

基于粗糙集的复杂系统网络可靠性评价新方法

何 灿, 邢建春, 杨启亮, 谢立强, 王荣浩

(解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要: 本文提出了一种基于粗糙集的复杂系统网络可靠性评价新方法. 本方法首先利用粗糙集属性约简原理删除冗余指标, 然后利用粗糙集属性重要度原理确定各指标权重, 最后采用线性加权法得到综合评价结果. 结合某复杂通信系统网络可靠性评价实例进行分析. 结果表明, 本文方法所得评价结果比专家评价法结果更加客观、合理, 证明了本文方法的有效性和优越性.

关键词: 粗糙集; 属性约简; 权重确定; 综合评价; 网络可靠性

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)07-0011-05

A New Method for Network Reliability Evaluation of Complex System Using Rough Set

HE Can, XING Jian-chun, YANG Qi-liang, XIE Li-qiang, WANG Rong-hao

(PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: This paper presents a new method for complex system network reliability evaluation based on rough set. It includes attribute reduction algorithm, weight determination algorithm and linear-weighted comprehensive assessment method. The paper gives an example in the end, the example uses the new method to evaluate the network reliability of a complex communication system. This example shows that the result which is achieved by the new method is more precise than the experts', it proves out the effectiveness of the new method.

Key words: rough set; attribute reduction; weight determination; comprehensive evaluation; network reliability

1 引言

复杂系统网络可靠性评价就是在构建系统网络可靠性指标体系的基础上, 根据实际情况对指标体系中各指标赋予相应的权重, 采用相应的评价模型得到系统网络可靠性评价结果. 网络可靠性评价一般步骤如下: 指标体系的构建; 指标的筛选; 指标权重的确定; 综合评价模型的建立. 现有复杂系统网络可靠性评价方法主要包括专家评价法^[1], 层次分析法^[2], 神经网络法^[3], 模糊理论法^[4], 这些方法存在无法删除冗余指标, 指标权重取值主观性强等缺陷.

为了解决这一问题, 本文提出一种基于粗糙集的大型复杂系统网络可靠性评价方法. 本方法主要包括三个步骤: 首先利用粗糙集属性约简原理删除

冗余指标, 解决无法删除冗余指标的问题; 然后利用粗糙集属性重要度原理客观地确定指标权重, 最后采用线性加权法得到评价结果.

2 信息熵表示下的粗糙集理论

2.1 相关定义

定义 1 设 U 为一个论域, 可以认为 U 上任一属性集合(知识)是定义在 U 上的子集组成的 σ 代数上的一个随机变量, 其概率分布可通过如下方法确定:

设属性集合 P, Q 对 U 的划分分别为 X, Y ($X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}, Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$), 则 P, Q 在 U 上的子集组成的 σ 代数上的概率分布为:

收稿日期: 2012-10-12; **修回日期:** 2012-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(70371039)

$$[X:p] = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \cdots & X_n \\ p(X_1) & p(X_2) & \cdots & p(X_n) \end{bmatrix};$$

$$[Y:p] = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 & \cdots & Y_n \\ p(Y_1) & p(Y_2) & \cdots & p(Y_n) \end{bmatrix}$$

$$\text{其中: } p(X_i) = \frac{|X_i|}{|U|}, i=1,2,\cdots,n,$$

$$p(Y_j) = \frac{|Y_j|}{|U|}, j=1,2,\cdots,m.$$

有了属性集合的概率分布定义后,根据粗糙集的相关内容就可以定义属性集的信息熵和条件信息熵.

定义 2 (1)信息熵:

对任一属性集合(知识) P 的信息熵 $H(P)$ 定义为: $H(P) = - \sum_{i=1}^n p(X_i) \log[p(X_i)]$

(2)条件信息熵:

属性集合 $Q(U|IND(Q)=\{Y_1, Y_2, \cdots, Y_m\})$ 相对于属性集合 $P(U|IND(P)=\{X_1, X_2, \cdots, X_n\})$ 的条件信息熵定义为: $H(Q|P) = - \sum_{i=1}^n p(X_i) \sum_{j=1}^m p(Y_j|X_i) \log[p(Y_j|X_i)]$

$$\text{其中: } p(Y_j|X_i) = \frac{|Y_j \cap X_i|}{|X_i|}; i=1,2,\cdots,n, j=$$

1,2,\cdots,m.

