

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181174

## 动态综合评价方法在电网应急能力评估中的应用

王迪<sup>1</sup>, 蔡东军<sup>2</sup>, 房鑫炎<sup>1</sup>, 方忠闪<sup>2</sup>, 胡振起<sup>2</sup>, 丁鹏堃<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 国网宁波供电公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 传统的电网应急能力评估模型大多采用的是静态评价, 这种方法得出的结论具有片面性。针对这种不足, 提出了一种动态评价方式使评价结果更加合理、全面。建立了电网应急能力评估基本指标体系, 采用层次分析法和变异系数法主客观相结合的方法对各项指标进行权重赋值并进行静态评价。将应急能力评估分为预防、准备、响应和恢复4个时间阶段, 并集结时序加权平均—时序加权几何平均混合算子模型对电网应急能力进行分析, 得到动态综合评价值。结果表明, 采用动态综合评价方法对电网应急能力进行评估可以得出科学、准确的结果。

**关键词:** 电网应急能力评估; 动态评价; 时序加权平均算子; 时序加权几何平均算子; 指标体系

### Application of dynamic comprehensive evaluation method in power system emergency management capability assessment

WANG Di<sup>1</sup>, CAI Dongjun<sup>2</sup>, FANG Xinyan<sup>1</sup>, FANG Zhongshan<sup>2</sup>, HU Zhenqi<sup>2</sup>, DING Pengkun<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;  
2. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** Most of the traditional grid emergency management capability assessment models use static evaluation. The conclusions drawn by this method are one-sided. In response to this deficiency, this paper proposes a dynamic evaluation method to make the evaluation results more reasonable and comprehensive. The basic index system of power grid emergency management capability assessment is established. The analytic hierarchy process and the coefficient of variation method are used to combine the objective and subjective methods to assign weights to each index and perform static evaluation. The emergency management capability assessment is divided into four periods: prevention, preparation, response and recovery. The time-weighted average-time-series weighted geometric average hybrid operator model is used to analyze the grid emergency management capability to obtain the dynamic comprehensive evaluation value. The results show that the dynamic comprehensive evaluation method can be used to evaluate the emergency management capability of the power grid to obtain scientific and accurate results.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0205204).

**Key words:** power system emergency management capability assessment; dynamic evaluation; timing weighted average operator; timing weighted geometric mean operator; indicator system

## 0 引言

随着科技的进步和社会的发展, 电在人们的生产和生活中起着无法替代的作用, 可以说, 人们的每一项活动都离不开电能的支撑。但近年来, 各种原因导致国内外电力事故频发<sup>[1-3]</sup>, 如 2003 年的美加大停电、2008 年的南方冰雪灾害造成的大范围停电、2018 年的巴西 3.21 大停电等事故都给人们和社

会带来了巨大的影响和损失。并且, 电网运行的复杂性也使得目前大面积停电事故很难从根本上杜绝。因此, 基于以上背景, 进行电网应急能力评估以提高电网企业在应对突发事件下的应急能力就成为亟需开展的一项工作。

目前, 已有相关学者对电力应急能力评估进行了相关研究<sup>[4-8]</sup>。如: 文献[4]初步构建了应急能力技术指标框架, 并从多个角度出发建立了城市电网应急能力评估技术指标体系。文献[5]根据 PPRR 理论, 建立了电力应急能力评估指标体系, 并采用层次分

析法对各级指标进行权重赋值进而得到指标相对重要性的排序方式。文献[6]结合大面积停电事故的特点，建立了有效评估电网企业应急能力的层级指标体系，并采用层次分析法和模糊综合评价法相结合的方法对电网企业应急能力进行了综合评价。文献[7]从电网突发事件应急响应角度出发，建立了适合于响应能力的评价指标体系，此外为克服主观因素带来的不利影响，采用改进的熵权法对指标进行了评价。文献[8]将电力企业进行了部门划分并阐述了各部门的具体应急活动，通过层次分析法并结合脆弱性概念对各应急小组进行权重评估，得出在不同危机下，各小组的相对重要性。

