

DOI: 10.7667/PSPC180151

# 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估

周剑<sup>1</sup>, 罗添允<sup>2</sup>, 李智勇<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 俞蕙<sup>3</sup>, 朱建全<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640;  
3. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510623)

**摘要:** 针对电力系统的停电影响综合评估问题, 提出了一种新的改进可拓层次分析法(Improved Extension Analytic Hierarchy Process, IEAHP)。首先, 建立停电影响的指标体系以全面表征各次停电的影响程度。其次, 根据历史停电数据与评估专家的经验, 划分出停电严重程度等级, 并运用可拓集理论计算停电事件的指标与等级隶属度。接着, 利用可拓区间的形式构建判断矩阵以解决专家的主观赋权模糊性问题, 并通过客观的专家权重分配方式对各个判断矩阵进行合并计算, 从而实现停电影响的综合评估。最后, 将所提方法用于实际停电事件评估, 所得结果证明了其有效性。

**关键词:** 停电影响; 综合评估; 可拓层次分析法; 主观赋权模糊性; 专家权重分配

## Comprehensive evaluation of power failure based on improved extension analytic hierarchy process

ZHOU Jian<sup>1</sup>, LUO Tianyun<sup>2</sup>, LI Zhiyong<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, YU Hui<sup>3</sup>, ZHU Jianquan<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Power Dispatch Control Center, Guangzhou 510623, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** Aiming at the comprehensive evaluation of the impact of power failure on power systems, a new Improved Extension Analytic Hierarchy Process (IEAHP) is presented in this paper. Firstly, the indicator system is established to fully characterize the impact of each power failure. Secondly, the power failure levels are divided based on historical data of power failures and experience of evaluation experts, and then the extension set theory is used to calculate the membership of the indicators to the levels. Thirdly, the judgment matrix is constructed by the extension interval in order to reduce the experts' subjective empowerment vagueness, then the judgment matrices are combined through the objective allocation of expert weights so as to provide a comprehensive assessment of the impact of power failure. Finally, the proposed method is applied to the assessment of real power failures, and the results prove its effectiveness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307064), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (No. 000000KK52150001), and Fundamental Research Fund for the Central Universities (No. 2017ZM0022).

**Key words:** power failure impact; comprehensive evaluation; extension analytic hierarchy process; subjective empowerment vagueness; objective allocation of expert weights

## 0 引言

保证电力系统的安全运行是电力工作的首要任务。一旦发生停电事件, 将会对经济社会造成较大的危害, 并给人民生活带来不便<sup>[1-2]</sup>。在这种情况下,

有必要及时评估停电造成的整体影响, 一方面为相应级别的应急措施制定提供依据, 提高停电事件的应对处理能力, 使损失降至最低; 另一方面便于发现电网的薄弱环节, 提高电网运行规划水平, 保障电力供应安全<sup>[3-4]</sup>。

目前已有大量学者对电力系统的安全性、经济性问题进行评估<sup>[5-7]</sup>, 但具体针对停电影响综合评估的研究还相对较少。在评估面的赋权方面, 较有代表性的方法包括模糊评价法、灰色综合评估法、

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51307064); 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(000000KK52150001); 中央高校基本科研业务费项目资助(2017ZM0022)

蒙特卡罗法、德尔菲法和熵权法等，具体又可归为主观性评估法、客观性评估法、主观与客观组合评估法三类<sup>[8-10]</sup>。其中，主观评估法根据决策者对评估面的注重程度确定权值，适用于决策者对评估面的要求较为明确的评估，主要面临的问题是决策者由于经验存在差异在赋权过程中容易出现矛盾。客观评估法根据大量的历史数据确定各评估面的权重，计算结果受样本的影响较大。主观与客观组合评估法兼具二者的特点，但在主观因素与客观因素的权值界定方面也存在一定的困难。

在形成综合的评估结果方面，层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 由于逻辑清晰、操作性强而广受青睐。文献[11]运用层次分析法对多种供电模式进行评估，文献[12]基于层次分析法分析了配电网的供电效益，当判断指标的相对重要性不一致时，需要不断调整判断矩阵以满足一致性条件。但是调整方式并不明确，调整过程存在一定的盲目性。文献[13]利用遗传算法对层次分析法进行改进，通过对判断矩阵进行非线性优化，使其达到最佳的一致性状态，并在区域电网的安全风险评估得到了成功的应用。文献[14]将模糊评价法与层次分析法相结合，并用于火电企业的节能评价，在一定程度上考虑了专家判断的模糊性，但评估结果易受专家认识水平的影响。一旦个别专家由于认识错误而产生异常判断矩阵，评估结果可能会受到较大影响。

可拓学理论是近年提出的一种综合分析方法，已在人工智能、控制、经济和管理等领域的评估分析取得了成功的应用<sup>[15]</sup>，但在电力系统的应用还比较少。可拓学理论能描述事物具有某种性质的程度并将其量化，在对象比较复杂、主观判断容易产生模糊时具有较好的评估效果，有利于解决停电事件评估中专家主观判断的不确定性问题。此外，可拓学理论作为一种开放的评估分析方法，在理论上可以与层次分析法天然衔接，从而形成对某次停电事件影响情况的天然评估。

