DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181173

基于权重自适应的电力应急预案指标评价方法

李路军[1]，丁鹏堃[2]，房鑫炎[2]，王海峰[2]，何玉涛[2]，王 迪[2]

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

摘要：针对传统电网灾变恢复预案评价的片面性问题以及传统的权重划分方法具有自身的局限性问题，提出了具有自适应权重特性的电力应急预案评价方法。具体介绍了在该方法中的全面性评价指标的构建和自适应权重的确定方法。以待评价电力应急预案和绝对正理想解的相似度最高为目标函数，以 RC 等级法的判断作为权重约束条件，通过计算比较各电力应急预案与绝对正理想解的相对贴近度大小，实现电力应急预案的优劣排序。该方法提高了评价指标的全面性，避免了人为主观因素对权重划分的影响。科学的预案评价结果为预案的制定与修改提供参考与辅助。最后的应用算例表明了该方法的有效性。

关键词：电力应急；预案评价；评价指标构建；RC 等级法；自适应权重

Evaluation method of power emergency plan index based on weight adaptive

LI Lujun[1], DING Pengkun[2], FANG Xinyan[2], WANG Haifeng[2], HE Yutao[2], WANG Di[2]

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

Abstract: Aiming at the one-sided problem of traditional power grid disaster recovery plan evaluation and the limitation of traditional weight partition method, an evaluation method of electric power emergency plan with adaptive weights is proposed in this paper. The construction of comprehensive evaluation index and the determination method of adaptive weights are introduced in detail. With the highest similarity between the electric power emergency plan and the absolute positive ideal solution as the objective function and the judgment of RC grade method as the weight constraint condition, the relative closeness between the electric power emergency plan and the absolute positive ideal solution is calculated and compared to realize the ranking of the electric power emergency plan. This method improves the comprehensiveness of evaluation index and avoids the influence of subjective factors on weight division. The scientific evaluation results of plans provide reference and assistance for the formulation and modification of plans. The final application example in this paper shows the effectiveness of this method.

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

Key words: power emergency; preplan evaluation; evaluation index construction; RC grade method; adaptive weight

0 引言

随着社会经济的快速发展，电力作为国民经济的基础产业，对经济社会发展和人民生活起着重要的支撑和保障作用，人们对电的依赖不断增加，因此近些年发生的大面积停电事故，给国民经济带来了巨大损失[1-3]。这使电力应急预案显得尤为重要，在电网事故处理中，电力应急预案有很强的必要性[4-5]。现有的电网灾变恢复预案评价系统中，大多仅对某一项应急职能或者应急能力进行评价，例如从电网调度来对电力应急预案进行评价，文献[6]指出现阶段的电力应急系统还不完善，这使得应急预案的评价也相对片面。文献[7-9]从电网调度方面来对电力应急预案进行改善。文献[10-11]介绍了如何加强电力应急中的通信保障。文献[12-13]指出物资保障在电力应急管理工作中的作用及加强措施。文献[14]提出了一种定性和定量分析电力系统安全等级的安全等级分类方法。文献[15]提出一种不受故障类型和位置、故障前功率、故障电阻、故障起始时间等影响的故障检测与分类方法，很好地提高了电网的

基金项目：国家重点研发计划项目资助(2016YFC0205204)

灾害监测能力。其次，大多数的预案评价系统中，权重划分多采用 AHP 法和熵权法，AHP 权重划分方法由于主观性较强的缘故使得该方法具有一定的局限性，而熵权法同样存在自身的局限性。文献[16]中的评估模型把模糊决策理论和混合权重有效地联系起来，建立了熵权模糊综合评价模型。文献[17]提出了基于熵权及 TOPSIS 法的方案评估，增强了评估的客观性。文献[18]提出一种差异性权重和协同过滤相结合的综合评价模型。文献[19]提出了一种基于逼近理想解的评价模型，但是对属性权重的配置问题没有特别的解决办法。

本文首先从电力应急预案的评价指标入手，将评价指标的范围涵盖到应急实施时的六大职能部门，使得应急预案的评价更具有可靠性和完整性。同时，本文在对应急预案评价指标权重划分时，运用了自适应权重模型，同时 RC 等级法为权重设置约束条件，二者的结合使得电力应急预案评价指标的权重划分更具实用性和可操作性。

