

# LEC 法加入模糊影响图算法的变电站施工触电风险研究

汪玉翔<sup>1</sup>, 梁伟萍<sup>2</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心,贵州 贵阳 550002;  
2. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司,贵州 贵阳 550009)

**摘要:**为了解决传统 LEC 法安全风险的评价模式套路化的问题,本文通过加入模糊影响图算法提高了风险管理的有效性、灵活性。首先,从变电站工程安全风险的一般应用理论和方法出发,先以 LEC 法为主导进行变电站建设风险危险源辨识,利用 minitab 软件分析统计风险危害因素,分析项目存在的安全风险特点,找出了触电风险作为主要管控风险点;然后,绘制出触电风险模糊影响图,使用 Matlab 工具进行模糊逻辑推理揭示出引发“触电风险”的众多因素间的潜在关系,探究出有针对性的安全管理方案并在实际中提高了安全风险管控措施的有效性;最后,采用针对性方案解决了安措套路化的问题,提高了增强了灵活性,讨论了基于定性分析的 LEC 评价法和定量风险的模糊影响图评价算法的优缺点,为今后的现场施工管理提供理论支撑和应用模型。

**关键词:**安全风险辨识;模糊评价;危险性评价;模糊逻辑推理;触电风险

文章编号:2096-4633(2019)11-0021-08 中图分类号:TM74 文献标志码:B

国内近些年在安全管理上的进步主要体现在各种规章制度的完善,加强了问责机制和现场管理力度。各种安全风险管理理论比较成熟,但安全管理水平仍主要受限于两方面——安全风险管理理论的实际有效的应用、安全生产技术的发展。

其中,安全风险管理理论的实际有效的应用,基于频繁的监督与管控留下了大量的检查表数据和图像资料,从这些资料和经验中,通过科学分析,得到经验,找出关联和重点,降低风险。每个工程的风险有相同的一面也有独特的一面,例如贵州的施工环境与广东的施工环境不同,风险管理侧重方式就有不同,面对这一问题 LEC 法虽经典但刻板。为了克服传统 LEC 法套路化的一面,还需加入模糊评价法,找出重点和其包含因素之间的关联,从而提出更具针对性的决策,增强现场安全管控的灵活性、有效性<sup>[1]</sup>。

本文由笔者所参建的 220 kV 奎福变电站工程作为研究实例。该站位于广东省佛山市顺德区杏坛镇麦村。在工程开工前根据当地的环境地理情况、以及本工程的特点编制汇总了危险源辨识风险评价清单,严格执行安全管理四步法的要求,施工期间各方不间断的安全检查,产生了大量风险源及防控措施等原始数据,从 108 本作业指导书中选用了其中

的 39 份,业主和项目部安全检查、整改闭环 80 次,执行完毕安全施工作业票 69 份,专项安全交底 29 次,应急演练 3 次。笔者以这些第一手的数据资料为基础,应用安全评价理论通过对这些数据进行统计分析,在 LEC 法后,加入模糊影响图评价方法,从而为该项目探究出一个有针对性的安全管理方案,并运用到实际的管理中去,在项目过程中提供完整的安全预警体系,并为今后的现场施工管理提供理论和应用支持。

## 1 作业条件危险性评价法(LEC 法)

作业条件危险性评价法是电网公司常用的一种评价方法。它将评价的环境和参考环境做对比,将事故或危险事件发生的可能性(Likelihood),人员暴露于危险环境的频率(Exposure)及一旦发生危险后果的严重程度(Consequence)作为自变量,作业条件的风险值作为因变量(D),函数式  $D = L \times E \times C$ ,乘积 D 越大,风险越大<sup>[2]</sup>。

### 1.1 利用 minitab 统计分析 220 kV 奎福变电站 LEC 表

根据 220 kV 奎福变电站施工过程中专家以及现场经验丰富的一线职工得到的安全管理经验和数据,填写出了 659 项在 220 kV 奎福变电站工程施工

过程中存在的作业风险评价表。再结合 minitab 软件统计后,我们凝结出如下特征:

(1) 奎福变电站的不同等级的风险数量呈金字塔状分布,可接受风险最多,高风险最少,符合我们直观感受。将施工各阶段存在的风险分类统计,发现变电站施工的两大特性:①变电安装阶段比变电土建阶段存在的风险种类更丰富;②土建阶段的风险具有重复性。

(2) 变电站施工项目中,细分风险中出现频数最多的是触电风险 90 项,且该风险分布在各个施工阶段。因此,从整体管控上、出现频次上,我们优先选“触电风险”作为施工整体过程中重点防范的风险。