基于上述分析，本文提出一种改进的可拓层次分析法，并用于停电影响的综合评估。该方法将传统层次分析法的判断矩阵变成可拓区间矩阵，将专家的定性认知转化为一个数值范围，有利于解决专家主观判断的不确定性问题。从一致性要求出发，用较为客观的方式为专家赋权，从而解决个别专家认知错误引起的一致性问题<sup>[16]</sup>。将所提方法用于停电事件影响等级划分与综合评估，有利于得到较为全面、客观的停电影响综合评估结果。

## 1 总体思路

本文所提的基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估方法的框架如图 1 所示。从图 1 中可以看出，该框架包括停电评估基本模型的建立以及综合模型的形成两个环节。在基本模型的建立环节，主要在可拓学理论的方法框架下对停电事故的各种指标的评估等级进行划分，并通过关联矩阵的方式建立停电事件的各种指标对不同评估等级的从属关系。在综合模型的环节，则主要通过可拓层次分析法对各个基本模型的评估结果进行综合，从而得到停电影响的综合评估结果。

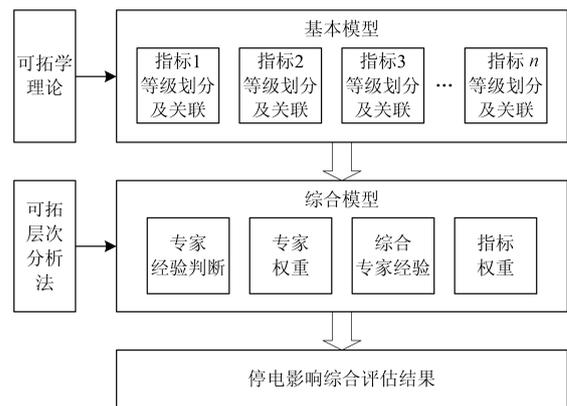


图 1 停电影响综合评估框架

Fig. 1 Comprehensive evaluation framework of power failure

## 2 基于改进可拓层次分析的停电评估模型

### 2.1 停电影响评估指标体系

评价指标体系由多个反映评价对象各方面性质以及互关系的指标组成，是可拓学理论分析的基础。合理的指标体系可提高评估效率并增加评估的全面性<sup>[17]</sup>。

已有的表征停电事故严重程度的指标繁多，但从实用化的角度考虑，采用的指标不宜过多，且应保持独立性并遵循可量化原则。按照该原则，常用的反映停电影响程度的指标为：停电用户数、用户重要性等级、停电时间、损失负荷等<sup>[18-19]</sup>。其中，停电用户数直观地体现了停电事故的影响范围；用户的重要性等级进一步反映了受影响的用户的性质；停电时间和损失负荷则从时间和负荷功率两个维度反映了这些用户受影响的程度。这些指标从不同的角度表征了停电影响情况，满足独立性原则。同时，停电用户数、停电时间、损失负荷可以统计得到，用户性质的划分也已形成明确的标准，满足可量化原则。利用上述指标对停电影响进行评估，其逻辑关系如图 2 所示。

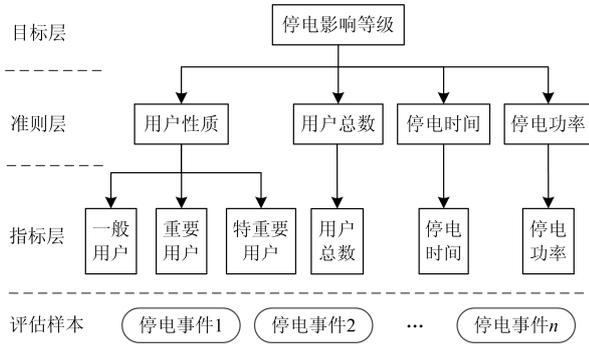


图 2 停电影响评估指标体系

Fig. 2 Indicator system for evaluation of power failure

## 2.2 停电影响评估基本模型

### 2.2.1 可拓学理论简介

可拓理论主要用于研究事物特性的拓展规律，是一门将定性的矛盾问题形式化、逻辑化和数学化处理的学科<sup>[15]</sup>。物元理论和可拓集理论是可拓理论的两大支柱。其中，物元理论收集了事物的内部信息，可拓集则描述了事物具有某种性质的程度并将其量化。以下将结合上述的停电影响评估指标体系，基于可拓学理论建立停电影响评估的基本模型，具体包含停电影响评价物元与关联矩阵计算两个方面。

### 2.2.2 停电影响评价物元

在可拓学理论中，物元由 3 个元素构成，记为  $R = (N, C, V)$ ，其中  $N$  为评价对象名称， $C$  为特征指标， $V$  为指标量值。在具体应用中，主要包括 3 种物元：经典域、节域和待评估物元。

1) 经典域。在停电影响评估中，可通过经典域表示各停电影响评价等级对应的指标的取值范围，具体如式(1)所示。

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j, c_1, \langle a_1, b_1 \rangle \\ c_2, \langle a_2, b_2 \rangle \\ c_3, \langle a_3, b_3 \rangle \\ c_4, \langle a_4, b_4 \rangle \\ c_5, \langle a_5, b_5 \rangle \\ c_6, \langle a_6, b_6 \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $N_j$  为第  $j$  个停电影响评价等级； $\langle a_1, b_1 \rangle$  表示第  $j$  评价等级下  $c_1$  指标的取值区间； $c_1 \sim c_6$  依次为图 2 中指标层的 6 个指标。

