

# 基于组合赋权的网络可生存性模糊综合评估

伍文, 孟相如, 马志强, 梁霄

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077)

**摘要:** 针对网络系统可生存性的有效评估问题, 对指标体系的构建, 指标赋权及综合评估方法进行了研究。提出了一种机制关联的网络可生存性指标体系构建方法, 从可生存性的 4 个重要属性角度构建了层次化的指标体系, 依据该指标体系提出了一种新的组合赋权方法, 由层次分析法计算主观权重, 粗糙熵方法计算客观权重, 并给出了关联权重的概念和计算方法, 构建离差最小化目标优化函数将 3 种权重联合得到组合权重, 建立了基于隶属云的模糊综合评估模型, 将隶属云替代原来的确定性隶属度函数。仿真结果表明, 该评估方法可对网络系统可生存性进行准确有效的评估。

**关键词:** 网络可生存性; 模糊综合评估; 组合权重; 粗糙熵; 隶属云

**中图分类号:** TP 393.07

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.18

## Fuzzy comprehensive evaluation of network survivability based on combinational weight

WU Wen, MENG Xiang-ru, MA Zhi-qiang, LIANG Xiao

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of evaluating network system survivability efficiently, the construction of index systems, weighting of indexes and synthetic evaluation method are studied. A constructing method of the network survivability index system by way of mechanism-associating is proposed, the hierarchy index system is constructed from the angle of survivability's four important attributes. A new combinatorial weighting method is given based on the index system. The subjective weight is calculated using analytic hierarchy process. The objective weights using rough entropy is calculated. The concept and calculating method of the associated weight are given. The three weights are combined into combinational weight using a minimum object optimization function. The fuzzy synthetic evaluation model based on cloud membership is established. The primary determinate membership function is replaced by cloud membership. The simulation results show that this evaluation method could evaluate the network system survivability accurately and efficiently.

**Keywords:** network survivability; fuzzy comprehensive evaluation; combinational weight; rough entropy; cloud membership

## 0 引言

信息网络在政治、经济、军事、文化等领域发挥着越来越重要的作用, 攻击、故障等恶性事件会对网络的正常使用造成严重影响<sup>[1]</sup>。传统以“防”、“检”为主的安全措施已无法阻止恶意事件的侵袭, 为了避免不必要的损失, 网络系统可生存性研究成为近几年网络安全领域关注的热点<sup>[2-3]</sup>。网络系统可生存性是指在遭受攻击、故障或意外事故时, 系统能够及时地完成其关键任务的能力<sup>[4]</sup>。

网络可生存性评估是决策的前提和基础, 提出合理科

学的可生存性评估方法是可生存性研究的一个关键问题。已有的可生存性评估方法有: (1) 从拓扑结构角度展开的可生存性评估<sup>[5-6]</sup>; (2) 从系统状态变迁建模角度展开的可生存性评估<sup>[7-8]</sup>; (3) 构建指标体系的综合评估方法<sup>[9]</sup>。从拓扑结构展开的网络可生存性评估过于片面, 不能够反映网络上层的可生存行为, 从状态变迁建模角度展开的可生存性评估存在状态空间爆炸问题, 应用的局限性较大。系统效能综合评估方法通过构建指标体系可以展开多维度, 多层面的可生存性评估, 对网络可生存性的评估更具备全面性和合理性。从系统效能综合评估角度展开的网络可生存性评估研究才刚刚起步, 存在指标体系不完善等问题, 在评

估方法上还有许多亟待研究和改进的地方。

本文提出了一种组合赋权的网络系统可生存性模糊综合评估方法。首先提出了一种机制关联的指标体系构建方法,给出了主观权重、客观权重及关联权重 3 种权重联合的指标赋权方法,并给出一种改进的基于隶属云的模糊综合评估方法,实现对网络系统可生存性的有效评估。

## 1 机制关联的可生存性指标体系

现有的可生存指标体系构建方法多以专家的主观意见为主,指标构建的粒度较粗。为了实现指标体系构建的科学性、合理性、完备性和可行性,本节给出一种机制关联的可生存性指标体系构建方法。

研究对象为网络可生存系统,下属分为 4 个子系统,分别为:抵抗子系统、识别子系统、恢复子系统和自适应子系统,每个子系统包含若干相关机制元素,这些机制即为具体的网络可生存措施和方法。机制之间存在关联性,随着可生存技术的发展,出现新的机制,淘汰旧的机制,各机制也会在自身基础上进行演化。可生存性评估指标的确定即依赖这些机制,因此给出的机制关联的指标体系具有开放性、演化性、灵活性、全面性、层次性等特点。