但上述参考文献主要是从静态角度对应急能力指标进行了评估，然而根据系统客观条件影响，电网物资储备、功率储备、后勤保障体系、网架结构等电网静态响应以及设备状态评估对电网状态影响、潮流运行方式、调度策略等电网运行状态并非一成不变，因此在实际的应急活动中，随着时间的推移应急能力评估的各项指标权重是随着阶段的不同而变化的，仅从静态角度进行评价并不能得出正确、全面的结果。基于此，本文引进基于时序加权平均算子和时序加权几何平均算子的动态评价方法对电网应急能力进行评价。在此之前，已有相关学者采用这种方法进行了研究，如：文献[9]通过时序加权平均算子和时序加权几何平均算子的混合模型对大坝群的安全协同度进行了动态评价；文献[10]采用时序加权平均算子对灌区进行了动态评价。但此种方法在电网应急能力评价中还未有应用。因此，

本文引进该评价方法，并建立电网应急能力评估基本指标体系，根据应急过程的推移确定不同时段的指标权重，结合时序对电网企业的电力应急能力进行动态综合评价，使评估结果更加全面、客观。

## 1 电网应急能力评估的静态评价模型

### 1.1 电网应急能力评价基本指标体系

在进行动态应急能力评估之前需要构建合理的电网应急能力评估指标体系，使评估结果更加科学、有说服力。因此本文在参考文献[11-13]的基础上，结合电网企业的实际情况和专家的相关意见，构建包括5个一级指标、13个二级指标的电网应急评估基本指标体系，见图1所示。

### 1.2 静态评价模型构建

1) 指标量化。由于在所建立的电网应急能力评价基本指标体系中含有大量的定性指标，因此在进行应急能力评估之前的一个关键环节就是进行指标量化。通过对上述指标分析发现定性指标大都以程度来表示，因此以建立模糊评价集  $V=\{\text{优, 良, 中, 差}\}$ ，对应的评价值  $B=\{(100\sim75)、(75\sim50)、(50\sim25)、(25\sim0)\}$ 的方法，通过专家或专业人员按照实际情况对相应的定性指标进行评价打分。

2) 指标值标准化。为使计算更加简便，需要将不同量纲的指标评价值进行无量纲化处理。一般说来，指标值分为正指标和逆指标，正指标值越大越好，而逆指标值越小越好。因此本文采用式(1)和式(2)对指标数据进行标准化处理。

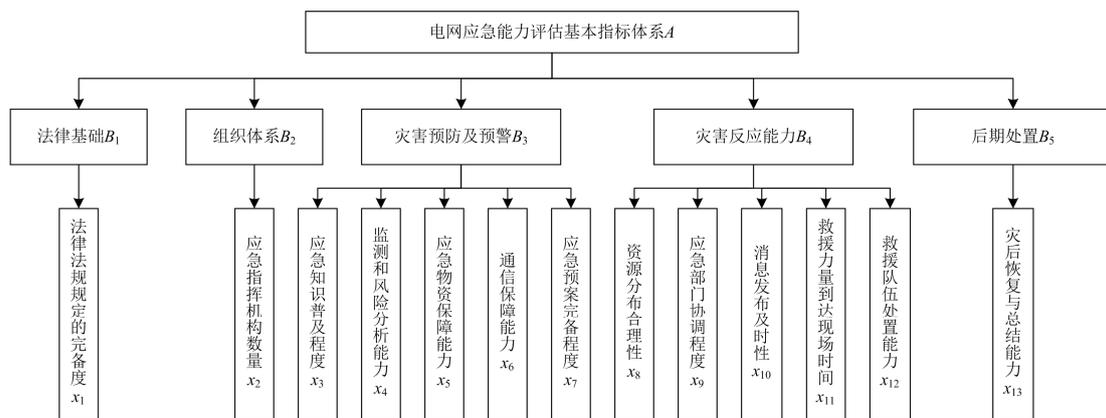


图1 电网应急能力评价基本指标体系

Table 1 Basic indicator system for power grid emergency management capability evaluation

