企业应用

基于AHP与信心权重的天然气站防爆电气风险评价

袁语林[1,2]，梁 龙[1,2]，张 杰[1,2]，宋君晗[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司，长沙 410012；2.金属矿山安全技术国家重点实验室，长沙 410012）

摘要：针对天然气场站防爆电气设备设施在日常运维中面临的爆炸风险防控需求，以预防电气火花引发天然气燃爆事故为核心目标，构建基于层次分析法（AHP）与专家信心权重的风险评价模型，实现防爆电气系统潜在风险的科学量化与分级管控。从“产品质量不合格”“选型因素”“安装质量不符合要求”“生产维护类问题”4个方面选取24个二级因素构建天然气场站防爆电气安全评价体系。以浙江省某天然气场站为例进行分析和验证，将评价指标风险等级划分为极低风险、低风险、中风险、高风险、极高风险，并组建一个由25名经验丰富的专家组成的团队。考虑到25名专家的经验及背景均不同，结合专家信心权重指标法对评价指标进行现场打分，基于正态分布原理综合确定评价指标在各风险等级的风险概率打分，结合AHP得出天然气场站防爆电气一级因素的风险等级。该天然气场站整体风险等级为“中风险”，其中“安装质量不符合要求”的风险等级最高，为高风险，评价结果符合实际情况。通过对一级因素的敏感性分析验证了评价模型的稳健性。研究提出的基于AHP与信心权重的防爆电气模糊风险评价模型，核心优势在于将定性的安全风险转化为可量化的指标。这种量化风险评估能力不仅实现了对风险等级的精确判断，更能够指导安全管理人员进行风险排序与资源优化配置，从而显著提升场站安全管理的科学化与精细化水平。

关键词：天然气场站；防爆电气；模糊风险评价；层次分析法（AHP）；专家信心权重

中图分类号：X932 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)07－0222－08

在城镇燃气与电厂用户增多、天然气场站生产规模日益扩大的背景下，由电气设备引发的天然气场站爆炸事故频发，成为安全事故的重要诱因。据行业统计与研究分析，防爆电气问题（选型错误、老化失效、安装不当等）导致的电气事故约占所有电气相关爆炸事故的50%～70%，而电气引爆事故在化工、天然气等高危行业占比高达40%[1]。由此可见，天然气场站中防爆电气设备的事故发生频率较高[2]，存在较大安全隐患[3-5]。因此，亟待开发一种针对天然气场站防爆电气设备的定量安全风险评估方法。这对保障现场生产安全、预防安全事故、强化现场风险防控具有重要意义。

目前，国内外学者已对天然气的安全风险评价展开了大量研究。例如：李水平[6]利用模糊综合评判方法和层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）定量评价了西气东输管道环境地质灾害的风险性；潘禹臣等[7]利用灰色关联分析-加权信息模型完成了对中缅天然气管道沿线的地质灾害风险评价；张鹏等[8]进行了基于风险矩阵法和Borda序值法的城市埋地燃气管道风险评价研究；胡瑾秋等[9]对城市社区燃气管道突发事件进行了风险分析。然而，现有的天然气风险评价研究主要集中在管道方面，关于对天然气场站的风险评价分析较少。虽然，罗振敏等[10]从工作人员、组织管理、失效、点火源4个方面建立天然气场站燃爆风险评估体系，并采用模糊综合评价和层次分析模型确立了天然气场站燃爆风险评估模型，但该研究未对具体设备设施的风险特征展开深入探讨，难以有效支撑基层日常设备设施维护中的安全风险指导需求。

依据《化工和危险化学品生产经营单位重大生

收稿日期：2025-11-11

基金项目：金属矿山安全技术国家重点实验室项目（2024GZKJ02）

作者简介：袁语林（1992—），男，湖南怀化人，硕士，工程师，研究方向为石油化工场所防爆电气检验；通信作者梁龙（1986—），男，甘肃庆阳人，硕士，高级工程师，研究方向为防爆电气检测检验技术和自动控制技术；张杰（1987—），男，江苏无锡人，硕士，高级工程师，研究方向为防爆电气检测检验技术；宋君晗（1985—），男，山西晋城人，硕士，高级工程师，研究方向为防爆电气检测检验技术。

产安全事故隐患判定标准(试行)》(安监总办〔2017〕121 号)的规定,爆炸危险场所(如天然气)未按国家标准安装使用防爆电气设备被列为重大安全事故隐患。这可能导致生产经营单位被迫停产整改,直接影响正常生产秩序,甚至造成重大财产损失与人员伤亡[11-13]。