具体的指标构建方法如图 1 所示。

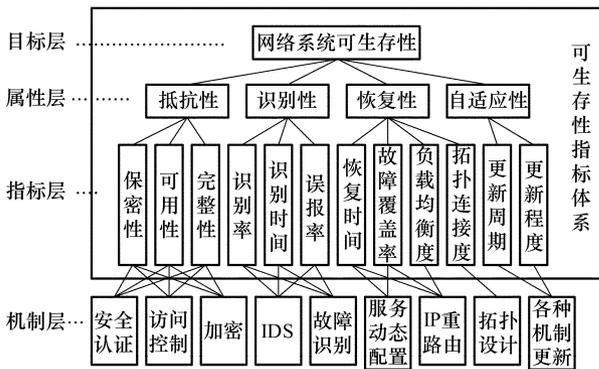


图 1 网络系统可生存性指标体系

指标体系分为 3 个层次,第一层为评估目标层,第二层为属性层,第三层为指标层。指标层的指标与可生存性机制相关联。根据网络可生存系统的具体机制确定评估指标,单个机制可确定多个指标,单个指标可由多个机制确定。一些机制会带来新的评估指标,例如,负载均衡度指标是用于衡量 IP 重路由后链路的负载均衡程度,是衡量 IP 重路由性能的一个新指标。依据机制所属于的属性,该机制所关联的指标确定其从属的属性层指标。

机制关联的指标确定方法在保证指标体系完备性方面有其独到的优势,不仅选取了多数机制共同关注的指标(这些指标也常被其他指标体系选用),也选取了个别机制关注的指标,使得指标更加细化和全面。由于有的指标是多个机制关联的,有的指标是由较少的机制关联,指标层指标的地位是不等的,在评估时应该重点考虑这个问题。

## 2 指标权重的确定

指标的权重是综合评估的重要信息,其准确性和合理性对评估结果的可靠性将直接影响<sup>[10]</sup>。权重的确定通常分为主观赋权法和客观赋权法,两种方法联合起来的主客观组合赋权方法可以同时体现主观和客观信息,具有较强的可信性<sup>[11]</sup>。关联权重是根据本文给出的指标体系提出的一种新的权重概念,该权重反映指标与机制的关联程度。将主客观权重与关联权重相结合得到的组合权重作为评估的权重。

### 2.1 主观权重的确定

采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)进行主观权重的确定,AHP 方法的主要步骤为<sup>[12]</sup>:

**步骤 1** 将研究的系统划分为不同层次,如本文划分为目标层、属性层和指标层;

**步骤 2** 对同一层次的各项因素相对于上一层因素的重要性进行两两比较,得到权重判断矩阵;

**步骤 3** 由判断矩阵计算各指标的权重,并进行一致性检验;

**步骤 4** 计算各元素对系统目标的合成权重。

通过 AHP 可得到  $m$  个指标层指标的主观权重,记为  $W_i = (\omega_{i_1}, \omega_{i_2}, \omega_{i_3}, \dots, \omega_{i_m})$ 。

### 2.2 客观权重的确定

客观权重的确定采用粗糙集理论中的粗糙熵概念。粗糙熵是对粗糙集中不确定性的度量,定义为:

**定义 1** 设  $S = (U, A, V, f)$  是一个信息系统,其中,  $U$  是全域(对象构成的集合,  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ),  $A$  是属性集,  $V = \bigcup_{a \in A} V_a$  是属性值的集合,  $V_a$  是属性  $a$  的值集,  $f: U \times A \rightarrow V$  为信息函数,指定  $U$  中每一个对象  $x$  的属性值。  $X \subseteq U$ ,  $R \subseteq A$  为  $U$  上的一个等价关系,不可分辨关系  $ind(R)$  在  $U$  上的分类为  $U/ind(R) = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ,则粗糙集关于  $R$  的粗糙熵定义为<sup>[13]</sup>

$$E_R(X) = \frac{|BN_R(X)|}{|U|} \ln(1 + |BN_R(X)|) + \sum_{i=1}^n \frac{|X_i|}{|U|} \ln |X_i| \quad (1)$$

式中,  $BN_R(X) = R^-(X) - R_-(X)$ ,  $R^-(X)$  和  $R_-(X)$  分别表示  $X$  关于  $R$  的上近似和下近似。

