

基于改进层次分析法的雷电防护能力模糊综合评价

梁景峰^{1,2} 刘伟娜^{3*} 张静^{1,2} 冯鹤⁴

(1 中国气象局气象干部培训学院河北分院,保定 071000; 2 河北省信息工程学校,保定 071000;

3 河北农业大学机电工程学院,保定 071000; 4 河北省气象行政技术服务中心,石家庄 050021)

摘要 为科学评价雷电防护措施的防护能力,分析国内外多种评价方法的优劣,结合雷电防护措施的特点提出基于改进层次分析法的模糊综合评价。依据雷电防护相关技术标准和规范,综合考虑雷电环境、承载体特征、自然因素的影响,建立雷电防护能力评价指标体系。利用改进层次分析法计算各级指标的权重,采用模糊综合评价法确定雷电防护能力评价等级。运用此方法对采取多种雷电防护措施的油气集输站进行雷电防护能力评价,评价等级与实际情况和有关文献案例相符,表明该方法适用于雷电防护能力的评价。

关键词 雷电防护能力;改进层次分析法;模糊综合评价法;隶属矩阵;能力评价

中图分类号: P429 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20220319 **文献标识码:** A

引言

雷电防护主要是防止和减少雷电闪击造成的物质损失和人身伤亡而采取的各种措施^[1],事关社会经济生产安全和人民生命财产安全。雷电灾害已被联合国“国际减灾十年”行动计划确定为最严重的 10 种自然灾害之一^[2-3],每年因雷电造成的损失数以亿计。绝大部分雷电灾害是因防护措施不到位不健全所导致。雷电防护措施和手段易受外部环境的影响,特别是一些防护设施容易出现老化和腐蚀,其防护性能下降和失效。因此,对雷电防护措施进行科学合理的评价具有极其重要的意义。

目前对雷电防护措施进行综合评价的研究还不多,大多数是针对雷电防护装置检测方法和技术的研究。雷电防护装置检测研究的重点是指标的确定、参数的获取、数据的处理等^[4]。雷电防护能力评价则更关注的是如何全面系统客观的判断已有雷电防护措施的防护能力和水平,对是否需进一步强化防护措施和提高防护水平以及如何提高防护能力提供科学依据和指导^[5]。

就防护能力及风险的综合评价方法而言,国内外主要采用故障树分析法、贝叶斯网络评价法、神经网络法、失效模式分析法、肯特评分法、主分量分析法等。这些方法各具一定的优势,但也存在局限性。例如,故障树分析法的优势在于形象、清晰、逻辑性强,但难以准确确定事件的发生概率,实际运用有很大的局限^[6-7]。贝叶斯网络评价法其评价结果的准确性受指标划分、权值分配和专家经验等主观因素的影响较大^[8]。而神经网络法的评价过程较为客观性,但难点是训练集的选择,对试验数据的可靠性也有严格的要求,目前没有较好的解决办法^[9]。失效模式分析法对所有可能发生的故障原因、故障模式、故障后果进行系统地分析,并计算出风险优先数值,但以风险优先度来划分风险存在一定缺陷^[10]。肯特评分法的实际运用简便,但忽略了各指标的权重差异,易发生评价结果偏离实际情况^[11]。主分量分析法不仅减少了评价的工作量,还消除了评价指标的相互影响,但存在变量降低维度后的信息量保持在较高水平的要求并且要具有实际的意义^[12]。

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

中国气象局软科学基金项目(2020ZDIANXM02)、河北省气象局科研开发项目(20zc03)、保定市科技计划项目(2341ZF168)资助

作者简介:梁景峰,男,1980年生,硕士,高级工程师,主要从事雷电防护技术、气象教育培训等研究,Email:596010919@qq.com

收稿日期:2022年7月28日;定稿日期:2023年2月7日

*通信作者,Email:94095842@qq.com

©《气象科技》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

雷电防护对象采取的防护措施是复杂多样的,这些措施作用的发挥不是孤立的,而是互相耦合的,并且具有很大的模糊性^[13-14]。这种模糊性是客观存在的,各雷电防护措施的防护能力不能被精确量化,为较好地描述和综合评价防护能力,应引入模糊思想和数学理论^[15-17]。20 世纪 60 年代,美国控制论专家 Zadeh^[18]第一次提出了模糊数学理论。对于客观世界中界限模糊不清且不能分割的事物可以采用模糊数学的理论解释这种不确定性。受多种因素影响的对象评价应该采用模糊综合评价的方法,不仅可以对主观因素和客观因素进行综合评价,而且评价结果还以向量的形式表示,能够较准确的反映评价对象的模糊特性。