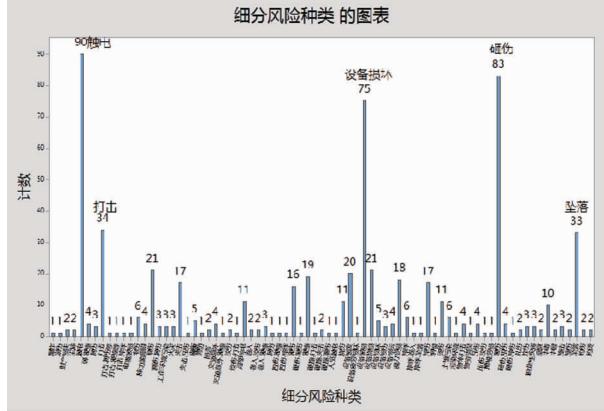


图 1 细分风险累积频数统计图

Fig. 1 Statistical diagram of Segmentation risk cumulative frequency

为更好的管控“触电风险”,我们统计了各种导致“触电风险”的产生因素(图 2),并将排在前 5 种的危险因素绘制成影响图<sup>[3]</sup>(图 3)。

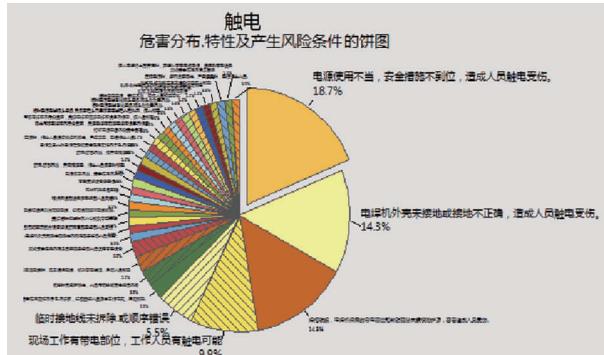


图 2 触电风险各种产生条件占比饼图

Fig. 2 Ratio pie chart of various occurrence condition of electric shock risk

通过饼图我们可以一目了然将占比最大的主要

因素抓出,摒弃一些次要的因素,绘制出的构图简洁的“触电风险”影响图(图 3),方便下一步使用模糊推理分析计算,揭示各因素中的内在联系。“影响”一词不仅明显包含了其中的因果关系,也包含了不相关的方向性关联。例如升高与体重相关,但无因果关系<sup>[4-5]</sup>。

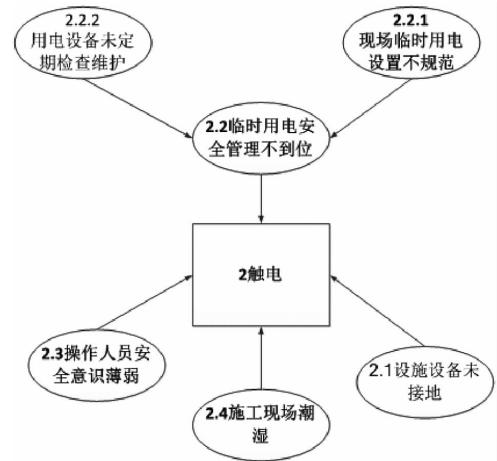


图 3 触电风险影响图

Fig. 3 Impact of electric shock risk

## 2 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种定量安全评价方法,通过大量实验结果分析和事故统计资料上获得的指标或规律(数学模型),根据模糊数学的隶属度理论,得到事故基本至因因素的关联度,适合用于对受多因素制约的事物对象作出一个总体的评价,适合解决难以量化、非确定性的问题。由于导致触电风险的因素非常多,所以非常适合利用模糊推理进行分析<sup>[6]</sup>。

当然模糊评价法也有它受限制的一面:首先,模糊推理和 LEC 法一样规则和打分都依赖经验。其次,模糊规则的制定相比 LEC 法更加繁杂:模糊规则的语言定义和打分规则的定义对结果起决定因素,隶属度的定义不能模棱两可,隶属度取值决定了生成图形的形状。当输入输出变量、隶属度函数、模糊规则数目增多时,图形化的模糊逻辑系统效率降低甚至难以实现,需要结合命令行函数进行重复性计算<sup>[7]</sup>。

### 2.1 模糊集合理论

论域代表被控对象的取值范围,论域 X 上“模糊集合”定义为  $\tilde{A}$ :

$\tilde{A} = \{(x, A(x)) | x \in X\}$ , 或者  $\tilde{A} = \{x, \mu_A(x) | x \in X\}$  与  $\tilde{B}$  的“并集”记为  $\tilde{C} = \tilde{A} \cup \tilde{B}$ , 则对一切  $\mu \in U$ , 有  $\mu_C(\mu) = \max[\mu_A(\mu), \mu_B(\mu)]$ , 或:

$$\mu_D(\mu) = \mu_A(\mu) \vee \mu_B(\mu) \quad (1)$$

式中, 符号“ $\vee$ ”表示取两者中大的数作为运算结果, 而符号“ $\wedge$ ”表示取两边较小的数作为结果。在模糊集合中, 集合  $\tilde{U}$  到集合  $\tilde{V}$  的模糊关系, 则定义成直积集  $\tilde{U} \times \tilde{V}$  的一个模糊子集  $\tilde{R}$ , 称为从  $\tilde{U}$  到  $\tilde{V}$  的一个模糊关系, 记作:

$$\tilde{U} \xrightarrow{\tilde{R}} \tilde{V}$$

$$\mu_R(X_i, Y_j) = \mu_{A \times B}(X_i, Y_j) = \min[\mu_A(X_i), \mu_B(Y_j)] \quad (2)$$

