

DOI: 10.7667/PSPC161085

## 基于物元可拓模型的电力通信网风险评估

何玉钧, 刘毅, 周生平

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071000)

**摘要:** 为了有效掌握电力通信网的风险状况并指导运维工作, 需要剖析电力通信网的风险影响因素并对其风险进行评估。通过系统分析电力通信网风险影响因素, 建立了三级递阶层次结构的电力通信网风险评估指标体系。基于物元可拓理论及层次分析法构建了电力通信网风险定量评估模型。利用该模型对某电力通信网风险进行评估, 通过评估得到了该通信网各评估指标及网络整体风险等级。评估结果对于全面标识电力通信网运行过程中的脆弱环节, 指导运维工作的有效开展, 促进电力通信网的差异化管理和科学决策具有积极指导意义。

**关键词:** 电力通信网; 物元可拓模型; 层次分析法; 风险评估

### Risk evaluation for electric power communication network based on matter-element extensible model

HE Yujun, LIU Yi, ZHOU Shengping

(Dept of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** It is essential to analyze the risk influential factors and evaluate the operational risk status for power communication network so as to identify the risk of the power communication network and guide the operation and maintenance work. First, based on the systematic analysis of the risk influential factors of power communication network, the risk evaluation index system with three-level hierarchical structure is established. Then, the quantitative risk evaluation model for power communication network is constructed based on matter-element extensible model and analytical hierarchy process theory. Through applying the model to a certain practical power communication network, the risk level for each influential factor and the whole network can be obtained. The evaluation results can provide positive and instructional significance for generally identifying the vulnerabilities in power communication network operation process, guiding the operation and maintenance work, and promoting the differentiated management and scientific decision-making for power communication network.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 13MS64) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. XXB51201501250).

**Key words:** electric power communication network; matter-element extensible model; analytic hierarchy process method; risk evaluation

## 0 引言

电力通信网的高效运行是保障电网安全、稳定、经济运行的重要环节, 科学、完善的风险评估与预警机制成为电力通信网管理中的重点内容。一直以来, 相关研究人员在电力通信网的风险评估领域开展了大量工作, 从多方面剖析了电力通信网风险因素, 并建立多种评估模型与方法, 主要包括基于概率论的方法<sup>[1]</sup>、基于可靠性理论的方法<sup>[2-4]</sup>、基于模

糊理论的方法<sup>[5]</sup>、基于人工智能的方法<sup>[6]</sup>、构建层次模型的方法<sup>[7-8]</sup>等, 各种评估模型及其评估结果为电力通信网的风险管控、业务可靠性的提升<sup>[9]</sup>提供了理论支持。但是现有的评估方法多数得到的是一个评估特征值, 可以通过对比分析多个评估对象得到各自的优劣信息, 不能对评估结果进行分档从而实现了对评估对象集的差异化管理。基于模糊理论的评估方法在电力系统脆弱性评估<sup>[10]</sup>、电网运行及维护<sup>[11-12]</sup>等领域得到了较为广泛的应用, 实践表明该方法保留了评估对象的模糊性, 保障了多指标、差异化的评估需求, 但是指标模糊化的过程复杂, 并且模糊隶属度函数缺乏统一的标准, 人为干扰因素

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(13MS64);  
国家电网公司科技项目(XXB51201501250)

影响较大, 造成评估结果难以让人满意。可拓学是一种定性定量相结合的方法<sup>[13]</sup>, 该方法以物元理论和可拓集合论作为理论框架, 能够将定性指标转化成定量指标并得到评估对象的优劣信息和评估等级, 从而为多属性评估对象提供较好的综合评价模型和决策指导。

目前, 物元可拓模型在电能质量评估<sup>[14-15]</sup>、电网风险评估<sup>[16]</sup>和用电安全风险评估<sup>[17]</sup>等领域得到了应用, 相关应用证明物元可拓理论在评估中既能得到单个属性的评估等级, 又能从整体上对评估对象进行评价, 从而为电能质量的提升、电网风险的管控等工作提供高效指导。但是, 物元可拓评价理论在这些领域应用时, 其关联函数不涉及评估指标的方向特征, 因此, 为了保证物元可拓理论在电力通信网风险评估的应用效果, 其关联函数的选取需要符合电力通信网风险指标特征。