正指标为

$$x'_{ij}(t_k) = \frac{x_{ij}(t_k) - \min\{x_{ij}(t_k)\}}{\max\{x_{ij}(t_k)\} - \min\{x_{ij}(t_k)\}} \quad (1)$$

逆指标为

$$x'_{ij}(t_k) = \frac{\max\{x_{ij}(t_k)\} - x_{ij}(t_k)}{\max\{x_{ij}(t_k)\} - \min\{x_{ij}(t_k)\}} \quad (2)$$

式中： $t_k$  为时序值； $\max\{x_{ij}(t_k)\}$  为指标  $j$  在某时段

中的最大值:  $\min\{x_j(t_k)\}$  为指标  $j$  在某时段中的最小值。

3) 指标权重的确定。目前关于指标权重确定的方法有很多, 主要分为主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法三大类。主观赋权法是根据决策者主观信息进行赋权的一类方法, 这种方法的优点是专家可以结合实际问题和自身经验确定各指标权重的排序, 但受主观影响较大, 缺少客观性。主观赋权法主要包括二项系数法<sup>[14]</sup>、专家调查法<sup>[14]</sup>、层次分析法<sup>[15]</sup>等。客观赋权法是根据原始数据之间的联系来确定其权重, 具有很强的客观性, 但忽略了决策者的主观意愿。客观赋权法主要包括熵值法<sup>[14]</sup>、主成分分析法<sup>[16]</sup>、变异系数法<sup>[17]</sup>等。组合赋权法是客观赋权法和主观赋权法按照一定的规律相结合的权重计算方法, 它既保留了主、客观赋权法的优点, 又克服了二者的不足。因此, 本文采用组合赋权法的方式对应急能力指标进行权重赋值, 其中主观赋权法采用层次分析法, 客观赋权法采用变异系数法, 具体步骤如下。

#### 1) 层次分析法

分层次构建两两比较的判断矩阵, 求出最大特征值, 得到最终特征向量, 并进行一致性校验, 若满足校验, 则通过; 若不满足, 则重新构造判断矩阵, 直到满足一致性校验, 得到各指标的主观权重  $a_i(t_k)$ 。

#### 2) 变异系数法

首先, 计算各项指标的变异系数。

$$\mu_j(t_k) = \frac{s_j(t_k)}{\bar{x}_j(t_k)} \quad (3)$$

式中:  $s_j(t_k)$  为各项指标在同一时间阶段下的标准差;  $\bar{x}_j$  为第  $j$  个指标在同一时间阶段下的平均值。

其次, 对变异系数进行归一化处理得到变异系数权重。

$$b_j(t_k) = \frac{\mu_j(t_k)}{\sum_{j=1}^m \mu_j(t_k)} \quad (4)$$

#### 3) 综合权重确定

$$\omega_j(t_k) = \alpha a_j(t_k) + (1 - \alpha) b_j(t_k) \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为两种方法所占的比重, 经咨询专家的意见, 令  $\alpha = 0.5$ 。

#### 4) 单时段静态评价计算

在以上研究的基础上, 利用线性加权法得到各时段待评价对象的静态评价结果, 如式(6)。

$$y_i(t_k) = \sum_{j=1}^m \omega_j(t_k) \cdot x'_{ij}(t_k) \quad (6)$$

式中:  $\omega_j(t_k)$  为第  $j$  项指标的权重值;  $x'_{ij}(t_k)$  为第  $i$  个评价对象对应的第  $j$  项指标值,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ 。

## 2 电网应急能力评估的动态评价模型

基于前述理论, 考虑到权重在同一事件下随时间上的推进而变化这一影响, 本文采用时序加权平均算子与时序加权几何平均算子的混合评价模型, 建立了由静态评价模型再耦合时序的动态全局评价方法, 真正有效地反映了实际情况。