2.2 相关定理^[5-6]

定理 1 设 U 为一个论域, P, Q 是 U 上的两个属性集合. 若 $IND(P)=IND(Q)$, 则

$$H(P)=H(Q).$$

定理 2 设由属性集合 P 和 $D=\{d\}$ 导出的对论域 $U(|U|=n)$ 的划分分别为 $U|IND(P)=\{X_1, X_2, \cdots, X_i\}$ 和 $U|IND(\{d\})=\{Y_1, Y_2, \cdots, Y_s\}$, 则

$$H(D|P)=H(D \cup P)-H(P).$$

定理 3 设 U 为一个论域, P, Q 是 U 上的两个属性集合. 若 $P \subseteq Q$ 且 $H(P)=H(Q)$, 则

$$IND(P)=IND(Q).$$

定理 4 设 U 是一个论域, P 是 U 上的一个属性集合, P 中的一个属性 r 是不必要的充要条件为:

$$H(\{r\}|P-\{r\})=0.$$

推论: P 中的一个属性 r 是必要的充要条件为:

$$H(\{r\}|P-\{r\})>0.$$

定理 5 设 U 是一个论域, P 是 U 上的一个属性集合, $Q \subseteq P$ 是 P 的一个约简的充分必要条件为: $H(Q)=H(P)$ 且对任意的 $q \in Q$, 有

$$H(\{q\}|Q-\{q\})>0.$$

定理 6 设 U 是一个论域, P 是 U 的一个条件

属性集合, d 为决策属性, 且论域 U 是在 P 上相对于 $\{d\}$ 一致的, 则 P 中的属性 r 是 P 相对于决策属性 d 不必要属性的充要条件为:

$$H(\{d\}|P)=H(\{d\}|P-\{r\})$$

定理 7 设 U 是一个论域, P 是 U 的一个条件属性集合, d 为决策属性, 且论域 U 是在 P 上相对于 $\{d\}$ 一致的, 则 P 是相对于决策属性 d 独立的充分必要条件为对于 P 中任意属性 r 都有:

$$H(\{d\}|P) \neq H(\{d\}|P-\{r\})$$

定理 8 设 U 是一个论域, P 是 U 的一个条件属性集合, d 为决策属性, 且论域 U 是在 P 上相对于 $\{d\}$ 一致的, 则 $Q \subseteq P$ 是 P 相对于决策属性 d 的一个约简的充要条件为 $H(\{d\}|Q)=H(\{d\}|P)$ 且 Q 是相对于决策属性 d 独立的.

3 基于粗糙集的复杂系统网络可靠性评价方法

3.1 基于粗糙集的属性约简算法

本文利用粗糙集约简算法进行属性约简, 算法的起点是初始条件属性集, 通过逐步删除属性来实现约简的功能.

算法描述:

输入: 一个决策表 $(U, C \cup D, V, f)$, 其中, U 为论域, C 为条件属性集合, D 为决策属性集合.

输出: 该决策表的一个相对约简 E .

Step1: 计算决策表中决策属性集 D 相对条件属性集 C 的条件熵 $H(D|C)$;

Step2: 计算决策表中决策属性集 D 相对条件属性集 C 在删除 a_i 后的条件信息熵 $H(D|C-\{a_i\})$;

Step3: 比较 $H(D|C)$ 与 $H(D|C-\{a_i\})$, 如果两者相等或差别在一个阈值以内, 则属性 a_i 可以约简, 否则 a_i 不能约简.

Step4: 删除所有可以约简的属性, 得到该决策表的一个相对约简 E .

3.2 基于粗糙集属性重要度的权重确定方法

为了进行系统网络可靠性的综合评价, 在得到约简后的属性集合之后, 我们还要得到各个属性对于最终评价结果的权重. 本文采用粗糙集的属性重要度原理来确定各属性权重.

定义 3 一个决策表 $(U, C \cup D, V, f)$, 其中, U 为论域, C 为条件属性集合, D 为决策属性集合, $A \subseteq C$, 属性 $a \in C-A$ 的重要度 $\text{sig}(a, A, D)$ 定义为:

$$\text{Sig}(a, A, D) = H(D|A) - H(D|A \cup \{a\})$$

若 $A \in \varphi$, 则属性 $a \in C$ 的重要度定义为:

$$\text{Sig}(a, D) = H(D) - H(D | \{a\})$$

$\text{Sig}(a, A, D)$ 的值越大, 说明在已知 A 的条件下, 属性 a 对于决策属性 D 的重要程度越大. 对每个属性的重要程度进行归一化处理就得到各属性的权重:

$$W_{a_i} = \frac{\text{Sig}(a_i, D)}{\sum_{j=1}^n \text{Sig}(a_j, D)}$$

基于粗糙集属性重要度的权重确定方法是一种比较客观、定量的方法, 它是从已知数据中挖掘各属性的重要度出发, 然后对各属性重要度进行归一化处理得到的.