因此,现以天然气场站防爆电气设备为研究对象,参考行业标准从产品质量不合格、选型因素、安装质量不符合要求、生产维护问题 4 个方面构建风险体系框架,引入专家信心权重指标法[13-14]对风险概率进行可靠定量化评估,采用层次分析法(AHP)[15]计算各影响因素的权重,并基于模糊综合评价模型,从设备状态、维护管理、环境条件、人员操作 4 个维度对天然气场站的防爆电气问题开展系统性风险分析。以确保防爆电气设备选型正确、安装规范、维护良好,确保设备防爆性能持续有效,从而将设备潜在的危险源消灭在萌芽状态,为防爆电气风险防控领域的模型构建与方法创新提供实践验证案例。

1 风险评价模型

基于防爆电气风险因素构建原则,结合行业标准[16]与专家经验[2,17]建立天然气场站爆炸风险因素体系并利用专家正态打分法获得可靠风险评分来验证天然气场站爆炸风险因素体系的合理性。

1.1 评价指标体系的建立

通过分析众多天然气场站的检测项目,调研众多天然气场站关于防爆电气项目的阶段工作(包括设计阶段、选型阶段、采购验收阶段、施工安装阶段、施工验收阶段),初步构建天然气场站的防爆电气爆炸风险评价体系 $\boldsymbol{M}$。选取产品质量不合格、选型错误、安装质量不符合要求、生产维护类问题作为父因素(一级因素 B),以铭牌信息为隔爆型,产品实物为增安型结构等 24 项因素作为子因素(二级因素 X)。评价体系框架如图 1 所示。

1.2 专家信心权重指标法

专家信心权重指标法[14]是一种通过量化专家权威性和判断信心水平,对专家给出的风险事件主观评分进行差异化加权的方法。其核心是通过赋予高权威性、高信心专家更高的权重,减少低可靠性意见的影响,从而提高风险评估结果的准确性和数据可信度。

1.2.1 专家信心指标

考虑到不同专家的教育背景、工作经验和风险态度的不同,需要对专家权威性和判断信心水平进行评价[14]。在实际操作中,通常认为专家的权威性随着教育背景和工作经验的积累而变得越来越成熟和稳

