



基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价

王迪, 房鑫炎, 陈晓国, 宋永超, 黎振宇, 丁鹏堃

引用本文:

王迪, 房鑫炎, 陈晓国, 等. 基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1333–1341.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题](#)

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time
控制与决策. 2021, 36(6): 1387–1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681>

[基于策略权重的模糊多属性决策方法](#)

Strategic weight manipulation in fuzzy multiple attribute decision making
控制与决策. 2021, 36(5): 1259–1267 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0542>

[考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择](#)

Routing optimization of cross-regional collaborative emergency rescue considering efficiency and fairness
控制与决策. 2021, 36(2): 483–490 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0919>

[考虑时间序列的动态大群体应急决策方法](#)

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series
控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

[乡村旅游开发适宜性等级评价TOPSIS方法](#)

TOPSIS method of suitability grade assessment for rural tourism development
控制与决策. 2020, 35(11): 2619–2625 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1565>

基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价

王迪^{1†}, 房鑫炎¹, 陈晓国², 宋永超³, 黎振宇², 丁鹏堃¹

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 南方电网科学研究院
有限责任公司, 广州 510663; 3. 中国南方电网有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 首先,对电网应急能力进行基于时间维度和空间维度的拆解,构建基本电网应急能力评价指标体系;其次,考虑到指标评价标准具有动态性的问题,采用三角模糊数对指标进行量化处理,并建立可对多个模糊数集结的优化模型;然后,采用 α -截集对三角模糊数进行处理并建立基于单一时间节点下的模糊-两阶段超效率SBM模型实现对电网应急能力的静态评价;最后,以时间维度拆解为基础,建立电网应急能力动态综合评价模型,实现对应急能力的整体评价、排序,使评价结果更加具有科学性和合理性.实例分析结果表明,所提出方法可有效区分应急能力仍需作出改善的区域,并在一定程度上克服评价标准需要动态变化的问题,具有较强的客观性.

关键词: 电网应急能力评估; 应急能力拆解; 指标体系; 模糊数; 两阶段超效率SBM; 动态评价

中图分类号: TM711

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1128

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王迪,房鑫炎,陈晓国,等. 基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1333-1341.

Dynamic comprehensive evaluation of power grid emergency capability based on fuzzy-two-stage super efficiency SBM

WANG Di^{1†}, FANG Xin-yan¹, CHEN Xiao-guo², SONG Yong-chao³, LI Zhen-yu², DING Peng-kun¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou, 510663, China; 3. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Firstly, the power grid emergency capability is disassembled based on time dimension and space dimension, and the basic power grid emergency capability evaluation index system is constructed. Secondly, considering the dynamic problem of the index evaluation standard, the index is quantified with triangular fuzzy numbers, and the optimization model for the aggregation of multiple fuzzy numbers is established. Then, the triangular fuzzy numbers are processed using the cut-off set, and the fuzzy two-stage super efficiency SBM model based on a single time node is established to realize the static evaluation of power grid emergency capability. Finally, the dynamic comprehensive evaluation model of power grid emergency capability is established based on the disassembly of time dimension, which realizes the overall evaluation and sequencing of corresponding emergency capability, making the evaluation results more scientific and reasonable. The results of case study show that the method can effectively distinguish the areas where the emergency capability still needs to be improved, and to a certain extent, it overcomes the problem of that the evaluation criteria need to change dynamically, and has strong objectivity.

Keywords: power grid emergency capability assessment; emergency capability disassembly; index system; fuzzy number; two-stage super efficiency SBM; dynamic evaluation

0 引言

近几年来,世界范围内接连发生了不同规模的大面积停电事故^[1-4],给人民的和社会的正常运行带来了巨大的不良影响.因此,采取合理有效的措施避免大面积停电事故的发生已成为各国研究的热门

内容.由于我国幅员辽阔,气候变化呈现多样性,众多因素的影响无法完全避免电力事故的发生.尽管目前电网企业的应急能力已经处于一个较高水平,但由于“三型两网”发展战略的提出以及新能源的接入使得应急工作仍有更大的提升空间.由此,对电网应急

收稿日期: 2019-08-06; 修回日期: 2019-12-06.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0205204); 中国南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20180039).

责任编委: 张维海.

[†]通讯作者. E-mail: 1183801803@qq.com.

能力进行评估仍是一项十分必要的工作。

进行电力系统应急能力评估可以直观地展现出电网企业在应对电力突发事件时的工作能力,并有助于找出其在应急活动中存在的薄弱环节,提升应急处置效率,降低停电事故发生造成的不利影响。目前,相对于国外应急领域的研究,我国在该领域的研究起步较晚,但已有相关专家学者对其进行了探索并取得了一定的进展。文献[5]根据应急管理理论建立了针对输变电工程的指标体系,考虑到指标间的内部联系,采用网络层次分析法确定指标权重,并运用二元语义法消除了评估过程中存在模糊性的问题;文献[6]采用主客观组合赋权的方法对所建立的电网应急能力评价指标体系进行权重赋值,并与VIKOR模型相结合,从而对电网应急能力进行评估;文献[7]以配电网的应急能力为研究对象,建立了主客观相结合的组合赋权法来确定指标权重,从而弥补了主观赋权法存在的不足。

可以看出,已有的研究成果大多是从静态角度出发对电网应急能力进行评估,而实际上应急工作是一个具有动态性、连续性、循环性的过程。因此,在进行应急能力评估工作时考虑时间因素的影响可以在一定程度上提升评估结果的精准性,增强说服力。此外,在进行电网应急能力评估时不仅存在着对单一评价对象进行能力评估的情况,还存在着对多个对象之间进行评价比较的需求,但由于存在区域性等差异,采用统一的评价标准会使得评价结果有失客观性和公允性。因此,本文引入模糊系统理论,决策层可根据待评价对象的实际情况动态地设定评价标准,完成对其评价指标的赋值。目前,模糊系统在电网应急能力评估领域已有相关的应用。文献[8]从应急管理行业的特点出发,构建了多层级的电力系统基础设施应急评价指标体系,并采用层次分析法与模糊综合评价方法相结合的方式实现对电网基础设施应急能力的量化评价;文献[9]以电力系统应急过程为准则建立了详细的指标评估体系,并采用模糊层次分析法实现了电网企业在自然灾害情景下的应急能力量化表示方法。然而,已有的基于模糊理论的电网应急能力评价大多为对单个对象进行评估,尽管在其他行业基于模糊系统的应急能力评价存在对多个对象进行评估的研究^[10-11],但大多数研究只能确定多个评价对象的排列顺序,判断出应急能力最优的对象,却未能有效区分出其应急能力水平是否相对有效。