3.3 综合评价方法

本文采用线性加权法对系统网络可靠性进行综合评价. 根据各属性的取值和权重进行加权计算, 最终得到综合评价结果. 计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n V_{a_i} \cdot W_{a_i}$$

其中, V_{a_i} 为属性 a_i 经过预处理后的属性值, W_{a_i} 是属性的权重, S 为网络可靠性评价结果.

4 算例

图 1 为某复杂通信系统网络可靠性指标体系, 系统实测数据^[7]见表 1.

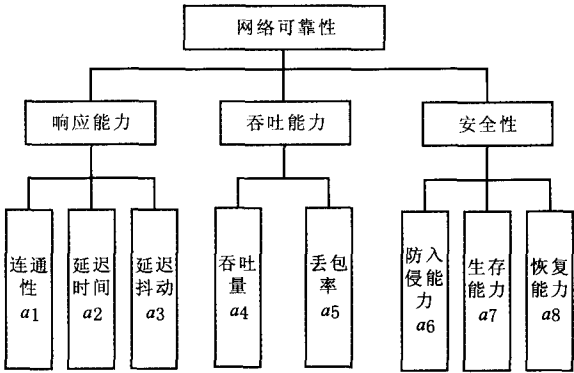


图 1 某复杂通信系统网络可靠性指标体系

表 1 某复杂通信系统网络可靠性指标实测数据

系统状态	连通性	延迟时间 (s)	延迟抖动 (s)	吞吐量 (Kb/s)	丢包率 (%)	防入侵能力	生存能力	恢复能力	网络可靠性等级
A1	1	0.065646	0.002003	700	0	1	1	1	1
A2	1	0.065764	0.003879	750	0	2	2	1	1
A3	1	0.066084	0.005085	800	0	2	2	1	2
A4	1	0.066614	0.006591	850	0	2	2	2	1
A5	1	0.072721	0.008862	900	0.003731	2	2	2	2
A6	1	0.074368	0.015066	910	0.041199	1	1	2	2
A7	1	0.076668	0.011714	920	0.060606	1	2	2	3
A8	1	0.077252	0.012498	930	0.057471	2	2	1	2
A9	1	0.077784	0.01176	940	0.085603	2	2	1	3
A10	1	0.077882	0.012031	950	0.120301	1	2	1	3

4.1 数据离散化

对于连通性, 防入侵能力, 生存能力, 恢复能力和决策指标网络可靠性等级等定性指标都是由专家打分得到, 好为 1 分, 一般为 2 分, 差为 3 分. 对于定量指标, 采用等距离法对数据进行离散化:

设 $A = (\text{MAX} - \text{MIN}) / 3$, 其中, MAX 表示各指标列的最大值, MIN 指各指标列的最小值, 把每一列指标值分 3 个等级: 对于指标值属于开区间 $(\text{MIN} + 2 * A, \text{MAX})$ 用 3 表示; 对于指标值属于开区间 $(\text{MIN} + A, \text{MIN} + 2 * A)$ 用 2 表示; 对于指标值属于开区间 $(\text{MIN}, \text{MIN} + A)$ 用 1 表示. 离散化后得表 2. 其中各指标代号见图 1.

4.2 指标约简

本文基于粗糙集的属性约简算法进行指标约简.

步骤 1: 求 $H(D | C)$, D 为决策属性, C 为条件属性集合. 由条件信息熵的定义可以得到:

$$H(D | C) = - \sum_{i=1}^n p(X_i) \sum_{j=1}^m p(Y_j | X_i) \log[p(Y_j | X_i)]$$

表 2 数据离散化结果

系统状态	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	决策指标 D
A1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A2	1	1	1	1	1	2	2	1	1
A3	1	1	2	1	1	2	2	1	2
A4	1	1	2	2	1	2	2	2	1
A5	1	2	2	2	1	2	2	2	2
A6	1	3	3	3	2	1	1	2	2
A7	1	3	3	3	2	1	2	2	3
A8	1	3	3	3	2	2	2	1	2
A9	1	3	3	3	3	2	2	1	3
A10	1	3	3	3	3	1	2	1	3

其中决策属性 $D(U|IND(D)=\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\})$, 条件属性集合 $C(U|IND(C)=\{X_1, X_2, \dots, X_n\})$.