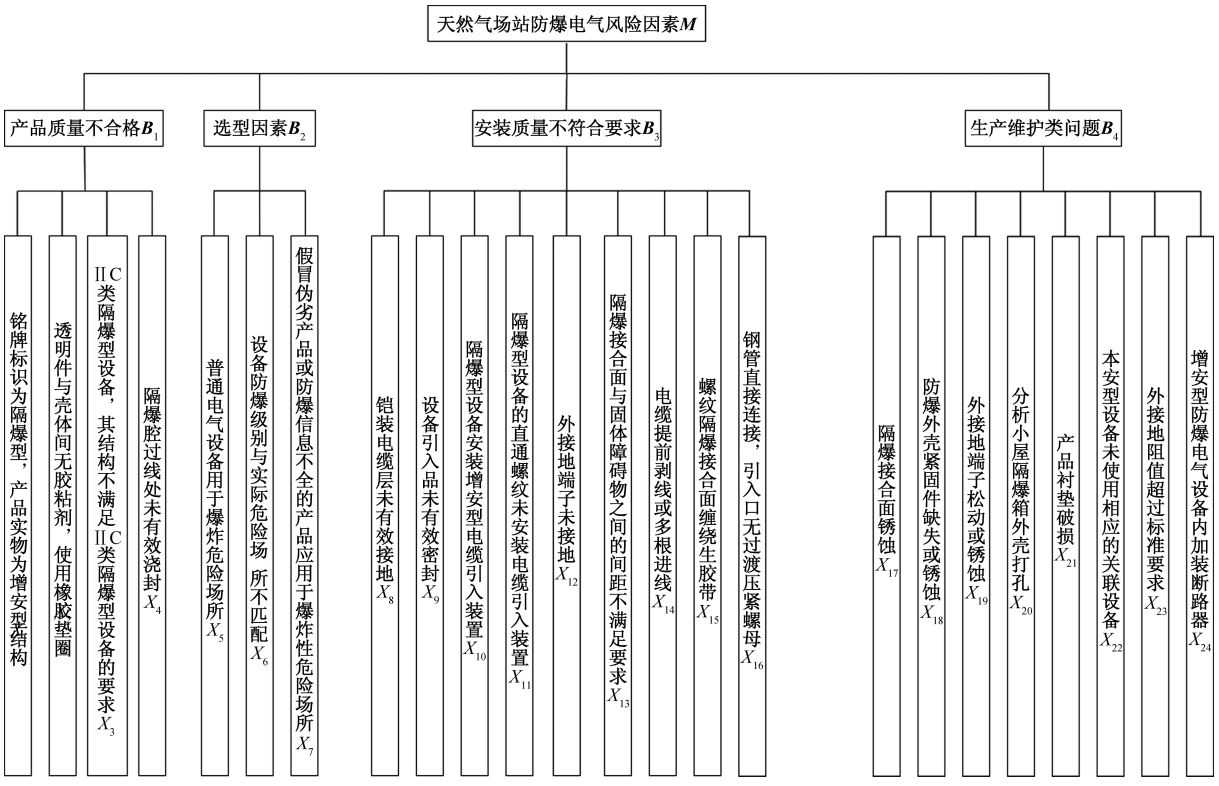


图 1 防爆电气风险评价体系框架

定。权威性评价能力分为 4 个等级，分别用Ⅰ～Ⅳ表示，权威指数用 ξ 表示，见表 1。其中，Ⅰ级得分 ξ=1.0，代表专家的最高权威性。另一方面专家信心指标还涉及对风险因素判断信心水平的评价，在调查过程中，表示专家对自己判断可靠性的主观可靠性水平指标 φ。主观可靠性分为 5 个等级，对应的分数分别为 1.0、0.9、0.8、0.7、0.6。φ 越高，判断越可靠。

综合考虑专家权威性 ξ 和判断信心水平指标 φ，通过式(1)计算出专家信心指标 θ，保证调查数据的可靠性。

$$\theta = \varphi\xi \tag{1}$$

表 1　专家权重划分

等级	工作年限	职称	权重指数 ξ	专家数量
Ⅰ	＞20	教授级高级工程师	1.0	5
Ⅱ	5～20	高级工程师	0.9	5
Ⅲ	3～5	工程师	0.8	7
Ⅳ	1～3	助理工程师	0.7	8

1.2.2　风险概率等级划分

基本事件的概率值通常难以确切给出，一般通过扩展概率值区间增加数据可信度，对某个特定根节点出现在第 k 个区间的专家信心指标 θ，表示该根节点落入第 k 个区间的概率，k 为专家打分所处的区间位置，该节点有 $1-\theta$ 的残差概率位于除 k 以外的区间，根据正态分布原理、随机变量的高斯分布模式，发生概率倾向于围绕其期望值波动，并且随着远离期望值而逐渐减少。残差概率$(1-\theta)$在其他区间分布如式(2)～式(4)所示。

当有 N 位专家参与调查时，为了归一化处理，结合式(5)，可计算第 i 个风险区间内特定基本事件的平均发生概率 $p_i(1\leqslant i\leqslant 5)$，将其作为最终专家意见的评价结果。

当 $k=1$ 时：

$$p_i=\begin{cases}\dfrac{a_{5+k-i}-a_k}{\sum_{i=1}^{5}(a_i-a_k)}(1-\theta), & k+1\leqslant i\leqslant 5\\ \theta, & i=k\end{cases} \tag{2}$$

当 $2\leqslant k\leqslant 4$ 时：

$$p_i=\begin{cases}\dfrac{a_k-a_{k-i}}{\sum_{i=1}^{k-1}(a_k-a_i)}\dfrac{1-\theta}{2}, & 1\leqslant i\leqslant k-1\\ \theta, & i=k\\ \dfrac{a_{5+k-i}-a_k}{\sum_{i=1}^{5}(a_i-a_k)}\dfrac{1-\theta}{2}, & k+1\leqslant i\leqslant 5\end{cases} \tag{3}$$

当 $k=5$ 时：

$$p_i=\begin{cases}\dfrac{a_k-a_{k-i}}{\sum_{i=1}^{k-1}(a_k-a_i)}(1-\theta), & 1\leqslant i\leqslant k-1\\ \theta, & i=k\end{cases} \tag{4}$$

发生概率：

$$P_i=\sum_{i=1}^{N}\frac{p_i}{N} \tag{5}$$

1.3　风险模糊综合评价模型

模糊综合评价是一种基于模糊数学的多因素决策方法，适用于评价指标具有模糊性、难以量化的情况，其核心计算步骤如下。

(1)确定风险评价因素集(U)。将评价对象分解为 n 个评价因素，即天然气场站防爆电气风险因素的父因素集 U，$U=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\}$。父因素按特定属性分成 s 个子因素集，构成下一级子因素指标 U_i，$U_i=\{u_{1i},u_{2i},\cdots,u_{ni}\}$，且满足 $\sum_{i=1}^{s}ni=n$，$\bigcup_{i=1}^{s}U_i=U$，$U_i\cap U_j=\varphi$，$i\neq j$。

(2)建立评语集 V。将天然气场站爆炸风险划分为 5 个等级，分别为极低风险(v_1)、低风险(v_2)、中风险(v_3)、高风险(v_4)、极高风险(v_5)，确定评价集 $v=\{v_1,v_2,v_3,v_4,v_5\}$。风险等级划分见表 2。

(3)确定权重矩阵 $\boldsymbol{W}$。根据 Saaty[15] 提出的一种定性与定量相结合的多准则决策方法，通过构建层次结构和两两比较矩阵，将复杂问题分解为可量化的评价排序，见表 3。构建判断评价矩阵 $\boldsymbol{C}$ 可表示为

$$\boldsymbol{C}=(b_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix}b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n}\\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn}\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：b_{ij} 为第 i 个评价指标与第 j 个评价指标两者重要性的比较结果，且 $b_{ij}=1/b_{ji}$，$i,j=1,2,\cdots,n$。