属性  $a \in A$  在  $A$  中的重要性  $Sig(a, A)$  定义为  $A$  中去掉  $a$  后粗糙熵变化的程度,即

$$Sig(a, A) = E_{A-\{a\}}(X) - E_A(X) \quad (2)$$

则指标  $a_j$  的客观权重  $w_{oj}$  为

$$w_{oj} = \frac{Sig(a_j, A)}{\sum_{a \in A} Sig(a, A)} \quad (3)$$

通过粗糙熵权方法计算得到  $m$  个指标层指标的客观权重,记为  $W_o = (\omega_{o_1}, \omega_{o_2}, \omega_{o_3}, \dots, \omega_{o_m})$ 。

### 2.3 关联权重的确定

关联权重主要反映指标层指标与可生存性机制之间的

关联程度, 指标关联的机制越多, 关联的机制越重要, 则应分配越高的权重。

指标关联的机制集记为  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ , 给定各机制的重要度记为  $Y = \{y_{m_1}, y_{m_2}, \dots, y_{m_n}\}$ , 指标  $j$  关联的机制记为  $M_{r_j} = \{m_{p_1}, m_{p_2}, \dots, m_{p_s}\} \subset M$ , 则指标  $j$  的权重为

$$\omega_{r_j} = \frac{\sum_{x \in M_{r_j}} y_x}{\sum_{j=1}^m \sum_{x \in M_{r_j}} y_x} \quad (4)$$

通过式(4)计算得到  $m$  个指标层指标的关联权重, 记为  $W_r = (\omega_{r_1}, \omega_{r_2}, \omega_{r_3}, \dots, \omega_{r_m})$ 。

### 2.4 组合权重的确定

将主观权重  $W_s$ 、客观权重  $W_o$  以及关联权重  $W_r$  集成得到可生存性评估的组合权重  $W$ 。根据对 3 种权重反映程度的不同, 设定权重偏好因子  $(\mu_s, \mu_o, \mu_r)$ ,  $\mu_s$  表示主观权重的偏好因子,  $\mu_o$  表示客观权重的偏好因子,  $\mu_r$  表示关联权重的偏好因子, 其中  $\mu_s + \mu_o + \mu_r = 1$ 。

将组合权重的求解问题抽象为一个最优化问题, 使得组合权重到 3 种权重向量的离差和最小, 该最优化问题表述为

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^m [\mu_s (\omega_i - \omega_{s_i})^2 + \mu_o (\omega_i - \omega_{o_i})^2 + \mu_r (\omega_i - \omega_{r_i})^2] \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^m \omega_i = 1, \omega_i > 0, \mu_s + \mu_o + \mu_r = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 偏离因子  $\mu$  越大, 则组合权重与该偏离因子对应的权重向量越接近。

通过求解该最优化问题, 得到各个指标对应的权重向量, 记为  $W = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_m)$ 。

## 3 基于隶属云的模糊综合评估方法

在获得了各指标的权重和评价分数后, 采用模糊综合评估方法将各因素集成得到最后的评估结果<sup>[14]</sup>。

### 3.1 经典模糊综合评估方法介绍

模糊综合评估方法步骤如下<sup>[15]</sup>:

**步骤 1** 确定评判集  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_z\}$ , 以及每个评判等级对应的决策值  $x_i \leftarrow V_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

**步骤 2** 确定每个评估指标的评价值矩阵  $D$ , 其中  $D_{ij} = (d_{ij})_{q \times m}$ ,  $d_{ij}$  表示第  $i$  个专家对第  $j$  个指标的评价分数。

**步骤 3** 计算第  $j$  个指标属于第  $e$  个评判等级的隶属度  $\delta_{je}$ 。设第  $e$  个评判集的隶属度函数为  $f_e$ , 专家总数为  $m$ , 则隶属度  $\delta_{je}$  为

$$\delta_{je} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_e(d_{ij}) \quad (6)$$

第  $j$  个指标隶属于第  $e$  个评判等级的隶属度权重  $r_{je}$  为

$$r_{je} = \frac{\delta_{je}}{\sum_{k=1}^z \delta_{jk}} \quad (7)$$

则  $m$  个指标的隶属度权重构成的隶属度权重矩阵  $R$  表示为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1z} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2z} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

