

DOI: 10.7667/PSPC161624

基于全寿命周期理论和云物元理论的配电网规划 综合效益的评估

梁唐杰¹, 谢庆², 柳春芳¹, 赵蓓蓓², 陈安明¹, 田思雷¹, 洪千里²

(1. 佛山电力设计院有限公司, 广东 佛山 528000;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 结合配电网自身的特点, 引入全寿命周期理论, 从经济效益、社会效益和环境效益等三个方面构建了配电网规划综合效益评估体系。针对配电网效益评估过程中存在的不确定性, 建立了基于云物元理论的配电网规划综合效益评估模型, 结合云模型的不确定性推理和物元理论定性、定量分析的优点, 充分考虑了配电网效益等级边界信息的模糊性和随机性。最后通过算例分析验证该效益评估模型的科学性和有效性。

关键词: 配电网规划; 综合效益评估; 全寿命周期理论; 云模型; 物元理论

Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the life cycle cost theory and the cloud matter element theory

LIANG Tangjie¹, XIE Qing², LIU Chunfang¹, ZHAO Beibei², CHEN Anming¹, TIAN Silei¹, HONG Qianli²

(1. Foshan City, Guangdong Province Electric Power Design Institute Co., Ltd., Foshan 528000, China; 2. State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Combined with the characteristics of distribution network, this paper introduces the life cycle cost theory, from three aspects of economic benefits, social benefits and environmental benefits to construct the evaluation system of comprehensive benefits of distribution network planning. In view of the benefit evaluation of distribution network in the presence of uncertainty, it establishes a comprehensive benefit evaluation model of distribution network planning based on the cloud matter-element theory, which combines with advantages of cloud model reasoning under uncertainty and qualitative and quantitative analysis of matter element theory, and takes full account of the fuzziness and randomness of distribution network benefit level boundary information. Finally, a numerical example is analyzed to verify the scientificity and validity of the model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307060 and No. 51607068) and Natural Science Foundation of Beijing (No. 3164051).

Key words: distribution network planning; comprehensive benefit evaluation; life cycle cost theory; cloud model; matter element theory

0 引言

配电网规划综合效益的评估有利于客观、定量地认识配电网规划的投资效益, 对配电网规划方案的科学决策具有重要意义。目前, 对电网规划效益评估的研究已取得一定成果。配电网综合效益评估的模型很多, 但是大部分仅涉及配电网的经济性评

估和技术性评估, 如文献[1]提出了运用可靠性成本/效益分析方法对配电网进行综合评估, 文献[2]从安全性、效益、资金投入、资源消耗等方面建立了配电网规划方案综合评估模型。评估方法也有很多, 如层次分析法、模糊综合评价法、灰色关联法、数据包络法、人工神经网络法、物元可拓理论等等, 但是不同的方法均有自身的特点和局限性。文献[3]提出了基于模糊评判法的配电网可靠性评估, 但该方法主观性太强。文献[4]应用数据包络法对各电网投资效益进行测算和评估, 但受极值的影响较大,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307060, 51607068);
北京自然科学基金(3164051)

且指标权重可能因决策单元的不同而不同;文献[5]建立了基于人工神经网络的复杂电力系统故障后电压安全评估,但该方法一般需要大量的训练样本;文献[6]采用了多层次多方位的“多维度评价方法体系”,评价方法虽具有针对性和全面性,但对于一些定性的指标依然无法有效利用评估。用物元可拓理论进行评估时将评估对象视为一个确定的数学模型,但是并不考虑评估对象等级界限值的随机性和模糊性^[7-8]。

综上所述,本文完善了配电网规划综合效益的评估指标体系,引入全寿命周期理论,综合考虑经济效益、社会效益和环境效益三个方面因素,使配电网规划综合效益指标体系更科学合理。提出了一种基于云物元理论的配电网规划综合效益评估模型,该模型综合了云理论的双重不确定推理特性和物元可拓理论定性、定量分析问题的优势。