对照表 2, 经分析得出以下结论: 当 X 确定时, Y 也就唯一确定了. 所以当 X_i 确定时, 对于任意 Y_j , $p(Y_j|X_i)$ 要么为 1, 要么为 0. 但无论取 1 或者是 0, $\sum_{j=1}^m p(Y_j|X_i) \log[p(Y_j|X_i)]$ 恒为 0, 可以得出 $H(D|C)=0$.

步骤 2: 求 $H(D|C-\{a_i\})$

(1) 对于指标 a_1 : 与 $H(D|C)$ 分析方法相同, 同样可得 $H(D|C-\{a_1\})=0$.

所以 $H(D|C)=H(D|C-\{a_1\})=0$; 按照定理 6, 指标 a_1 不必要, 可以删除.

(2) 对于指标 a_2 :

$$\begin{aligned} H(D|C-\{a_2\}) &= - \sum_{i=1}^n p(X_i) \sum_{j=1}^m p(Y_j|X_i) \log[p(Y_j|X_i)] \\ &= -P(X_1^*) \{ (p(Y_j=2)|X_1^*) \log[p(Y_j=2)|X_1^*] + (p(Y_j=1)|X_1^*) \log[p(Y_j=1)|X_1^*] \} \end{aligned}$$

其中 X_1^* 为在 A_4, A_5 状态下 $C-\{a_2\}$ 的取值情况. 由表达式得知 $H(D|C-\{a_2\}) > 0 = H(D|C)$, 所以指标 a_2 是必要的.

(3) 对于指标 a_3 :

$$\begin{aligned} H(D|C-\{a_3\}) &= - \sum_{i=1}^n p(X_i) \sum_{j=1}^m p(Y_j|X_i) \log[p(Y_j|X_i)] \\ &= -P(X_2^*) \{ (p(Y_j=2)|X_2^*) \log[p(Y_j=2)|X_2^*] + (p(Y_j=1)|X_2^*) \log[p(Y_j=1)|X_2^*] \} \end{aligned}$$

其中 X_2^* 为在 A_2, A_3 状态下 $C-\{a_3\}$ 的取值情况. 由表达式得知 $H(D|C-\{a_3\}) > 0 = H(D|C)$, 所以指标 a_3 是必要的.

(4) 对于指标 a_4, a_6, a_8 : 同指标 a_1 的分析, 得到 $H(D|C)=H(D|C-\{a_4\})=H(D|C-\{a_6\})=H(D|C-\{a_8\})=0$, 所以指标 a_4, a_6, a_8 均不必要, 可以删除.

(5) 对于指标 a_5, a_7 : 同指标 a_2, a_3 的分析, 得知 $H(D|C-\{a_5\}) > 0 = H(D|C)$, $H(D|C-\{a_7\}) > 0 = H(D|C)$, 所以指标 a_5, a_7 是必要的.

综上得到指标约简结果 $\{a_2, a_3, a_5, a_7\}$. 即延迟时间、延迟抖动、丢包率、生存能力四个指标. 约简后的指标体系见图 2.

4.3 指标权重的确定

采用文中基于属性重要度原理求取各指标权

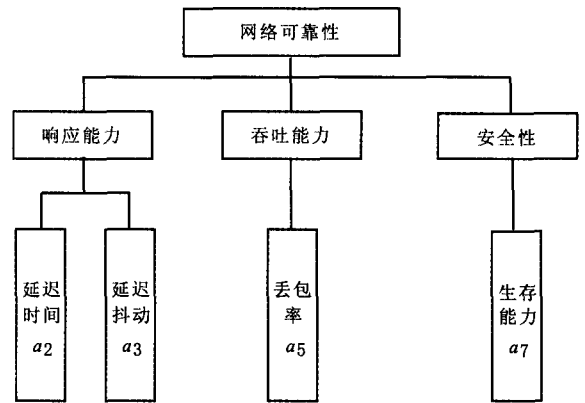


图 2 约简后的指标体系

重, 具体步骤如下:

(1) 求 $H(D)$:

$$\begin{aligned} H(D) &= - \sum_{i=1}^n p(X_i) \log[p(X_i)] \\ &= -(\frac{3}{10} \log \frac{3}{10} + \frac{3}{10} \log \frac{3}{10} + \frac{4}{10} \log \frac{4}{10}) \\ &= 1.0889 \end{aligned}$$