1　电力应急预案评价指标

1.1　电力应急预案评价指标分类

进行电力应急预案评价的重中之重就是首先确定采用的评价分类指标，完善的电力应急预案评价指标可以对相关电力行业工作人员进行预案的规划、建设指导[20]。能够很好地反映电力应急预案在应对电力突发事件中控制手段的及时性和针对性，是电力应急预案评价指标建立的关键所在。

电力系统应急管理体系包含多种特征量及功能，如应急体系架构中经常强调的 6 种关键职能，这 6 种职能分别对应 6 个不同部门，分别为调度部门、运检部门、信通部门、物资部门、检修部门和安监部门。传统的电力应急预案评价方法大多只针对这 6 个方面中的某一个方面进行考虑，例如在大面积停电的灾变恢复过程中的电网调度应急预案，其多目标优化函数及边界条件分为电压等级转化次数、主要电气设备开关操作次数、恢复的负荷顺位、重要负荷恢复度、停电时间、电量损失、节点电压约束条件、功率约束条件、黑启动电源的启动功率优化等。而完整的电力应急预案评价则需要从多个关键方面进行全面考虑，所以本文采用的评价指标从这几个关键方面进行划分，并将这几个方面作为电力应急预案评价的一级指标。然后对于各一级指标，分别抽取出若干个二级指标，确定的方法为根据相关电力应急导则指定，以及对电网企业以往应急预案和应急事故的处置过程进行提炼、分析，从而确定各个切实有效的二级应急预案评价指标，指标的划分可见图 1 (所有指标均为二层分类指标)。

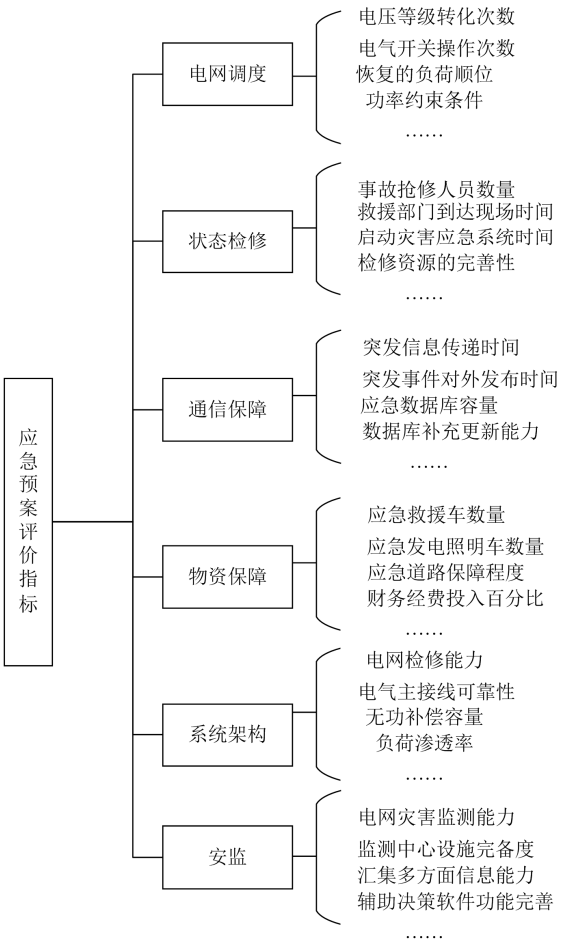


图 1　电力应急预案指标体系构建

Fig. 1 Construction of index system for power emergency plan

1.2　电力应急预案评价指标赋值

评价指标构建完成后，则需要对所有指标进行赋值。本文中的指标赋值主要针对二级指标进行赋值。

二级指标的赋值根据事件库中的赋值规则进行赋值，例如电压等级转换次数，每经过一个变电站，电压就变化一次，将电压等级转换次数作为电网调度下的二级指标，目的是为了保证电网节点电压的稳定性。具体赋值函数为

$$\begin{cases} 1, 0 \le x \le 2 \\ 1-\dfrac{x-2}{2}, 2 \le x \le 4 \\ 0, x \ge 4 \end{cases}$$