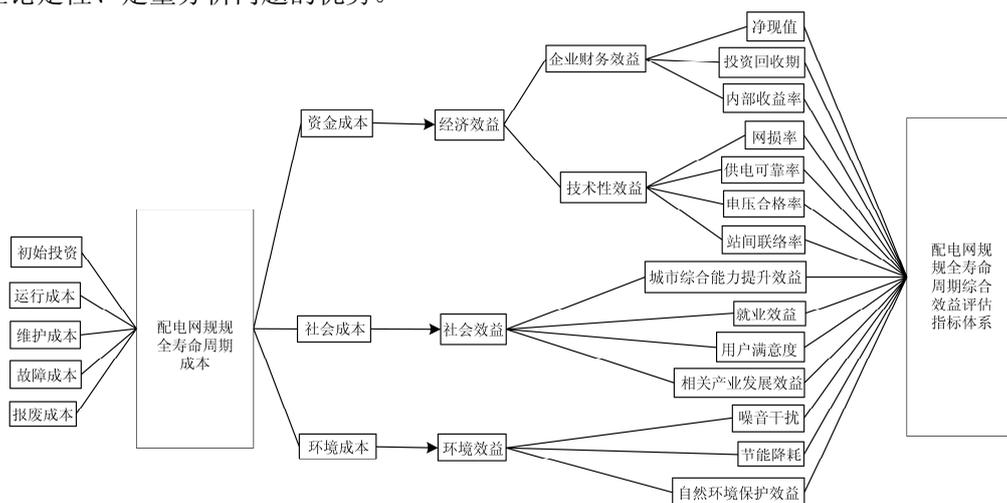


图1 基于LCC的配电网规划综合效益评估指标体系

Fig. 1 Comprehensive benefit evaluation index system of distribution network planning based on the LCC

在经济效益方面,从企业财务效益和技术性效益展开,企业财务效益包括净现值,投资回收期和内部收益率,其中净现值反映投资的收益情况,投资回收期反映资金的周转速度,内部收益率反映资金的利用效率^[11]。技术性效益包括网损率、供电可靠率、电压合格率和站间联络率,其中前三个指标分别是反映配电网经济、可靠、优质的指标,站间联络率反映配电网的适应性和协调性。在社会效益方面,配电网的规划拉动了相关人员的就业,促进了相关电力设备产业的发展,而且随着供电可靠性和供电能力的提高,用户的满意程度提高,同时也促进了城市综合能力的提升。在环境效益方面,通过合理的配电网规划,可以减少噪音对周围居民的干扰,通过先进的技术做到节能降耗,随着配电网接入越来越多的新能源,对自然环境的改善也具有

1 基于全寿命周期理论的配电网规划综合效益评估指标体系的构建

全寿命周期管理是统筹考虑从规划、立项、设计、运行到报废整个寿命周期各个阶段的业务,以总体效益为目标,寻求最佳方案,实现贯穿整个阶段的整体优化,避免决策局限于某个时间段^[9-10]。全寿命周期成本的构成根据不同的划分标准而异,根据时间划分,可分为初始投资、运行成本、维护成本、故障成本和报废成本;根据类型划分,可分为资金成本、社会成本和环境成本三种成本。本文从全寿命周期成本出发,由资金成本、社会成本和环境成本分别对应经济效益、社会效益和环境效益,构建了详细的配电网规划综合效益评估指标体系,见图1所示。

重要意义^[12]。

2 云模型和正态云

云模型结合了概率论和模糊数学理论,是定性与其定量表示之间的不确定性转换模型,主要反映模糊性和随机性两种不确定性,并把这两种不确定性集成在一起构成定性概念和定量数据之间的映射。

设 U 是一个数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量数值 $x \in U$ 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0,1]$ 是具有稳定倾向的随机数,即 $\mu: U \rightarrow [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ 。则 x 在论域 U 上的分布称为云,记为 $C(x)$ 。每一个 x 称为一个云滴^[13]。

正态云模型是用得较多的云模型,可用期望

Ex、熵 En 和超熵 He 三个数字特征来表征。如图 2 所示。期望 Ex 是最能代表定性概念的点,即是最能描述配电网规划综合效益等级的点值,距离期望 Ex 越近,云滴越集中,反映人们对概念的认知越统一。熵 En 是定性概念不确定性的度量,由概念的随机性和模糊性共同决定,即熵 En 既反映了配电网规划综合效益评估指标数据的随机性,又体现综合效益评估等级所接受样本范围的模糊性。超熵 He 是熵的不确定性度量,即熵的熵,由熵的随机性和模糊性共同决定,表示配电网规划综合效益评估指标数据样本的离散程度,超熵越大,云滴离散程度越大,云的“厚度”也越大^[14]。