根据评价矩阵 $\boldsymbol{C}$ 确定各级评价因素的权重系数，对于每一层的 n 个评价因素来说，w_i 表示第 i 个评价因素的权重，且 $\sum_{i=1}^{n}w_i=1$。

(4)确定风险评价矩阵。基于 1.2 节得到各风险评价指标的发生概率，即对于第 i 个评价指标来说，其风险因素的评价集为 $P_i=(P_{i1},P_{i2},\cdots,P_{i5})$。

(5)计算模糊风险结果。利用模糊数学运算方法，对模型进行风险综合评价。

$$\boldsymbol{B}_i=\boldsymbol{W}_i\boldsymbol{R}_i,\ i=1,2,\cdots,s \tag{7}$$

若存在 s 个父因素评价指标，$\boldsymbol{B}_i$ 为第 i 个父因

表 2　风险等级划分

风险等级	下限/%	平均值/%	上限/%	风险名称
v_1	0	0.005	0.01	极低风险
v_2	0.01	0.505	1	低风险
v_3	1	10.5	20	中风险
v_4	20	40	60	高风险
v_5	60	80	100	极高风险

表 3　比较尺度 C_{ij} 的含义

尺度 b_{ij}	含义
1	C_i 较 C_j 的影响相同
3	C_i 较 C_j 的影响略大
5	C_i 较 C_j 的影响大
7	C_i 较 C_j 的影响明显大
9	C_i 较 C_j 的影响绝对大
2,4,6,8	C_i 较 C_j 的影响处于上述等级之间
1,1/2,1/3,…,1/9	C_i 较 C_j 的影响之比相对大,为 C_{xij} 的倒数

素的模糊风险矩阵,$\boldsymbol{W}_i$ 和 $\boldsymbol{R}_i$ 分别为第 i 个父因素下所有子因素的权重和风险向量。对于二级模糊评价模型来说,$\boldsymbol{B}_i$ 结合父因素权重矩阵 $\boldsymbol{W}$,即可得到二级模糊风险向量 $\boldsymbol{B}$。对 $\boldsymbol{B}$ 做归一化处理,并按照最大隶属度原则得到最终模型风险评判结果。

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{R}=(w_1,w_2,\cdots,w_s)\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_1\\ \boldsymbol{B}_2\\ \vdots\\ \boldsymbol{B}_s\end{bmatrix}=(b_1,b_2,\cdots,b_m) \tag{8}$$

2　案例分析

选择浙江省某天然气场站(图 2)为防爆电气风险因素评价对象,该站年供气量为 1.37×10^8 m^3,占地面积约10 713 m^2。主要包含工艺区、办公区、过滤区、计量区、调压区、自用气撬、分析小屋及放空区。

2.1　数据收集和专家正态打分

为了准确掌握天然气场站防爆电气的风险评估指标,采用问卷发放的方式。同时为了保证问卷的有效性及参考意义,问卷调查对象涉及不同工作年限、职称和学历。选择防爆电气领域专家共 25 名进行问卷调查,以获得风险因素的风险等级(表 2)。同时为避免单个专家评价的主观性和不确定性,综合考虑专家判断权重系数 ξ 和信心指数 φ,保障数据收集的可靠性。



图 2　浙江省某天然气场站现场

2.2　确定防爆电器指标权重及模糊隶属度

采取专家信心权重指标法,利用式(1)分别算得 25 位专家对各二级因素的信心权重指标 θ 和概率等级。表 4 为二级因素 x_1 的评价信息。

表 4　二级因素 x_1 风险概率评价

专家编号	风险等级	信心指数 φ	权重指数 ξ	信心权重指标 θ
1	v_3	0.85	1.0	0.85
2	v_4	0.90	1.0	0.90
3	v_3	0.90	1.0	0.90
4	v_2	0.70	1.0	0.70
5	v_3	0.75	1.0	0.75
6	v_4	0.70	0.9	0.63
7	v_3	0.80	0.9	0.72
8	v_4	0.70	0.9	0.63
9	v_2	0.75	0.9	0.68
10	v_3	0.90	0.9	0.81
11	v_2	0.75	0.8	0.60
12	v_2	0.70	0.8	0.56
13	v_2	0.70	0.8	0.56
14	v_4	0.65	0.8	0.52
15	v_5	0.60	0.8	0.48
16	v_4	0.70	0.8	0.56
17	v_3	0.80	0.8	0.64
18	v_3	0.80	0.7	0.56
19	v_3	0.70	0.7	0.49
20	v_3	0.70	0.7	0.49
21	v_2	0.80	0.7	0.56
22	v_2	0.70	0.7	0.49
23	v_4	0.70	0.7	0.49
24	v_3	0.80	0.7	0.56
25	v_3	0.75	0.7	0.53