基于以上考虑,本文从时间维度和空间维度对电网应急能力进行拆解,构建基于时空维度的电网基本应急能力评价指标体系;针对待评价对象发展具有

差异性以及未能有效区分其应急能力有效性的问题,建立基于模糊-两阶段超效率SBM的静态电网应急能力评价模型,实现对评价标准动态化评估;最后,通过分析时间序列的相对重要性,建立可集结时间维度的电网应急能力动态综合评价模型,实现对电网应急能力的综合评价排序。

1 电网应急能力评价基本指标体系

在进行电力系统应急能力评估之前,首先需要进行应急能力指标体系的构建。合理的指标体系是电力系统应急能力评估是否能够反应实际情况的关键环节。因此,本文通过对应急任务进行时间维度和空间维度的拆解,分析影响应急能力的关键要素,建立应急电网应急能力评价指标体系,实现对电网应急能力的分解。其中,对于时间维度和空间维度拆解方式如下文所示。

1.1 时间维度拆解

应急管理活动是一个连续、动态的过程,根据情景的发展过程,可将其划分为预防与应急准备、监测与预警、应急处置与救援、事后恢复与重建4个阶段^[12],如图1所示。



图1 应急能力时间维度拆解

基于时间拆解的4个应急能力阶段是依次交替进行的,并且在各阶段所侧重的应急任务也有所区别。因此,本文将其作为应急能力指标体系的一级指标,并在后文对其进行进一步的指标划分。

1.2 空间维度拆解

空间维度拆解是在时间维度的基础上进行的,是针对单时间阶段的静态拆解过程,本文按照应急管理体系的特点将空间维度拆解为主体、物态和环境3个基本要素,并对其分别作如下定义:1) 应急主体:主要包括相关工作人员或组织机构在职责范围内的工作完成或落实情况,通常不随情景的变化而转移;2) 物态:在一定阶段内表现出相对稳定性的事物,受情景影响较小;3) 环境:在不同的情景下通常会呈现出不同状态的因素,受情景影响较大,具有一定的时效性和不确定性。空间拆解示意图如图2所示。

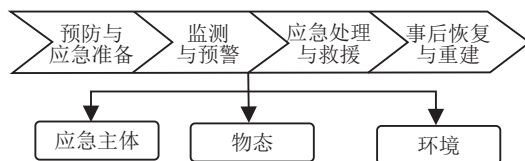


图2 应急能力空间维度拆解

将上述空间要素作为各应急阶段下的二级指标,

可将其更进一步地细化成三级指标。

1.3 电网应急能力基本评价指标体系的构建

根据上文的能力拆解,得到电网应急能力指标体

系如表1所示。由于篇幅限制,本文仅选取具有代表性的元素组成基本指标体系,在后续研究中可对其进行更加详细地细化或增减。

表1 电网应急能力评价指标体系

A级指标	一级指标	二级指标	三级指标
电网应急能力指标体系A	预防与应急准备B ₁	应急主体C ₁₁	应急队伍建设情况x ₁ 应急培训与演练能力x ₂
		物态C ₁₂	法律法规落实程度x ₃ 应急预案完善度x ₄
		环境C ₁₃	应急保障能力x ₅ 电网风险分析x ₆
	监测与预警B ₂	应急主体C ₂₁	预警管理工作执行情况x ₇ 预警监测系统落实情况x ₈
		物态C ₂₂	信息网络完善度x ₉ 预警调整与结束x ₁₀
		环境C ₂₃	
	应急处置与救援B ₃	应急主体C ₃₁	应急响应能力x ₁₁ 应急部门协调程度x ₁₂
		物态C ₃₂	信息报送能力x ₁₃ 资源调动及时性x ₁₄
		环境C ₃₃	现场处置能力x ₁₅ 应急队伍到达现场及时性x ₁₆
	事后恢复与重建B ₄	应急主体C ₄₁	事件评估调查能力x ₁₇ 对灾后人员救助情况x ₁₈
		物态C ₄₂	整改计划完善程度x ₁₉ 设施设备重建情况x ₂₀
		环境C ₄₃	

2 电网应急能力评估评价模型的建立

根据上文建立的指标体系可以看出:本文对指标采用的是定性化描述,很难用具体的函数关系式表示其具体数值;并且在实际的应急评估中,待评价对象之间往往存在区域性、队伍、物资等差异,比如在对指标信息网络完善度进行量化表示时,对于负荷要求高的地区,会将卫星通讯有无作为其中一个考核指标,而在其他地区则可不考虑该条件,因此在进行指标赋值时若采用统一的评价标准会使得评价结果缺少一定的客观性。基于此,本文采用一种将三角模糊数与两阶段超效率SBM相结合的方式对电网应急能力进行评估。

2.1 三角模糊数

三角模糊数是一种可将定性指标量化的方法,通常是决策层根据已有认知对指标赋值,在本文中,通过三角模糊数对指标赋值可以有效解决在多目标多指标的研究体系中指标边界条件难以用确切的函数表示的问题,即决策层可结合自身经验、实际情况以及历史事件库中的数据动态地设定待评价指标的评价标准,实现指标的量化表示。三角模糊数的相关理论如下。