一般情况下, 模糊关系可以用矩阵形式表示如下:

$$R(x, y) = \tilde{A}(x) \times \tilde{B}(y) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} [y_1, y_2, \dots, y_n] = \begin{bmatrix} x_1 \wedge y_1 & x_1 \wedge y_2 & \dots & x_1 \wedge y_n \\ x_2 \wedge y_1 & x_2 \wedge y_2 & \dots & x_2 \wedge y_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n \wedge y_1 & x_n \wedge y_2 & \dots & x_n \wedge y_n \end{bmatrix} = \underbrace{\{(x_i \wedge y_j) | x_i \in X, y_j \in Y\}}_{r_{ij}}$$

普通关系通常用 1 或 0 表示, 与隶属度合成模糊关系进行运算。

### 2.1.2 模糊关系 $\tilde{C} \cup \tilde{D}$ :

$$\mu_{C \cup D}(x_i, y_j) = \max[\mu_C(x_i, y_j), \mu_D(x_i, y_j)] \quad (3)$$

### 2.1.3 模糊关系 $\tilde{G} \cdot \tilde{H}$

设  $\tilde{G}, \tilde{H}$  为两个模糊关系, 且  $\tilde{G} \in \tilde{X} \times \tilde{Y}, \tilde{H} \in \tilde{Y} \times \tilde{Z}$ , 定义模糊关系  $\tilde{G}$  对  $\tilde{H}$  的“合成”为模糊关系  $\tilde{G} \cdot \tilde{H}$ , 对于任意  $x \in X, y \in Y, z \in Z$ , 模糊合成关系的隶属函数为:

$$\mu_{E \cdot F}(x_i, z_j) = \max\{\min|\mu_E(x_i, y_j), \mu_F(y_j, z_k)|\} \quad (4)$$

点乘的意义是代表在同一论域下比较两个关系的相关程度。

## 2.2 模糊集合和隶属度的建立

影响图中所有节点和前置或后置节点模糊集合间的存在关系都可以用函数来进行表达, 模糊运算后, 以模糊矩阵的形式出现, 这样的矩阵形式既方便运算, 也方便将其转换为计算机语言, 因此我们可以使用 MATLAB 的模糊规则编辑器进行计算。

S 型函数曲线 (sigmoid 型函数曲线) 非常适合作为带有“很”、“很不”等修饰词的语言值的隶属度

或者:

$$\tilde{U} \times \tilde{V} = \{(u, v) | u \in U, v \in V\}$$

叉积的意义是将论域进行转换, 让不同论域下的概念发生联系, 例如将普通关系转换为模糊关系。模糊关系  $\tilde{R}$  由隶属函数  $\tilde{R}(u, v)$  是给定论域到实数区间  $[0, 1]$  的一个映射, 当  $\tilde{U} = \tilde{V}$  时, 称  $R$  为论域  $\tilde{U}$  中的模糊关系<sup>[8]</sup>。

### 2.1.1 模糊关系 $\tilde{A} \times \tilde{B}$

两个模糊集合  $\tilde{A}$  和的  $\tilde{B}$  笛卡尔乘积具有以下隶属度:

$$(2)$$

函数<sup>[9-10]</sup>。我们在模糊逻辑工具箱中利用两个 S 型函数组成的 psigmf 函数构造的隶属度函数类型可以得到与人类语言特性更符合的一些隶属度函数形状, 我们将 0 到 1 分解成 11 个点  $(0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0)$ , 如图 4。

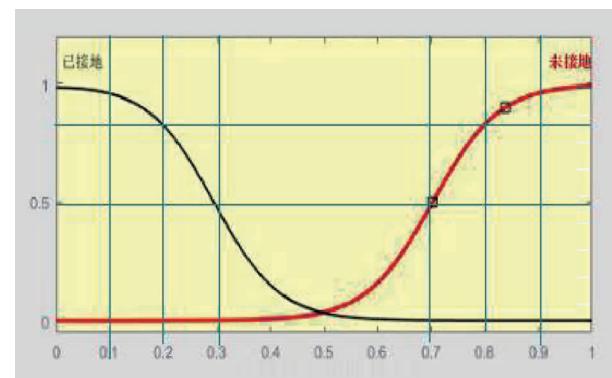


图 4 隶属度的取值

Fig. 4 Value of membership

频率模糊集合和状态模糊集合常用一些通用指标来评价, 状态大多使用“好中差”, 频率使用“高中低”等常用级别。模糊关系通过相邻结点间状态模糊关系函数来确定<sup>[11]</sup>。我们可以将隶属度表示同意程度, 纵坐标代表隶属度, 横坐标代表频率, 根据曲线中的频率各取 4 个点为 H、M、L 赋值<sup>[12]</sup>, 取以