此外,基于层次分析法,采用加权平均的方式对风险因素在判断矩阵中的重要度进行打分。分别得到 $\boldsymbol{M}$-$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{B}_i$-$\boldsymbol{X}_j$($i=1,2,3,4$;$j=1,2,\cdots,24$)共 5 个判断矩阵。$\boldsymbol{M}$-$\boldsymbol{B}$ 判断矩阵、权重见表 5。通过对一级因素权重计算,得到最大特征值 $\lambda_{max}=4.0104$,

表 5　$\boldsymbol{M}$-$\boldsymbol{B}$ 判断矩阵

$\boldsymbol{M}$	$\boldsymbol{B}_1$	$\boldsymbol{B}_2$	$\boldsymbol{B}_3$	$\boldsymbol{B}_4$	权重
$\boldsymbol{B}_1$	1	2	2	2/3	0.286
$\boldsymbol{B}_2$	1/2	1	1	1/3	0.143
$\boldsymbol{B}_3$	1/2	1	1	1/3	0.143
$\boldsymbol{B}_4$	3/2	3	3	1	0.429

一致性比率 CR＝0.004＜0.1，即满足一致性检验条件。

同理可得其他 4 个矩阵和各自对应的权重，见表 6。

表 6　*M-B* 各级因素权重

一级父因素	权重	二级子因素	权重
B_1	0.167	X_1	0.286
		X_2	0.143
		X_3	0.143
		X_4	0.429
B_2	0.167	X_5	0.200
		X_6	0.200
		X_7	0.600
B_3	0.417	X_8	0.128
		X_9	0.128
		X_{10}	0.077
		X_{11}	0.128
		X_{12}	0.077
		X_{13}	0.077
		X_{14}	0.128
		X_{15}	0.128
		X_{16}	0.128
B_4	0.250	X_{17}	0.156
		X_{18}	0.156
		X_{19}	0.156
		X_{20}	0.156
		X_{21}	0.156
		X_{22}	0.031
		X_{23}	0.094
		X_{24}	0.094

2.3　天然气场站防爆电气设备风险模糊综合评价

防爆电气爆炸风险因素流程如图 3 所示。①识别近几年天然气场站防爆电气爆炸的风险因素；②通过 25 位专家评价天然气场站爆炸的调查问卷，统计有效的调查结果；③采用正态分布专家信息权重法计算风险概率区间；④通过基本事件的风险概率分析来验证测算方法的有效性。

由表 5 得到防爆电气各级风险因素的权重集合。通过模糊综合评价公式，模糊综合评价的二级子因素的结果计算如图 4、图 5 所示。

$$\boldsymbol{B}_1 = \boldsymbol{W}_i\boldsymbol{R}_i = (r_{i1}, r_{i2}) \begin{bmatrix} B_{i1} \\ B_{i2} \end{bmatrix} = [0.182\ \ 0.302\ \ 0.244\ \ 0.211\ \ 0.060]$$

。同上可得：$\boldsymbol{B}_2$＝[0.359 0.388 0.186 0.057 0.010]，$\boldsymbol{B}_3$＝[0.077 0.168 0.243 0.336 0.176]，$\boldsymbol{B}_4$＝[0.092 0.280 0.424 0.168 0.035]。