### 2.1 时序加权平均算子(TOWA)、时序加权几何平均算子(TOWGA)原理

TOWA 与 TOWGA 算子是郭亚军<sup>[18]</sup>等学者在有序加权平均(OWA)算子<sup>[19]</sup>的基础上提出来的, 其具体定义如下文所示。

#### 1) TOWA 算子

令  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ , 称  $\langle u_i, a_i \rangle (i \in N)$  为 TOWA 对, 其中,  $u_i$  为时间诱导分量,  $a_i$  为数据分量, 则时序加权平均(TOWA)算子定义为

$$F(\langle u_1, a_1 \rangle, \dots, \langle u_n, a_n \rangle) = \sum_{j=1}^n w_j b_j \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  为与  $F$  相关联的加权向量, 且  $\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \in [0, 1]$ ;  $b_j$  为时间诱导分量  $u_i (i \in N)$  中第  $j$  时刻所对应的 TOWA 对中的数据分量, 则称  $F$  为  $n$  维 TOWA 算子。

从式(7)可以看出, TOWA 算法的实质是将时间诱导分量  $u_i$  照某一顺序进行排列, 然后将所对应的数据分量进行线性加权求和, 即将各时段的静态评价值与相对应的时间权向量进行耦合, 并且时间权向量只与时间诱导分量的顺序有关, 与数据分量的大小、位置无关。

#### 2) TOWGA 算子

令  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ , 称  $\langle v_i, c_i \rangle (i \in N)$  为 TOWGA 对, 其中,  $v_i$  为时间诱导分量,  $c_i$  为数据分量, 则时序加权几何平均(TOWGA)算子定义为

$$G(\langle v_1, c_1 \rangle, \dots, \langle v_n, c_n \rangle) = \prod_{j=1}^n g_j^{w'_j} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{W}' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)^T$  是与  $G$  相关联的加权向

量, 且  $\sum_{j=1}^n w'_j = 1, w'_j \in [0,1]$ ;  $g_j$  是时间诱导分量  $v_i (i \in N)$  中第  $j$  时刻所对应的 TOWGA 对中的数据分量, 则称  $G$  为  $n$  维 TOWGA 算子。

从式(7)中可以看出, TOWGA 算法的实质是将时间诱导分量  $v_i$  按照一定的顺序进行排序, 然后将所对应的数据分量进行加权集成, 即将各时段的静态评价与相对应的时间权向量进行集成, 同 TOWA 算子一样, TOWGA 算子中的时间权向量只与时间诱导分量的顺序有关, 与数据分量的大小、位置无关。

### 2.2 时间权向量的确定

在进行多指标动态综合评价时, 时序立体数据可以看作是由指标、评价对象和时间构成的三维数据组成。因此, 在进行动态综合评价之前, 还需要解决的一个问题就是时间权向量  $W (W')$  的确定。根据应急管理的一般理论, 应急管理过程通常分为预防、准备、响应、恢复 4 个阶段, 这 4 个阶段在时间上具有连续性<sup>[20-21]</sup>, 涵盖了应对突发事件的全过程, 因此, 应急能力评估也应该在时间上具有全面性。基于此, 本文选取预防、准备、响应和恢复 4 个时段进行电网应急能力动态综合评估, 使评价结果更加合理。对各时段的时间权重求解选用信息熵<sup>[22]</sup>的方法。

熵的概念源自于物理学, 它表示系统的混乱程度。熵的定义为

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \ln p_i \quad (9)$$

若一个系统越混乱, 其熵值就越大; 反之, 若一个系统越有序, 其熵值就越小。同理, 在求取时间权向量时, 若权向量之间的差异越小, 则熵值就越大; 若权向量之间的差异越大, 则其熵值就越小。

在求解时间权向量之前, 需要先给出“时间度”  $S$  的概念, 如式(10)。

$$S = \sum_{k=1}^N \frac{N-k}{N-1} w_{t_k} \quad (10)$$

“时间度”  $S$  的大小表示算子集结过程中专家对各时间节点的重视程度。若  $S$  越接近于 1, 表示专家越重视前段时间节点, 即预防阶段; 若  $S$  越接近于 0, 则表示专家越重视后段时间节点, 即恢复阶段。“时间度”  $S$  的详细取值见表 1。