本文从定量和定性相结合的角度出发, 选取符合电力通信网风险指标特征的关联函数, 以克服物元可拓模型应用于电力通信网风险评估中的不足之处, 旨在运用物元可拓模型实现电力通信网风险评估并为电力通信网风险管控提供指导。

## 1 物元可拓模型

采用物元可拓模型进行评估的基本思路为: 首先将评估对象分级并赋予各级区间值域, 得到经典域集合; 接着, 利用关联函数计算指标与经典域的关联度, 关联度越大, 它与该经典域的符合程度也越大; 最后, 将指标的关联度加权聚合, 得到评估对象的整体状态。物元可拓模型的构造步骤如下。

### 1) 定义物元

物元是物元可拓模型的逻辑细胞, 给定评估对象, 其以有序三元组来作为描述事物的基本元, 表示为  $R=(N,C,V)$ , 代表事物  $N$  具有特征  $C$ , 其值为  $V$ 。假设事物具有  $n$  个特征记做  $c_1, c_2, \dots, c_n$ , 其对应量值为  $v_1, v_2, \dots, v_n$ , 那么评估对象物元定义为

$$R=(N,C,V)=\begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

在电力通信网风险评估模型中, 物元元素  $N$  代表电力通信网风险,  $C=[c_1, c_2, \dots, c_n]$  表示风险指标集合,  $V=[v_1, v_2, \dots, v_n]$  为风险指标特征值集合。

### 2) 构建经典域和节域

经典域是区分评估对象不同等级的区间, 反映

了研究人员对评估对象的差异化管理需求。评估对象的经典域物元定义为

$$R_j=(N_j,C,V_j)=\begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $R_j$  是评估对象在等级  $j$  下的物元;  $N_j$  为第  $j$  个评价等级;  $v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jn}$  分别是  $c_1, c_2, \dots, c_n$  对应  $N_j$  的值域, 即经典域;  $a_{ji}$  和  $b_{ji}$  为  $v_{ji}$  的取值边界。

评估对象的节域物元为

$$R_p=(N_p,C,V_p)=\begin{bmatrix} N_p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $R_p$  表示评估对象在所有等级下的物元;  $N_p$  为评估等级的集合;  $v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pn}$  分别是  $c_1, c_2, \dots, c_n$  的值域, 即节域。

在电力通信网风险评估模型中,  $R_j$  和  $R_p$  分别是风险在等级  $j$  下和在所有评估等级下的物元; 为保证评估有效性并控制计算复杂度, 将评估等级分为 5 级, 即  $j=1, 2, 3, 4, 5$ , 对应的  $N_1, N_2, N_3, N_4$  和  $N_5$  分别表示电力通信网风险级别很高、较高、一般、较低和很低; 经典域边界  $a_{ji}$  和  $b_{ji}$  的值通过参考行业标准及专家评判得出; 节域是各经典域的集合。

### 3) 确定指标权重

指标权重的设计直接影响到综合评价的可行性与质量, 为避免发生指标重要度与其实际重要性程度相悖的情况, 采用层次分析法设计权重。层次分析法赋权<sup>[18]</sup>的过程为: 首先, 对通信网风险体系同一层次各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; 接着, 由判断矩阵计算各指标的权重, 并进行一致性检验; 最后, 计算各元素对总目标的合成权重为  $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

### 4) 确定关联函数

关联函数用以反映事物具有某种性质的程度, 即评估对象与评估等级的贴近程度, 用以区分不同的层次。关联函数的一般表达式为

$$K_j(v_i)=\begin{cases} -\rho(v_i, v_{ij}), & v_i \in v_{ij} \\ \frac{\rho(v_i, v_{ij})}{D(v_i, v_{ij}, v_{pi})}, & v_i \notin v_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $K_j(v_i)$  代表指标值  $v_i$  相对于经典域  $v_{ji}$  (即等级

$j$ )的关联程度;  $\rho(v_i, v_{ji})$  表示指标值与经典域  $v_{ji}$  的可拓距离, 即

$$\rho(v_i, v_{ji}) = \begin{cases} a_{ji} - v_i, & v_i < a_{ji} \\ v_i - b_{ji}, & v_i \geq a_{ji} \end{cases} \quad (5)$$