对雷电防护措施的防护能力进行评价时,为使各评价指标的权重确定合理、计算简便,采取改进层次分析法,它是在经典层次分析法的基础上发展而来的。美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代首次提出了一种多目标、定性与定量相结合的评价决策方法^[19],即所谓的经典层次分析法。但经典层次分析法在实际运用中存在一些问题,首先在确定权重方面,采取两两指标对比的九标度(1~9)法构造判断矩阵,标度对应的概念比较模糊,专家的主观经验主导标度的确定,出现评价结果与实际背离的风险极大。其次在计算量方面,判断矩阵需要进行一致性检验,如果不通过则说明不具备优先排序功能,需要从新构置,不仅违背专家意志,还需反复计算。改进层次分析法采取三标度(0~2)法构造判断矩阵,降低了主观意志对评价结果的影响,判断矩阵也不需要一致性检验,提高了准确度,降低了计算量,符合实际工程的要求^[20]。

1 评价指标体系的建立

建立科学合理的评价指标体系是雷电防护能力评价的前提和关键。依据《建筑物防雷设计规范》^[1]《建筑物电子信息系统防雷设计规范》^[21]《通信局(站)防雷与接地工程设计规范》^[22]《石油化工装置防雷设计规范》^[23]《建筑物防雷装置检测技术规范》^[4]《通信局(站)防雷装置检测技术规范》^[24]《爆炸和火灾危险场所防雷装置检测技术规范》^[25]等雷电防护相关国家技术标准与规范,综合考虑雷电环境、载体特征、自然因素的影响,建立了雷电防护能力评价指标体系,如表 1 所示。

表 1 雷电防护能力 U 评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of lightning protection ability

一级指标	二级指标	获取方式	是否“一票否决项”
接闪装置 U_1	年预计雷击次数 U_{11}	气象资料分析	否
	雷电流强度 U_{12}	气象资料分析	否
	接闪器形式规格 U_{13}	检测数据分析	是
	接闪器锈蚀程度 U_{14}	专家检查评定	是
引下线 U_2	建筑物结构金属利用 U_{21}	专家检查评定	否
	引下线间距 U_{22}	检测数据分析	是
	引下线形式规格 U_{23}	检测数据分析	是
接地装置 U_3	引下线腐蚀程度 U_{24}	专家检查评定	是
	接地体形式规格 U_{31}	检测数据分析	否
等电位连接 U_4	接地电阻 U_{32}	检测数据分析	是
	连接形式规格 U_{41}	检测数据分析	否
电涌保护器 U_5	过渡电阻 U_{42}	检测数据分析	否
	电涌保护器安装位置 U_{51}	检测数据分析	否
	电涌保护器基本参数 U_{52}	检测数据分析	否
屏蔽与布线 U_6	连接导体规格 U_{53}	检测数据分析	否
	屏蔽措施 U_{61}	专家检查评定	否
	布线方式 U_{62}	专家检查评定	否

表中,接闪器形式规格 U_{13} 、接闪器锈蚀程度 U_{14} 、引下线间距 U_{22} 、引下线形式规格 U_{23} 、引下线腐蚀程度 U_{24} 、接地电阻 U_{32} 对整体的雷电防护能力有重大影响^[1,4,21-25],任何一项不符合技术规范要求则导致整体的雷电防护能力失效,因此综合评价机制中采取“一票否决项”策略。

2 改进层次分析法对指标权重的确定

2.1 建立比较矩阵

由雷电防护工作经验丰富的技术专家使用 0, 1, 2 三个标度^[26],对各级各类相应指标进行两两比较,根据相对重要程度确定出矩阵各元素的数值,进而建立起比较矩阵 A 。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, a_{ij} 为矩阵元素。 a_{ij} 取值为 0, 表示第 i 指标没有第 j 指标重要; a_{ij} 取值为 1, 表示第 i 指标与第 j 指标一样重要; a_{ij} 取值为 2, 表示第 i 指标比第 j 指标重要。

2.2 计算重要性排序指数

将比较矩阵 A 各行元素之和作为对应指标的重要性排序指数 r_i 。

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

2.3 构造判断矩阵

利用重要性排序指数计算判断矩阵 B 的各元素 b_{ij} 。

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{(r_i - r_j)(k_m - 1)}{r_{\max} - r_{\min}} + 1 & r_i \geq r_j \\ \left[\frac{(r_j - r_i)(k_m - 1)}{r_{\max} - r_{\min}} + 1 \right]^{-1} & r_i < r_j \end{cases} \quad (3)$$

其中, $r_{\max} = \max\{r_i\}$, $r_{\min} = \min\{r_i\}$, $k_m = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}$

2.4 计算传递矩阵

对判断矩阵 B 的元素 b_{ij} 取常用对数得出传递矩阵 C 的各元素 c_{ij} 。

$$c_{ij} = \lg b_{ij} \quad (4)$$

2.5 构造最优传递矩阵

利用传递矩阵 C 的元素计算最优传递矩阵 D 的各元素 d_{ij} 。

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (c_{ik} - c_{jk}) \quad (5)$$