**步骤 4** 计算模糊综合评估结果向量。假设计算得到的  $m$  个评估指标权重为  $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ , 则模糊综合评估结果向量  $E$  为

$$E = W \cdot R = (e_1, e_2, \dots, e_z) \quad (9)$$

式中,  $e_i$  表示评估结果隶属于评判集  $i$  的隶属度。

**步骤 5** 计算具体的评估值  $EA$  为

$$EA = (e_1 \cdot x_1, e_2 \cdot x_2, \dots, e_z \cdot x_z) \quad (10)$$

### 3.2 基于隶属云的隶属度确定方法

隶属度计算中隶属函数的选取多为确定性函数, 由于评价分数的计算或给定由于各因素的影响具有模糊性和随机性的特点, 为了更好地表达这种模糊性和随机性, 本节用隶属云来表达隶属函数。

**定义 2** 设  $U$  是一个用精确数值表示的论域,  $\tilde{A}$  是  $U$  上对应的定性概念, 对于论域的任意一个元素  $x$ , 都存在一个有稳定倾向的随机数  $y = \mu_{\tilde{A}}(x)$ , 叫做  $x$  对  $\tilde{A}$  的隶属度。  $x$  在论域上的分布称为隶属云<sup>[16]</sup>。

隶属云用期望值  $E_e$ 、熵  $E_n$ 、超熵  $H_e$  3 个数字特征来表征, 如果隶属度函数只用  $E_e$  和  $E_n$  来表达, 则转化为普通的确定性隶属度函数, 超熵  $H_e$  的引入使得隶属云既可以反映模糊性又可以反映随机性。采用正向云发生器计算隶属度, 具体步骤如下:

**步骤 1** 生成一个期望值为  $E_n$ , 方差为  $H_e$  的正态随机数, 记为  $E'_n$ ;

**步骤 2** 生成一个期望值为  $E_x$ , 方差为  $E'_n$  的正态随机数, 记为  $d$ ;

**步骤 3** 令  $d$  为评估的一次评价分数, 由式(11)计算得到该评价分数的隶属度。

$$f(d) = e^{-\frac{(d-E_x)^2}{2(E'_n)^2}} \quad (11)$$

在对网络系统可生存性评估时, 给定评判集  $V = \{\text{非常差, 很差, 较差, 差, 一般, 好, 较好, 很好, 非常好}\}$ , 对应的决策值  $X = \{0, 12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75, 87.5, 100\}$ , 则该评判集的隶属云如图 2 所示。与原有的确定性隶属度函数相比, 基于隶属云的隶属度函数不再是对应确定的隶属度值, 而是在一个小的范围内随机变化。

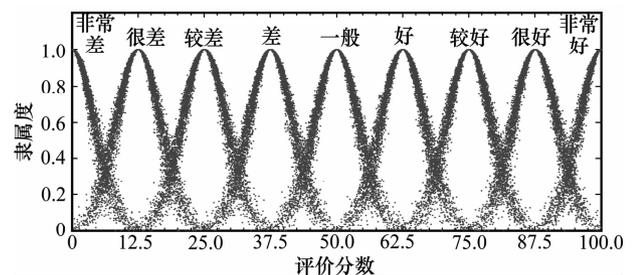


图 2 评判集的隶属云

### 4 实例分析

以某网络系统为例,根据其相关机制选取如图 1 所示的指标体系对其可生存性进行评估。

首先计算评估指标的权重,AHP 是一种常用的评估方法,这里不再赘述计算步骤,直接给出 AHP 得到的主观权重结果  $W_s = (0.11, 0.15, 0.09, 0.08, 0.06, 0.08, 0.13, 0.09, 0.04, 0.09, 0.04, 0.04)$ 。

采用粗糙熵方法计算客观权重。给出历史的可生存性评估指标值共 100 组数据(已经标准化)作为计算客观权重的数据集,如表 1 所示,12 个指标分别用  $a_1 \sim a_{12}$  表示。

对表 1 的数据进行离散化处理,用  $d$  表示表 1 中的评价价值, $d'$  表示离散后的评价价值,则当  $d \in [0.2, 0.45)$  时,  $d' = 1$ ; 当  $d \in [0.45, 0.7)$  时,  $d' = 2$ ; 当  $d \in [0.7, 0.95)$  时,  $d' = 3$ , 其中  $0.2 \leq d \leq 0.95$ 。

表 1 历史评估数据集

U	A											
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$
1	0.82	0.67	0.55	0.43	0.65	0.34	0.47	0.72	0.67	0.76	0.7	0.5
2	0.47	0.65	0.52	0.41	0.71	0.50	0.53	0.79	0.71	0.66	0.7	0.6
3	0.21	0.62	0.42	0.47	0.41	0.65	0.49	0.54	0.49	0.62	0.6	0.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	0.66	0.39	0.86	0.42	0.57	0.59	0.54	0.68	0.63	0.66	0.5	0.4