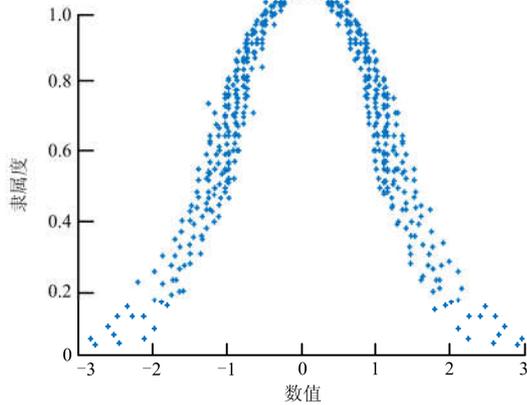


图 2 正态云及数字特征(Ex=0,En=1,He=0.5)

Fig. 2 Normal cloud and digital features (Ex=0, En=1, He=0.5)

3 云物元理论

物元理论是将事物、事物的特征和表征事物特征的量值统一起来,反映事物的质和量的关系。一般物元表示为 $R=(N,c,v)$,若该事物有多个性质,则物元表达式为

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

式中: N 为事物的名称; c 为事物的特征; v 为表征事物特征的量值,可以是数值也可以是区间值,但物元理论并未考虑到事物的随机性和模糊性。

为弥补物元可拓理论的不足,借助云模型处理事物双重不确定性方面的优势,将 v 用正态云 (Ex,En,He) 替代,得到云物元模型。表达式为

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N & c_1 & (Ex_1, En_1, He_1) \\ & c_2 & (Ex_1, En_1, He_1) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (Ex_1, En_1, He_1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

云物元理论结合了云模型的不确定性推理和物元理论定性、定量分析的优点,充分考虑配电网效益等级边界信息的模糊性和随机性。云物元理论评估方法的步骤^[15]如图 3 所示。

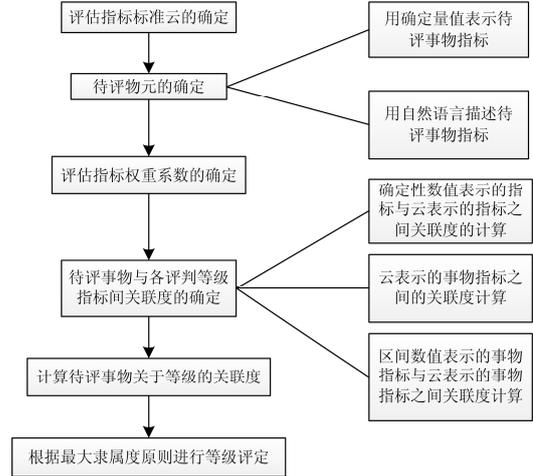


图 3 云物元理论的步骤

Fig. 3 Steps of the cloud matter-element theory

其中关于待评事物与各评判等级指标的关联度的确定有三种情况^[16]。

1) 确定性数值与云物元之间的关联度

首先,产生一个均值为 En 、标准差为 He 的正态随机数 EN' ; 然后令该数值为 x ,称为云滴;最后计算 x 属于这个云模型关联度 y 。

$$y = \exp \frac{-(x - Ex)^2}{2(En)^2} \quad (3)$$

2) 云物元与云物元之间的关联度

由于正态云 99.74% 的云滴都落在 $(Ex - 3EN', Ex + 3EN')$ 之间,将此区间看作一个集合,则两个云共有的部分和非共有的部分用 N 和 M 表示,则关联度为