定义1^[13] 记 $\tilde{X} = (x^l, x^m, x^u)$ 为一个三角模糊数,且有 $0 < x^l \leq x^m \leq x^u$,其中 x^l 为模糊数 $\tilde{X}$ 的下限, x^u 为模糊数 $\tilde{X}$ 的上限,则其隶属度函数为

$$\mu_x(a) = \begin{cases} 0, & a \leq x^l; \\ \frac{a - x^l}{x^m - x^l}, & x^l < a \leq x^m; \\ \frac{a - x^u}{x^m - x^u}, & x^m < a \leq x^u; \\ 0, & a \geq x^u. \end{cases} \quad (1)$$

对指标的量化表示通常需要参考决策层多位专家的意见使评估结果尽可能准确,因此需要对多个模糊数进行集结得到最终的赋值结果,本文采用一种基于模糊数差异性最小和相似度最高的集结算子^[14]。

定义2^[14] 设有两个任意的三角模糊数 $\tilde{X} = (x^l, x^m, x^u)$ 和 $\tilde{Y} = (y^l, y^m, y^u)$,则其相似度记为

$$A(x, y) = \frac{x^l y^l + x^m y^m + x^u y^u}{\sqrt{(x^l)^2 + (x^m)^2 + (x^u)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{(y^l)^2 + (y^m)^2 + (y^u)^2}}. \quad (2)$$

定义3^[15] 设有两个任意的三角模糊数 $\tilde{X} = (x^l, x^m, x^u)$ 和 $\tilde{Y} = (y^l, y^m, y^u)$,则其差异度记为

$$D(x, y) = \sqrt{(x^l - y^l)^2 + (x^m - y^m)^2 + (x^u - y^u)^2}. \quad (3)$$

由此,建立可将模糊数集结的优化模型^[15]

$$\min \sum_{k=1}^s D(y_k, x).$$

$$\text{s.t. } A(y_k, x) \geq \delta; k = 1, 2, \dots, s; x^l \leq x^m \leq x^u. \quad (4)$$

其中: $y_k = (y_k^l, y_k^m, y_k^u)$ ($k = 1, 2, \dots, s$) 为经 s 位决策层专家评判得到的三角模糊数; $x = (x^l, x^m, x^u)$ 为经集结后的三角模糊数; δ 为各集结模糊数 y_k 与最终模糊数 x 的相似度, 可根据实际需求设定.

2.2 基于单时间节点的模糊-两阶段超效率SBM模型

数据包络分析法 (data envelopment analysis, DEA)^[16] 是一种通过对输入输出进行分析而求取相对效率的评价方法, 对电网应急能力评估也可看成是一种针对应急工作的效率评估, 即效率越高, 应急能力越强, 效率越低, 应急能力越弱. 通过对多个区域的电网应急能力进行相对性比较, 可以促使应急能力相对薄弱的地区及时发现不足, 作出改进. 目前, 经过长期的科研探索, DEA 方法已经发展出多个相关模型, 其中应用较为广泛的为 C^2R 、超效率SBM^[17] 等模型, 但上述方法存在着未考虑松弛变量或出现无可行解的问题, 具有一定的局限性. 因此, 本文采用文献[18]中的两阶段超效率SBM模型进行分析.

2.2.1 α -截集

由于在使用两阶段超效率SBM模型求解时需要输入输出数据进行大小比较, 而含有三角模糊数的输出数据之间很难直接进行比较, 为方便分析, 本文引入 α -截集^[19] 对其进行处理.

定义4 设 $\tilde{X} = (x^l, x^m, x^u)$ 为经集结后的三角模糊数, 则记其 α -截集为 $\tilde{X}_\alpha = [x_\alpha^l, x_\alpha^u]$, $0 \leq \alpha \leq 1$. 其中: x_α^l, x_α^u 分别为在 α -截集上的区间下界和区间上界, 且有

$$x_\alpha^l = x^l + \alpha(x^m - x^l), \quad (5)$$

$$x_\alpha^u = x^u - \alpha(x^u - x^m). \quad (6)$$

2.2.2 模糊-两阶段超效率SBM模型

假设含有 N 个决策单元 (decision making unit, DMU), 并且每个决策单元在时段 t_k 中包含 m 个输入指标和 s 个输出指标, 则记

$$\begin{aligned} (\tilde{X}(t_k))_\alpha &= \\ &\begin{bmatrix} (\tilde{x}_{11}(t_k))_\alpha & (\tilde{x}_{12}(t_k))_\alpha & \cdots & (\tilde{x}_{1N}(t_k))_\alpha \\ (\tilde{x}_{21}(t_k))_\alpha & (\tilde{x}_{22}(t_k))_\alpha & \cdots & (\tilde{x}_{2N}(t_k))_\alpha \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\tilde{x}_{m1}(t_k))_\alpha & (\tilde{x}_{m2}(t_k))_\alpha & \cdots & (\tilde{x}_{mN}(t_k))_\alpha \end{bmatrix}, \quad (7) \\ (\tilde{Y}(t_k))_\alpha &= \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} (\tilde{y}_{11}(t_k))_\alpha & (\tilde{y}_{12}(t_k))_\alpha & \cdots & (\tilde{y}_{1N}(t_k))_\alpha \\ (\tilde{y}_{21}(t_k))_\alpha & (\tilde{y}_{22}(t_k))_\alpha & \cdots & (\tilde{y}_{2N}(t_k))_\alpha \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\tilde{y}_{s1}(t_k))_\alpha & (\tilde{y}_{s2}(t_k))_\alpha & \cdots & (\tilde{y}_{sN}(t_k))_\alpha \end{bmatrix}. \quad (8)$$

$(\tilde{X}(t_k))_\alpha$ 和 $(\tilde{Y}(t_k))_\alpha$ 分别为在时段 t_k ($t_k = 1, 2, \dots, T$) 中, DMU 在 α 水平下的模糊输入、输出指标合集. 其中: $(\tilde{x}_{ij}(t_k))_\alpha$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, T$) 为 α 水平中 DMU _{j} 在时段 t_k 下的第 i 个模糊输入指标值; $(\tilde{y}_{ij}(t_k))_\alpha$ ($i = 1, 2, \dots, s; j = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, T$) 为 α 水平中 DMU _{j} 在时段 t_k 下的第 i 个模糊输出指标值; 在不同的时段内 m, s 的取值根据建立的指标个数而定.