式中，x 表示电压等级转换次数。

对于二级指标中的定性指标，用等级描述法表示，然后可以采用三角模糊数将其量化。

定义 1[21] 若 $N=(x,y,z)$，其中 $0<x\le y\le z$，称 N 为一个三角模糊数。$\alpha=y-x$，$\beta=z-y$，可

取 $\alpha=\beta=1$。

定义 2 三角模糊数的清晰值[19]为

$$N'=(x+2y+z)/40 \tag{1}$$

如图 2 所示，本文采用三角模糊数的三标度法，将定性指标量化为三角模糊数，然后再根据式(1)把三角模糊数转化为清晰值，便于数据计算。



图 2 三角模糊数的三标度法

Fig. 2 Three scale method of triangular fuzzy numbers

将各二级指标赋值完成后，按照二级指标等权重原则，将各二级指标值乘以各自权重并作和，作为对应一级指标的赋值大小，以此作为电力应急预案评价的基础。

2　自适应权重在电力应急预案评价中的应用

在确定电力应急预案评价指标构建以及指标赋值后，需要对所有指标进行权重划分，而同一一级指标下的二级指标采用等权重划分，所以本文主要针对各一级指标在特定应急情景下，进行自适应权重划分。传统电网灾变恢复预案的评价方法中，权重问题一般多为人为设定值，这种做法缺乏主观性，并不合理。虽然已有论文研究出了主客观结合的权重，但仍存在一定的局限性。本文采用自适应权重划分方法，在电力应急预案评价中具有一定的实际意义。

2.1 自适应权重模型

本文提出了自适应最优权重的确定方法。首先假设有 m 个待评价应急预案，且每个预案有 n 个评价指标，其中 a_{ij} 表示第 i 个待评价预案第 j 个指标的经归一化后的评价值，其指标值越大，表明该方案指标越优。$\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)$ 为指标的属性权重，专家根据自身的工作经验对指标权重的大小进行判断。但是为了保证每个指标都起到一定的作用，指标权重的最大和最小值不得与权重的平均值相差太大。其设置结果可由集合 H 中的子集表示，如式(2)。

$$\begin{aligned}H=\{&\omega_i\ge\omega_j;\ \ \omega_i-\omega_j\ge\varepsilon_i(\varepsilon_i>0);\beta_j+\varepsilon_j\ge\\&\omega_j\ge\beta_j(1\ge\beta_j+\varepsilon_j\ge\beta_j>0);\\&\omega_j\in(\frac{1}{n}-\delta,\frac{1}{n}+\delta),(1>\frac{1}{n}+\delta,\frac{1}{n}-\delta>0)\}\end{aligned} \tag{2}$$

本文取 δ=0.1，其中 $\frac{1}{n}$ 为指标权重的平均值。

规定各个评价指标的理想最优解为

$$\begin{aligned}a=(a_1,a_2,\cdots,a_n)=\\(\max_{1\le i\le m}a_{i1},\max_{1\le i\le m}a_{i2},\cdots,\max_{1\le i\le m}a_{in})\end{aligned} \tag{3}$$

由式(4)可知，理想最优解指的是待评价预案中每个指标的最大值，亦是正极端应急预案指标值。

设每个指标与理想最优解中同类指标的相似度为

$$d_{ij}=d(a_{ij},a_j)=1-\frac{|a_{ij}-a_j|}{\sum_{j=1}^{n}|a_{ij}-a_j|} \tag{4}$$

d_{ij} 表示第 i 个待评价预案中第 j 个指标与理想最优解中 j 类指标的相似度，d_{ij} 越高，则说明该指标值越优，否则相反。

通过加权和即可得到第 i 个待评价预案与理想最优解之间的相似度为

$$d_i=\sum_{j=1}^{n}\omega_j d_{ij} \tag{5}$$

因为一个最优权重向量一定满足每个电力应急预案与理想最优解的相似度最高的原则，因此本文建立如下多目标线性规划模型[7]：

$$\begin{aligned}&\text{Modell}:\max\{\sum_{j=1}^{n}\omega_j d_{1j},\sum_{j=1}^{n}\omega_j d_{2j},\cdots,\sum_{j=1}^{n}\omega_j d_{mj}\}\\&\text{s. t.}\quad\omega\in H\\&\qquad\omega_1+\omega_2+\cdots+\omega_n=1\\&\qquad\omega_j\ge0\end{aligned} \tag{6}$$