下点方便计算。

### 2.2.1 频率模糊集的定义

“ $0.7 \mid 0.5$ ”表示频率为 0.7 的隶属度为 0.5，隶属度和模糊集合可以按如下标识<sup>[13]</sup>。

$$\text{高 (H)} = \{0.7 \mid 0.5, 0.8 \mid 0.7, 0.9 \mid 0.9, 1.0 \mid 1.0\};$$

$$\text{中 (M)} = \{0.3 \mid 0.2, 0.4 \mid 0.8, 0.5 \mid 1.0, 0.6 \mid 0.8, 0.7 \mid 0.2\};$$

$$\text{低 (L)} = \{0 \mid 1.0, 0.1 \mid 0.9, 0.2 \mid 0.7, 0.3 \mid 0.5\}.$$

### 2.2.2 状态模糊集的定义

根据变电工程施工安全风险的特点，并咨询相关安全员、工程师以及项目经理，将变电建设项目施

工安全风险因素的状态模糊集进行表述：

$$\text{好 (G)} = \{G \mid 1.0, S \mid 0, B \mid 0\};$$

$$\text{中 (S)} = \{G \mid 0, S \mid 1.0, B \mid 0\};$$

$$\text{差 (B)} = \{G \mid 0, S \mid 0, B \mid 1.0\};$$

$$\text{是 (Y)} = \{Y \mid 1.0, N \mid 0\};$$

$$\text{否 (N)} = \{Y \mid 0, N \mid 1.0\}.$$

其中“G、S、B、Y、N”等表示状态为“好中坏”的隶属度的为 0 或 1，其他类似<sup>[14-15]</sup>。

根据影响图 3 结合 220 kV 奎福变电站现场安全员记录的 70 多起安全事件和过往工程经验，对影响图形中独立结点的状态模糊集合、频率模糊集评估如下表。

表 “触电风险”结点的状态与频率对应表

Tab. Status and frequency correspondence table of "electric shock risk" node

结 点	是(Y)	否(N)	好(G)	中(S)	差(B)
2.1 设施设备未接地	H	L			
2.2 临时用电安全管理不到位	H	L			
2.2.1 现场临时用电设置不规范	H	L			
2.2.2 用电设备定期检查维护			L	M	H
2.3 操作人员安全意识薄弱	H	L			
2.4 施工现场潮湿			M	H	L

### 2.3 使用 MATLAB 模糊推理规则编辑器计算

#### “触电风险”

通过隶属度函数编辑器来设计和修改“IF… THEN”形式的模糊控制规则<sup>[16-17]</sup>。

#### 2.3.1 建立模糊控制系统

(1) 定义 5 个独立风险结点为输入变量，一个输出变量“触电风险”，如图 5 所示。

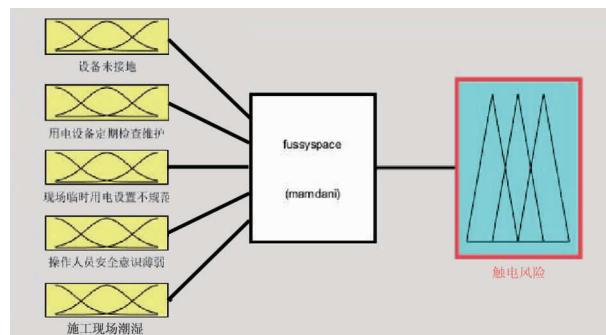


图 5 “触电风险”价值结点模糊控制系统逻辑设计

Fig. 5 Logic design of fuzzy control system for value node of "electric shock risk"

② 用电设备定期检查维护(图 7)。

③ 现场临时用电设备设置不规范(图 8)。

④ 操作人员安全意识淡薄(图 9)。

⑤ 施工现场潮湿(图 10)。

⑥ 触电风险(图 11)。

(2) 添加推理规则。推理规则有  $2 \times 3 \times 2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 2 = 216$  种组合，根据奎福变现场经验，添加符合现场实际的 24 种规则，权重皆为 1。图 12。

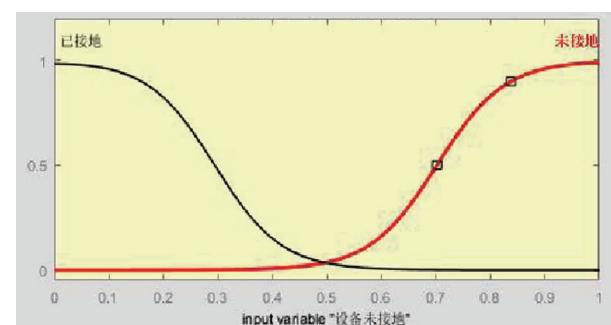


图 6 “设施设备未接地”独立结点模糊集合

Fig. 6 Fuzzy set of independent node of "ungrounded facility and equipment"