基于模糊-两阶段超效率SBM的DEA评价模型如下:

第1阶段:

$$\begin{aligned} \min \sum_{r=1}^s s_r^+(t_k) / (\tilde{y}_{rq}(t_k))_\alpha. \\ \text{s.t. } (\tilde{y}_{rq}(t_k))_\alpha \leq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{y}_{rj}(t_k))_\alpha + s_r^+(t_k); \\ \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) = 1, \\ s_r^+(t_k) \geq 0, \lambda_j(t_k) \geq 0, \\ r = 1, 2, \dots, s, j = 1, 2, \dots, N, j \neq q. \end{aligned} \quad (9)$$

第2阶段:

$$\begin{aligned} \min (\tilde{\rho}_q(t_k))_\alpha = 1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^-(t_k) / (\tilde{x}_{iq}(t_k))_\alpha. \\ \text{s.t. } (\tilde{x}_{iq}(t_k))_\alpha \geq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{x}_{ij}(t_k))_\alpha - s_i^-(t_k); \\ (\tilde{y}_{rq}(t_k))_\alpha - s_r^+(t_k) \leq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{y}_{rj}(t_k))_\alpha; \\ \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) = 1; \\ s_r^+(t_k) \geq 0, s_i^-(t_k) \geq 0, \lambda_j(t_k) \geq 0, \\ i = 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, \dots, s, \\ j = 1, 2, \dots, N, j \neq q. \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $(\tilde{\rho}_q(t_k))_\alpha$ 为 α 水平下 DMU _{q} 在时间阶段 t_k 中的效率 (或能力) 评价模糊指数, 若该值大于等于 1, 则表明 DMU _{q} 的应急能力水平是有效的, 反之则是无效的; $\lambda_j(t_k)$ 为权系数; $s_i^-(t_k)$ 、 $s_r^+(t_k)$ 为输入输出指标松弛向量, 并且在第2阶段中的 $s_r^+(t_k)$ 为第1阶段解得的常量.

由于输入输出指标为模糊数, 使得得到的应急能

力结果也应为一个模糊数,需要合理地选取输入输出指标的上下界来确定评价结果的上下界。基于此,本文采用文献[20]方法对式(9)和(10)进行处理,即:

1) 确定决策单元DMU_q的应急能力评价价值下限。

第1阶段:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{r=1}^s s_r^+(t_k) / (\tilde{y}_{rq}(t_k))_{\alpha}^l. \\ \text{s.t.} & (\tilde{y}_{rq}(t_k))_{\alpha}^l \leq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{y}_{rj}(t_k))_{\alpha}^u + s_r^+(t_k); \\ & \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) = 1; \\ & s_r^+(t_k) \geq 0, \lambda_j(t_k) \geq 0, \\ & r = 1, 2, \dots, s, j = 1, 2, \dots, N, j \neq q. \end{aligned} \quad (11)$$

第2阶段:

$$\begin{aligned} \min & (\tilde{\rho}_q(t_k))_{\alpha}^l = 1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^-(t_k) / (\tilde{x}_{iq}(t_k))_{\alpha}^u. \\ \text{s.t.} & (\tilde{x}_{iq}(t_k))_{\alpha}^u \geq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{x}_{ij}(t_k))_{\alpha}^l - s_i^-(t_k); \\ & (\tilde{y}_{rq}(t_k))_{\alpha}^l - s_r^+(t_k) \leq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{y}_{rj}(t_k))_{\alpha}^u; \\ & \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) = 1; \\ & s_i^-(t_k) \geq 0, s_r^+(t_k) \geq 0, \lambda_j(t_k) \geq 0, \\ & i = 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, \dots, s, \\ & j = 1, 2, \dots, N, j \neq q. \end{aligned} \quad (12)$$

2) 确定决策单元DMU_q的应急能力评价价值上限。

第1阶段:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{r=1}^s s_r^+(t_k) / (\tilde{y}_{rq}(t_k))_{\alpha}^u. \\ \text{s.t.} & (\tilde{y}_{rq}(t_k))_{\alpha}^u \leq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{y}_{rj}(t_k))_{\alpha}^l + s_r^+(t_k); \\ & \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) = 1; \\ & s_r^+(t_k) \geq 0, \lambda_j(t_k) \geq 0, \\ & r = 1, 2, \dots, s, j = 1, 2, \dots, N, j \neq q. \end{aligned} \quad (13)$$

第2阶段:

$$\begin{aligned} \min & (\tilde{\rho}_q(t_k))_{\alpha}^u = 1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^-(t_k) / (\tilde{x}_{iq}(t_k))_{\alpha}^l. \\ \text{s.t.} & (\tilde{x}_{iq}(t_k))_{\alpha}^l \geq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{x}_{ij}(t_k))_{\alpha}^u - s_i^-(t_k); \\ & (\tilde{y}_{rq}(t_k))_{\alpha}^u - s_r^+(t_k) \leq \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) (\tilde{y}_{rj}(t_k))_{\alpha}^l; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1, j \neq q}^N \lambda_j(t_k) &= 1; \\ s_r^+(t_k) &\geq 0, s_i^-(t_k) \geq 0, \lambda_j(t_k) \geq 0, \\ i &= 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, \dots, s, \\ j &= 1, 2, \dots, N, j \neq q. \end{aligned} \quad (14)$$

2.3 指标数据规范化处理

在使用模糊-两阶段超效率SBM模型进行电网应急能力评估时,需要确定输入输出指标的选取,一般而言输入指标应越小越好(即为成本型指标),而输出指标应越大越好(即为效益型指标)^[21],但本文建立的指标都为效益型指标,若以此原则确定输入输出指标,则会产生无输入指标的现象。因此为便于分析,本文将决策单元在各时段中主体和物态下的次级指标作为输入向量,环境下的次级指标作为输出向量,并采用文献[22]方法进行规范化处理,使其满足上述原则,则有:

1) 对于输入指标,有

$$\begin{cases} (x'_{ij}(t_k))_{\alpha}^l = \frac{1 / (x_{ij}(t_k))_{\alpha}^u}{\sum_{j=1}^N (1 / (x_{ij}(t_k))_{\alpha}^l)}, \\ (x'_{ij}(t_k))_{\alpha}^u = \frac{1 / (x_{ij}(t_k))_{\alpha}^l}{\sum_{j=1}^N (1 / (x_{ij}(t_k))_{\alpha}^u)}. \end{cases} \quad (15)$$

2) 对于输出指标,有

$$\begin{cases} (x'_{ij}(t_k))_{\alpha}^l = \frac{(x_{ij}(t_k))_{\alpha}^l}{\sum_{j=1}^N (x_{ij}(t_k))_{\alpha}^u}, \\ (x'_{ij}(t_k))_{\alpha}^u = \frac{(x_{ij}(t_k))_{\alpha}^u}{\sum_{j=1}^N (x_{ij}(t_k))_{\alpha}^l}. \end{cases} \quad (16)$$

其中: $(x'_{ij}(t_k))_{\alpha}^l$ 、 $(x'_{ij}(t_k))_{\alpha}^u$ 为在 α 水平下规范化的指标模糊数据下限和上限; $(x_{ij}(t_k))_{\alpha}^l$ 、 $(x_{ij}(t_k))_{\alpha}^u$ 为经过 α -截集处理的指标模糊数据下限和上限。

2.4 动态综合评价模型的建立

2.4.1 时间权重向量的求取

由于上文建立的电网应急能力评价模型是在静态时间节点的基础上展开的,在进行综合评价时还需要解决的一个问题就是时间权重向量的确定。

在求解时间权重之前,首先需要定义“时间度” S 的概念^[23]

$$S = \sum_{k=1}^T \frac{T-k}{T-1} \omega_{t_k}, \quad (17)$$

其中 ω_{t_k} ($k = 1, 2, \dots, T$) 为各阶段时间权重。

“时间度” S 的取值大小代表了决策层专家对各

时间阶段的重视程度. 若其值比较接近于1,则表示决策层专家较重视前期(即预防阶段)的时间数据;若其值更接近于0,则表示决策层专家较重视后期(即恢复阶段)的时间数据. “时间度” S 的具体赋值如表2所示.

表2 “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

在确定了“时间度” S 的取值后,即可根据 S 求取时间权向量 ω_{t_k} 的值. 考虑到应尽量降低时间权向量的取值对结果的影响,本文采用方差法建立时间权重求取模型^[24],即

$$D^2(W) = \sum_{k=1}^T \frac{1}{T} [\omega_{t_k} - E(W)]^2 = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \omega_{t_k} - \frac{1}{T^2}. \quad (18)$$

其中: $E(W)$ 为时间权重 ω_{t_k} 的平均值,且有 $E(W) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \omega_{t_k}$.

这里可将式(18)转化为非线性规划问题求取时间权向量 ω_{t_k} 的值,则有

$$\min \left(\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \omega_{t_k}^2 - \frac{1}{T^2} \right). \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} S = \frac{1}{T-1} \sum_{k=1}^T (T-k) \omega_{t_k}; \\ \sum_{k=1}^T \omega_{t_k} = 1, 0 \leq \omega_{t_k} \leq 1. \end{cases} \quad (20)$$

2.4.2 动态综合评价模型

在建立了基于模糊-两阶段超效率SBM的静态电网应急能力评价模型和求取了时间权向量之后,需要将其进行集结得到能体现整体应急能力水平的模糊动态评价值. 因此,采用线性加权法对其进行综合,即

$$\tilde{y}_j = \sum_{k=1}^T \omega_{t_k} \cdot \tilde{\rho}_j, \quad (21)$$

其中 $\tilde{y}_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 为第 j 个决策单元的模糊动态应急能力评价值.

由于上式得到的动态应急能力评价值仍为模糊数,为方便排序比较,采用如下步骤对其处理:

1) 确定最优应急能力值

$$b^+(b^{l+}, b^{u+}) =$$

$$(\max(y_1^l, \dots, y_N^l), \max(y_1^u, \dots, y_N^u)). \quad (22)$$

2) 确定最劣应急能力值

$$b^-(b^{l-}, b^{u-}) =$$

$$(\min(y_1^l, \dots, y_N^l), \min(y_1^u, \dots, y_N^u)). \quad (23)$$

3) 计算与最优值的相对贴进度

$$d =$$

$$\frac{\sqrt{(y_i^l - b^{l-})^2 + (y_i^u - b^{u-})^2}}{\sqrt{(y_i^l - b^{l-})^2 + (y_i^u - b^{u-})^2 + \sqrt{(y_i^l - b^{l+})^2 + (y_i^u - b^{u+})^2}}}. \quad (24)$$

2.5 电网应急能力动态综合评价方法步骤

通过上文的基本理论介绍,可得基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价方法如下:

1) 从时间维度和空间维度出发,对电网应急能力进行分解,建立基于时空维度拆解的基本能力评价指标体系.

2) 获取指标原始数据,参考多位决策层专家意见,结合被评价对象实际情况设定相应评价标准,根据三角模糊数理论得到各指标的量化值.

3) 根据式(2)~(4)对指标模糊数据进行集结,得到优化三角模糊数.

4) 由式(5)和(6)将三角模糊数转化成便于分析的 α -截集数据.

(5)根据式(15)和(16)对模糊输入输出指标数据进行规范化处理,并结合式(11)~(14)求取单一节点下的静态应急能力评价值.

6) 根据式(19)和(20)求取时间权向量,并由式(21)~(24)获得最终电网应急能力动态评价值,进行分析比较.