由于每个目标函数都是同等重要的，因此可将上述模型简化为单目标线性规划模型，如式(7)所示。

$$\begin{aligned}&\text{Model2}:\max\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\omega_j d_{ij}\\&\text{s. t.}\quad\omega\in H\\&\qquad\omega_1+\omega_2+\cdots+\omega_n=1\\&\qquad\omega_j\ge0\end{aligned} \tag{7}$$

通过对模型(7)进行求解即可得到电力应急预案的自适应最优权重。

2.2 基于 RC 法的评价指标权重约束

在实际应用中，电力应急预案中的每一个指标的重要性不一定相等，尤其是在具体的电力突发事故中，指标的相对重要程度并不相等，此时就需要着重考虑某一个或者某几个指标，即指标权重在具体电力突发事件中有定性的大小排序，这对最终的评价结果有着重要的影响，因此如何对指标的重要等级大小排序至关重要。

本文采用 RC(rank-centroid)法为各个一级评价指标进行重要程度排序[22]，从而作为指标权重划分

的约束条件。该方法是让相关电力应急专家根据各个指标在具体电力突发事故中的重要程度来划分等级，具体方法为指定最重要的评价指标的等级为 1，次级重要的评价指标等级为 2，以此类推。

表 1 为使用等级法时所用的计算评价表，每个电力应急预案评价专家根据自己的判断，在表中给出自己的指标等级值，根据给出的各个指标的等级值，计算出指标的最终等级值之和，用来评判各个指标的最终权重大小排序。

表 1 指标重要等级程度计算表

Table 1 Tables of index importance ratings

评价指标	专家指定等级值				等级值和
	*P*1	*P*2	…	*Pn*	
*B*1	S_{11}	S_{12}	…	S_{1n}	S_1
*B*2	S_{21}	S_{22}	…	S_{2n}	S_2
*B*3	S_{31}	S_{32}	…	S_{3n}	S_3
*B*4	S_{41}	S_{42}	…	S_{4n}	S_4
*B*5	S_{51}	S_{52}	…	S_{5n}	S_5
*B*6	S_{61}	S_{62}	…	S_{6n}	S_6

注：*B*1—*B*6 依次表示电网调度、状态检修、通信保障、物资保障、系统架构和安监 6 个一级指标。

表中，S_i 为所有专家指定指标 *Bi* 的等级之和，则

$$S_i=\sum_{j=1}^{n}S_{ij} \tag{8}$$

根据 S_i 的大小对评价指标进行排序，S_i 越小，则表明指标越重要，则在电力应急预案评价中该指标的权重越大，将得到的权重大小排序作为电力应急预案评价一级指标的权重约束。

2.3 电力应急预案评价的步骤

电力应急预案的评价步骤如下：

Step1 应急评价指标赋值。

具体赋值方法按照 1.2 节所示，对所有二级指标进行赋值，并按同一一级指标下的二级指标等权重原则，将二级指标赋值转化为 6 个电力应急预案一级评价指标的赋值大小。

Step2 数据标准化。

对每个电力应急预案中的指标值进行标准化处理，数据标准化公式为

$$a'_{ij}=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\times\frac{a_{ij}-\min\limits_{1\le i\le m}a_{ij}}{\max\limits_{1\le i\le m}a_{ij}-\min\limits_{1\le i\le m}a_{ij}},(j=1,2,\cdots,n) \tag{9}$$

式中，a_{ij} 表示第 *i* 方案第 *j* 指标。

该标准化方法避免了传统解法运用时经常出现的逆序问题。

Step3 计算指标权重。

首先，根据 RC 法确定各一级评价指标的权重约束关系，作为计算自适应权重的约束条件。

然后，根据式(3)—式(7)求解得到自适应最优权重值 $\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)$。