$$K = \frac{|N|}{|M|} \quad (4)$$

3) 区间数值与云物元之间的关联度

首先将区间数值转换成云表示,再运用云与云关联度的计算方法计算。其中区间数值看成一个双约束的指标 $[C_{min}, C_{max}]$,

$$Ex = (c_{min} + c_{max})/2 \quad (5)$$

$$En = (c_{max} - c_{min})/6 \quad (6)$$

He 可根据效益评估等级划分的模糊性程度进行具体调整。

$$En = (c_{max} - c_{min})/2.355 \quad (7)$$

4 基于云物元理论的配电网规划综合效益评估模型

4.1 配电网规划综合效益评估指标体系

本文用于配电网规划综合效益评估的指标体系如图 1 所示, 将效益评估结果按好、较好、一般、差 4 个等级划分, 通过咨询专家意见, 得到表 1 所

示的效益评估等级划分结果。

4.2 配电网规划综合效益评估指标的正态云物元模型

由表 1 可得到配电网规划综合效益评估指标的等级界限云模型, 表中每项的 3 个数字分别为等级界限云模型的 3 个数字特征(Ex, En, He), 其中用自然语言表示的指标的评分范围和云表示见表 3 所示。

表 1 配电网规划综合效益评估指标体系

Table 1 Comprehensive benefit evaluation index system of distribution network planning

评估指标	等级界限			
	1级(差)	2级(一般)	3级(较好)	4级(好)
净现值A11	0~50w	50w~100w	100w~250w	250w~400w
投资回收期A12	7a~10a	5a~7a	3a~5a	2a~3a
内部收益率A13	0%~5%	5%~10%	10%~15%	15%~25%
网损率A21	9%~10%	7%~9%	5%~7%	0%~5%
供电可靠率A22	99.99%~99.994	99.994%~99.996	99.996%~99.998%	99.998%~100%
电压合格率A23	60%~80%	80%~90%	90%~95%	95%~100%
站间联络率A24	0~10%	10%~20%	20%~30%	30%~40%
用户满意度B1	差	一般	较好	好
就业效益B2	差	一般	较好	好
城市综合能力效益B3	差	一般	较好	好
相关产业发展效益B4	差	一般	较好	好
噪音干扰C1	差	一般	较好	好
节能降耗C2	差	一般	较好	好
自然环境保护效益C3	差	一般	较好	好

表 2 效益评估指标的等级云物元模型参数

Table 2 Model parameters of the cloud matter element model of the benefit evaluation index

指标	等级界限云模型			
	1级	2级	3级	4级
净现值	(25,21.231,0.2)	(75,21.231,0.2)	(175,63.694,0.2)	(325,63.694,0.2)
投资回收期	(8.5,1.274,0.1)	(6,0.849,0.1)	(4,0.849,0.1)	(2.5,0.425,0.1)
内部收益率	(2.5,2.123,0.1)	(7.5,2.123,0.1)	(12.5,2.123,0.1)	(20,4.246,0.1)
网损率	(9.5,0.425,0.05)	(8,0.849,0.05)	(6,0.849,0.05)	(2.5,2.123,0.05)
供电可靠率	(99.992,0.0017,0.05)	(99.995,0.0008,0.05)	(99.997,0.0008,0.05)	(99.999,0.0008,0.05)
电压合格率	(70,8.493,0.1)	(85,4.246,0.1)	(92.5,2.123,0.1)	(97.5,2.123,0.1)
站间联络率	(5,4.246,0.05)	(15,4.246,0.05)	(25,4.246,0.05)	(35,4.246,0.05)
用户满意度	(30,25.478,0.2)	(67.5,6.369,0.2)	(82.5,6.369,0.2)	(95,4.246,0.2)
就业效益	(30,25.478,0.2)	(67.5,6.369,0.2)	(82.5,6.369,0.2)	(95,4.246,0.2)
城市综合能力效益	(30,25.478,0.2)	(67.5,6.369,0.2)	(82.5,6.369,0.2)	(95,4.246,0.2)
相关产业发展效益	(30,25.478,0.2)	(67.5,6.369,0.2)	(82.5,6.369,0.2)	(95,4.246,0.2)
噪音干扰	(30,25.478,0.1)	(67.5,6.369,0.1)	(82.5,6.369,0.1)	(95,4.246,0.1)
节能降耗	(30,25.478,0.2)	(67.5,6.369,0.2)	(82.5,6.369,0.2)	(95,4.246,0.2)
自然环境保护效益	(30,25.478,0.2)	(67.5,6.369,0.2)	(82.5,6.369,0.2)	(95,4.246,0.2)