3 实例分析

为了表明本文方法的有效性,现对广东省的中山A、东莞B、广州C三处区域在应对2018年9月13日登录的台风“百里嘉”这一情景下的电网应急能力进行分析,其具体步骤如下:

1) 指标量化确定. 结合三角模糊数基本理论并参考3位决策层专家意见对A、B、C三个区域的实际情况进行指标值量化. 其中量化方法采用基于语言标度的三角模糊数,即将定性指标划分为 $I = \{\text{非常差, 很差, 差, 较差, 一般, 较好, 好, 很好, 非常好}\}$ 这9个等级,其对应的三角模糊数分别为 $I_1 = [0, 0.1, 0.2], I_2 = [0.1, 0.2, 0.3], I_3 = [0.2, 0.3, 0.4], I_4 = [0.3, 0.4, 0.5], I_5 = [0.4, 0.5, 0.6], I_6 = [0.5, 0.6, 0.7], I_7 = [0.6, 0.7, 0.8], I_8 = [0.7, 0.8, 0.9], I_9 = [0.8,$

0.9, 1.0]. 则可得指标原始数据如表3所示.

表3 指标量化数据

指标	区域								
	A			B			C		
x_1	I_{17}	I_{26}	I_{37}	I_{16}	I_{26}	I_{37}	I_{18}	I_{27}	I_{39}
x_2	I_{15}	I_{25}	I_{34}	I_{16}	I_{25}	I_{36}	I_{18}	I_{27}	I_{38}
x_3	I_{18}	I_{27}	I_{38}	I_{18}	I_{29}	I_{37}	I_{18}	I_{28}	I_{38}
x_4	I_{15}	I_{24}	I_{34}	I_{16}	I_{24}	I_{35}	I_{15}	I_{24}	I_{34}
x_5	I_{17}	I_{26}	I_{36}	I_{18}	I_{27}	I_{38}	I_{19}	I_{28}	I_{38}
x_6	I_{17}	I_{27}	I_{38}	I_{18}	I_{28}	I_{38}	I_{18}	I_{29}	I_{38}
x_7	I_{18}	I_{27}	I_{38}	I_{18}	I_{28}	I_{38}	I_{18}	I_{29}	I_{38}
x_8	I_{17}	I_{25}	I_{37}	I_{18}	I_{28}	I_{37}	I_{19}	I_{28}	I_{38}
x_9	I_{17}	I_{26}	I_{38}	I_{18}	I_{29}	I_{38}	I_{19}	I_{29}	I_{38}
x_{10}	I_{16}	I_{27}	I_{37}	I_{18}	I_{27}	I_{37}	I_{18}	I_{28}	I_{38}
x_{11}	I_{15}	I_{28}	I_{37}	I_{17}	I_{26}	I_{38}	I_{18}	I_{27}	I_{38}
x_{12}	I_{18}	I_{28}	I_{37}	I_{18}	I_{29}	I_{37}	I_{18}	I_{29}	I_{39}
x_{13}	I_{16}	I_{27}	I_{36}	I_{17}	I_{28}	I_{37}	I_{18}	I_{28}	I_{38}
x_{14}	I_{17}	I_{27}	I_{36}	I_{17}	I_{29}	I_{37}	I_{18}	I_{29}	I_{38}
x_{15}	I_{15}	I_{27}	I_{35}	I_{17}	I_{28}	I_{38}	I_{18}	I_{27}	I_{38}
x_{16}	I_{18}	I_{28}	I_{38}	I_{18}	I_{29}	I_{37}	I_{18}	I_{28}	I_{38}
x_{17}	I_{16}	I_{26}	I_{37}	I_{16}	I_{28}	I_{37}	I_{18}	I_{28}	I_{39}
x_{18}	I_{16}	I_{27}	I_{37}	I_{17}	I_{29}	I_{38}	I_{19}	I_{28}	I_{38}
x_{19}	I_{17}	I_{27}	I_{38}	I_{18}	I_{29}	I_{38}	I_{18}	I_{29}	I_{39}
x_{20}	I_{17}	I_{26}	I_{37}	I_{17}	I_{28}	I_{38}	I_{18}	I_{28}	I_{38}

注: I_{ij} 表示第 i 位专家确定的三角模糊数等级为 j .

2) 对指标模糊数据进行集结与转换. 根据式(2)~(4)对表3中的指标量化模糊数据进行集结, 使结果满足差异性最小和相似度最高原则; 并根据式(5)和(6)将得到的优化三角模糊数转换成 α -截集的形式. 其中: δ 取值为0.9, α 取值为0.8, 得到最终转换数据见表4.

表4 指标转换值

指标	区域		
	A	B	C
x_1	[0.680 0, 0.720 0]	[0.580 0, 0.620 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_2	[0.480 0, 0.520 0]	[0.580 0, 0.620 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_3	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_4	[0.380 0, 0.420 0]	[0.480 0, 0.520 0]	[0.380 0, 0.420 0]
x_5	[0.580 0, 0.620 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_6	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_7	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_8	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_9	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.880 0, 0.920 0]
x_{10}	[0.680 0, 0.720 0]	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_{11}	[0.680 0, 0.720 0]	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_{12}	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.880 0, 0.920 0]
x_{13}	[0.580 0, 0.620 0]	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_{14}	[0.680 0, 0.720 0]	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_{15}	[0.480 0, 0.520 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_{16}	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_{17}	[0.580 0, 0.620 0]	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_{18}	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]
x_{19}	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.880 0, 0.920 0]
x_{20}	[0.680 0, 0.720 0]	[0.780 0, 0.820 0]	[0.780 0, 0.820 0]

3) 指标数据规范化处理. 根据式(15)和(16)对表4中转换后的指标数据进行规范化处理, 使其满足输入输出指标选取原则, 规范化数据如表5所示.