根据式(2)计算得到各指标的重要度为

$$\begin{aligned}
 &Sig(a_1, A) = 0.027\ 7; & Sig(a_2, A) &= 0 \\
 &Sig(a_3, A) = 0.151\ 2; & Sig(a_4, A) &= 0.086\ 8 \\
 &Sig(a_5, A) = 0; & Sig(a_6, A) &= 0 \\
 &Sig(a_7, A) = 0.055\ 4; & Sig(a_8, A) &= 0 \\
 &Sig(a_9, A) = 0.013\ 9; & Sig(a_{10}, A) &= 0 \\
 &Sig(a_{11}, A) = 0.013\ 9; & Sig(a_{12}, A) &= 0
 \end{aligned}$$

$D =$

47	62	38	65	37	49	60	24	78	35	64	69
62	64	39	89	67	82	77	32	26	64	83	87
67	61	67	34	26	67	65	34	52	68	78	83
65	32	38	67	49	85	67	36	68	64	67	72
64	38	75	65	64	38	69	34	66	54	86	47

(12)

其中,重要度为 0 表示在去掉该指标后,全体指标体系的不可分辨关系不受影响,即该指标在指标体系的不可分辨关系中不起任何作用。由式(3)计算得到客观权重  $W_o = (0.08, 0, 0.43, 0.25, 0, 0, 0.16, 0, 0.04, 0, 0.04, 0)$ 。

由式(6)、式(7)和式(11)计算得到隶属度权重矩阵为

$R =$

0	0	0	0.03	0.17	0.7	0.1	0	0
0	0	0.05	0.29	0.02	0.62	0.02	0	0
0	0	0	0.6	0.02	0.14	0.24	0	0
0	0	0.03	0.17	0	0.49	0.08	0.22	0.01
0	0	0.18	0.36	0.18	0.27	0.01	0	0
0	0	0	0	0.32	0.16	0.18	0.34	0
0	0	0	0	0.01	0.63	0.36	0	0
0	0.01	0.32	0.67	0	0	0	0	0
0	0	0.22	0.01	0.2	0.29	0.26	0.02	0
0	0	0.02	0.18	0.14	0.57	0.09	0	0
0	0	0	0	0	0.31	0.31	0.38	0
0	0	0	0	0.19	0.1	0.32	0.39	0

(13)

由专家给定图 1 中 9 个机制的重要度  $Y = \{0.18, 0.11, 0.09, 0.11, 0.07, 0.13, 0.16, 0.11, 0.04\}$ , 由式(4)计算得到评估指标的关联权重  $W_r = (0.15, 0.15, 0.15, 0.07, 0.07, 0.07, 0.11, 0.11, 0.06, 0.04, 0.01, 0.01)$ 。

式(5)中,给定  $\mu_s = 0.5, \mu_o = 0.2, \mu_r = 0.3$ , 计算得到各指标对应的组合权重  $W = (0.11, 0.12, 0.18, 0.11, 0.05, 0.06, 0.13, 0.08, 0.05, 0.06, 0.03, 0.02)$ 。

各指标的主观权重、客观权重、关联权重及组合权重如图 3 所示。

则模糊综合评估结果向量  $E = (0, 0.000\ 8, 0.056\ 1, 0.247\ 7, 0.076\ 4, 0.395\ 5, 0.157\ 6, 0.064\ 8, 0.001\ 1)$ , 根据评判集对应的决策集值计算得到具体的评估值  $EA = 56.84$ 。

### 5 结论

本文对网络系统可生存性综合评估问题进行了研究,提出了一种机制关联的网络系统可生存性指标体系构建方法及基于组合赋权的生存性模糊综合评估方法。与其他生存性综合评估方法相比,本文给出方法的合理性主要体现在

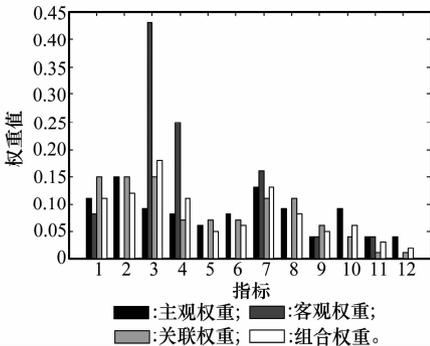


图 3 权重比较图

5 个专家对该网络系统评价的评价值矩阵为

在以下 3 个方面:①采用机制关联的方式构建可生存性指标体系,该指标体系具备开放性、细致性、灵活性、完备性、演化性的特点;②建立关联权重概念,并将其与主客观权重、客观权重通过最优化方法联合,克服指标体系中指标地位不均衡的问题;③模糊综合评估中,用隶属云作为隶属度函数,增加了评估的随机性特点,使得评估结果更贴近实际情况。在下一步工作中,拟在完备的指标体系基础上优化指标选取,提高指标评估的效率。

