	FAIDI 值/h	可靠性
	0.51	21.5	0.997 545
6-9; 13-14	0.09	1.46	0.999 794

注: FAIFI、FAIDI 分别表示馈线上每个用户平均每年停电次数和停电时间。

5 结论

配电网开关的优化配置问题是一种复杂的组合优化问题, 配电网开关配置的特点是在任一点安装开关所减少的停电损失与安装的先后顺序无关, 只有在某点安装分段开关所减少的停电损失大于设备投资时, 该点才作为分段开关可候选的安装位置。本文通过对配电网开关的优化配置问题的研究, 抽象出相应的数学模型, 并且引入了人工鱼群算法来对该问题进行优化求解。提出一种以配电网综合费用最低为目标, 在满足系统供电可靠性要求的基础

上对配电网开关进行最优配置的方法。算例表明了此种方法的可行性。由于本文采用的算例结构较简单, 使得所述算法在结果上较传统优化算法提高不明显, 相信在大规模复杂配电网系统中会有更好的效果。

参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
GUO Yong-ji. The Theory and Application of Reliability in Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.
- [2] 李卫星, 李志民, 刘迎春. 复杂辐射状配电系统的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (3): 69-73.
LI Wei-xing, LI Zhi-min, LIU Ying-chun. Evaluation of Complex Radial Distribution System Reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (3): 69-73.
- [3] Billinton R. Optimal Switching Device Placement Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, (3): 1645-1651.

(下转第 51 页 continued on page 51)

能够给运行人员的调度和控制提供一定的准确参数值, 具有一定的实用性。

参考文献

- [1] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Power System Security and Its Prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [3] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] Cutsem T Van, Vournas C D. Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-Term Time Scales[J]. IEEE Trans on PWRs, 1996, 11 (1): 146-154.
- [5] 段献忠, 汪馥英, 何仰赞, 等. 负荷建模研究现状综述[J]. 电力系统自动化, 1994, 18 (8): 60-68.
DUAN Xian-zhong, WANG Fu-ying, HE Yang-zan, et al Review of the Development of Load Modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(8): 60-68.
- [6] 石景海, 贺仁睦. 动态负荷建模中的负荷时变性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 85-90.
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Load Time-variation Study in Dynamic Load Modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 85-90.
- [7] 祝达康, 程浩忠. 求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法[J]. 电网技术, 1999, 23 (4): 37-40.
ZHU Da-kang, CHENG Hao-zhong. An Improved Continuation Method in Tracing PV Curves of Power Systems[J]. Power System Technology, 1999, 23 (4): 37-40.
- [8] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (16): 13-16.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Continuation Power Flow Method for Voltage Stability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 13-16.
- [9] 段俊东, 郭志忠. 对在线电压稳定监视的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (5): 199-202.
DUAN Jun-dong, GUO Zhi-zhong. On-line Monitoring of Power System Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (5): 199-202.
- [10] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 40-45.
ZHANG Yao, SONG Wen-nan. Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest Bus of the Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 40-45.
- 收稿日期: 2007-03-18; 修回日期: 2007-04-16
- 作者简介:
段俊东 (1969-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: dddzfm@163.com
郭志忠 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、计算机在电力系统中的应用、电力市场、光学电流互感器等;
魏成江 (1969-) 男, 本科, 电气工程师, 研究方向为电气设备运行与控制。
-
- (上接第 30 页 continued from page 30)
- [4] Levitin G, Mazal-Tov S, Elmakis D. Optimal Allocation of Sectionalizer in Radial Distribution Networks[A]. In: Proceeding of the 1995 Stockholm Power Tech Conference[C]. 1995. 761-764.
- [5] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22: 32-38.
LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, Qian Ji-xin. An Optimizing Method Based on Autonomous Animals: Fish-swarm Algorithm[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 22: 32-38.
- [6] 李晓磊, 钱积新. 基于分解协调的人工鱼群优化算法研究[J]. 电路与系统学报, 2003, 8 (1): 1-6.
LI Xiao-lei, Qian Ji-xin. Studies on Artificial Fish-swarm Optimization Algorithm Based on Decomposition and Coordination Techniques[J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(1): 1-6.
- [7] CHEN Rong-liang, Allen K, Billinton R. Value-based Distribution Reliability Assessment and Planning[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(1): 421-429.
- [8] WEN Fu-shuan, Chang C S. Transmission Network Optimal Planning Using the Tabu Search method[J]. Electric Power Systems Research, 1997, 42(2): 153-163.
- [9] XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi, Billinton R. Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Electric Distribution Networks Based on the Shortest Path[J]. IEEE Proceeding-Gener, Transm, and Distrib, 2003, 150(6): 686-690.
- [10] 王守相, 王成山. 配电系统联络开关的优化配置[J]. 继电器, 2002, 30 (12): 24-27.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Optimal Tie Switches Allocation in Distribution Systems[J]. Relay, 2002, 30 (12): 24-27.
- 收稿日期: 2007-04-28; 修回日期: 2007-06-20
- 作者简介:
张红霞 (1976-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为数据挖掘、MIS 系统; E-mail: zhx0988@sohu.com
赵秀明 (1965-) 女, 硕士, 教授, 主要研究领域为管理信息系统设计与开发、局域网广域网技术与工程。