表5 指标规范化数据表

指标	区域		
	A	B	C
x_1	[0.310 2, 0.348 4]	[0.360 3, 0.408 4]	[0.272 4, 0.303 7]
x_2	[0.377 9, 0.438 1]	[0.316 9, 0.362 6]	[0.239 6, 0.269 6]
x_3	[0.317 1, 0.350 4]	[0.317 1, 0.350 4]	[0.317 1, 0.350 4]
x_4	[0.324 1, 0.393 7]	[0.261 8, 0.311 6]	[0.324 1, 0.393 7]
x_5	[0.376 1, 0.425 5]	[0.284 4, 0.316 4]	[0.284 4, 0.316 4]
x_6	[0.288 1, 0.321 4]	[0.330 5, 0.366 1]	[0.330 5, 0.366 1]
x_7	[0.317 1, 0.350 4]	[0.317 1, 0.350 4]	[0.317 1, 0.350 4]
x_8	[0.344 2, 0.384 2]	[0.302 3, 0.334 9]	[0.302 3, 0.334 9]
x_9	[0.357 1, 0.398 0]	[0.313 6, 0.346 9]	[0.279 5, 0.307 5]
x_{10}	[0.300 9, 0.336 4]	[0.300 9, 0.336 4]	[0.345 1, 0.383 2]
x_{11}	[0.328 9, 0.367 9]	[0.328 9, 0.367 9]	[0.288 8, 0.320 7]
x_{12}	[0.329 6, 0.363 6]	[0.329 6, 0.363 6]	[0.293 7, 0.322 3]
x_{13}	[0.360 3, 0.408 4]	[0.310 2, 0.348 4]	[0.272 4, 0.303 7]
x_{14}	[0.328 9, 0.367 9]	[0.328 9, 0.367 9]	[0.288 8, 0.320 7]
x_{15}	[0.222 2, 0.254 9]	[0.361 1, 0.402 0]	[0.361 1, 0.402 0]
x_{16}	[0.317 1, 0.350 4]	[0.317 1, 0.350 4]	[0.317 1, 0.350 4]
x_{17}	[0.360 3, 0.408 4]	[0.310 2, 0.348 4]	[0.272 4, 0.303 7]
x_{18}	[0.344 2, 0.384 2]	[0.302 3, 0.334 9]	[0.302 3, 0.334 9]
x_{19}	[0.357 1, 0.398 0]	[0.313 6, 0.346 9]	[0.279 5, 0.307 5]
x_{20}	[0.288 1, 0.321 4]	[0.330 5, 0.366 1]	[0.330 5, 0.366 1]

4) 计算各时间阶段下的静态模糊评价结果. 结合式(11)~(14)将表5中的数据进行处理, 可得待决策单元在单一时间维度下的静态应急能力模糊评价结果, 其结果如表6所示.

表6 静态模糊评价

区域	静态模糊值	预防与应急准备阶段	监测与预警阶段	应急处置与救援阶段	事后恢复与重建阶段
A	ρ_l	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	ρ_u	1.060 8	1.035 0	1.000 0	1.000 0
B	ρ_l	1.008 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	ρ_u	1.144 3	1.071 0	1.000 0	1.035 9
C	ρ_l	1.072 4	1.006 6	1.023 8	1.013 7
	ρ_u	1.246 0	1.151 3	1.266 2	1.209 3

5) 求取时间权重向量. 令 $S = 0.6$, 即相对重视预防与应急准备和监测与预警两个时间段的数据, 求解式(15)和(16), 得到时间权重向量的取值为 $W = (0.340 0, 0.280 0, 0.220 0, 0.160 0)$.

6) 计算动态综合评价结果. 通过式(21)~(24)对上述的静态模糊评价结果进行时间加权, 得到最终的动态综合评价, 如表7所示.

表7 动态综合评价结果

	A	B	C
电网应急能力综合评价值 d	0.000 0	0.231 8	1.000 0
排序	3	2	1

由表7可以看出, A、B、C三个区域的电网应急能力水平排序为 $C > B > A$,表明相较于B、C两个区域,A区的应急能力还有很大的提升空间.从表6可以看出,区域A、B、C的静态电网应急能力均处于能力水平有效的状态,并且区域C的静态电网应急能力模糊评价值与A、B两地相比都处于一个更加相对有效的情形中,尽管在应急处置与救援阶段A、B两个

区域的应急能力水平仍然是相对有效的,但与C区以及这两个地区的其他应急阶段相比依旧是处于较弱的状态,因此在今后的工作中,应对这两个地区的应急处置与救援阶段的应急能力有针对性的加强.

此外,为了对本文方法的有效性和合理性进行验证,采用文献[10]中的模糊TOPSIS进行比较,得到其静态模糊评价值和动态综合评价价值如表8所示.

表8 模糊TOPSIS法的静态评价值与动态综合评价值

区域	静态模糊评价值				动态综合评价值	排序
	预防与应急准备阶段	监测与预警阶段	应急处置与救援阶段	事后恢复与重建阶段		
A	0.111 1	0	0	0	0.037 8	3
B	0.555 6	0.5	0.5	0.666 7	0.545 6	2
C	0.888 9	1	1	1	0.962 2	1

由表8可以看出,模糊TOPSIS法与本文方法得出的结果相一致,均为 $C > B > A$,由此验证了本文方法的科学性.但与表6的静态评价结果相比发现,该方法仅能有效区分出各阶段的应急能力排序情况,却无法表明其应急能力是否处于有效的水平,由此表明本文的方法更加合理.

4 结 论

本文从时间维度和空间维度两个方面对电网应急能力进行拆解,构建了基本的应急能力评价指标体系;针对指标评价标准需要动态化分析的问题,采用三角模糊数对指标进行量化处理;此外,为了有效区分应急能力水平相对薄弱的地区,建立基于模糊-两阶段超效率SBM模型对电网应急能力进行了单一时间节点下的评估;同时,考虑到应急处置工作具有动态性的特点,本文通过建立动态综合评价模型实现了对电网应急能力的动态评价、排序,使评价结果更加的科学、合理.

参考文献(References)

[1] 朱朝阳. 委内瑞拉大停电事故的背后[J]. 国家电网, 2019(5): 72-74.
(Zhu C Y. Behind the blackout in Venezuela[J]. State Grid, 2019(5): 72-74.)

[2] 代贤忠. 美国近期停电事故分析及启示[J]. 国家电网, 2017(6): 46.
(Dai X Z. Analysis and enlightenment of recent blackout accidents in the united states[J]. State Grid, 2017(6): 46.)

[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 B W, Chen Q Y, Yang D S. On the power system large-scale blackout in Brazil[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 97-105.)