Step4 构造加权决策矩阵。

根据 Step3 求解得到自适应最优权重值 $\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)$，可得到加权决策矩阵为

$$A''=\left(a''_{ij}\right)_{m\times n} \tag{10}$$

式中，$a''_{ij}=\omega_j\times a'_{ij}(i=1,2,\cdots,m,\ j=1,2,\cdots,n)$。

Step5 得到电力应急预案的正理想解和负理想解，即正负极端方案。

正理想解为

$$(a'')^{+}=(\max_{1\le i\le m}a''_{i1},\max_{1\le i\le m}a''_{i2},\cdots,\max_{1\le i\le m}a''_{in})=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n) \tag{11}$$

负理想解为

$$(a'')^{-}=(\min_{1\le i\le m}a''_{i1},\min_{1\le i\le m}a''_{i2},\cdots,\min_{1\le i\le m}a''_{in})=(0.5\omega_1,0.5\omega_2,\cdots,0.5\omega_n) \tag{12}$$

Step6 计算各应急预案到正负理想解的欧氏距离。

1) 各应急预案到正理想解之间的欧氏距离。

$$d^{i}_{\text{best}}=\left\|a'_i-(a')^{+}\right\|=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\omega_j(a'_{ij}-1)^2} \tag{13}$$

2) 各应急预案到负理想解之间的欧氏距离。

$$d^{i}_{\text{worst}}=\left\|a'_i-(a')^{-}\right\|=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\omega_j(a'_{ij}-0.5)^2} \tag{14}$$

Step7 计算每个电力应急预案的相对贴近度。

$$C_i=\frac{d^{i}_{\text{worst}}}{d^{i}_{\text{best}}+d^{i}_{\text{worst}}} \tag{15}$$

Step8 根据相对贴近度的大小对所有电力应急预案进行排序。当 C_i 值愈大，该电力应急预案越理想，反之，则越不理想。

3 算例分析

为了验证本文评估方法的有效性，本文采用宁波地区针对自然灾害的 5 套电力应急预案进行评价(预案编号为：SGCC-ZJ-NB-ZT-01、SGCC-ZJ-NB-ZT-02、SGCC-ZJ-NB-ZT-03、SGCC-ZJ-NB-ZT-04、SGCC-ZJ-NB-ZT-05)。

这 5 套电力应急预案的编制依据及考虑约束条件的优先度如下所示(依次用 *Y*1~*Y*5 表示 5 套电力应急预案)：*Y*1 主要依据于灾害发生时现场的物资保障重要度优先；*Y*2 则强调灾变恢复时的电网调度和安监两个部门的功能保障；*Y*3 针对灾害发生时应急处置任务对电网系统架构坚强性方面的依赖程度；

*Y*4 则根据应急人员的整体灾害处置能力的评估而制定；*Y*5 主要依据灾害发生时兼顾电网设备状态检修及网架结构两方面的综合评分。各电力应急预案的指标情况如表 2 所示。

表 2 各评价预案的指标情况

Table 2 Evaluation index value

一级指标	二级指标	应急预案				
		*Y*1	*Y*2	*Y*3	*Y*4	*Y*5
电网调度	电压等级转化次数	2 次	1 次	2 次	3 次	2 次
	电气开关操作次数	2 次	1 次	2 次	2 次	2 次
	⋮					
状态检修	事故抢修人员数量	750 人	750 人	500 人	750 人	800 人
	救援到达现场时间	20 min	20 min	25 min	20 min	10 min
	⋮					
通信保障	突发信息传递时间	6 s	6 s	10 s	6 s	10 s
	事故对外发布时间	15 min	15 min	20 min	15 min	25 min
	⋮					
物资保障	应急救援车数量	200 辆	150 辆	150 辆	180 辆	180 辆
	应急照明车数量	50 辆	40 辆	35 辆	50 辆	50 辆
	⋮					
系统架构	电网检修能力	二级	二级	一级	一级	一级
	电气主接线可靠性	三级	二级	一级	二级	一级
	⋮					
安监	电网灾害监测能力	一级	一级	二级	二级	二级
	监测设备完善性	一级	二级	三级	三级	三级
	⋮					