以二级模糊评价结果为基础，将其结果转化为单因素集合，进行一级父因素模糊综合评价。

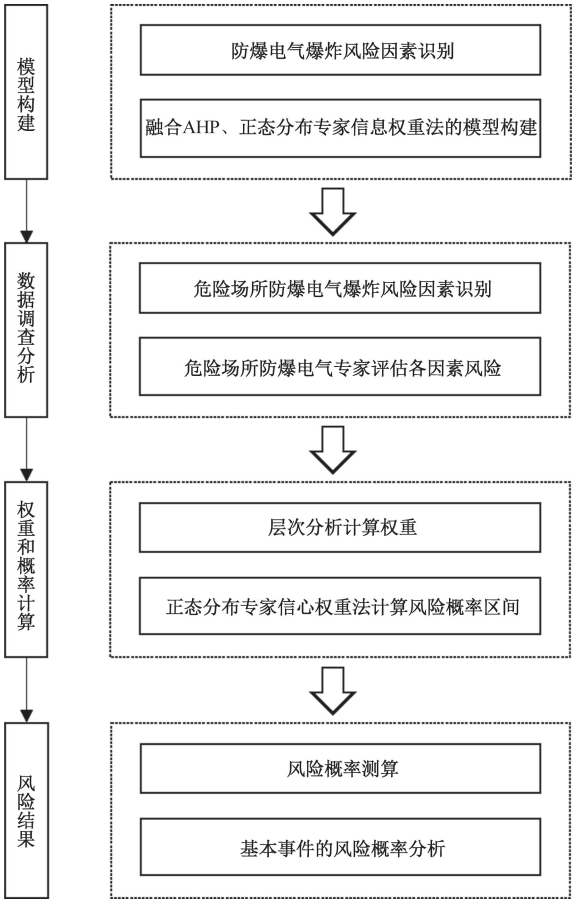


图 3　防爆电气爆炸风险概率的评价流程

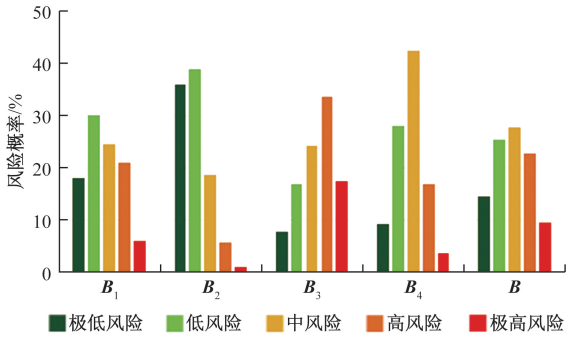


图 4　防爆电气各因素爆炸风险概率的模拟综合评价结果

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{W}\boldsymbol{R} = (w_1, w_2, w_3, w_4) \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_1 \\ \boldsymbol{B}_2 \\ \boldsymbol{B}_3 \\ \boldsymbol{B}_4 \end{bmatrix}。$$

归一化得，$\boldsymbol{B}$＝[0.145 0.255 0.279 0.227 0.094]。即为整体防爆电气风险因素的模糊综合评价向量。通过最大隶属度法，天然气场站防爆电气风险概率的最大隶属度为 0.279，按照表 2 建立的风险等级划分，其对应的风险等级为 v_3 中风险。

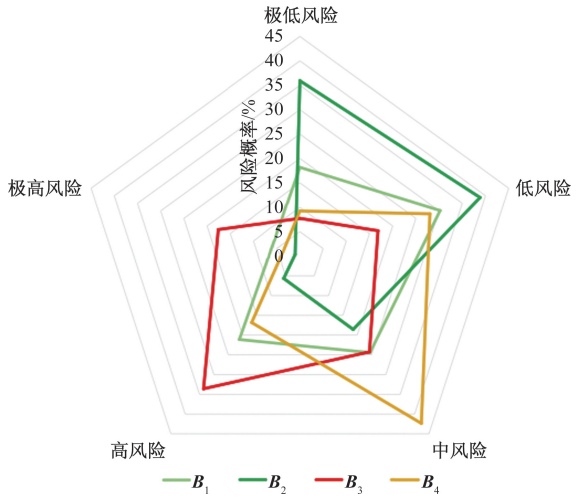


图 5　防爆电气各因素爆炸风险概率的模拟综合评价结果

结合风险因素的各权重,天然气场站建设单位应从防爆电气的选型阶段、施工阶段、运维阶段采取预防措施,投入必要的资源进行管理,保证防爆电气风险因素的总体可控。

2.4　天然气场站防爆电气设备风险评价的敏感性分析

在本文的研究框架中虽引入了专家信心权重用以减少低可靠性意见的影响,但不能排除打分过程中专家整体偏误的可能性产生。为弥补这一局限性,并检验评估结果的稳健性,利用敏感性分析,探究各因素权重在合理范围内发生微小变动时,关键风险因素的优先级排序是否会发生变化。

现假定表 6 中一级因素权重上下变动 10%(图 6),则现有的综合风险得分变化幅度如下。

(1)安装质量不符合要求 $\boldsymbol{B}_3$。当该因素权重上调 10%时,对应的综合风险得分变化为 0.68%;而该因素权重下调 10%时,得分变化为−0.70%。在所有考察的因素中该项变化幅度最大,表明本文的

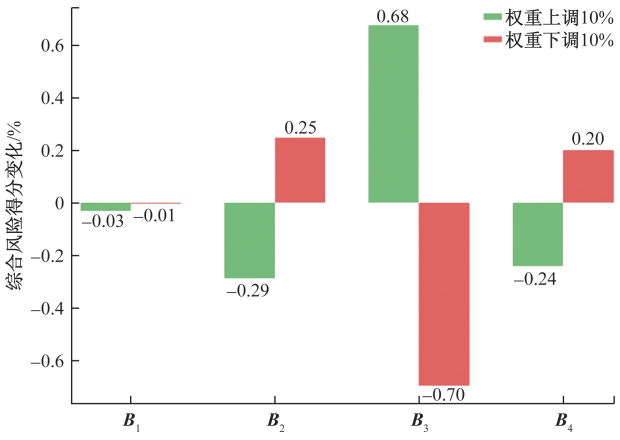


图 6　一级因素权重变动对模拟综合评价的影响

风险核定框架对安装质量不符合要求的权重变化最为敏感。在整体偏误存在的前提下,上述结果意味着安装质量的变化将对天然气场站防爆电气安全风险评估的影响最为显著。

(2)选型因素 $\boldsymbol{B}_2$。该因素权重上调 10%时,综合风险得分变化为−0.29%;而权重下调 10%时,变化为 0.25%。其敏感性变化幅度排名第 2。