2) 节域。节域可以表示停电影响评估体系中各个指标的全部取值范围，是经典域的所有取值范围的并集，具体如式(2)所示。

$$R_p = \begin{bmatrix} N, c_1, \langle d_1, e_1 \rangle \\ c_2, \langle d_2, e_2 \rangle \\ c_3, \langle d_3, e_3 \rangle \\ c_4, \langle d_4, e_4 \rangle \\ c_5, \langle d_5, e_5 \rangle \\ c_6, \langle d_6, e_6 \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $N$  表示全体停电影响等级； $\langle d_1, e_1 \rangle$  表示  $c_1$  的所有评估等级的取值区间。

3) 待评估物元。为了对某次停电事件进行评估，可将其各项停电数据转化成物元，有

$$R = \begin{bmatrix} N_0, c_1, x_1 \\ c_2, x_2 \\ c_3, x_3 \\ c_4, x_4 \\ c_5, x_5 \\ c_6, x_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $N_0$  为待评估的停电事件代号； $x_i$  为  $c_i$  的值。

### 2.2.3 关联矩阵的计算

关联矩阵可以描述停电数据中的各个指标值对各个评估等级区间的从属关系，具体计算公式为

$$k(x) = \begin{cases} \frac{\rho(x, x_0, X_0)}{\rho(x, X) - \rho(x, X_0)} & \rho(x, X) - \rho(x, X_0) \neq 0 \\ -\rho(x, x_0, X_0) - 1 & \rho(x, X) - \rho(x, X_0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (5)$$

$$\rho(x, X) = \left| x - \frac{d+e}{2} \right| - \frac{e-d}{2} \quad (6)$$

式中： $x$  为停电事件的指标统计值； $k$  为各指标对相应等级的从属系数； $a$ 、 $b$  分别对应式(1)中各个指标取值区间的上、下限； $d$ 、 $e$  分别对应式(2)中各个评估等级的取值区间的上、下限。

式(4)中  $\rho$  的优值位于等级区间的左侧，因此选取左测距公式进行计算，具体如式(7)所示<sup>[20]</sup>。

$$\rho(x, x_0, X_0) = \begin{cases} a-x & x \leq a \\ x-b & x > a \end{cases} \quad (7)$$

如果关于停电影响的  $n$  个指标有  $m$  个评价等级，则关联矩阵  $K$  有  $n \times m$  个元素，具体为

$$K = \begin{bmatrix} k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1m} \\ k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2m} \\ \vdots \\ k_{n1}, k_{n2}, \dots, k_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 2.3 停电影响综合评估方法

从上述的关联矩阵可知停电事件的每个指标对各个评估等级的从属情况。然而在通常情况下，各指标的评价等级并不相同，这就需要对各个指标所反映的停电影响情况进行综合分析<sup>[21]</sup>。

本文将可拓集理论中的模糊集与层次分析法相结合，利用多位专家形成表征指标相对重要性的判断矩阵，并根据该判断矩阵计算出各指标的权重值，从而形成对停电事件的影响情况的综合判断。然而，该方法中综合判断矩阵由各个专家的判断矩阵等权求和得到，若个别专家的认知水平与其他专家相差较大或者其判断矩阵存在一致性问题，则难以得到合理的权重值。为了解决这个问题，本文对综合判断矩阵的合成方法进行改进，以非等权求和的方式综合各个专家的判断矩阵，从而变相地减小个别专家的认知错误的影响。具体步骤如下。

步骤 1: 邀请  $T$  位专家按照表 1 的规则比较每个指标，给出比较得分区间，并结合一致性原则形成判断矩阵  $A$  的可拓区间。

$$a_{ii} = 1, a_{ij} = \langle a_{ij}^-, a_{ij}^+ \rangle, a_{ji} = \langle \frac{1}{a_{ij}^+}, \frac{1}{a_{ij}^-} \rangle$$

式中， $a_{ij}$  代表判断矩阵  $A$  第  $i$  行第  $j$  列的区间元素。

表 1 判断矩阵形成规则

Table 1 Formation rules of judgment matrix

| 标度 | 含义              |
|----|-----------------|
| 1  | 两个元素具有相同重要性     |
| 3  | 前一个元素比后一个元素稍微重要 |
| 5  | 前一个元素比后一个元素明显重要 |
| 7  | 前一个元素比后一个元素强烈重要 |
| 9  | 前一个元素比后一个元素极为重要 |

步骤 2: 按式(9)计算  $T$  位专家的群体可拓判断矩阵  $A^*$  的每一个元素。

$$a_{ij}^* = \frac{1}{T} \otimes [a_{ij}^{(1)} + a_{ij}^{(2)} + \dots + a_{ij}^{(T)}] \quad (9)$$

式中： $a_{ij}^{(t)}$  为第  $t$  位专家的判断矩阵的第  $i$  行第  $j$  列元素； $\otimes$  为运算符，具体形式为

$$a_{ij}^{*-} = \frac{1}{T} [a_{ij}^{-(1)} + a_{ij}^{-(2)} + \dots + a_{ij}^{-(T)}]$$

$$a_{ij}^{*+} = \frac{1}{T} [a_{ij}^{+(1)} + a_{ij}^{+(2)} + \dots + a_{ij}^{+(T)}]$$