$D(v_i, v_{ji}, v_{pi})$  表示指标值  $v_i$  与经典域和节域组成的区间套的位置关系, 即

$$D(v_i, v_{ji}, v_{pi}) = \rho(v_i, v_{pi}) - \rho(v_i, v_{ji}) \quad (6)$$

式中,  $\rho(v_i, v_{pi})$  表示指标值与节域的可拓距离, 表示为

$$\rho(v_i, v_{pi}) = v_i - b_{pi} \quad (7)$$

考虑到电力通信网风险指标往往是正向指标或者逆向指标, 因此, 本文确定的关联函数具有以下性质:  $v_i \in v_{ji}$  且  $v_i \neq a_{ji}, b_{ji}$  的充要条件是  $K_j(v_i) \in (0, 1)$ ;  $v_i = b_{ji}$  和  $v_i = a_{ji}$  的充要条件分别为  $K_j(v_i) = 1$  和  $K_j(v_i) = 0$ ; 若  $v_i \in v_p - v_{ji}$ , 则  $K_j(v_i) < 0$ 。因此, 关联函数能够有效区分数据  $v_i$  与各个经典域的关联关系, 并且关联数值的最优点在区间端点。

### 5) 确定风险等级

评估对象关于等级  $j$  的关联度表示为  $K_j(N)$ , 计算方法如式(8)。

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n w_i \times K_j(v_i) \quad (8)$$

式中,  $w_i$  为指标  $c_i$  的权重系数, 取  $K_j(N) = \max K_j(N)$ , 得到评估对象的等级为  $j$ 。

## 2 电力通信网风险评估实例

### 2.1 构建评价指标体系

目前, 电力通信网在统计指标上缺乏统一的规范, 其风险具有复杂、多维等特点, 造成指标不易量化、指标体系难以覆盖全面。本文基于现有的电力通信网统计指标规程<sup>[19]</sup>和专家意见, 从规划、运行和管理三个方面提取电力通信网的风险因素。

1) 规划类风险。规划是电力通信网生存周期内的首要环节, 此环节决定了通信网的拓扑结构和业务保障水平。电力通信网承载着保障电网运行的重要业务, 由于调整空间有限, 规划环节的设计将影响业务的可靠传输。因此, 规划风险是通信网风险首先考虑的内容。

2) 运行类风险。电力通信网实现自身特定功能的基础在于运行环节的有效进行, 通信网运行过程

中出现的设备故障、业务缺陷等问题会影响到网络性能, 不利于发挥电力通信网在监测、调度等方面的功能。电力通信网运行类风险主要关注业务运行质量和设施运行质量。

3) 电力通信网管理类风险。如今, “软件”的建设对通信网运行的影响日益增大, 管理制度、人员技能等运维资源已成为保证电力通信网有效运行、资源高效配置的重要环节。因此管理类风险也是电力通信网风险需要关注的重要环节。

根据上述分析, 本文构建了电力通信网风险评估指标体系, 如图 1 所示。

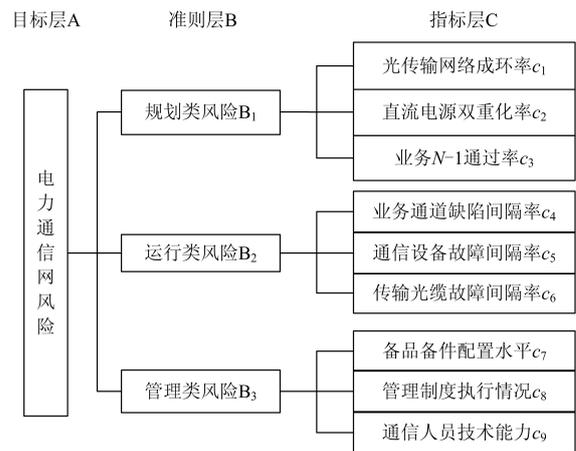


图 1 电力通信网风险评估指标体系

Fig. 1 Risk evaluation index system of electric power communication network

### 2.2 构建评价模型

1) 构建经典域。本文将电力通信网风险分为 5 个等级: 很高、较高、一般、较低和很低, 依次对应风险的各个经典域。参考行业标准, 指标  $c_1 \sim c_6$  的取值范围为 0~1, 等分这一范围即得到该类指标对应风险等级的经典域, 即风险很高等级对应 0~0.2, 风险较高等级对应 0.2~0.4, 依次类推。指标  $c_7 \sim c_9$  采用专家打分法, 5 个风险等级的经典域依次取 0~60、60~70、70~80、80~90、90~100。