2.6 计算拟优一致矩阵

将最优传递矩阵 D 的元素 d_{ij} 作为 10 的指数, 计算可得拟优一致矩阵 Q 的各元素 q_{ij} 。

$$q_{ij} = 10^{d_{ij}} \quad (6)$$

2.7 求解特征向量

首先计算拟优一致矩阵 Q 的各行元素之积 L_i ;

$$L_i = \prod_{j=1}^n q_{ij} \quad (7)$$

然后求 L_i 的 n 次方根 \overline{W}_i ;

$$\overline{W}_i = \sqrt[n]{L_i} \quad (8)$$

最后将 \overline{W}_i 归一化处理得 W_i ;

$$W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{W}_i} \quad (9)$$

其中, W_i 即为拟优一致矩阵 Q 的特征向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ 的元素, 也就是利用改进层次分析法得出的指标权重。特征向量 W 即为指标的权重向量。

3 模糊综合评价法对能力等级的确定

3.1 建立评语集

根据雷电防护能力及其评价指标可能出现的评价等级建立评语集, 用 V 表示。评语集 V 的等级划分越多, 对应的评价等级就越精细, 但计算量也越大^[27]。在权衡评价精细度和计算量的基础上, 评语

集 V 采取 5 个评语等级以及评语元素来表示各指标和雷电防护能力的评价等级。

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) =$$

{好(G), 较好(B), 一般(M), 较差(S), 差(P)}

$$(10)$$

其中, $v_1 \sim v_5$ 为评语等级。

3.2 建立隶属矩阵

根据雷电防护实际工作经验选取比较合适的分布形态隶属函数来建立隶属矩阵, 用 R 表示。等差三角形分布函数能很好反映评价等级对评语元素的隶属度^[28-29]。已有研究验证了等差值取 0.28 具有较高的有效性和实用性^[30-32]。因此, 本文也取等差值为 0.28, 经计算得评价等级隶属度, 如表 2 所示。

表 2 等差值取 0.28 时评价等级隶属度

Table 2 Evaluation grade membership degree

评价等级	评语元素				
	好	较好	一般	较差	差
G	1.00	0.72	0.44	0.16	0.00
B	0.72	1.00	0.72	0.44	0.16
M	0.44	0.72	1.00	0.72	0.44
S	0.16	0.44	0.72	1.00	0.72
P	0.00	0.16	0.44	0.72	1.00

对表 2 中评价等级隶属度进行归一化处理, 即得隶属矩阵 R 。

$$R = \begin{pmatrix} 0.4310 & 0.3103 & 0.1897 & 0.0690 & 0.0000 \\ 0.2368 & 0.3289 & 0.2368 & 0.1447 & 0.0526 \\ 0.1325 & 0.2169 & 0.3012 & 0.2169 & 0.1325 \\ 0.0526 & 0.1447 & 0.2368 & 0.3289 & 0.2368 \\ 0.0000 & 0.0690 & 0.1897 & 0.3103 & 0.4310 \end{pmatrix} \quad (11)$$

3.3 模糊综合评价

首先, 通过气象资料分析、检测数据分析、专家检查评定等方式确定各项指标的评价等级。根据隶属矩阵可得评价等级对应的权重向量 R_i 。G、B、M、S、P 评价等级对应的权重向量分别为 $R_1 \sim R_5$, 如表 3 所示。

表 3 评价等级权重向量

Table 3 Evaluation grade weight vector

评价等级	权重向量
G	$R_1 = (0.4310, 0.3103, 0.1897, 0.0690, 0.0000)$
B	$R_2 = (0.2368, 0.3289, 0.2368, 0.1447, 0.0526)$
M	$R_3 = (0.1325, 0.2169, 0.3012, 0.2169, 0.1325)$
S	$R_4 = (0.0526, 0.1447, 0.2368, 0.3289, 0.2368)$
P	$R_5 = (0.0000, 0.0690, 0.1897, 0.3103, 0.4310)$

然后,利用评价等级对应的权重向量 R_j 和隶属矩阵 R 对指标进行模糊评价,得到各级中第 j 指标的评价向量 E_j 。

$$E_j = R_j R \quad (12)$$

进而,利用指标的评价向量 E_j 组成新的矩阵 N 和对应的权重向量 W ,进行模糊综合评价,得到该指标的综合评价向量 E 。

$$N = (E_1, E_2, \dots, E_n) \quad (13)$$

$$E = WN \quad (14)$$

最终得到所有指标对雷电防护能力的综合评价向量,由最大隶属度原则确定雷电防护能力的评价等级。

4 雷电防护能力综合评价实例分析

现以含有易燃易爆生产区、信息控制功能区、电力系统功能区等雷电防护要求高且工程复杂的油气集输站库为对象,采取改进层次分析法的模糊综合评价方法确定雷电防护能力的评价等级。具体步骤如图 1 所示。