注：表中仅给出每 1 个一级指标下的两个二级指标的情况表述，由于二级指标数量较多，文中没有一一列出，其余二级指标类似。

Step1 对各电力应急评价指标赋值。

对于二级指标的赋值规则，在 1.2 节有所介绍，例如电压等级转化次数，应急预案 *Y*1 为 2 次，则由式(1)可知赋值为 1.0；再例如电网检修能力，应急预案 *Y*1 为二级，则由三角模糊数可知赋值为 0.7。

对于一级指标赋值，采用二级指标等权重赋值累加和形式，例如应急预案 1 的电网调度一级指标的赋值方法为

$$a_{11} = 0.25 \times (1.0 + 1.0 + 0.8 + 0.8) = 0.9$$

其中，1.0、1.0、0.8 和 0.8 分别为电网调度一级指标下二级指标(电压等级转化次数、电气开关操作次数、恢复的负荷顺位和功率约束条件)的赋值大小，而 0.25 是各二级指标的权重大小，采用二级指标等权重制。表 3 中其他电力应急预案指标赋值方法与此相同。

表 3 评估方案指标值

Table 3 Evaluation index value

应急预案	*B*1	*B*2	*B*3	*B*4	*B*5	*B*6
*Y*1	0.90	0.90	0.95	1.00	0.80	0.95
*Y*2	1.00	0.90	0.95	0.85	0.90	1.00
*Y*3	0.90	0.75	0.85	0.80	1.00	0.85
*Y*4	0.80	0.90	0.95	0.95	0.95	0.85
*Y*5	0.90	1.00	0.80	0.95	1.00	0.85

注：*B*1~*B*6 依次表示电网调度、状态检修、通信保障、物资保障、系统架构和安监 6 个一级指标。(下同)

Step2 根据式(10)进行数据标准化处理。标准化后的评价指标如表4所示。

表 4 标准化后的评价指标值

Table 4 Evaluation index values after standardization

应急预案	*B*1	*B*2	*B*3	*B*4	*B*5	*B*6
*Y*1	0.75	0.80	1.00	1.00	0.5	0.83
*Y*2	1.00	0.80	1.00	0.625	0.75	1.00
*Y*3	0.75	0.50	0.667	0.5	1.00	0.5
*Y*4	0.50	0.80	1.00	0.875	0.875	0.5
*Y*5	0.75	1.00	0.50	0.875	1.00	0.5
正极端	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
负极端	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

Step3 求取自适应权重。

首先，根据 RC 法确定各指标的权重约束关系，作为计算自适应权重的约束条件，得到的指标重要等级计算表如表 5 所示。假设共有 4 位专家参与评判。

表 5 指标重要等级程度计算表

Table 5 Tables of index importance ratings

评价指标	专家指定等级值				等级值和
	*P*1	*P*2	*P*3	*P*4	
*B*1	1	1	1	3	6
*B*2	6	6	6	5	23
*B*3	3	2	3	2	10
*B*4	5	5	5	6	21
*B*5	4	4	4	4	16
*B*6	2	3	2	1	8

根据上述结果可以得出，指标的重要等级排序为：$B1 > B6 > B3 > B5 > B4 > B2$，因此有

$$\omega_1 > \omega_6 > \omega_3 > \omega_5 > \omega_4 > \omega_2$$

再根据式(6)、式(7)求解得到的各个一级指标的权重大小为

$\omega = (0.270, 0.066, 0.143, 0.121, 0.135, 0.265)$

根据式(11)将得到的权重值代入标准化后的指标数值中，即可得到加权决策矩阵如表 6 所示。

表 6 加权决策矩阵

Table 6 Weighted decision matrices

应急预案	*B*1	*B*2	*B*3	*B*4	*B*5	*B*6
*Y*1	0.203	0.053	0.143	0.121	0.068	0.220
*Y*2	0.270	0.053	0.143	0.076	0.101	0.265
*Y*3	0.203	0.033	0.095	0.061	0.135	0.133
*Y*4	0.135	0.053	0.143	0.106	0.118	0.133
*Y*5	0.203	0.066	0.072	0.106	0.135	0.133
正极端	0.270	0.066	0.143	0.121	0.135	0.265
负极端	0.135	0.033	0.072	0.061	0.068	0.133