2) 构建节域。各电力通信网风险评价指标的节域  $R_p$  为其对应的经典域的并集。

3) 确定待评物元。以某电力公司提供的电力通信网数据为基础得出各风险指标的取值。

物元可拓模型中各风险等级的经典域  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$  及节域  $R_p$ 、待评物元  $R$  的取值具体如下所示, 其中,  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  和  $N_5$  分别对应电力通信网风险级别很高、较高、一般、较低和很低。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_1 &= \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & (0,0.2) \\ & c_2 & (0,0.2) \\ & c_3 & (0,0.2) \\ & c_4 & (0,0.2) \\ & c_5 & (0,0.2) \\ & c_6 & (0,0.2) \\ & c_7 & (0,60) \\ & c_8 & (0,60) \\ & c_9 & (0,60) \end{bmatrix} & \mathbf{R}_2 &= \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & (0.2,0.4) \\ & c_2 & (0.2,0.4) \\ & c_3 & (0.2,0.4) \\ & c_4 & (0.2,0.4) \\ & c_5 & (0.2,0.4) \\ & c_6 & (0.2,0.4) \\ & c_7 & (60,70) \\ & c_8 & (60,70) \\ & c_9 & (60,70) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_3 &= \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & (0.4,0.6) \\ & c_2 & (0.4,0.6) \\ & c_3 & (0.4,0.6) \\ & c_4 & (0.4,0.6) \\ & c_5 & (0.4,0.6) \\ & c_6 & (0.4,0.6) \\ & c_7 & (70,80) \\ & c_8 & (70,80) \\ & c_9 & (70,80) \end{bmatrix} & \mathbf{R}_4 &= \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & (0.6,0.8) \\ & c_2 & (0.4,0.6) \\ & c_3 & (0.4,0.6) \\ & c_4 & (0.4,0.6) \\ & c_5 & (0.4,0.6) \\ & c_6 & (0.4,0.6) \\ & c_7 & (80,90) \\ & c_8 & (80,90) \\ & c_9 & (80,90) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_5 &= \begin{bmatrix} N_5 & c_1 & (0.8,1) \\ & c_2 & (0.8,1) \\ & c_3 & (0.8,1) \\ & c_4 & (0.8,1) \\ & c_5 & (0.8,1) \\ & c_6 & (0.8,1) \\ & c_7 & (90,100) \\ & c_8 & (90,100) \\ & c_9 & (90,100) \end{bmatrix} & \mathbf{R}_p &= \begin{bmatrix} N_p & c_1 & (0,1) \\ & c_2 & (0,1) \\ & c_3 & (0,1) \\ & c_4 & (0,1) \\ & c_5 & (0,1) \\ & c_6 & (0,1) \\ & c_7 & (0,100) \\ & c_8 & (0,100) \\ & c_9 & (0,100) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} N & c_1 & 0.72 \\ & c_2 & 0.80 \\ & c_3 & 0.37 \\ & c_4 & 0.68 \\ & c_5 & 0.88 \\ & c_6 & 0.52 \\ & c_7 & 52.92 \\ & c_8 & 90.79 \\ & c_9 & 82.11 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

4) 确定指标权重。经专家评判, 整理得到各判断矩阵, 其中, 准则层相对于目标层的判断矩阵为

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

指标层规划类风险各项相对于准则层规划类风

险的判断矩阵记为  $\mathbf{P}_{11}$ , 指标层运行类风险各项相对于准则层运行类风险的判断矩阵记为  $\mathbf{P}_{12}$ , 指标层管理类风险各项相对于准则层管理类风险的判断矩阵记为  $\mathbf{P}_{13}$ , 即

$$\mathbf{P}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 1 \\ 3 & 1 & 3 \\ 1 & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{P}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 2 \\ \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 3 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{P}_{13} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