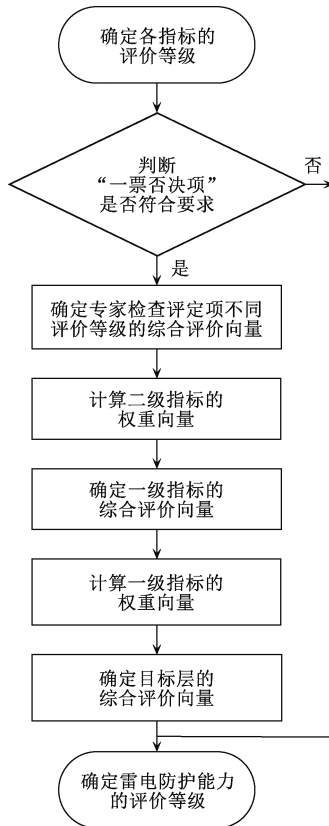


图 1 雷电防护能力模糊综合评价流程

Fig. 1 Fuzzy comprehensive evaluation process of lightning protection capability

专业人员或专家依据雷电防护相关技术标准与规范,通过资料分析、设备检测和性能检查等方式确定某油气集输站库雷电防护相关 17 项指标的评价等级,如表 4 所示。其中指标“建筑物结构金属利用 U_{21} ”的评价等级划分是对建筑物的钢梁、钢柱、消防梯等金属构建,以及幕墙的金属立柱和混凝土内的钢筋、钢柱等结构金属设施做自然引下线的利用情况进行合理评价。

表 4 指标评价等级

Table 4 Index evaluation grade

指标	评价等级	是否“一票否决项”
年预计雷击次数 U_{11}	P	否
雷电流强度 U_{12}	G	否
接闪器形式规格 U_{13}	G	是
接闪器锈蚀程度 U_{14}	GBG	是
建筑物结构金属利用 U_{21}	P	否
引下线间距 U_{22}	G	是
引下线形式规格 U_{23}	G	是
引下线腐蚀程度 U_{24}	GBB	是
接地体形式规格 U_{31}	G	否
接地电阻 U_{32}	G	是
连接形式规格 U_{41}	B	否
过渡电阻 U_{42}	B	否
电涌保护器安装位置 U_{51}	G	否
电涌保护器基本参数 U_{52}	G	否
连接导体规格 U_{53}	G	否
屏蔽措施 U_{61}	PMM	否
布线方式 U_{62}	MPM	否

任何“一票否决项”评价等级中出现“S”或“P”级,则雷电防护能力的评价等级直接定为“P”级。由表 4 可知,此油气集输站库“一票否决项”评价等级均在“S”级以上,符合技术规范要求。

对于专家检查评定项由 3 位专家分别独立确定评价等级,若出现不同评价等级,则专家权重向量为 $(0.4, 0.3, 0.3)$ 。根据表 4 中各位专家对接闪器锈蚀程度、引下线腐蚀程度、屏蔽措施、布线方式的不同评价等级,从表 3 中选取评价等级对应的权重向量,利用式(11)~(14)可得专家检查评定项的综合评价向量,如表 5 所示。

利用改进层次分析法计算雷电防护能力评价指标体系中各类二级指标的权重向量。首先根据各类二级指标相对重要性构造对应的比较矩阵 A ,利用式(1)~(9)分别计算重要性排序指数 r_i 、构造判断矩阵 B 、计算传递矩阵 C 、构造最优传递矩阵 D 、计算拟优一致矩阵 Q 、最终得到矩阵 Q 的特征向量 W

即各类二级指标的权重向量,如表 6 所示。

表 5 专家检查评定项综合评价向量

Table 5 Comprehensive evaluation vector of items evaluated by experts

专家检查评定项	评价等级	评价向量	权重	综合评价向量
U_{14}	G	(0.2881,0.2870,0.2287,0.1385,0.0578)	0.4000	(0.2673,0.2782,0.2316,0.1507,0.0722)
	B	(0.2190,0.2577,0.2384,0.1793,0.1057)	0.3000	
	G	(0.2881,0.2870,0.2287,0.1385,0.0578)	0.3000	
U_{24}	G	(0.2881,0.2870,0.2287,0.1385,0.0578)	0.4000	(0.2673,0.2782,0.2316,0.1507,0.0722)
	B	(0.2881,0.2870,0.2287,0.1385,0.0578)	0.3000	
	B	(0.2190,0.2577,0.2384,0.1793,0.1057)	0.3000	
U_{61}	P	(0.0578,0.1385,0.2287,0.2870,0.2881)	0.4000	(0.1190,0.1864,0.2377,0.2458,0.2111)
	M	(0.1598,0.2183,0.2437,0.2183,0.1598)	0.3000	
	M	(0.1598,0.2183,0.2437,0.2183,0.1598)	0.3000	
U_{62}	M	(0.1598,0.2183,0.2437,0.2183,0.1598)	0.4000	(0.1292,0.1944,0.2392,0.2389,0.1983)
	P	(0.0578,0.1358,0.2287,0.2870,0.2881)	0.3000	
	M	(0.1598,0.2183,0.2437,0.2183,0.1598)	0.3000	