通过这种方式，便可形成专家群可拓判断矩阵  $A^* = [A^{*-}, A^{*+}] = [a_{ij}^*]_{n \times n}$ 。

步骤 3: 按式(10)计算每个专家的可拓区间数  $a_{ij}^{(t)}$  和专家群可拓区间数  $a_{ij}^*$  的相对偏差。

$$\theta_{ij}^{(t)} = \sqrt{[a_{ij}^{-(t)} - a_{ij}^{*-}]^2 + [a_{ij}^{+(t)} - a_{ij}^{*+}]^2} \quad (10)$$

进一步将所有相对偏差的平方求和，有

$$\Delta\theta_t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\theta_{ij}^{(t)}]^2 \quad (11)$$

从一致性要求考虑，偏差平方和  $\Delta\theta_t$  越小，第  $t$  位专家与全部专家的平均判断水平就越为接近，应该赋予较大的权重，反之则赋予较小的权重。

步骤 4: 计算第  $t$  位专家的权重。利用专家判断矩阵的偏差构造正态分布函数，方差为

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta\theta_t}{T} \quad (12)$$

专家权重概率分布函数为

$$\rho_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{\Delta\theta_t}{\sigma^2}\right) \quad (13)$$

归一化后得到专家的权重为

$$\lambda_t = \frac{\rho_t}{\sum_{t=1}^T \rho_t} \quad (14)$$

步骤 5: 按式(15)计算综合可拓判断矩阵。

$$\bar{A} = \lambda_1 a_{ij}^1 \oplus \lambda_2 a_{ij}^2 \oplus \dots \oplus \lambda_T a_{ij}^T \quad (15)$$

对于综合可拓判断矩阵  $\bar{A} = \langle \bar{A}^-, \bar{A}^+ \rangle$ ，进一步

进行一致性检验。即先求出  $\bar{A}^-$  和  $\bar{A}^+$  对应的最大特征根的均值  $\lambda_{\max}$ ，再计算一致性指数  $CR$ ，使  $CR < 0.1$ 。

步骤 6: 计算指标权重。计算  $\bar{A}^-$  和  $\bar{A}^+$  的最大特征根对应的归一化特征向量  $x^-$ 、 $x^+$ ，从而形成满足一致性条件的权重区间向量为

$$S = [kx^-, mx^+] = (S_1, S_2, \dots, S_n)^T \quad (16)$$

式中，比例系数  $k$ 、 $m$  为

$$k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^-} \right)}}, m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^+} \right)}} \quad (17)$$

则第  $h$  层的第  $i$  个指标对于其所属的上一层指标的单排序权重为

$$P_i = \frac{(S_i^- + S_i^+)}{2} \quad (18)$$

归一化后得到第  $h$  层的指标对于  $h$  层的权重向量  $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)^T$ 。

步骤 7: 综合评估结果。按式(19)将权重向量与

关联矩阵相乘, 可得到综合评估指标为

$$P = W \cdot K \quad (19)$$

式(19)中, 评估矢量  $P$  的元素对应各个等级的关联值。若某一等级的关联值为正, 则说明综合指标落在该等级所在的区间, 因而可以选择该等级为最终的评估结果。此时, 关联值的数值越大就越偏向该等级所在区间的左侧, 越小就越偏向该等级所在区间的右侧; 若各个等级的关联值均为负, 则说明该问题的模糊性过强, 无法直接指明停电影响等级。但从模糊性角度考虑, 某一等级负的关联值越大(绝对值越小), 评估结果从属于该等级的可能性就越大, 因此可以将其作为最终的评估等级<sup>[22]</sup>。

### 2.4 停电影响综合评估流程

本文所提的基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估流程如图 3 所示。其中, 该图的左半部分主要描述可拓理论的关联值计算过程, 右半部分主要描述改进可拓层次分析法的指标赋权过程。

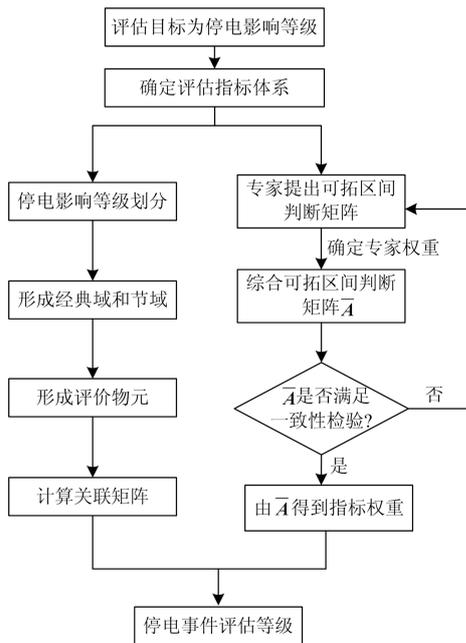


图 3 停电影响综合评估流程图

Fig. 3 Flow chart of comprehensive evaluation of power failure

### 3 算例分析

为了验证本文所提方法的有效性, 选取广东电网某 4 个停电事件进行仿真分析。各指标的等级划分及相应的标准见表 2, 停电事件的统计数据及变电站的参数见表 3。为提高可比性, 将各项指标的分级标准值及统计值转化为标么值。所采用的基准值取自表 3 的变电站参数, 其中重要性分类指标的基准为变电站所带的该类用户总数, 时间基准为 30 天, 功率基准为变电站容量。评估等级标准的主要依据是以往大部分变电站统计数据以及专家意见。