计算各级指标权重并经一致性检验后, 合成指标权重如表 1 所示。

表 1 风险评级关联表

Table 1 Related information of risk grade

指标	很高	较高	一般	较低	很低	权重
$c_1$	-0.6500	-0.5333	-0.3000	0.4000	-0.2222	0.08
$c_2$	-0.7500	-0.6667	-0.5000	0.0000	0.2000	0.24
$c_3$	-0.2125	0.0500	-0.0455	-0.2674	-0.4057	0.08
$c_4$	-0.6000	-0.4667	-0.2000	0.6000	-0.2727	0.232
$c_5$	-0.8500	-0.8000	-0.7000	-0.4000	0.1200	0.044
$c_6$	-0.4000	-0.2000	0.2000	-0.1429	-0.3684	0.124
$c_7$	0.1770	-0.1307	-0.2662	-0.3652	-0.4406	0.04
$c_8$	-0.7698	-0.6930	-0.5395	-0.0790	9.2100	0.08
$c_9$	-0.5528	-0.4037	-0.1055	0.7890	-0.3061	0.08

### 2.3 确定风险等级

利用式(4)计算得到风险指标与各等级的关联度如表 1 所示, 将表 1 数据和权重代入式(8)得到电力通信网风险同各等级的关联度为

$$K_1(N) = \sum_{i=1}^9 w_i \times K_1(v_i) = -0.5739$$

$$K_2(N) = \sum_{i=1}^9 w_i \times K_2(v_i) = -0.4599$$

$$K_3(N) = \sum_{i=1}^9 w_i \times K_3(v_i) = -0.2623$$

$$K_4(N) = \sum_{i=1}^9 w_i \times K_4(v_i) = 0.1567$$

$$K_5(N) = \sum_{i=1}^9 w_i \times K_5(v_i) = 0.5888$$

由于  $K_5(N) = \max K_j(N)$ , 因此得到电力通信网风险等级为“很低”。

进一步分析表 1 数据, 评估对象中存在 1 项风险“很高”的指标: 备品备件配置水平, 1 项风险“较高”的指标: 业务  $N-1$  通过率, 说明该通信网在通信设施缺陷应急和业务通道安排方面存在隐患, 两者属于风险管控中需要重点关注的内容, 需要在网络规划、改造时开展有针对性的改进, 同时, 业务  $N-1$  通过率的权重更大, 说明通信网风险的变化对该指标更为敏感, 需要给予更多关注; 存在 1 项风险“一般”的指标: 传输光缆故障间隔率, 需

要给予一定重视并适当改进日常管理方法, 针对传输光缆的运行环境、老化水平等细致安排检修计划; 另外各有 3 项指标的风险处于“较低”和“很低”的水平, 相对只投入较少资源并继续执行日常管理维护规程即可。由此可知, 电力通信网风险具有复杂性和多维度的特点, 在日常管理工作中, 管理人员应该重点关注风险较大、更为敏感的因素, 及时有针对性地开展管理工作, 以期控制并降低电力通信网的风险。

### 3 结论

本文构建了基于物元可拓模型的电力通信网风险评估模型。该模型的特点在于: 构建了电力通信网风险评估的层次体系; 采用层次分析法设计指标权重; 指标聚合环节选取契合指标特性的关联函数, 在体现电力通信网风险因素自身的模糊性和不确定性的同时, 保证了评估结果的客观性和精确性。

实例证明, 本文建立的评估模型能够全面衡量电力通信网的风险情况。通过分析风险指标同各等级区间的关联关系, 能够有效掌握通信网运行的整体状况和脆弱环节, 切实指导通信网后期规划和日常运维工作有的放矢地进行, 有利于实现电力通信网的差异化管理和科学决策。