[4] 贾林杰, 冯新民. 印度“7.30”大停电事故分析及启

示[J]. 科技风, 2012(22): 114.
(Jia L J, Feng X M. Analysis and enlightenment of india's “7.30” blackout[J]. Technology Wind, 2012(22): 114.)

[5] 潘华, 薛强中, 梁作放, 等. 基于二元语义网络分析法的输变电工程应急能力评价研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(13): 77-83.
(Pan H, Xue Q Z, Liang Z F, et al. Research on emergency capability transmission and transformation engineering based on binary semantic network analysis method[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(13): 77-83.)

[6] 蔡东军, 王迪, 房鑫炎, 等. 基于主客观赋权VIKOR法的电网应急能力评价方法[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 180-182.
(Cai D J, Wang D, Fang X Y, et al. Power grid emergency management capability evaluation method based on subjective and objective weighted VIKOR method[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(7): 180-182.)

[7] 王华昕, 邹龙, 赵永熹, 等. 基于AHP-变熵权法的配电网应急能力综合评估方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(1): 32-38.
(Wang H X, Zou L, Zhao Y X, et al. Research on comprehensive evaluation of distribution network emergency capability based on analytic hierarchy process and variable entropy weight method[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(1): 32-38.)

[8] 门永生, 朱朝阳, 于振, 等. 电网基础设施突发事件应急能力指标体系构建及评价[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 84-87.
(Men Y S, Zhu C Y, Yu Z, et al. On the evaluation of the emergency response capability of the index system for power grid infrastructure facing the unexpected accidents emergencies[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(3): 84-87.)

[9] 王春晨. 电网企业自然灾害突发事件应急能力评估[D]. 北京: 华北电力大学经济与管理学院, 2017.
(Wang C C. Evaluation on emergency response capability

- of natural disasters in power grid enterprises[D]. Beijing: School of Economics and Management, North China Electric Power University, 2017.)
- [10] 李望晨, 王素珍, 郑文贵, 等. 基于三角模糊多属性决策的卫生应急能力组合评价模型设计与比较[J]. 中国卫生统计, 2018, 35(3): 415-419.
(Li W C, Wang S Z, Zheng W G, et al. Design and comparison of health emergency response portfolio evaluation model based on triangular fuzzy multi-attribute decision making[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2018, 35(3): 415-419.)
- [11] 梁美社. 基于直觉模糊群决策的高校应急能力评价方法[J]. 闽西职业技术学院学报, 2019, 21(2): 114-118.
(Liang M S. An approach to emergency response capability evaluation of universities based on intuitionistic fuzzy group decision making[J]. Journal of Minxi Vocational and Technical College, 2019, 21(2): 114-118.)
- [12] 盛勇. 基于情景构建技术的应急准备能力评估方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(10): 43-47.
(Sheng Y. Study on the assessment method of emergency preparedness capability based on scenario construction technology[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(10): 43-47.)
- [13] Van Laarhoven P J M, Pedrycz W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1983, 11(1/2/3): 229-241.
- [14] 江文奇. 三角模糊数型多准则群决策的VIKOR扩展方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(6): 1059-1064.
(Jiang W Q. Extension of VIKOR method for multi-criteria group decision making problems with triangular fuzzy numbers[J]. Control and Decision, 2015, 30(6): 1059-1064.)
- [15] 贾凡. 不确定信息环境下多准则群决策方法研究[D]. 济南: 山东大学管理学院, 2017.
(Jia F. Research on multiple-criteria group decision making methods in uncertain information environment[D]. Jinan: School of Management, Shandong University, 2017.)
- [16] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [17] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [18] 钱振华, 成刚. 数据包络分析SBM超效率模型无可行解问题的两阶段求解法[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(5): 171-178.
(Qian Z H, Cheng G. A two-stage approach to overcoming the infeasibility of SBM super-efficiency model in data envelopment analysis[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(5): 171-178.)
- [19] 王美强, 梁樑. 具有三角模糊要素的非径向DEA模型[J]. 系统工程, 2008, 26(1): 91-95.
(Wang M Q, Liang L. A non-radial fuzzy DEA model with triangular number inputs and outputs[J]. Systems Engineering, 2008, 26(1): 91-95.)
- [20] Kao C A, Liu S T. Fuzzy efficiency measures in data envelopment analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 113(3): 427-437.
- [21] 李亮, 崔晋川. DEA方法中输入输出项目的选择和数据处理[J]. 系统工程学报, 2003, 18(6): 487-490.
(Li L, Cui J C. Selection of input-output items and data disposal in DEA[J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(6): 487-490.)
- [22] 黄智力, 罗键. 三角模糊数型不确定多指标决策的可能度关系法[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1365-1371.
(Huang Z L, Luo J. Possibility degree relation method for triangular fuzzy number-based uncertain multi-attribute decision making[J]. Control and Decision, 2015, 30(8): 1365-1371.)
- [23] 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, 27(10): 154-158.
(Guo Y J, Yao Y, Yi P T. A method and application of dynamic comprehensive evaluation[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2007, 27(10): 154-158.)
- [24] 郭亚军, 唐海勇, 曲道钢. 基于最小方差的动态综合评价方法及应用[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(6): 1225-1228.
(Guo Y J, Tang H Y, Qu D G. Dynamic comprehensive evaluation method and its application based on minimal variability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(6): 1225-1228.)

作者简介

王迪(1994—), 女, 硕士生, 从事电力应急的研究, E-mail: 1183801803@qq.com;

房鑫炎(1963—), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统灾变恢复及继电保护等研究, E-mail: xyfang2000@sjtu.edu.cn;

陈晓国(1978—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事设备状态监测与故障诊断的研究, E-mail: chenxg@csg.cn;

宋永超(1981—), 男, 高级工程师, 从事电力安全的研究, E-mail: songyc@csg.cn;

黎振宇(1987—), 男, 工程师, 博士, 从事高电压与外绝缘技术等研究, E-mail: lizy6@csg.cn;

丁鹏堃(1993—), 男, 硕士生, 从事电力系统保护和电力应急预案的研究, E-mail: Dingpengkun@sjtu.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)