① 设施设备未接地(图 6)。

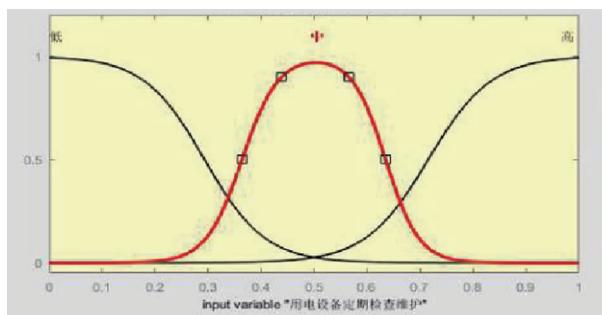


图 7 “用电设备定期检查”独立结点模糊集合

Fig. 7 Fuzzy set of independent nodes for  
"Regular inspection of powered devices"

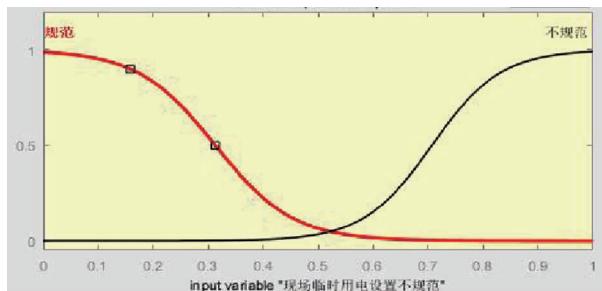


图 8 “现场临时用电设备设置不规范”独立结点模糊集合

Fig. 8 Fuzzy set of independent nodes for "irregular setting  
of temporary power equipment on site"

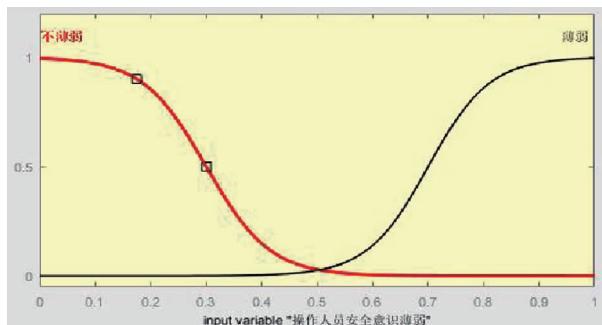


图 9 “操作人员安全意识淡薄”独立结点模糊集合

Fig. 9 Fuzzy set of independent nodes for "Poor  
security awareness of operators"

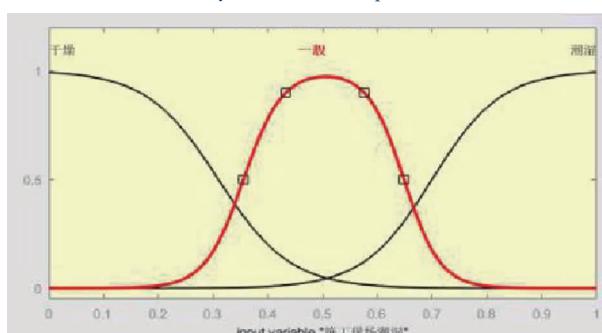


图 10 “施工现场潮湿”独立结点模糊集合

Fig. 10 Fuzzy set of independent nodes for  
"Construction site damp"

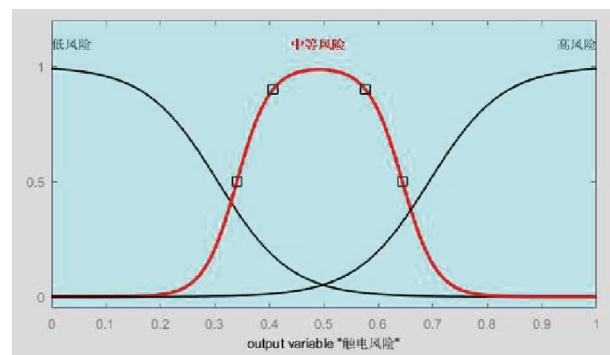


图 11 “触电风险”价值结点模糊集合

Fig. 11 Fuzzy set of value nodes for "electric shock risk"

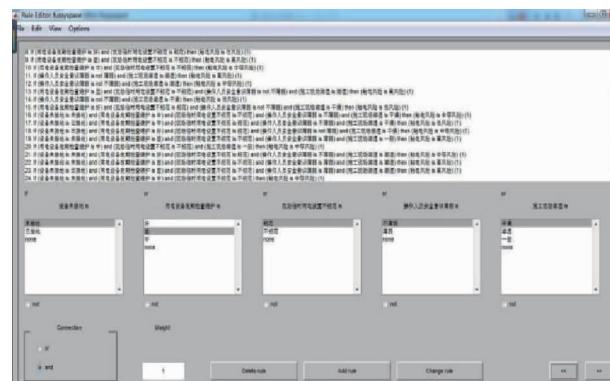


图 12 为“触电风险”添加推理规则

Fig. 12 Adding inference rules for "electric shock risk"

### 2.3.2 分析触电风险的图形化界面

通过图形化界面图 13, 我们可以直观的看到两元素之间的关系, 灵活判断出现场存在的风险值, 不必用 LEC 法反复打分。我们可以给各个元素打分, 拖动红线到现场目前实际分值, 得到最右侧现场触电风险的实际得分。