表 6 各类二级指标的比较矩阵和权重向量

Table 6 Comparison matrix and weight vector of the second-level index set

二级指标	比较矩阵	拟优一致矩阵	权重向量
$U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.4671 & 0.0976 & 0.2089 \\ 2.1407 & 1.0000 & 0.2089 & 0.4472 \\ 10.2407 & 4.7867 & 1.0000 & 2.1407 \\ 4.7867 & 2.2361 & 0.4671 & 1.0000 \end{pmatrix}$	(0.0550,0.1178,0.5638,0.2634)
$U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0976 & 0.2089 & 0.4671 \\ 10.4702 & 1.0000 & 2.1407 & 4.7867 \\ 4.7867 & 0.4671 & 1.0000 & 2.2361 \\ 2.1407 & 0.2089 & 0.4472 & 1.0000 \end{pmatrix}$	(0.0550,0.5638,0.2634,0.1178)
U_{31}, U_{32}	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.3333 \\ 3.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}$	(0.2500,0.7500)
U_{41}, U_{42}	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.3333 \\ 3.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}$	(0.2500,0.7500)
U_{51}, U_{52}, U_{53}	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.1644 & 0.4055 \\ 6.0822 & 1.0000 & 2.4662 \\ 2.4662 & 0.4055 & 1.0000 \end{pmatrix}$	(0.1047,0.6370,0.2583)
U_{61}, U_{62}	$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 3.0000 \\ 0.3333 & 1.0000 \end{pmatrix}$	(0.7500,0.2500)

采取模糊综合评价法确定雷电防护能力评价指标体系中一级指标综合评价向量。根据表 4 中指标评价等级,从表 3 中选取评价等级对应的权重向量,利用式(11)~(12)得相应的评价向量。再结合表 5 的专家检查评定项综合评价向量,以及表 6 中各类二级指标的权重向量,代入式(13)~(14),可得一级指标的综合评价向量,如表 7 所示。

再次利用改进层次分析法计算雷电防护能力评价指标体系中一级指标的权重向量。构造一级指标对应的比较矩阵,再利用式(1)~(9)计算一级指标

的权重向量,如表 8 所示。

再次采取模糊综合评价法确定目标层即雷电防护能力的综合评价向量。将表 7 中一级指标综合评价向量和表 8 中一级指标的权重向量,代入式(13)~(14),可得目标层即雷电防护能力的综合评价向量,如表 9 所示。

根据表 9 中雷电防护能力的综合评价向量,由最大隶属度原则可确定该油气集输站库雷电防护能力的评价等级为 B 级,即“较好”等级。

此评价等级与文献[33]的评价结果一致,也与

表 7 一级指标综合评价向量

Table 7 Comprehensive evaluation vector of the first-level index

一级指标	二级指标	二级指标评价向量	权重	一级指标综合评价向量
U_1	U_{11}	(0.0578, 0.1385, 0.2287, 0.2870, 0.2881)	0.0550	(0.2699, 0.2765, 0.2295, 0.1499, 0.0743)
	U_{12}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.1178	
	U_{13}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.5638	
	U_{14}	(0.2673, 0.2782, 0.2316, 0.1507, 0.0722)	0.2634	
U_2	U_{21}	(0.0578, 0.1385, 0.2287, 0.2870, 0.2881)	0.0550	(0.2729, 0.2778, 0.2291, 0.1481, 0.0722)
	U_{22}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.5638	
	U_{23}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.2634	
	U_{24}	(0.2673, 0.2782, 0.2316, 0.1507, 0.0722)	0.1178	
U_3	U_{31}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.2500	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)
	U_{32}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.7500	
U_4	U_{41}	(0.2190, 0.2577, 0.2384, 0.1793, 0.1057)	0.2500	(0.2190, 0.2577, 0.2384, 0.1793, 0.1057)
	U_{42}	(0.2190, 0.2577, 0.2384, 0.1793, 0.1057)	0.7500	
U_5	U_{51}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.1047	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)
	U_{52}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.6370	
	U_{53}	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.2583	
U_6	U_{61}	(0.1190, 0.1864, 0.2377, 0.2458, 0.2111)	0.7500	(0.1216, 0.1884, 0.2381, 0.2441, 0.2079)
	U_{62}	(0.1292, 0.1944, 0.2392, 0.2389, 0.1983)	0.2500	

表 8 一级指标的比较矩阵和权重向量

Table 8 Comparison matrix and weight vector of the first-level index set

一级指标	比较矩阵	权重向量
$U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	(0.1406, 0.0739, 0.3621, 0.3621, 0.0393, 0.0220)