Step4 根据式(11)、式(12)求取正负理想解。

正理想解为

$(a'')^{+} = (0.270, 0.066, 0.143, 0.121, 0.135, 0.265)$

负理想解为

$(a'')^{-} = (0.135, 0.033, 0.072, 0.061, 0.068, 0.133)$

Step5 根据式(13)—式(15)，算出每个方案到正负理想解的欧氏距离和相对贴近度，并根据相对贴近度的大小进行方案排序。其评估结果如表 7 所示。

表 7 评估结果

Table 7 Assessment results

方案	d_{best}	d_{worst}	相对贴近度
*Y*1	0.060 9	0.128 2	0.677 9
*Y*2	0.028 1	0.185 8	0.868 6
*Y*3	0.145 7	0.054 6	0.272 6
*Y*4	0.140 4	0.077 7	0.356 3
*Y*5	0.120 8	0.084 1	0.410 4

根据每个电力应急预案的相对贴进度大小进行排序，可以得到：$Y2 > Y1 > Y5 > Y4 > Y3$，从而可以得出电力应急预案的优劣排序亦是：$Y2 > Y1 > Y5 > Y4 > Y3$。应急预案 2 的电网调度和安监这两个一级指标，相对其他 4 套预案最强，而在指标权重划分时，这两个指标的权重最大，因此结果显示应急预案2为最优，所得到的预案排序结果符合实际。

4 结论

合理的电力应急预案评价方法可以为改善预案质量提供支撑和辅助。建立科学合理的电力应急预案评价方法是现阶段电力应急工作者的重要研究内容之一。本文提出的电力应急预案指标评价方法，评价指标的构建较为全面，涵盖了应急执行时的主要部门及应急功能，有效地解决了以往预案评价中针对单一部门或应急能力的评价片面性问题。同时，本文采取的自适应权重算法模型，将 RC 等级法与自适应权重模型结合，将其作为权重的约束条件，使得权重划分更具有实用性和可靠性。并以浙江宁波的自然灾害预案为例进行了实际展开，具有很好的实用性，对电力应急预案的选择和完善具有重要的参考意义。最后，本文的计算中涉及到不少的指标选取及参数计算，有些指标的确定需要进行实际评估，本文中这些指标的选取方法还稍显粗糙，更精确的选取方法将是在建立电力应急预案时应该细化的内容，通过对较多电力应急预案的梳理和深入研究，可以选取出更加科学合理的预案评价指标体系，更好地服务于电力应急。

参考文献

[1] 唐斯庆, 张弥, 李建设, 等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化, 2016, 30(1): 1-7, 16.
TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26—causes and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7, 16.

[2] 葛爽. 电力企业生产安全事故应急预案的编制及改进[J]. 电力安全技术, 2019, 21(1): 13-15.
GE Shuang. Development and improvement of emergency plan for production safety accidents in electric power enterprises[J]. Electric Power Safety Technology, 2019, 21(1): 13-15.

[3] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-5.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of Australian “9.28” blackout and its enlightenment to china[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-5.

[4] 黄忠海. 电网事故处理中应急处理预案的重要性[J]. 中外企业家, 2017(36): 215-217.
HUANG Zhonghai. Importance of emergency response plan in power grid accident handling[J]. Chinese & Foreign Entrepreneurs, 2017(36): 215-217.

[5] 印水华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-10.
YIN Shuihua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of the “8.14” blackout in the United States and Canada and lessons to be learned[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-10.

[6] 郑联琼. 探析电力应急管理中的不足与解决措施[J]. 低碳世界, 2017(21): 89-90.
ZHENG Lianqiong. Analysis of the insufficiency and solutions in power emergency management[J]. Low Carbon World, 2017(21): 89-90.

[7] 黄宋波, 朱余启, 何金定, 等. 电网脆弱性评估调度应

急预案管理系统[J]. 云南电网技术, 2016, 44(5): 25-27.
HUANG Songbo, ZHU Yuqi, HE Jinding, et al. Dispatching contingency plan management system for power grid vulnerability assessment[J]. Yunnan Electric Power, 2016, 44(5): 25-27.