(3)生产维护类问题 $\boldsymbol{B}_4$。该因素权重上调 10%时,综合风险得分变化为−0.24%;而权重下调 10%时,变化为 0.20%。其敏感性变化幅度排名第 3。

(4)产品质量不合格 $\boldsymbol{B}_1$。该因素权重上调 10%时,综合风险得分变化为−0.03%;而权重下调 10%时,变化为−0.01%。该因素在敏感性测试下得分变动幅度最小,表明风险评估框架对产品质量不合格因素的权重变化敏感性最低。

因此,敏感性分析结果显示,各一级因素对整体风险得分影响的排序为:安装质量不符合要求 $\boldsymbol{B}_3$>选型因素 $\boldsymbol{B}_2$>生产维护类问题 $\boldsymbol{B}_4$>产品质量不合格 $\boldsymbol{B}_1$。各一级因素在权重发生±10%变动所导致的对综合风险得分的变化不大(变化幅度值均小于 1%),影响有限。这一结果有力地证明了本文中构建的风险评估模型具有较好的稳健性,评价结果受专家权重赋值潜在偏误的影响较小,该结果为纠正风险偏误影响以及增强风险防控提供科学参考。

3　风险防控实施对策

根据天然气场站风险因素的分级结果,针对不同级别的风险,采取不同的应对措施进行风险防控,减少天然气场站因防爆电气安全风险造成的损失。其中,重要风险因素大多来源于电气设备的安装质量问题、生产维护类问题和产品质量问题。

(1)安装质量问题。安装质量问题评价结果为较高风险。原因是:①防爆电气的现场施工人员普遍素质不高,缺乏防爆设备安装的相关知识和技能;②现场监理缺乏防爆电气的相关专业知识,无法有效履行现场安装的监督措施;③安装问题直接影响防爆设备的安全保护功能,尤其是隔爆型设备的直通螺纹未安装电缆引入装置、电缆提前剥线或多根进线的安装问题不仅严重破坏设备的防爆型式,且现场整改难度大,为天然气场站较高的风险因素。针对安装质量问题的对策和建议:①加强对防爆电气施工单位的管理,通过对施工单位资质文件的审查、现场施工人员的安全培训交底,保障现

场施工的人员能力；②对施工单位的安装过程进行巡视及指导；③加强防爆电气的监理过程总结，保障监理履行有效的监督；④防爆电气施工项目的竣工验收，须委托有资质的检测机构进行现场检验，且出具有合法效力的检验报告。必要时提出相应的整改问题，保障在防爆电气新建或改扩建验收阶段完成后，减少安装问题带来的风险。

(2)生产维护类问题。现场多为设备部件缺失、松脱或锈蚀，以及设备进水、外壳破损等问题。尽管该类问题与防爆专业技术相关性较低，但现场出现频率较高，充分反映了日常巡检的不细致和建设单位的不重视。生产维护类问题在一定程度上影响设备的防爆型式，评价结果为中风险。对于此类问题采取以下措施：①对天然气场站驻守人员进行防爆技术培训，树立对防爆设备关键部件的日常维护意识；②是驻守人员对防爆电气设备进行定期检查，尤其针对部件缺失、锈蚀，设备进水、外壳衬垫等问题，这类问题防爆专业技术较低，驻守人员应及时发现并处理；③对防爆电气的供方进行定期评价，如隔爆面锈蚀，可依据同类设备厂家的锈蚀情况对其进行评价，逐步淘汰质量较差的厂家，从采购源头控制产品质量。

(3)产品质量问题。产品质量问题评价结果为低风险因素。天然气场站所遇情况多为铭牌信息为隔爆型，产品实际结构为增安型。该项因素本质上为防爆电气设备生产单位提供的产品与检测单位备案产品结构的不一致，多见于天然气场站的仪表箱，仪表箱内部多为接线端子，相对风险较低。针对产品质量问题的对策和建议如下：①建设单位防爆电气相关的技术人员需要参与设备的采购验收，从而识别防爆标识信息与设备实际机构是否吻合，从采购阶段阻止不合格品进入安装使用阶段；②委托有资质的防爆电气检测机构，对现场产品质量问题进行针对性地检查，若查实则建议整改或更换设备。