特别地, 当  $S=0$  时,  $W = (0,0,\dots,1)^T$ ; 当  $S=1$  时,  $W = (1,0,\dots,0)^T$ 。

在“时间度”  $S$  确定后, 应尽可能考虑各指标的相对重要程度, 减少时间权向量之间的差异, 根

表 1 “时间度”  $S$  赋值表

$S$	意义
0.1	非常重视后期数据
0.3	比较重视后期数据
0.5	同等重视所有时期数据
0.7	比较重视前期数据
0.9	非常重视前期数据
0.2,0.4,0.6,0.8	对应以上相邻判断的中间情况

据  $S$  求取时间权向量  $w_{t_k}$  的值。这里采用求解非线性规划问题求取时间权向量的值, 即

$$\max \left( -\sum_{k=1}^N w_{t_k} \ln w_{t_k} \right) \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} S = \sum_{k=1}^N \frac{N-k}{N-1} w_{t_k} \\ \sum_{k=1}^N w_{t_k} = 1, 0 \leq w_{t_k} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

由于本文选取了预防、准备、响应、恢复 4 个时间段, 因此  $N=4$ 。

### 2.3 时序算子的改进模型

从之前的 TOWA、TOWGA 算子定义可以看出, TOWA 算子是“和性”的, TOWGA 算子是“积性”的, 即 TOWA 算子更注重功能性, 而 TOWGA 算子更注重均衡性<sup>[18]</sup>, 二者各有利弊。因此, 为了克服两者之间的缺点, 本文采用一种 TOWA-TOWGA 混合模型算法进行电网应急能力的动态综合评估, 即对两个算子进行线性加权集合。由此得到最终的动态综合评价值为

$$Y_i = \lambda_1 F(y_i) + \lambda_2 G(y_i) \quad (13)$$

式中,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为 TOWA、TOWGA 算子所占比重, 且  $0 \leq \lambda_1 \leq 1, 0 \leq \lambda_2 \leq 1, \lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

## 3 实例分析

由于篇幅限制, 本文仅以某市的 A 区、B 区、C 区三处区域为例来对电网应急能力动态综合评价进行说明, 其具体步骤如下:

1) 原始数据处理。结合事件经验库和历史数据库对各地区电网进行数据统计分析, 并邀请 4 位行业专家结合实际情况通过模糊评价集的评价标准对定性指标的各时段进行评价, 实现定性指标的量化处理。以 A 区的指标  $x_1$  为例, 专家认为目前指标  $x_1$  在该区 4 个时段的实际情况均处于中差水平, 仍不完善, 还存在很大提升空间, 且其评价值分别为 (16, 28, 43, 9)、(18, 22, 45, 13)、(12, 30, 29, 9)、(14, 24, 15, 5), 对其进行平均处理, 得到最

终的评价值为(15, 26, 33, 9)。由此,即可得到各指标在预防( $t_1$ )、准备( $t_2$ )、响应( $t_3$ )、恢复( $t_4$ )4个时间段的原始数据,详细数据见表2。