表 9 目标层综合评价向量

Table 9 Comprehensive evaluation vector of target layer

目标层	一级指标	一级指标综合评价向量	权重	目标层综合评价向量
U	U_1	(0.2699, 0.2765, 0.2295, 0.1499, 0.0743)	0.1406	(0.2557, 0.2720, 0.2326, 0.1579, 0.0818)
	U_2	(0.2729, 0.2778, 0.2291, 0.1481, 0.0722)	0.0739	
	U_3	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.3621	
	U_4	(0.2190, 0.2577, 0.2384, 0.1793, 0.1057)	0.3621	
	U_5	(0.2881, 0.2870, 0.2287, 0.1385, 0.0578)	0.0393	
	U_6	(0.1216, 0.1884, 0.2381, 0.2441, 0.2079)	0.0220	

该油气集输站库目前采取的雷电防护措施能满足基本要求但需进一步完善的实际情况相吻合。根据评价过程和结果看,可从建筑物结构金属利用、空间屏蔽和布线方式等方面来改进雷电防护措施,提高防护能力和水平。

5 结论

(1)对雷电防护措施进行分析并依据相关技术标准与规范,综合考虑雷电环境、承载体特征、自然因素的影响,建立了雷电防护能力评价指标体系。

(2)将改进层次分析法和模糊综合评价法相结

合,不仅较经典层次分析法能更精准的确定指标权重,还能更客观地反映雷电防护能力指标的模糊性。

(3)基于改进层次分析法的雷电防护能力模糊综合评价,尽可能避免了主观判断产生的误差,使评价结果更合理和客观。

(4)使用该方法对某油气集输站库雷电防护能力进行评价,得出的结果与实际情况和有关文献案例相符,表明该方法的可行性和准确性。

参考文献

- [1] 林维勇,黄友根,焦兴学,等. GB 50057—2010 建筑物防雷设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2011. Lin W Y, Huang Y G, Jiao X X, et al. GB 50057—2010 Code for design protection of structures against lightning (in Chinese) [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [2] 顾媛,张卫斌,崔雪东. 浙江省地闪特征及致灾危险性分析[J]. 气象科技,2021,49(4):654-661. Gu Y, Zhang W B, Cui X D. Analysis of CG lightning characteristics and disaster-causing risk in Zhejiang Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(4): 654-661.
- [3] 马虹旭,袁湘玲,张凯,等. 辽宁省雷电易发区及预警应对等级划分[J]. 气象科技,2021,49(4):647-653. Ma H X, Yuan X L, Zhang K, et al. Classification of response levels in lightning-prone areas in Liaoning Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(4): 647-653.
- [4] 曹和生,黄晓虹,梅勇成,等. GB/T 21431-2015 建筑物防雷装置检测技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,2015. Cao H S, Huang X H, Mei Y C, et al. GB/T 21431-2015 Technical code for inspection of lightning protection system in building (in Chinese) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [5] 齐静静,李家宁,尹志清,等. 油气集输站库雷电防护能力模糊评价模型研究[J]. 电瓷避雷器,2019(6):49-54. Qi J J, Li J N, Yin Z Q, et al. Research on the Fuzzy evaluation model of lightning protection capability in oil and gas gathering & transportation station[J]. Insulators and Surge Arresters (in Chinese), 2019(6): 49-54.
- [6] 孟蕾,廖玉芳,汤亦豪. 基于雷达产品阈值与闻雷半径的雷暴过程判别[J]. 气象科技,2021,49(1):25-31. Meng L, Liao Y F, Tang Y H. Identification of thunderstorm processes based on radar product threshold and hearing-thunder radius [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(1): 25-31.
- [7] 王洁,张中杰,曲晓黎,等. 基于层次分析法的朔黄铁路暴雨灾害风险评估[J]. 气象科技,2022,50(6):870-877. Wang J, Zhang Z J, Qu X L, et al. Risk zoning of rainstorm disaster along Shuohuang railway based on meteorological geography method [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2022, 50(6): 870-877.
- [8] 李红,朱建平. 综合评价方法研究进展评述[J]. 统计与决策,2012(9):7-11. Li H, Zhu J P. A review of research progress on comprehensive evaluation methods [J]. Statistics & Decision (in Chinese), 2012(9): 7-11.
- [9] 张焯方,刘冰,冯真祯,等. 基于遥感影像大数据、卷积神经网络的福建省有效致灾雷电分布模型及应用[J]. 气象科技,2021,49(6):953-959. Zhang Y F, Liu B, Feng Z Z, et al. Study and application of effective disaster-causing lightning distribution in Fujian Province based on remote sensing image sensing and convolutional neural network [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(6): 953-959.
- [10] 李毅佳,余建星. 基于FMEA和模糊理论的海底管道建造期质量风险分析[J]. 中国安全科学学报,2012,22(1):112-117. Li Y J, Yu J X. Quality risk analysis of submarine pipeline in construction period base on FMEA and fuzzy theory [J]. China Safety Science Journal (in Chinese), 2012, 22(1): 112-117.
- [11] 许谨,邵必林,吴琼. 肯特法在长输管道安全评价中的改进研究[J]. 中国安全科学学报,2014,24(1):109-112. Xu J, Shao B L, Wu Q. Improvement of Kent for evaluation of long-distance pipeline risk [J]. China Safety Science Journal (in Chinese), 2014, 24(1): 109-112.
- [12] 任帅,张琪,王东,等. 基于主分量法的管道腐蚀评价-以川气东送管道为例[J]. 油气储运,2015,34(5):519-523. Ren S, Zhang Q, Wang D, et al. Pipeline corrosivity assessment based on principal component analysis-take the Sichuan-East gas transmission pipeline as an example [J]. Oil & Gas Storage and Transportation (in Chinese), 2015, 34(5): 519-523.
- [13] 覃彬全,郭在华,陈佳祺,等. 埋地金属导体对接地系统电阻测试影响试验分析[J]. 气象科技,2021,49(4):662-670. Qin B Q, Guo Z H, Chen J Q, et al. Influence experiment and analysis of buried-metal conductor on resistance test of grounding systems [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(4): 662-670.
- [14] 余田野,徐达军,余彦龙,等. 湖北省地形特征对雷电参数的影响[J]. 气象科技,2022,50(5):734-741. Yu T Y, Xu D J, Yu Y L, et al. Influence research of topographic features on lightning parameters in Hubei Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2022, 50(5): 734-741.
- [15] 杨超,赵丽娟. 模糊综合评判法在厦门市雷电灾害风险区划中的应用[J]. 气候与环境研究,2011,16(6):774-778. Yang C, Zhao L J. The application of fuzzy comprehensive evaluation method in lightning disaster risk zoning in Xiamen city [J]. Climate And Environmental Research (in Chinese), 2011, 16(6): 774-778.
- [16] 樊运晓,高朋会,王红娟. 模糊综合评判区域承灾体脆弱性的理论模型[J]. 灾害学,2003(3):22-25. Fan Y X, Gao P H, Wang H J. Theoretical model for fuzzy evaluation of vulnerability of regional hazard bearing body [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 2003(3): 22-25.