[8] 高明, 李文云, 袁德君, 等. 使用故障树理论对电网调度自动化系统应急预案完备度的量化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 58-63.
GAO Ming, LI Wenyun, YUAN Dejun, et al. Completeness degree quantitative analysis of dispatching automation system emergency preplan[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 58-63.

[9] 蒋维勇, 张伯明, 吴文传, 等. 一种增强电网输送能力的应急调度决策模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 12-15.
JIANG Weiyong, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. An emergency dispatching decision-making model for enhancing the transmission capacity of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 12-15.

[10] 朱朝阳, 于振, 刘超, 等. 电力应急管理理论与技术体系研究[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 178-182.
ZHU Chaoyang, YU Zhen, LIU Chao, et al. Research on theory and technology system of electric power emergency management[J]. Power Grid Technology, 2011, 35(2): 178-182.

[11] 高强, 刘献伟, 邱丽君, 等. 电力系统应急通信网络及其抗毁性分析[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 104-108.
GAO Qiang, LIU Xianwei, QIU Lijun, et al. Emergency communication network of power system and its destruction resistance analysis[J]. Power System Technology, 2009, 35(2): 104-108.

[12] 黄磊, 马倩. 电力企业加强应急物资管理工作的措施[J]. 中外企业家, 2017(36): 74-75.
HUANG Lei, MA Qian. Measures for strengthening emergency supplies management in electric power enterprises[J]. Chinese & Foreign Entrepreneurs, 2017(36): 74-75.

[13] 杨舒婷, 谢宁, 王赛一, 等. 基于不同用户需求的移动应急电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 115-119.
YANG Shuting, XIE Ning, WANG Saiyi, et al. Mobile emergency power optimal configuration based on different users'demand[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 115-119.

[14] LU Zhigang, HE Liangce, ZHANG Dan, et al. A security level classification method for power systems under N-1 contingency[J]. Energies, 2017, 102(55): 1-17.

[15] EL-SAADAWI M, HATATA A. A novel protection scheme for synchronous generator stator windings based on SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 257-268. DOI: 10.1186/s41601-017-0057-x.

[16] 林济铿, 李童飞, 赵子明, 等. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 115-120.
LIN Jinkeng, LI Tongfei, ZHAO Ziming, et al. Assessment on power system black-start schemes based on entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 115-120.

[17] 林振智, 文福拴, 周浩, 等. 熵权决策理论及其在黑启动决策中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 26-33.
LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, ZHOU Hao, et al. Entropy weight based decision-making theory and its application to black-start decision-making[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 26-33.

[18] 冷亚军, 陆青, 张俊岭, 等. 基于差异性权重和协同过滤的黑启动方案评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 78-83.
LENG Yajun, LU Qing, ZHANG Junling, et al. Assessment of black-start schemes based on difference weight and collaborative filtering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 78-83.

[19] 倪静. 基于TOPSIS法的黑启动决策方法[J]. 广东电力, 2009, 22(12): 8-11.
NI Jing. Black-start decision-making method based on TOPSIS[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(12): 8-11.

[20] 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.
CHENG Zhenggang, FANG Xinyan, YU Guoqin, et al. Research of vulnerability assessment of power emergency system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 51-54.

[21] 胡丽芳, 关欣, 邓勇, 等. 一种三角模糊数型多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(12): 1877-1880, 1885.
HU Lifang, GUAN Xin, DENG Yong, et al. Approach for fuzzy multi-attribute decision making[J]. Control and Decision, 2011, 26(12): 1877-1880, 1885.

[22] 陈伟. 一种基于等级法的联网审计绩效评价方法[J]. 计算机科学, 2010, 37(11): 111-116.
CHEN Wei. Performance assessment method of online auditing based on rank-centroid[J]. Computer Science, 2010, 37(11): 111-116.

收稿日期：2018-09-13；　修回日期：2018-12-29

作者简介：

李路军(1970—)，男，通信作者，本科，工程师，研究方向为电力安全监督、应急管理、风险评估；E-mail: satanj@126.com

丁鹏堃(1993—)，男，通信作者，硕士，研究方向为电力系统保护和电力应急预案。E-mail: Dingpengkun@sjtu.edu.cn

(编辑　周金梅)