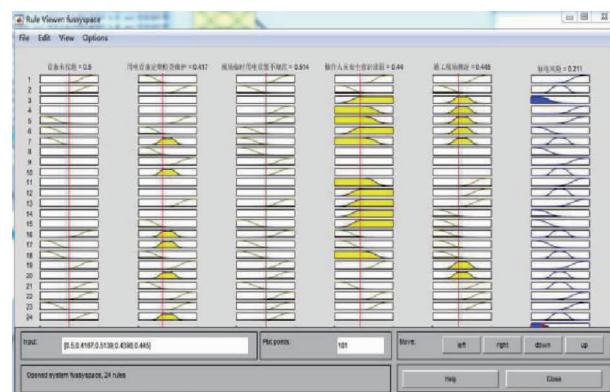


图 13 “触电风险”规则图形化界面

Fig. 13 Graphical interface of "Electric shock risk" rule

我们通过风险分析现场潮湿程度与其他各因素的关系, 可以揭示出规则背后现场存在的实际问题。以现场潮湿为例, 施工现场潮湿在这里指的是持续

性强降雨导致的现场洪涝积水。

图 14 中黄色部分代表高风险,蓝色区域代表低风险;我们可以看出黄色顶端,是现场潮湿时,触电风险值一直居高,不受临电设施设置的规范情况变化,而绿色和蓝色部分,代表现场一般、干燥时,临电设施规范则可以有效降低风险。产生这一特点原因,是奎福变夏季发生台风暴雨,现场的用电设备极易发生漏电,根据事故典型案例的经验,积水容易发生连环触电事故。例如近期台风艾云尼造成广东暴雨,积水淹没配电箱,造成人员连环触电伤亡事故。

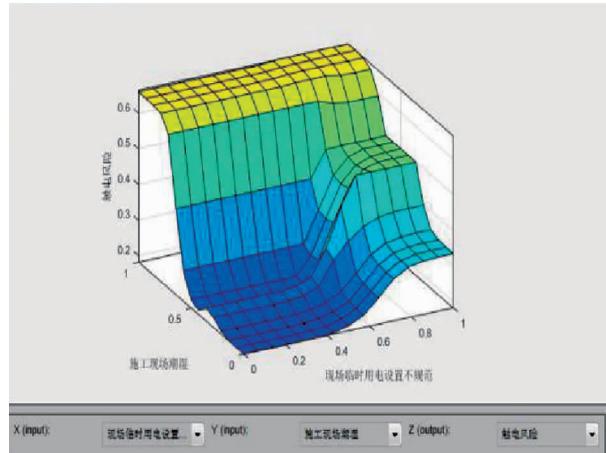


图 14 “潮湿”因素与“临电设置规范情况”的面表观察图

Fig. 14 Surface observation diagram of "wet" factor and "province setting specification"

按照这一规律,奎福变的施工过程中,我们将配电箱移至场地最高处,且配电箱四周都是渗水性极强的细沙土,最大程度避免了积水,并且在接到暴雨和台风通知后,及时将配电箱断电,极大的降低了触电风险的隐患,顺利通过了暴雨台风的考验。这是针对广东地区台风等极端考验下,产生的特殊联系。

我们可以由图 15 看出,现场潮湿时风险值高,但人员安全意识强则可以有效降低安全风险,将黄色降低为蓝绿色,这揭示出两种风险因素呈相互制约的关系。

我们利用这一关系,在奎福变的施工过程中,着重加强操作人员的安全意识,特别是加强触电事故案例的学习,例如台风暴雨时不要淌积水(可能有电线掉落在积水中),暴雨时不要站在变压器下,施救时不应用手,而是用干燥木棍调开电源,通过人员意识上的提高,有效的避免在潮湿环境触电风险事

故的发生。

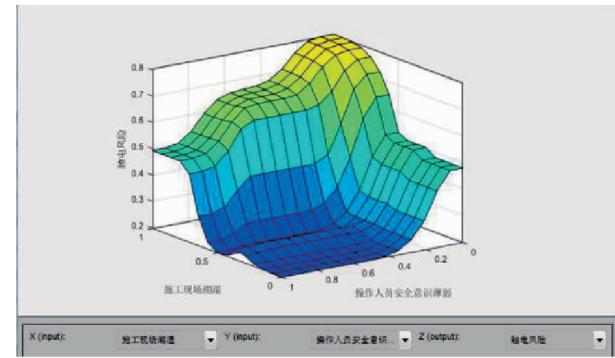


图 15 “潮湿”因素与“人员安全意识”的面表观察图

Fig. 15 Surface observation diagram of "wet" factor and "personal safety awareness"

透过图 16 黄色顶端的高风险值部分的变化,我们可以发现存在一个下坡,说明施工现场潮湿时,用电设备定期检查做得好可以减低一点风险,因为用电设备检查可以及时发现漏电保护装置不灵敏并及时更换,漏电保护会自动切断电源。