表 3 各语言值所对应的评分范围和云表示

Table 3 Range of values and the cloud representation of each linguistic value

语言等级	评分范围
好	90~100
较好	75~90
一般	60~75
差	0~60

4.3 效益评估指标的关联度向量

根据表 2 中的云模型参数, 利用关联度计算公式, 运算 1 次得到效益指标 i 的实测值与效益等级标准 j 的正态云模型之间的关联度 k_{oij} 。

$$k_{m \times n} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \cdots & k_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式子 $B=WK$ 即可得到评价向量 B ，式中， $W=(w_1, w_2, \dots, w_m)$ 为指标的权重向量。

5 算例分析

以某规划区的配电网规划方案为例，对配电网

的效益指标进行数据收集和专家打分，得到各评估指标值，根据层次分析法计算各个指标的权重，其结果见表 4。

计算各指标相对于各效益等级的关联度计算结果如表 5 所示。

表 4 某规划区配电网规划综合效益指标值及其权重值

Table 4 Comprehensive benefit index value and weight value of distribution network planning in a planning area

目标层	准则层	指标层	指标值	权重	
配电网规划 综合效益G	经济效益A	企业财务效益A1	净现值A11	232w	0.2458
		益A1	投资回收期A12	6a	0.0744
			内部收益率A13	12%	0.1353
			网损率A21	8%	0.0612
	技术性效益A2	供电可靠率A22	99.996%	0.1204	
		电压合格率A23	85%	0.0156	
		站间联络率A24	34%	0.0306	
		用户满意度B1	87	0.0355	
	社会效益B	——	就业效益B2	82	0.0160
			城市综合能力效益B3	77	0.0571
			相关产业发展效益B4	85	0.0082
			噪音干扰C1	65	0.0219
	环境效益C	——	节能降耗C2	87	0.1162
			自然环境保护效益C3	84	0.0618

表 5 关联度的计算

Table 5 Calculation of correlation degree

指标	关联度			
	1级	2级	3级	4级
净现值A11	0	0	0.6700	0.3444
投资回收期A12	0.1458	1	0.0624	0
内部收益率A13	0.0302	0.1058	0.9726	0.1695
网损率A21	0.0020	1	0.0624	0.0349
供电可靠率A22	0.0628	0.4578	0.4578	0.1619
电压合格率A23	0.2102	1	0.0019	0.001
站间联络率A24	0.0001	0.0302	0.1058	0.9726
用户满意度B1	0.0819	0.0092	0.7791	0.1695
就业效益B2	0.1246	0.0749	0.9969	0.0092
城市综合能力效益B3	0.1824	0.3288	0.6888	0.0229
相关产业发展效益B4	0.0973	0.0229	0.9259	0.0625
噪音干扰C1	0.3892	0.9259	0.0229	0
节能降耗C2	0.0819	0.0092	0.7791	0.1695
自然环境保护效益C3	0.1058	0.0349	0.9726	0.0349

根据式(9)计算待评事物 q 关于等级 j 的关联度，得到计算评价向量 $B=[0.0666, 0.2655, 0.6048, 0.1888]$ ，根据最大隶属度原则确定效益等级为 3，即“较好”。

$$k_j(q) = \sum_{i=1}^n \alpha_i k_j(v_i) \quad (9)$$

6 结论

1) 本文结合配电网自身的特点，引入全寿命周期理论，从经济效益、社会效益和环境效益三个方面构建了配电网规划综合效益评估体系，从企业长期的效益出发，并考虑了社会和环境等方面的效益，使配电网规划综合效益评估体系更加完善，且全寿

命周期理论的引入有助于实现配电网的精益化管理。

2) 结合了云模型的不确定性推理和物元理论定性、定量分析的优点, 建立了基于云物元理论的配电网规划综合效益评估模型, 充分考虑配电网效益等级边界信息的模糊性和随机性, 为以后的配电网规划综合效益的评估提供了借鉴和参考。