## 参考文献:

- [1] James P S, Hutchison D, Chtinkaya E K, et al. Resilience and survivability in communication networks: strategies, principles, and survey of disciplines[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(8):1245-1265.
- [2] Lima M N, Santos A L, Pujolle G. A survey of survivability in mobile Ad Hoc networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1):66-77.
- [3] Ma Z S, Krings A W. Dynamic hybrid fault modeling and extended evolutionary game theory for reliability, survivability and fault tolerance analyses[J]. *IEEE Trans. on Reliability*, 2011, 60(1):180-196.
- [4] Ellison R J, Fisher D A, Linger R C, et al. Survivable network systems: an emerging discipline[R]. Pittsburgh, PA, USA: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 1997:2-7.
- [5] Wei F L, Han Z G, Tian Y, et al. Survivability evaluating method of rational communication network[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2006, 7(1):96-98. (魏福林, 韩中庚, 田园, 等. 野战地域通信网拓扑结构生存性的一种评价方法[J]. 信息工程大学学报, 2006, 7(1):96-98.)
- [6] Gierszewski T, Molisz W. Towards an ideal network; survivability issues in selected topologies[C]// *Proc. of the Ultra Modern Telecommunications & Workshops*, 2009:1-6.
- [7] Heegaard P E, Trivedi K S. Network survivability modeling[J]. *Computer Networks*, 2009, 53(8): 1215-1234.
- [8] Zuo Y J, Lande S, Pimple M. Analysis and simulation of system survivability [C] // *Proc. of the International Conference on Information Technology*, 2010:36-41.
- [9] Wang J, Wang H Q, Zhao G S. Fuzzy comprehensive assessment in network survivability based on the uncertain AHP [J]. *Computer Science*, 2006, 33(6):73-75. (王健, 王慧强, 赵国生. 基于不确定型 AHP 的网络生存能力模糊综合评估[J]. 计算机科学, 2006, 33(6):73-75.)
- [10] Chen J L, Liu X J, Chen C. Determination of objective weight of expert based on linguistic decision matrix[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(6):1310-1316. (陈俊良, 刘新建, 陈超. 基于语言决策矩阵的专家客观权重确定方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(6):1310-1316.)
- [11] Zhang P, Huang K Z, He X J, et al. Heterogeneous wireless network selection algorithm based on combinational weight[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(10): 2501-2505. (张鹏, 黄开枝, 贺晓珺, 等. 基于组合权重的异构无线网络选择算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(10):2501-2505.)
- [12] Al-Azab F G. Web based multi criteria decision making using AHP method[C]// *Proc. of the Information and Communication Technology for the Muslim World*, 2010:6-12.
- [13] Cui G B, Li Y J. Fuzzy multiple criteria decision making method and application based on rough entropy weight[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(4):408-412. (崔广彬, 李一军. 基于粗糙熵权的模糊多准则决策方法及应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(4):408-412.)
- [14] Wang J Q, Li J J. Multi-criteria fuzzy decision-making method based on cross entropy and score functions[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(1):1032-1038.
- [15] Dalalah D, Hayajneh M, Batieha F. A fuzzy multi-criteria decision making model for supplier selection[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(7):8384-8391.
- [16] Cai J P, Xiao Z T, Li X D. Survivability evaluation of military information networks based on cloud model[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(20):11-15. (蔡均平, 肖治庭, 李雪冬. 基于云模型的军事信息网络可生存性评估[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(20):11-15.)

## 作者简介:

伍文(1985-),女,博士研究生,主要研究方向为网络可生存性。

E-mail:w.w.850608@163.com

孟相如(1963-),男,教授,博士后,主要研究方向为宽带通信网络技术。

E-mail:xrmeng@126.com

马志强(1968-),男,副教授,硕士,主要研究方向为宽带网络通信技术。

E-mail:mazqxa@sina.com

梁霄(1988-),女,硕士研究生,主要研究方为网络安全态势评估。

E-mail:lxiao163@163.com