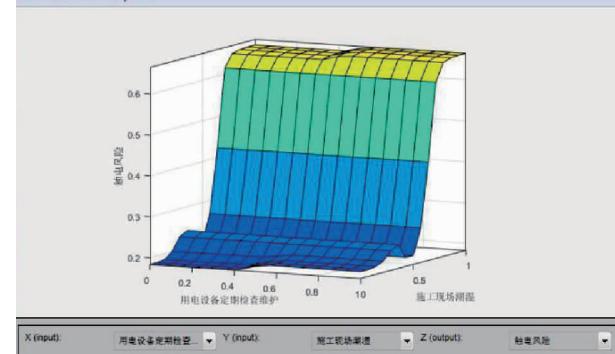


图 16 “潮湿”因素与“用电设备定期检查”的面表观察图

Fig. 16 Surface observation diagram of "wet" factor and "regular inspection of electrical equipment"

透过这一规则,在奎福变施工过程中,我们要求安全员和电工双双配合,安全员在日常巡视中着重检查电源线、漏电保护装置等,一旦发现电源线破皮,漏电保护失灵,就及时通知电工到现场用绝缘胶布包扎、更换漏电保护装置。通过这种形式有效发现整改,避免了漏电风险的盲区。

通过图 17 黄色区域的形状,我们可以观察出,施工现场潮湿时,设备接地不能有效降低风险。施工现场的配电箱、设施工具等按照标准要求接地深度为 1.8 米,在管理人员心理这个深度是达标、有效的。但实际施工中、当洪涝积水时,这个深度的接地在河沙填方的工地里无法起到减少触电风险的作用,因此,在奎福变施工时,要想降低触电风险,仅将

配电箱接地线打够深度是不够的,还需以上各种方法的一起使用。

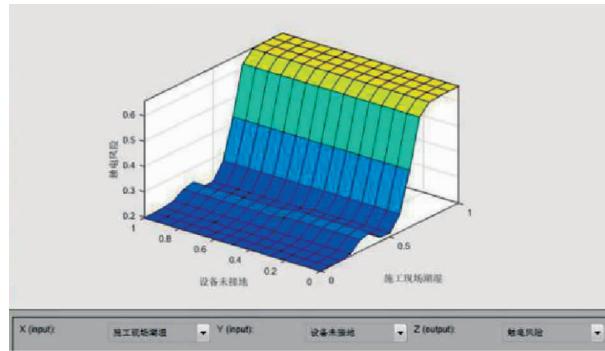


图 17 “潮湿”因素与“设备未接地”的面表观察图

Fig. 17 Surface observation diagram of "damp" factor and "ungrounded equipment"

### 3 结论

LEC 法的长处在于工作开展前用 LEC 法作为参考考虑周全,短处在于套路化、缺乏针对性的详细分析。因此,加入模糊推理,可以对风险管控后风险的变化进行分析,揭示风险的根源、潜在联系和规律,使整改方案更具有针对性、风险管控效果更满意、更有效。

#### 参考文献:

- [1] 孟飞翔,雷英杰,余晓东,等. 基于直觉模糊 Petri 网的知识表示与推理[J]. 电子学报,2016,44(01):77–86.  
MENG Feixiang, LEI Yingjie, YU Xiaodong, et al. Knowledge representation and Reasoning using intuitionistic fuzzy petri nets [J]. Acta Electronica Sinica,2016,44(01):77–86.
- [2] 王双,李志平,辛倩,等. 模糊综合评价法的整体安全评估[J]. 现代电子技术,2019,42(11):82–86.  
WANG Shuang, LI Zhiping, XIN Qian, et al. Overall safety assessment of fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Modern Electronics Technique,2019,42(11):82–86.
- [3] 丁晓丽. 海量信息中模糊数据定位数学模型设计[J]. 现代电子技术,2017,40(16):26–28.  
DING Xiaoli. Design of mathematical model for fuzzy data location in mass information [J]. Modern Electronics Technique,2017,40(16):26–28.
- [4] 李守军,马小平,杨春雨. R-fuzzy 隶属度粗糙近似集的优势度理论[J]. 控制理论与应用,2019,36(02):286–294.  
LI Shoujun, MA Xiaoping, YANG Chunyu. Advantage measure theory of R-fuzzy rough membership set [J]. Control Theory & Applications,2019,36(02):286–294.
- [5] 孟飞翔,雷英杰,雷阳,等. 基于直觉模糊 Petri 网的混合推理方法[J]. 电子学报,2017,45(08):1937–1946.

MENG Feixiang, LEI Yingjie, LEI Yang, et al. Hybrid reasoning using intuitionistic fuzzy petri nets [J]. Acta Electronica Sinica, 2017,45(08):1937–1946.