表 2 停电影响评估等级划分标准

Table 2 Classification criteria of evaluation of power failure

| 分项指标  | V 级   | IV 级 | III 级 | II 级  | I 级   |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| $c_1$ | 1.5%  | 2.5% | 5%    | 8%    | 12%   |
| $c_2$ | 0.5%  | 1%   | 2%    | 4%    | 7%    |
| $c_3$ | 0.1%  | 3%   | 10%   | 15%   | 20%   |
| $c_4$ | 0.96% | 2.4% | 4.9%  | 7.9%  | 11.8% |
| $c_5$ | 0.2%  | 0.5% | 1%    | 1.25% | 2%    |
| $c_6$ | 0.3%  | 1.1% | 2.1%  | 4.6%  | 6.5%  |

表 4 给出了利用本文所提方法形成的停电影响评估体系的物元, 表 5 以停电事件 B 为例, 给出了计算得到的关联矩阵。关联矩阵的每行元素对应样本相关指标与评估等级的从属关系。关联值为正表示某一指标的评估结果属于该等级, 反之则不属于该等级。从中可以看出, 由于指标的差异性, 同一停电事件的影响显示出不同的等级属性。为了形成更全面的评估, 需要综合所有指标并参考所有专家的认知进行判断。

为了更好地利用专家经验, 本文利用 10 位专家形成表征指标相对重要性的判断矩阵。但由于认知水平的限制, 评估过程中可能出现某些专家认知错误的情况。为了验证所提方法的有效性, 以下假定一定数量的专家由于认知错误而产生异常判断矩阵, 并分别采用本文所提方法与改进前的可拓层次分析法进行仿真分析, 计算结果见表 6—表 9。

表 3 停电事件的统计数据及变电站参数

Table 3 Statistical data of the power failure events and parameters of substations

| 指 标   | 事件 A   |          |        | 事件 B    |            |        | 事件 C    |          |        | 事件 D    |         |        |
|-------|--------|----------|--------|---------|------------|--------|---------|----------|--------|---------|---------|--------|
|       | 实测值    | 基准值      | 标么值    | 实测值     | 基准值        | 标么值    | 实测值     | 基准值      | 标么值    | 实测值     | 基准值     | 标么值    |
| $c_1$ | 596 户  | 19 230 户 | 3.1%   | 231 户   | 22 870 户   | 1.01%  | 1 761 户 | 29 108 户 | 6.05 % | 177 户   | 8 870 户 | 2%     |
| $c_2$ | 3 户    | 200 户    | 1.5%   | 5 户     | 208 户      | 2.4%   | 9 户     | 250 户    | 3.6%   | 1 户     | 78 户    | 1.2%   |
| $c_3$ | 1 户    | 7 户      | 14.3%  | 1 户     | 9 户        | 11.1%  | 0 户     | 10 户     | 0%     | 0 户     | 5 户     | 0%     |
| $c_4$ | 600 户  | 19 437 户 | 3.09%  | 237 户   | 23 087 户   | 1.03%  | 157 户   | 29 368 户 | 6.03%  | 178 户   | 8 953 户 | 1.99%  |
| $c_5$ | 72 min | 43 200   | 0.167% | 270 min | 43 200 min | 0.625% | 102 min | 43 200   | 0.169% | 120 min | 43 200  | 0.278% |
| $c_6$ | 0.98   | 50 MW    | 1.96%  | 0.72    | 80 MW      | 0.9%   | 1.624   | 80 MW    | 2.03%  | 0.13    | 50 MW   | 0.25%  |

表 4 停电影响评估的物元

Table 4 Matter elements for evaluation of power failure

| 指标    | 经典域    |          |         |         |          | 节域     | 待评估物元 |       |       |       |  |
|-------|--------|----------|---------|---------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|--|
|       | $N_1$  | $N_2$    | $N_3$   | $N_4$   | $N_5$    | $R_P$  | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ |  |
| $c_1$ | 0~1.5  | 1.5~2.5  | 2.5~5   | 5~8     | 8~12     | 0~12   | 3.1   | 1.01  | 6.05  | 2     |  |
| $c_2$ | 0~0.5  | 0.5~1    | 1~2     | 2~4     | 4~7      | 0~7    | 1.5   | 2.4   | 3.6   | 1.2   |  |
| $c_3$ | 0~0.1  | 0.1~3    | 3~10    | 10~15   | 15~20    | 0~20   | 14.3  | 11.1  | 0     | 0     |  |
| $c_4$ | 0~0.96 | 0.96~2.4 | 2.4~4.9 | 4.9~7.9 | 7.9~11.8 | 0~11.8 | 3.09  | 1.03  | 6.03  | 1.99  |  |
| $c_5$ | 0~0.2  | 0.2~0.5  | 0.5~1   | 1~1.25  | 1.25~2   | 0~2    | 0.167 | 0.625 | 0.169 | 0.278 |  |
| $c_6$ | 0~0.3  | 0.3~1.1  | 1.1~2.1 | 2.1~4.6 | 4.6~6.5  | 0~6.5  | 1.96  | 0.9   | 2.03  | 0.25  |  |