2) 指标标准化。根据式(1)和式(2),对指标的原始数据进行标准化,如表3。

表2 指标原始数据表

Table 2 Original data of indexes

指标	A区				B区				C区			
	预防时段	准备时段	响应时段	恢复时段	预防时段	准备时段	响应时段	恢复时段	预防时段	准备时段	响应时段	恢复时段
$x_1$	15	26	33	9	19	27	30	5	11	24	32	12
$x_2$	8	21	22	13	13	22	20	12	8	20	21	14
$x_3$	58	27	18	15	60	30	6	18	59	39	10	17
$x_4$	43	70	53	42	39	75	55	38	46	73	50	45
$x_5$	45	41	75	58	39	43	78	57	54	44	77	60
$x_6$	13	12	58	69	7	15	62	58	10	14	69	60
$x_7$	78	42	45	58	69	47	29	62	73	39	38	54
$x_8$	60	55	71	57	51	58	68	58	45	52	67	59
$x_9$	27	22	69	52	18	28	65	49	20	25	67	58
$x_{10}$	33	28	75	58	9	25	69	57	10	23	78	59
$x_{11}$	48	32	8	15	53	29	14	13	57	28	5	18
$x_{12}$	18	28	79	68	25	24	82	63	7	31	85	59
$x_{13}$	5	12	18	78	13	11	22	82	4	9	15	79

表3 指标标准化数据表

Table 3 Standardized data table of indexes

指标	A区				B区				C区			
	预防时段	准备时段	响应时段	恢复时段	预防时段	准备时段	响应时段	恢复时段	预防时段	准备时段	响应时段	恢复时段
$x_1$	0.5	0.67	1	0.57	1	1	0	0	0	0	0.67	1
$x_2$	0	0.5	1	0.5	1	1	0	0	0	0	0.5	1
$x_3$	0	0	1	0	1	0.25	0	1	0.5	1	0.33	0.67
$x_4$	0.57	0	0.6	0.57	0	1	1	0	1	0.6	0	1
$x_5$	0.4	0	0	0.33	0	0.67	1	0	1	1	0.67	1
$x_6$	1	0	0	1	0	1	0.36	0	0.5	0.67	1	0.18
$x_7$	1	0.375	1	0.5	0	1	0	1	0.44	0	0.56	0
$x_8$	1	0.5	1	0	0.4	1	0.25	0.5	0	0	0	1
$x_9$	1	0	1	0.33	0	1	0	0	0.22	0.5	0.5	1
$x_{10}$	1	1	0.67	0.5	0	0.4	0	0	0.04	0	1	1
$x_{11}$	1	0	0.67	0.6	0.44	0.75	0	1	0	1	1	0
$x_{12}$	0.61	0.57	0	1	1	0	0.5	0.44	0	1	1	0
$x_{13}$	0.11	1	0.43	0	1	0.67	1	1	0	0	0	0.25

3) 指标权重的确定。根据层次分析法和变异系数的综合赋权法得到各指标在不同时段所占的比重,如表4。

4) 静态评价结果。对原始数据进行标准化处理后,根据式(6)计算A区、B区、C区3处区域在4个时段下的静态评价结果,其结果见表5。

5) 时间权向量  $w_k$  的确定。经过咨询有关专家的意见,认为“时间度” $S$ 取0.6比较合适,即相对重视预防和准备两个时间段的数据,求解式(11)和式(12),得到时间权向量的取值为

$$W = (0.3474, 0.2722, 0.2133, 0.1671)$$

6) 动态综合评价结果。由式(13)对3个地区的静态评价结果进行时序集结,得到最终的动态综合评价。其中  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  取值相同,都为0.5,表示TOWA和TOWGA两种算子在混合模型中所占的比重相同,由此得到3个地区的动态综合评价如表6。

根据表6得出的结果可以看出,3种算子得出的结果排序是一样的,即3个区域的电网应急能力综合评价结果整体最好的B区,其次是A区,最后是C区。因此应该着重加强A区、C区的电网应急

表 4 指标权重值

Table 4 Value of indexes

指标	$t_1$ 时段	$t_2$ 时段	$t_3$ 时段	$t_4$ 时段
$x_1$	0.109 7	0.086 7	0.055 4	0.055 6
$x_2$	0.175 3	0.131 8	0.071 8	0.063 4
$x_3$	0.095 5	0.070 6	0.050 0	0.037 5
$x_4$	0.047 3	0.160 7	0.047 8	0.043 0
$x_5$	0.069 8	0.079 2	0.075 7	0.069 8
$x_6$	0.059 0	0.068 1	0.066 5	0.070 5
$x_7$	0.116 6	0.106 3	0.065 8	0.051 1
$x_8$	0.060 1	0.057 2	0.068 8	0.044 5
$x_9$	0.057 2	0.049 9	0.072 9	0.064 0
$x_{10}$	0.063 0	0.046 3	0.051 1	0.091 1
$x_{11}$	0.037 6	0.037 2	0.081 4	0.046 6
$x_{12}$	0.036 8	0.044 2	0.171 9	0.067 2
$x_{13}$	0.072 0	0.061 7	0.121 1	0.296 0