- [6] 申建红,盖立庭,万索妮,等. 基于模糊集与改进证据理论的深基坑施工风险评价[J]. 土木工程与管理学报,2019,36(02):28–34+41.  
SHEN Jianhong, GAI Liting, WANG Suoni, et al. Risk assessment of deep excavation construction based on fuzzy set and improved evidence theory [J]. Journal of Civil Engineering And Management,2019,36(02):28–34+41.
- [7] 张桂欣,孙柏涛. 基于模糊层次分析的建筑物单体震害预测方法研究[J]. 工程力学,2018,35(12):185–193+202.  
ZHANG Guixin, SUN Baobao. Seismic damage prediction for a single building based on a fuzzy analytical hierarchy approach [J]. Engineering Mechanics,2018,35(12):185–193+202.
- [8] 徐晨宇. 基于模糊影响图的输变电工程施工安全风险评价研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [9] 江文奇. 基于前景理论和 VIKOR 的风险型模糊多准则决策方法[J]. 控制与决策,2014,29(12):2287–2291.  
JIANG Wenqi. Risky fuzzy multi-criteria decision method based on prospect theory and VIKOR [J]. Control and Decision,2014,29(12):2287–2291.
- [10] 韩晓露,刘云,张振江,等. 基于直觉模糊集的网络安全态势评估方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(01):261–267.  
HAN Xiaolu, LIU Yun, ZHANG Zhenjiang, et al. Network security situation assessment method based on intuitionistic fuzzy sets [J]. Journal of Jilin University (Engineering And Technology Edition),2019,49(01):261–267.
- [11] 王威,宋卓,刘晓然,等. 基于直觉模糊集的城市供水安全预警评价模型[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(04):180–185.  
WANG Wei, SONG Zhou, LIU Xiaoran, et al. Early warning and evaluation model of urban water supply security based on intuitionistic fuzzy set [J]. Journal of Safety Science and Technology,2019,15(04):180–185.
- [12] 张文静,张晶,邢金峰. 大数据在配电网投资成效分析中的研究应用[J]. 电力大数据,2017,20(10):31–34.  
ZHANG Wenjing, ZHANG Jing, XING Jinfeng. Research and application of big data in the effectiveness analysis of distribution grid investment [J]. Power Systems and Big Data,2017,20(10):31–34.
- [13] HAOYANG ZHENG, YONG DENG, YONG HU. Fuzzy evidential influence diagram and its evaluation algorithm [J]. Knowledge-Based Systems,2017,131(01):28–45.
- [14] MEHRNOOSH DAVANIPOOR, MARYAM ZEKRI, FARID SHEIKHOLESLAM. Fuzzy wavelet neural network with an accelerated hybrid learning algorithm [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2012,20(03):463–470.
- [15] CHIYUAN YEH, WENHAUROGER JENG, SHIEJUE LEE. Data-

- based system modeling using a type-2 fuzzy neural network with a hybrid learning algorithm [ J ]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2012, 22(12) : 2296 – 2309.
- [16] AIXUAN ZHAO, JIANMING LI, LONG XU, et al. Fuzzy evaluation analysis and extraction of H-N parameters for on-site distribution cable[ J ]. IET Generation transmission & Distribution , 2019, 13 (11) : 2249 – 2256.
- [17] 范荣全, 吕俊杰, 杨义辉, 等. 基于数据仓库的输变电施工企业工程承载力评估系统的研究[ J ]. 电力大数据 2018, 20 (08) : 8 – 13.  
FAN Rongquan, LV Junjie, YANG Yihui, et al. Research of

engineering capacity evaluation system for transmission substation construction companies based on data warehouse [ J ]. Power systems and big data. 2018, 20(08) : 8 – 13.

收稿日期: 2019-09-08

作者简介:



汪玉翔(1988)男, 学士, 工程师, 主要从事变电项目管理、变电土建评审方面的工作。

(本文责任编辑:范斌)

## Study on electric shock risk of substation construction by using LEC method with fuzzy influence diagram algorithm

WANG Yuxiang<sup>1</sup>, LIANG Weiping<sup>2</sup>

(1. Power Grid Planningand Research Center of Guizhou Power Grid Co .,Ltd ., Guiyang 550002 Guizhou, China ;

2. Guizhou Honglin Aviation Power Control Technology Co .,Ltd ., AERO Engine corporation of China, Guiyang 550009 Guizhou, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the traditional LEC method of security risk evaluation, this paper improves the effectiveness and flexibility of risk management by adding fuzzy influence diagram algorithm. Firstly, starting from the general application theory and method of substation engineering safety risk, the LEC method is used to identify the risk hazard source of substation construction. The minitab software is used to analyze the statistical risk hazard factors, analyze the safety risk characteristics of the project, and find out the electric shock risk as the main risk control point. Then, the fuzzy influence diagram of electric shock risk is drawn, and the fuzzy logic reasoning with Matlab is used to reveal the potential relationship between the numerous factors causing "electric shock risk", explore the targeted safety management scheme and improve the effectiveness of safety risk control measures in practice. In the end, a targeted solution is adopted to solve the problem of anchuo routine, improve and enhance flexibility, discuss the advantages and disadvantages of LEC evaluation method based on qualitative analysis and fuzzy impact chart evaluation algorithm based on quantitative risk, and provide theoretical support and application model for the field construction management in the future.

**Key words:** security risk identification; fuzzy evaluation; risk assessment; fuzzy logic reasoning; electric shock risk