表 5 停电事件 B 的关联矩阵

Table 5 Correlation matrix of power failure B

| 分项<br>指标 | 关联值      |          |          |          |          | 评估<br>等级 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | V 级      | IV 级     | III 级    | II 级     | I 级      |          |
| $c_1$    | 0.942 3  | -0.326 7 | -0.596   | -0.798   | -0.873 8 | V 级      |
| $c_2$    | -0.441 9 | -0.368 4 | -0.142 9 | 0.8      | -0.4     | II 级     |
| $c_3$    | -0.552 8 | -0.476 8 | -0.11    | 0.5      | -0.304 7 | II 级     |
| $c_4$    | -0.063 6 | 1.427 1  | -0.570 8 | -0.789 8 | -0.869 6 | IV 级     |
| $c_5$    | -0.404 8 | -0.166 7 | 0.75     | -0.375   | -0.5     | III 级    |
| $c_6$    | -0.4     | 0.285 7  | -0.181 8 | -0.571 4 | -0.804 4 | IV 级     |

表 6 准则层专家权重

Table 6 Expert weights in guideline layer

| 专<br>家 | 专家权重    |         |         |         |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        | $E_n=0$ | $E_n=1$ | $E_n=2$ | $E_n=3$ | $E_n=4$ |
| 1      | 9.85%   | 0.74%   | 2.91%   | 5.67%   | 8.43%   |
| 2      | 4.06%   | 6.73%   | 2.45%   | 5.02%   | 7.81%   |
| 3      | 13.37%  | 12.84%  | 12.91%  | 5.94%   | 8.89%   |
| 4      | 12.30%  | 12.43%  | 12.51%  | 12.62%  | 7.40%   |
| 5      | 8.44%   | 10.06%  | 10.42%  | 10.71%  | 10.25%  |
| 6      | 8.90%   | 10.80%  | 11.27%  | 11.52%  | 10.98%  |
| 7      | 11.59%  | 11.86%  | 11.94%  | 11.98%  | 11.23%  |
| 8      | 12.70%  | 11.93%  | 11.73%  | 11.77%  | 11.05%  |
| 9      | 11.10%  | 12.01%  | 12.20%  | 12.60%  | 12.09%  |
| 10     | 7.68%   | 10.61%  | 11.66%  | 12.17%  | 11.87%  |

注： $E_n$ 表示异常判断矩阵的数量，有问题的专家排在前列。

表 7 指标权重

Table 7 Weights of indicators

| $E_n$ | 指标权重  |        |        |        |        |        |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | $c_1$ | $c_2$  | $c_3$  | $c_4$  | $c_5$  | $c_6$  |
| 0     | 4.37% | 12.40% | 31.68% | 15.40% | 14.45% | 21.69% |
| 1     | 3.66% | 10.38% | 26.51% | 18.60% | 13.13% | 27.74% |
| 2     | 3.71% | 10.53% | 26.90% | 18.68% | 13.17% | 27.03% |
| 3     | 3.77% | 10.71% | 27.35% | 18.94% | 13.37% | 25.85% |
| 4     | 3.87% | 10.97% | 28.02% | 19.45% | 13.53% | 24.17% |

表 6 展示了异常判断矩阵对本文所提方法的准则层专家权重的影响情况。当专家 1 的矩阵为异常判断矩阵时，其权重仅为 0.74%，远小于其他专家

的权重；当专家 1 和专家 2 的矩阵为异常判断矩阵时，他们的权重分别为 2.91%和 6.73%，两者之和小于 10%。随着异常判断矩阵数量的增多，异常判断矩阵对应专家的权重有所增大，但始终小于其他认识正常的专家的权重。这说明本文所提方法能较好地抑制异常判断矩阵的影响。

表 7 进一步给出了异常判断矩阵对本文所提方法的指标权重的影响情况。从中可以看出，随着异常判断矩阵的增加，各个指标的权重出现了一定的变化，但是变化幅度并不明显。这也说明了本文所提方法对专家认知错误问题具有良好的适应性。