表 5 静态评价结果

Table 5 Static evaluation result

区域	$t_1$ 时段	$t_2$ 时段	$t_3$ 时段	$t_4$ 时段
A 区	0.533 6	0.325 7	0.554 2	0.368 8
B 区	0.529 9	0.819 2	0.371 7	0.483 0
C 区	0.260 8	0.398 2	0.584 4	0.543 2

表 6 动态综合评价结果

Table 6 Evaluation results of dynamic method

区域	TOWA 算子评价价值	TOWGA 算子评价价值	混合模型算子评价价值	排序
A 区	0.453 9	0.442 1	0.448 0	2
B 区	0.567 1	0.544 7	0.555 9	1
C 区	0.414 4	0.392 9	0.403 7	3

能力水平,此外,尽管 B 区的评价结果最好,但仍存在着许多不足,从表 5 可以看出, B 市十分注重准备阶段的工作,但在其他 3 个阶段的应急能力水平仍然较低。因此,在今后的工作中,也应该加强其他 3 个阶段的应急能力水平建设,如,增强应急救援队伍的处置能力、增强各部门之间的协调性等等。

#### 4 结论

针对以往电网应急能力静态评价模型的评价结果具有片面性的特点,本文构建了科学的电网应急能力评价基本指标体系,并提出了一种基于 TOWA-TOWGA 混合算子模型的动态评价模型,对电网应急能力的整个过程进行时间上的集结,得出动态综合评价价值,使得评价结果更加科学、合理。

#### 参考文献

[1] 傅小华,季建华,何冰. 基于情景分析的电力突发事件

应急管理研究[J]. 工业工程与管理, 2013, 18(5): 118-123.

FU Xiaohua, JI Jianhua, HE Bing. Research on emergency management of power emergency based on scenario analysis[J]. Industrial Engineering and Management, 2013, 18(5): 118-123.

[2] 罗剑波,郁琛,谢云云,等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 158-170.

LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.

[3] 周博文,陈麒宇,杨东升. 巴西大停电的思考[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 97-105.

ZHOU Bowen, CHEN Qiyu, YANG Dongsheng. Reflections on the blackout in Brazil[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 97-105.

[4] 刘思革,范明天,张祖平,等. 城市电网应急能力评估技术指标的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 17-20.

LIU Sige, FAN Mingtian, ZHANG Zuping, et al. Study on technical indicators of urban power grid emergency capability assessment[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 17-20.

[5] 刘超. 基于 PPRR 理论的电力应急能力评估指标体系研究[J]. 电信科学, 2010(增刊 3): 37-41.

LIU Chao. Research on electric power emergency capability evaluation index system based on PPRR theory[J]. Telecommunications Science, 2010(S3): 37-41.

[6] 赵炜炜,张建华,尚敬福,等. 电网大面积停电应急评价指标体系及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 27-31.

ZHAO Weiwei, ZHANG Jianhua, SHANG Jingfu, et al. Power system large scale blackout emergency evaluation index system and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 27-31.

[7] 鲁鹏,陈大军,时珉,等. 基于熵权法的电网应急能力水平评价研究[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(11): 44-48.

LU Peng, CHEN Dajun, SHI Min, et al. The safety evaluation on grid emergency response capability level based on entropy weight method[J]. Power Science and Engineering, 2013, 29(11): 44-48.

[8] 肖洋,房鑫炎,俞国勤. 基于事件触发的权重评估法在电力应急中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(3): 214-216, 235.