### 参考文献

- [1] 张戈, 田之俊. 电力光纤通信网运行水平量化评估[J]. 电力信息与通信技术, 2013, 11(8): 31-34.  
ZHANG Ge, TIAN Zhijun. Quantitative evaluation of optical fiber communication network operation risks[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2013, 11(8): 31-34.
- [2] 蒋康明, 曾瑛. 基于业务的电力通信网风险评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 101-106.  
JIANG Kangming, ZENG Ying. Risk evaluation method of electric power communication network based on services[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 101-106.
- [3] 程晓荣, 张兰, 岳娇. 基于粗糙集属性约简的评估模型在电力通信网风险评估中的应用及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 44-48.  
CHENG Xiaorong, ZHANG Lan, YUE Jiao. Application and implementation of the assessment model based on rough set attribute reduction in power communication network risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 44-48.
- [4] 樊冰, 唐良瑞. 电力通信网脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1191-1197.  
FAN Bing, TANG Liangrui. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1191-1197.
- [5] 高会生. 基于相容\_粗糙集的电力通信网风险评估[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(12): 106-108.  
GAO Huisheng. Risk evaluation of electric power communication network based on tolerant rough-fuzzy set[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(12): 106-108.
- [6] 元峰, 李琪. 基于神经网络的电力通信网风险评估方法[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(1): 90-93.  
QI Feng, LI Qi. A neural network based method to access electric power communication network risk[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(1): 90-93.
- [7] 徐键, 郭少勇. 基于层次分析的电力通信网风险评估机制[J]. 电信技术, 2013(3): 73-75.  
XU Jian, GUO Shaoyong. Risk evaluation mechanism of electric power communication network based on AHP[J]. Telecommunications Technology, 2013(3): 73-75.
- [8] 田丹, 刘蒙. 基于层次分析法的配电通信网运行风险量化评估[J]. 电气应用, 2015(增刊 1): 44-47.  
TIAN Dan, LIU Meng. Operation risk evaluation of power distribution communication network based on AHP[J]. Electrotechnical Application, 2015(S1): 44-47.
- [9] 何玉钧, 陈冉, 张文正. 一种电力通信网最大不交叉双路由配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 61-67.  
HE Yujun, CHEN Ran, ZHANG Wenzheng. A maximally disjoint routing algorithm for power communication networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 61-67.
- [10] 丁明, 过羿, 张晶晶. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.  
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [11] 张静怡, 刘艳霍, 明雷. 基于模糊熵权 Vague 集的配电网检修决策优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 37-45.  
ZHANG Jingyi, LIU Yanhuo, MING Lei. The maintenance decision optimization for distribution networks based on fuzzy entropy weight of vague set[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 37-45.
- [12] 郭东王, 佩成, 李亚. 基于多层次模糊评估的配电网

- 节能潜力综合评价方法[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 66-70.
- GUO Dongwang, PEI Cheng, LI Ya. Energy-saving potential comprehensive evaluation method of distribution network based on multilevel fuzzy evaluation[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 66-70.
- [13] 蔡文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1190-1199.
- CAI Wen, YANG Chunyan. Basic theory and methodology on extenics[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1190-1199.
- [14] 李泓泽, 郭森. 基于改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 654-657.
- LI Hongze, GUO Sen. Comprehensive evaluation on power quality based on improved matter-element extension model with variable weight[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 654-657.
- [15] 李玲玲, 刘敬杰, 凌跃胜. 物元理论和证据理论相结合的电能质量综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 383-391.
- LI Lingling, LIU Jingjie, LING Yuesheng. Power quality comprehensive evaluation based on matter-element theory and evidence theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 383-391.
- [16] 史智萍, 单体华. 基于物元-可拓模型的电网运行水平综合评价[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3233-3238.
- SHI Zhiping, SHAN Tihua. Comprehensive evaluation of power network operation risk based on matter-element extensible model[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3233-3238.
- [17] 赵建立, 周雯娟. 基于用户责任的重要电力用户用电安全风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 71-77.
- ZHAO Jianli, ZHOU Wenjuan. Electrical safety assessment for important power users based on user's responsibility[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 71-77.
- [18] 李存斌, 宋易阳. 基于 AHP-熵权法的电力企业信息化应用效果模糊综合评价[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 48-52, 82.
- LI Cunbin, SONG Yiyang. Performance fuzzy comprehensive evaluation of electric power enterprise informatization application based on AHP-entropy[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 48-52, 82.
- [19] 电力通信设备及业务统计规范: Q/GDW 11344—2014[S]. 北京: 国家电网公司, 2015.
- Statistical analysis specification for power system communication equipments and services: Q/GDW 11344—2014[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2015.

收稿日期: 2016-07-15; 修回日期: 2016-08-22

作者简介:

何玉钧(1974—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力通信网管理安全风险评估;

刘毅(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力通信网管理安全风险评估; E-mail: 2401217541@qq.com

周生平(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力通信网管理安全风险评估. E-mail: 1204518399@qq.com

(编辑 魏小丽)