表 8 本文所提方法的停电影响评估结果

Table 8 Evaluation results of power failures

| 事<br>件 | $E_n$ | 评估结果矢量 $P$ |          |          |          |          | 评估<br>等级 |
|--------|-------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|        |       | V 级        | IV 级     | III 级    | II 级     | I 级      |          |
|        |       | 0          | -0.417 3 | -0.366 8 | -0.004 4 | -0.195 0 |          |
| A      | 1     | -0.413 8   | -0.348 3 | 0.399 0  | -0.199 3 | -0.502 4 | III 级    |
|        | 2     | -0.414 3   | -0.349 3 | 0.390 1  | -0.199 5 | -0.500 9 | III 级    |
|        | 3     | -0.413 8   | -0.350 1 | 0.383 5  | -0.201 4 | -0.499 5 | III 级    |
|        | 4     | -0.413 8   | -0.351 5 | 0.389 0  | -0.203 6 | -0.497 2 | III 级    |
| B      | 0     | -0.343 8   | 0.468 1  | -0.097 6 | -0.077 1 | -0.565 0 | IV 级     |
|        | 1     | -0.344 1   | 0.502 3  | -0.099 3 | -0.085 1 | -0.568 8 | IV 级     |
|        | 2     | -0.343 0   | 0.066 5  | -0.104 8 | -0.098 4 | -0.575 1 | IV 级     |
|        | 3     | -0.332 2   | 0.146 4  | -0.121 1 | -0.164 0 | -0.601 7 | IV 级     |
| C      | 4     | -0.330 8   | 0.139 9  | -0.121 2 | -0.150 0 | -0.595 6 | IV 级     |
|        | 0     | -0.534 3   | -0.536 9 | -0.476 2 | -0.348 1 | -0.624 5 | II 级     |
|        | 1     | -0.515 5   | -0.503 0 | -0.411 2 | -0.280 0 | -0.599 0 | II 级     |
|        | 2     | -0.532 0   | -0.533 1 | -0.469 1 | -0.343 9 | -0.623 7 | II 级     |
| D      | 3     | -0.533 1   | -0.523 4 | -0.439 5 | -0.308 0 | -0.609 2 | II 级     |
|        | 4     | -0.518 3   | -0.509 9 | -0.426 3 | -0.284 5 | -0.598 0 | II 级     |
|        | 0     | -0.401 2   | -0.155 7 | -0.484 4 | -0.779 6 | -0.869 1 | IV 级     |
|        | 1     | -0.330 5   | -0.117 5 | -0.494 0 | -0.777 9 | -0.868 5 | IV 级     |
| D      | 2     | -0.390 1   | -0.157 7 | -0.484 1 | -0.778 4 | -0.869 0 | IV 级     |
|        | 3     | -0.341 1   | -0.114 8 | -0.486 6 | -0.774 7 | -0.866 3 | IV 级     |
|        | 4     | -0.352 5   | -0.115 4 | -0.481 1 | -0.772 7 | -0.864 8 | IV 级     |

表 9 传统可拓层次分析法的停电影响评估结果  
Table 9 Evaluation results of power failures of traditional extension analytic hierarchy process

| 事件 | $E_n$ | 评估结果矢量 $P$ |          |          |          |          | 评估等级  |
|----|-------|------------|----------|----------|----------|----------|-------|
|    |       | V 级        | IV 级     | III 级    | II 级     | I 级      |       |
| A  | 0     | -0.469 9   | -0.339 2 | 0.168 6  | -0.139 0 | -0.505 1 | III 级 |
|    | 1     | -0.295 6   | 0.510 7  | -0.277 7 | -0.330 0 | -0.603 4 | IV 级  |
|    | 2     | -0.295 4   | -0.277 6 | 0.512 1  | -0.330 0 | -0.603 4 | III 级 |
|    | 3     | -0.479 8   | -0.353 6 | -0.137 0 | 0.165 3  | -0.485 6 | II 级  |
|    | 4     | -0.484 3   | -0.358 5 | -0.135 2 | 0.166 0  | -0.478 5 | II 级  |
| B  | 0     | -0.371 2   | 0.200 8  | -0.209 4 | -0.120 5 | -0.628 3 | IV 级  |
|    | 1     | 0.191 5    | -0.371 2 | -0.211 3 | -0.094 4 | -0.618 8 | V 级   |
|    | 2     | -0.393 4   | 0.083 3  | -0.185 5 | -0.005 3 | -0.581 7 | IV 级  |
|    | 3     | -0.347 1   | -0.091 8 | -0.239 0 | 0.266 2  | -0.616 4 | II 级  |
|    | 4     | -0.396 8   | -0.077 7 | -0.186 4 | 0.046 7  | -0.555 3 | II 级  |
| C  | 0     | -0.555 3   | -0.484 9 | -0.298 6 | -0.132 0 | -0.505 5 | II 级  |
|    | 1     | -0.361 8   | -0.393 7 | -0.222 4 | -0.362 0 | -0.554 8 | III 级 |
|    | 2     | -0.555 4   | -0.489 4 | -0.311 6 | -0.092 8 | -0.478 8 | II 级  |
|    | 3     | -0.589 1   | -0.532 4 | -0.197 3 | -0.379 0 | -0.515 8 | III 级 |
|    | 4     | -0.565 3   | -0.501 9 | -0.101 7 | -0.331 2 | -0.477 1 | III 级 |
| D  | 0     | -0.247 3   | -0.214 7 | -0.383 2 | -0.750 7 | -0.865 9 | IV 级  |
|    | 1     | -0.248 8   | 0.156 1  | -0.372 6 | -0.724 4 | -0.830 5 | IV 级  |
|    | 2     | -0.316 3   | -0.271 9 | -0.242 4 | -0.745 5 | -0.865 0 | III 级 |
|    | 3     | -0.248 6   | 0.156 0  | -0.373 4 | -0.725 0 | -0.830 8 | IV 级  |
|    | 4     | -0.326 7   | -0.270 1 | -0.048 7 | -0.681 6 | -0.815 8 | III 级 |

表 8 与表 9 分别给出了本文所提方法与传统可拓层次分析法评估结果。从中可以看出, 在出现不同数量的异常判断矩阵时, 本文所提方法得到的评估等级均保持不变。相对而言, 传统可拓层次分析法得到的评估等级随着异常判断矩阵的增加而出现反复变化, 难以形成稳定的判断。这说明了本文所提方法在处理专家认识错误问题方面相对于传统方法具有一定的优越性。

## 4 结论

本文提出一种改进的可拓层次分析法并用于停电影响综合评估, 得到主要结论如下:

1) 本文所提方法通过可拓学理论较好地描述了专家的主观模糊性, 减小了主观不确定性因素对评估结果的影响。

2) 本文所提方法可以根据各个专家的评估意见与整体评估情况的偏离程度自适应地分配权重, 有利于解决传统层次分析法的一致性检验问题, 从而得到更为合理的评估结果。

3) 将本文所提方法应用于广东电网的实际停

电事件的影响评估, 可以较好地反映停电事件的严重等级以及其对其他等级的偏向性, 从而客观地反映停电事件的综合影响情况。

## 参考文献

- [1] HE Jinghan, LIN Liu, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [2] 向德军, 王彬, 郭文鑫, 等. 基于人工神经网络的电力系统精细化安全运行规则[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 32-37.  
XIANG Dejun, WANG Bin, GUO Wenxin, et al. Fine security rule for power system operation based on artificial neural network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 32-37.
- [3] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.  
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [4] 周名煜, 谢宁, 王承民. 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 130-137.  
ZHOU Mingyu, XIE Ning, WANG Chengmin. Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 130-137.
- [5] BENIDRIS M, MITRA J, SINGH C. Integrated evaluation of reliability and stability of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4131-4139.
- [6] 王勇, 韩学山, 丁颖, 等. 基于马尔科夫链的电力系统运行可靠性快速评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 405-410.  
WANG Yong, HAN Xueshan, DING Ying, et al. Markov Chain-based rapid assessment on operational reliability of power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 405-410.
- [7] 王博, 游大海, 尹项根, 等. 基于多因素分析的复杂电力系统安全风险评估体系[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 40-45.  
WANG Bo, YOU Dahai, YIN Xianggen, et al. A security risk assessment system of complicated power grid based on multiple factor analysis[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 40-45.
- [8] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012,

36(10): 67-73.  
 SHEN Yangwu, PENG Xiaotao, SHI Tongqin, et al. A gray comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 67-73.

[9] 侯雨伸, 王秀丽, 刘杰, 等. 基于拟蒙特卡罗方法的电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 744-750.  
 HOU Yushen, WANG Xiuli, LIU Jie, et al. A Quasi-Monte Carlo method based power system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 744-750.

[10] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159, 164.  
 OUYANG Sen, SHI Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159, 164.

[11] 李蕊, 李跃, 徐浩, 等. 基于层次分析法和专家经验的重要电力用户典型供电模式评估[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2336-2341.  
 LI Rui, LI Yue, XU Hao, et al. Assessment on typical power supply mode for important power consumers based on analytical hierarchy process and expert experience[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2336-2341.

[12] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 146-150, 195.  
 YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system of distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150, 195.

[13] 高攀. 区域电力系统安全风险评估研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2016.  
 GAO Pan. Study on security risk assessment of power system based on BP neural network[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Electric Power, 2016.

[14] 成云雪. 火电企业节能减排效果评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
 CHENG Yunxue. Research on the effect evaluation of energy-saving and emission reduction in thermal power enterprises[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[15] 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]. Science Bulletin, 2013, 58(13): 1190-1199.

[16] 郑慧娟. 基于改进的可拓层次分析法的指挥控制系统作战效能评估指标赋权[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(1): 12-15.  
 ZHENG Huijuan. Determining index weight of operational effectiveness assessment of command and control System based on improved extension Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Armored Force Engineering College, 2014, 28(1): 12-15.

[17] 朱振中, 石志敏. 新产品开发中评价指标体系的建立与模糊综合评价[J]. 山东工程学院学报, 2001(3): 70-74.  
 ZHU Zhenzhong, SHI Zhimin. Building evaluation system and fuzzy comprehensive evaluation in new product development[J]. Journal of Shandong Institute of Engineering, 2001(3): 70-74.

[18] 张文俊. 配电网故障停电风险评估指标体系及评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
 ZHANG Wenjun. Research on index system and evaluation methods of distribution network fault outage risk assessment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

[19] 王泉, 刘天琪, 赵颖聪, 等. 电力系统停电影响评价指标体系及其应用[J]. 华东电力, 2014, 42(2): 253-256.  
 WANG Xiao, LIU Tianqi, ZHAO Yingcong, et al. Evaluation index system for power system blackout impacts and its application[J]. East China Electric Power, 2014, 42(2): 253-256.

[20] 丁立, 贾秀芳, 赵成勇, 等. 基于可拓学的电能质量综合评价[J]. 电力自动化设备, 2007, 37(12): 44-47, 52.  
 DING Li, JIA Xiufang, ZHAO Chengyong, et al. Synthetic evaluation of power quality based on extenics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 37(12): 44-47, 52.

[21] 田梁玉, 唐忠, 焦婷, 等. 基于多目标评判法的微电网经济性指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 122-127.  
 TIAN Liangyu, TANG Zhong, JIAO Ting, et al. Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 122-127.

[22] 蒋小军. 可拓学理论在地基土评价中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
 JIANG Xiaojun. Application of the theory of extenics to evaluation of subsoil[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

收稿日期: 2018-02-02; 修回日期: 2018-05-13

作者简介:

周 剑(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电网安全稳定研究及管理工作; E-mail: zhoujian@csg.cn

罗添允(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力负荷建模. E-mail: 543920097@qq.com

(编辑 周金梅)