XIAO Yang, FANG Xinyan, YU Guoqin. Application of event trigger based weight evaluation method in power emergency[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(3):

- 214-216, 235.
- [9] 江新, 朱沛文. 大坝群安全应急协同度的动态综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(8): 157-163.  
JIANG Xin, ZHU Peiwen. Dynamic comprehensive evaluation of synergistic degree of emergency response in dam group[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(8): 157-163.
- [10] 王书吉, 霍自民, 姚兰. 基于时序加权平均算子的灌区动态评价[J]. 水利水电技术, 2015, 46(3): 130-135.  
WANG Shuji, HUO Zimin, YAO Lan. Time-ordered weighted averaging operator-based dynamic evaluation of irrigation area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(3): 130-135.
- [11] 程正刚, 房鑫炎, 俞国勤, 等. 电力应急体系脆弱性评估指标体系的编制[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 247-250.  
CHENG Zhenggang, FANG Xinyan, YU Guoqin, et al. Compilation of index system for power emergency system vulnerability assessment[J]. East China Electric Power, 2010, 38(2): 247-250.
- [12] 程正刚, 房鑫炎, 俞国勤, 等. 电力应急体系的脆弱性评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 51-54, 86.  
CHENG Zhenggang, FANG Xinyan, YU Guoqin, et al. Vulnerability evaluation of electric power emergency system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 51-54, 86.
- [13] 程正刚, 房鑫炎, 俞国勤, 等. 基于脆弱性的电力应急体系灾害损失评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 68-72.  
CHENG Zhenggang, FANG Xinyan, YU Guoqin, et al. Vulnerability based disaster loss pre-evaluation of power emergency system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 68-72.
- [14] 镇常青. 多目标决策中的权重调查确定方法[J]. 系统工程理论与实践, 1987(2): 16-24, 30.  
ZHEN Changqing. Method for determining weights in multi-objective decision making[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1987(2): 16-24, 30.
- [15] SOLANGI Y A, TAN Q, MIRJAT N H, et al. Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: an integrated SWOT-AHP and fuzzy-TOPSIS approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 1-14.
- [16] 孙义豪, 李秋燕, 丁岩, 等. 基于主成分分析及系统聚类的县域电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 30-36.  
SUN Yihao, LI Qiuyan, DING Yan, et al. County power grid evaluation system based on principal component analysis and hierarchical cluster analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 30-36.
- [17] 宋彦蓉, 张宝元. 基于地区现代化评价的客观赋权法比较[J]. 统计与决策, 2015(11): 82-86.  
SONG Yanrong, ZHANG Baoyuan. Comparison of objective empowerment method based on regional modernization evaluation[J]. Statistics & Decision, 2015(11): 82-86.
- [18] 郭亚军, 姚远, 易平涛. 一种动态综合评价方法及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2007(10): 154-158.  
GUO Yajun, YAO Yuan, YI Pingtao. A method and application of dynamic comprehensive evaluation[J]. System Engineering Theory and Practice, 2007(10): 154-158.
- [19] YAGER R R. On ordered weight averaging aggregation operators in multi-criteria decision making[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190.
- [20] ZHOU Ping, NIU Dongxiao, LI Xin, et al. Research on comprehensive evaluation of grid emergency management[C] // 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, July 9-11, 2010, Chengdu, China: 260-263.
- [21] ZHANG Yizhou, NIU Dongxiao, LIU Jinping. The evaluation of electric power emergency management mechanism based on BP neural network[C] // 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, July 9-11, 2010, Chengdu, China: 413-416.
- [22] FU Sha, LIU Zhongli, SUN Guang, et al. Study on security risk assessment for information system based on fuzzy set and entropy theory[J]. Journal of Software Engineering, 2015, 9(4): 818-827.

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2019-04-02

作者简介:

王迪(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力应急; E-mail: 1183801803@qq.com

蔡东军(1972—), 男, 本科, 工程师, 高级技师, 主要从事电力安全监督, 施工评估, 培训管理等工作。E-mail: 11317566@qq.com

(编辑 周金梅)