- [17] 刘平英,张腾飞,尹丽云,等.基于多源数据融合的云南省雷电灾害风险综合评价与区划[J].气象科技,2021,49(2):269-277. Liu P Y, Zhang T F, Yin L Y, et al. Comprehensive evaluation and zoning of lightning disaster risks in Yunnan Province based on multi-source data fusion [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(2): 269-277.
- [18] Zadeh L A. Fuzzy sets [J]. Information&Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [19] Saaty T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [20] Wang J Q. Multi-criteria decision-making approach with incomplete certain information based on ternary AHP [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006(1): 109-114.
- [21] 王德言,李雪佩,刘寿先,等. GB 50343—2012 建筑物电子信息系统防雷技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012. Wang D Y, Li X P, Liu S X, et al. GB 50343-2012 Technical code for protection of building electronic information systems against lightning (in Chinese) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [22] 刘吉克,朱清峰,陈强,等. GB 50689—2011 通信局(站)防雷与接地工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2012. Liu Jike, Zhu Qingfeng, Chen Qiang, et al. GB 50689-2011 Code for design of lightning protection and earthing engineering for telecommunication bureaus (stations) (in Chinese) [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [23] 黄旭,周勇,杨光义,等. GB 50650—2011 石油化工装置防雷设计规范[S].北京:中国计划出版社,2012. Huang X, Zhou Y, Yang G Y, et al. GB 50650—2011 Code for design protection of petrochemical plant against lightning (in Chinese) [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [24] 刘凤姣,何逸,王智刚,等. GB/T 33676—2017 通信局(站)防雷装置检测技术规范[S].北京:中国标准出版社,2017. Liu F J, He Y, Wang Z G, et al. GB/T 33676—2017 Technical specifications for inspection of lightning protection system in telecommunication site (station) (in Chinese) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [25] 王学良,刘学春,李辉进,等. GB/T 32937—2016 爆炸和火灾危险场所防雷装置检测技术规范[S].北京:中国标准出版社,2016. Wang X L, Liu X C, Li H J, et al. GB/T 32937—2016 Technical specifications for inspection of lightning protection system in explosive and fire hazardous place (in Chinese) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [26] 向文,刘阳,胡海江,等.基于模糊综合评价的输电线路综合防雷措施的确定[J].电瓷避雷器,2019(3):63-67. Xiang W, Liu Y, Hu H J, et al. The determination of comprehensive lightning protection measures for transmission line based on FCE [J]. Insulators and Surge Arresters (in Chinese), 2019(3): 63-67.
- [27] 金菊良,魏一鸣,丁晶.基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J].水利学报,2004(3):65-70. Jin J L, Wei Y M, Ding J. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydraulic Engineering (in Chinese), 2004(3): 65-70.
- [28] 崔湘军,曹炳元.三角形类型模糊模式识别新探[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(5):978-981. Cui X J, Cao B Y. Study on triangle type fuzzy pattern recognition [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science (in Chinese), 2010, 29(5): 978-981.
- [29] 巴振宁,韩亚鑫,梁建文.基于改进 AHP 和模糊综合评价法的燃气管道腐蚀风险评价[J].安全与环境学报,2018,18(6):2103-2109. Ba Z N, Han Y X, Liang J W. Risk assessment of the gas pipeline corrosion based on the improved AHP and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Safety and Environment (in Chinese), 2018, 18(6): 2103-2109.
- [30] 王成歧.最大隶属原则有效度的测定[J].统计研究,1992,9(1):51-52. Wang C Q. Determination on validity of the maximum subordination principle [J]. Statistical Research (in Chinese), 1992, 9(1): 51-52.
- [31] 邱东.最大隶属原则的有效度与加权平均原则的应用-模糊统计评判中评判原则的比较分析[J].统计研究,1989,6(2):50-54. Qiu D. The validity of maximum membership principle and the application of weighted average principle-Comparative analysis of judgment principles in fuzzy statistical evaluation [J]. Statistical Research (in Chinese), 1989, 6(2): 50-54.
- [32] 朱小飞,王永君,李大军.模糊评价中最大隶属度原则有效性检验[J].测绘与空间地理信息,2016,39(5):135-137+143. Zhu X F, Wang Y J, Li D J. The effectiveness test of the maximum membership principle in fuzzy comprehensive evaluation [J]. Geomatics&Spatial Information Technology (in Chinese), 2016, 39(5): 135-137+143.
- [33] 于忠江,郝雪明,梁景峰,等.基于区间直觉模糊集的雷电防护能力评价[J].电瓷避雷器,2021(1):56-62. Yu Z J, Hao X M, Liang J F, et al. Capacity assessment of lightning protection based on interval intuitionistic fuzzy set [J]. Insulators and Surge Arresters (in Chinese), 2021(1): 56-62.