参考文献

- [1] 谢楚, 张焰, 黄一超. 可靠性成本/效益分析方法在实际电网中的应用[J]. 中国电力, 2013, 46(5): 106-110.
XIE Chu, ZHANG Yan, HUANG Yichao. Application of reliability cost/benefit analysis method in real power system[J]. Electric Power, 2013, 46(5): 106-110.
- [2] 刘璐洁, 胡荣, 符杨, 等. 基于节约理念的配电网规划方案综合评价[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 66-70.
LIU Lujie, HU Rong, FU Yang, et al. A comprehensive evaluation method for distribution network planning based on economical concept[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 66-70.
- [3] 张焰. 电网规划中的模糊可靠性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 77-80.
ZHANG Yan. Fuzzy reliability evaluation method in power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 77-80.
- [4] 杨丽徙, 张亮, 张四清, 等. 数据包络分析在农网投资效益评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 49-53.
YANG Lixi, ZHANG Liang, ZHANG Siqing, et al. Application of DEA in evaluation of rural power network investment benefit[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 49-53.
- [5] 李兴源, 宋永华, 刘俊勇, 等. 基于人工神经网络的复杂电力系统故障后电压安全评估[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 147-150.
LI Xingyuan, SONG Yonghua, LIU Junyong, et al. Voltage security assessment of complex power system based on artificial neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 147-150.
- [6] 胡殿刚, 张雪佼, 陈乃仕, 等. 新能源发电项目多维度后评价方法体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 10-17.
HU Diangang, ZHANG Xuejiao, CHEN Naishi, et al. Research on multi-dimensional post evaluation methodology of new energy power generation projects[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 10-17.
- [7] 夏非, 范莉, 苏浩益, 等. 基于云物元分析理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 6-10.
XIA Fei, FAN Li, SU Haoyi, et al. A comprehensive evaluation model of power quality based on the theory of cloud matter element analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 6-10.
- [8] 赵建立, 周雯娟, 郑庆荣, 等. 基于用户责任的重要电力用户用电安全风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 71-77.
ZHAO Jianli, ZHOU Wenjuan, ZHENG Qingrong, et al. Electrical safety assessment for important power users based on user's responsibility[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 71-77.
- [9] BRENT A C, SCHUMAN C A. Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry[J]. International Journal of Operations & Production Management, 2005, 25(6): 566-579.
- [10] ZHANG Y, WEI B. Reflections on implementing assets life cycle management in power grid corporations[J]. Electric Power Technologic Economics, 2008.
- [11] 苏海峰. 配电系统规划全寿命周期管理理论和方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
SU Haifeng. Research on the theory and method of the whole life cycle management of distribution system planning[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [12] 黄飞, 宋璇坤, 周晖, 等. 基于效果与基础互动的电网智能化水平综合评价指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 142-148.
HUANG Fei, SONG Xuankun, ZHOU Hui, et al. Research on comprehensive evaluation index system of grid's intelligence level based on interaction between effect and basis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 142-148.
- [13] 王国胤, 李德毅, 姚一豫, 等. 云模型与粒计算[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] 贾明, 蔡忠春, 杨佐龙, 等. 基于云物元的非战争军事行动机务保障能力评估[J]. 飞机设计, 2014, 34(3): 63-66.
JIA Ming, CAI Zhongchun, YANG Zuolong, et al. The evaluation of maintenance guarantee based on cloud-matter element model[J]. Aircraft Design, 2014, 34(3): 63-66.
- [15] 徐世田, 张阳, 浦立娜, 等. 基于物元模型的高速公路应急救援系统评价研究[J]. 公路, 2013(2): 129-134.
XU Shitian, ZHANG Yang, PU Lina, et al. Evaluation of expressway in emergency rescue capabilities based on cloud matter element model[J]. Highway, 2013(2): 129-134.
- [16] 谢庆, 彭澎, 唐山, 等. 基于云物元分析原理的电力变压器故障诊断方法研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 74-77.
XIE Qing, PENG Peng, TANG Shan, et al. Research on fault diagnosis method of power transformer based on the principle of cloud matter element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 74-77.

收稿日期: 2016-09-27; 修回日期: 2016-12-05

作者简介:

梁唐杰(1986—), 男, 工程师, 工学学士, 从事配电网规划、设计与智能电网研究等工作。

(编辑 姜新丽)