(2) 求 $H(D|\{a_i\})$:

$$\begin{aligned} H(D|\{a_2\}) &= - \sum_{i=1}^n p(X_i) \sum_{j=1}^m p(Y_j|X_i) \log[p(Y_j|X_i)] \\ &= -[\frac{4}{10} \times (\frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \log \frac{3}{4}) + \frac{1}{10} \times 0 + \frac{5}{10} \times (\frac{3}{5} \log \frac{3}{5} + \frac{2}{5} \log \frac{2}{5})] \\ &= 0.5614 \end{aligned}$$

$H(D|\{a_3\}) =$

$$\begin{aligned} &= - \sum_{i=1}^n p(X_i) \sum_{j=1}^m p(Y_j|X_i) \log[p(Y_j|X_i)] \\ &= -[\frac{3}{10} \times (\frac{1}{3} \log \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \log \frac{2}{3}) + \frac{2}{10} \times 0 + \frac{5}{10} \times (\frac{3}{5} \log \frac{3}{5} + \frac{2}{5} \log \frac{2}{5})] \\ &= 0.5275 \end{aligned}$$

同理得到:

$$H(D|\{a_5\}) = 0.5275$$

$$H(D|\{a_7\}) = 1.0044$$

(3) 求 $\text{Sig}(a_i, D)$:

$$\begin{aligned} \text{Sig}(a_2, D) &= H(D) - H(D|\{a_2\}) \\ &= 1.0889 - 0.5614 = 0.5275 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sig}(a_3, D) &= H(D) - H(D|\{a_3\}) \\ &= 1.0889 - 0.5275 = 0.5614 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sig}(a_5, D) &= H(D) - H(D|\{a_5\}) \\ &= 1.0889 - 0.5275 = 0.5614 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sig}(a_7, D) &= H(D) - H(D|\{a_7\}) \\ &= 1.0889 - 1.0044 = 0.0845 \end{aligned}$$

(4)求 Wa_i :

$$Wa_2 = \frac{\text{Sig}(a_2, D)}{\sum_{j=1}^n \text{Sig}(a_j, D)} = \frac{0.5275}{1.7348} = 0.3041$$

$$Wa_3 = \frac{\text{Sig}(a_3, D)}{\sum_{j=1}^n \text{Sig}(a_j, D)} = \frac{0.5614}{1.7348} = 0.3236$$

$$Wa_5 = \frac{\text{Sig}(a_5, D)}{\sum_{j=1}^n \text{Sig}(a_j, D)} = \frac{0.5614}{1.7348} = 0.3236$$

$$Wa_7 = \frac{\text{Sig}(a_7, D)}{\sum_{j=1}^n \text{Sig}(a_j, D)} = \frac{0.0845}{1.7348} = 0.0487$$

4.4 综合评价

根据线性加权计算公式: $S = \sum_{i=1}^n Va_i \cdot Wa_i$, 可以得到 A1 状态下网络可靠性评价结果:

$$S = 1 * 0.3041 + 1 * 0.3236 + 1 * 0.3236 + 1 * 0.0487 = 1$$

同理可以得到其他系统状态下网络可靠性最终评价结果. 具体结果见表 3.

表 3 本文评价结果与专家评价结果

系统状态	A1	A2	A3	A4	A5
本文结果	1	1.0487	1.3723	1.3723	1.6764
专家结果	1	1	2	1	2
系统状态	A6	A7	A8	A9	A10
专家结果	2.579	2.6277	2.6277	2.9513	2.9513
系统状态	2	3	2	3	3

4.5 结果分析

从表 3 中可以看出,对于 A3, A6, A8 三个状态,两种评价方法所得结果存在较大差别,下面分析差别产生的原因.

(1) A3 状态:

由表 2 得到 A2, A3 离散后的数据,见表 4.

表 4 A2, A3 离散后数据及评价结果

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	专家结果	本文结果
A2	3	1	1	1	1	2	2	1	1	1.0487
A3	3	1	2	1	1	2	2	1	2	1.3723

从表 4 可以看出,在 A2 状态下两种方法结果一致,我们认为 A2 状态下两种方法评估结果都是合理的. 而 A3 状态仅在 a_3 指标上与 A2 高了 1 个等级,其余指标完全相同,专家评价结果认为在 A3 状态下整个网络可靠性等级为 2,而在 A2 状态下整个网络可靠性等级为 1,过分强调了指标 a_3 的重要性. 采用本文方法,在 A2 状态下整个网络可靠性为 1.0487,在 A3 状态下整个网络可靠性为 1.3732,更与事实相符.