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Lightning Protection Ability Based on Improved Analytic Hierarchy Process

LIANG Jingfeng^{1,2} LIU Weina³ ZHANG Jing^{1,2} FENG He⁴

(1 Hebei Sub-Center of China Meteorological Administration Training Centre, Baoding 071000; 2 Hebei Information Engineering School, Baoding 071000; 3 Hebei Agricultural University, College of Mechanical & Electrical Engineering, Baoding 071000; 4 Meteorological Administration Technology Service Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050021)

Abstract: Lightning protection is a measure taken to prevent and reduce material losses and loss of life or personal injury caused by lightning strikes. Lightning protection facilities are easily affected by the external environment and their decreasing performance. Therefore, it is of great significance to evaluate the protection ability of lightning protection measures scientifically to ensure and improve the protection effect. The advantages and disadvantages of fault tree analysis, Bayesian network evaluation, neural network, failure mode analysis, Kent score, and principal component analysis are discussed. Based on the characteristics of coupling and fuzziness of lightning protection measures and the requirement of reasonably determining evaluation index weight, the fuzzy comprehensive evaluation based on improved analytic hierarchy process is proposed. According to the relevant technical standards and norms of lightning protection, considering the impact of the lightning environment, carrier characteristics, and natural factors, an evaluation index system of lightning protection capability with 6 primary indexes and 17 secondary indexes is established. The weights of each index are calculated by establishing a comparison matrix, calculating importance ranking index, constructing a judgment matrix, calculating a transfer matrix, constructing an optimal transfer matrix, calculating a quasi-optimal consistent matrix, solving the feature vector, and so on. The evaluation set and membership matrix of fuzzy comprehensive evaluation are established, and the single index fuzzy evaluation is carried out by using the weight vector and membership matrix corresponding to the evaluation level. The multi-index fuzzy comprehensive evaluation is carried out by using a new matrix composed of a single index evaluation vector and an index weight vector. The evaluation grade of lightning protection capability is determined by the principle of maximum membership degree. This method is used to evaluate the lightning protection ability of the oil and gas gathering station library containing an inflammable and explosive production area, information control function area, and power system function area. The evaluation level is consistent with the actual situation and related literature cases, indicating the applicability and correctness of the method, and providing guidance for the improvement of lightning protection measures and lightning protection ability.

Keywords: lightning protection capability; improved analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation method; membership matrix; ability evaluation

Received: 2022-07-28 Accepted: 2023-02-07

© Editorial Office of *Meteorological Science and Technology* (CC BY-NC-ND 4.0)