(2) A6 状态:

由表 2 得到 A6, A7 离散后的数据,见表 5.

表 5 A6, A7 离散后数据及评价结果

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	专家结果	本文结果
A6	3	3	3	3	2	1	1	2	2	2.579
A7	3	3	3	3	2	1	2	2	3	2.6277

从表 5 可以看出,对于 A6 和 A7 来说, A7 仅在 a_7 指标上与 A6 高了 1 个等级,其余指标完全相同,专家评价结果认为在 A7 状态下整个网络可靠性等级为 3,而在 A6 状态下整个网络可靠性等级为 2,过分强调了指标 a_7 的重要性.

(3) A8 状态:

由表 2 得到 A8, A9 离散后的数据,见表 6.

表 6 A8, A9 离散后数据及评价结果

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	专家结果	本文结果
A8	3	3	3	3	2	2	2	1	2	2.6277
A9	3	3	3	3	3	2	2	1	3	2.9513

从表 6 可以看出,对于 A8 和 A9 来说, A9 仅在 a_5 指标上与 A8 高了 1 个等级,其余指标完全相同,专家评价结果认为在 A9 状态下整个网络可靠性等级为 3,而在 A8 状态下整个网络可靠性等级为 2,过分强调了指标 a_5 的重要性.

上述分析表明,采用本文提出的综合评价方法进行评价所得结果与专家评价法相比更加合理.

5 结束语

文中提出了一种复杂系统网络可靠性评价新方法. 该方法首先利用粗糙集属性约简原理删除冗余指标,然后利用粗糙集属性重要度原理客观地确定指标权重,最后采用线性加权法得到评价结果. 算例分析表明,采用本文方法所得评价结果比专家评价法结果更加客观、合理. 证明了本文方法的有效性.

参考文献:

- [1] 孙景民. 基于专家系统和 Petri 网的网络可靠性评估方法[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(5): 99-102.
- [2] 刘川意. 基于 HPCC 和层次分析法的高性能计算系统评价模型[J]. 软件学报, 2007, 18(4): 1039-1046.
- [3] 程磊. 基于人工神经网络的矿井通风系统评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(5): 88-91.
- [4] Jensen. Semantics-preserving dimensionality reduction: rough and fuzzy-rough-based approaches[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(12): 1457-1471. (下转第 19 页)

的I/O性能、master网络的负载均衡以及数据安全等方面进行更深的研究。

参考文献:

- [1] Sanjay Ghemawat, Howard Gobioff, Shun-Tak Leung. The google file system[C]//Proceedings of the 19th ACM Symposium on Operating Systems Principles. New York: ACM Press, 2003: 29-43.
- [2] 杨丽婷. 基于云计算数据存储技术的研究[D]. 山西: 中北大学, 2011.
- [3] 吴吉义. 基于DHT的开放对等云存储服务系统研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2011.
- [4] 钱宁, 吴国新. 无结构化P2P网络资源搜索机制研究综述[J]. 计算机科学, 2010, 37(4): 7-10.
- [5] 李明, 杨成梧. 细菌菌落优化算法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 223-228.
- [6] Sachin Singh, Ghose T, Goswami S K. Optimal feeder

routing based on the bacterial foraging technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 70-78.

- [7] Gurjot Singh Gaba, Kanwaljit Singh. Sensor node deployment using bacterial foraging optimization[C]//Proceeding of IEEE, 2011 International Conference on Recent Trends in Information Systems. USA: Chicago, 2011.

作者简介:

赵季红 女, (1963-), 博士, 教授. 研究方向为移动互联网、物联网、宽带通信网等.

柳明 男, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为移动互联网与云计算.

曲桦 男, (1961-), 博士, 教授. 研究方向为移动互联网、宽带移动通信、网络的异构和融合技术等.

(上接第15页)

- [5] 吴尚智. 粗糙集和信息熵的属性约简算法及其应用[J]. 计算机工程, 2011, 37(7): 56-59.
- [6] 邓建高. 基于粗糙集的EPR系统实施风险控制指标属性约简[J]. 控制与决策, 2010, 25(11): 1742-1746.
- [7] 罗赞骞. 网络性能评估中客观权重确定方法比较[J]. 计算机应用, 2009, 29(10): 2624-2626.

作者简介:



何灿 男, (1988-), 博士研究生. 研究方向为复杂系统可靠性评估以及结构智能化.