(4)选型问题。选型问题评价结果为低风险因素。原因是：①设备选型大多由天然气场站建设单位在采购阶段直接负责，采购程序和采购记录严格把控；②选型问题在天然气场站多为铭牌防爆信息不全，经核实，产品本身经过了检测机构的防爆认证，且该问题容易整改，仅需承包商提供正确的防爆信息。针对选型问题的对策和建议如下：①建设单位按照天然气场站设计单位提供的危险区域划分图或MSDS等相关信息进行设备的采购；②建设单位采取培训考核等方式，增加采购人员的业务能力，确保采购人员具备识别常用防爆信息标识的能力。

4 结论

针对天然气场站防爆电气设备中可能存在的安全隐患，基于AHP与信心权重构建模糊风险评价模型，从“产品质量不合格”“选型因素”“安装质量不符合要求”“生产维护”4个方面提出24个二级指标进行风险核算，得出如下结论。

(1)以产品质量不合格($\boldsymbol{B}_1$)、选型因素($\boldsymbol{B}_2$)、安装质量不符合要求($\boldsymbol{B}_3$)、生产维护类问题($\boldsymbol{B}_4$)4个一级因素来构建天然气场站防爆电气的风险评价体系框架。由基于AHP专家信心权重指标法的风险评估结果可知，安装质量不符合要求($\boldsymbol{B}_3$)的风险评价结果为高风险(风险值为33.6%)，生产维护类问题($\boldsymbol{B}_4$)为中风险(风险值为42.4%)，产品质量不合格($\boldsymbol{B}_1$)、选型因素($\boldsymbol{B}_2$)为低风险(风险值分别为30.2%、38.8%)。经现场验证核实，设备安装问题确为天然气场站最为普遍且容易引发安全风险的因素，风险评估结果具备可靠性。

(2)为进一步排除专家的整体偏误，对一级指标进行了小范围的敏感性分析。结果显示，一级指标对整体风险得分影响的敏感性排序为：安装质量不符合要求($\boldsymbol{B}_3$)＞选型因素($\boldsymbol{B}_2$)＞生产维护类问题($\boldsymbol{B}_4$)＞产品质量不合格($\boldsymbol{B}_1$)。该排序结果厘清了各项风险因素偏误在天然气场站防爆电气风险评估中的重要性，进一步为纠正风险偏误影响以及增强防控提供了参考。

研究提出的基于AHP与信心权重的天然气场站防爆电气设备设施风险评价模型，不仅聚焦了天然气场站防爆电气安全生产的迫切需求，还对同类防爆电气环境的安全管理具有普适参考价值，可为其他场所的防爆安全风险评价提供理论指导及技术借鉴。

参考文献

[1] 爆炸危险环境电力装置设计规范：GB 50058—2014 [S]. 北京：中国计划出版社，2014.

[2] 樊亚龙. 浅谈电气的防火防爆问题 [J]. 电工文摘，2012(3)：3.

[3] 邓爱禹. 油气站场电气安全隐患统计分析及措施 [J]. 电气防爆，2024(6)：40-44.

[4] 林艺松. 石化工业防爆电气爆炸风险评估及应用研究 [D]. 广州：华南理工大学，2015.

[5] 孙继平. 电气火源引起的特别重大瓦斯爆炸事故案例分

析[J]. 工矿自动化,2012,38(2):1-5.
[6] 李水平. 西气东输管道沿线环境地质灾害风险性评价研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
[7] 潘禹臣,汤明高,倪文涛,等. 中缅天然气管道沿线地质灾害风险评价[J]. 人民长江,2022,53(10):108-115.
[8] 张鹏,潘灏航,杨宗强. 基于风险矩阵法和 Borda 序值法的城市埋地燃气管道风险评价研究[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(9):116-122.
[9] 胡瑾秋,张洋铭,刘佳豪,等. 基于多源数据的城市社区燃气管道突发事件风险分析[J]. 安全与环境工程,2024,31(4):1-10.
[10] 罗振敏,张春艳,王磊,等. 天然气场站燃爆风险评估模型及应用[J]. 科学技术与工程,2023,23(16):7145-7151.
[11] 孙继平. 基于物联网的煤矿瓦斯爆炸事故防范措施及典型事故分析[J]. 煤炭学报,2011,36(7):1172-1176.
[12] 刘正伟,吴清宇,史传坤,等. 油气集输站场防爆区域的划分与电气设备的选用[J]. 中国安全生产科学技术,2009,5(5):106-110.
[13] ZHANG L, WU X, SKIBNIEWSKI M J, et al. Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 131: 29-39.
[14] LIN S W, BIER V M. A study of expert overconfidence[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(5): 711-721.
[15] SAATY T L. Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP)[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(1): 1-35.
[16] 危险场所电气防爆安全规范:AQ 3009—2007. [S]. 北京:中国标准出版社,2008.
[17] 陈国华,林艺松,王新华,等. 防爆电气应用现状及其存在问题[J]. 石油化工设备,2015,44(2):56-61.

Risk Assessment of Explosion-proof Electrical Equipment in Natural Gas Stations Based on AHP and Confidence Weighting

YUAN Yulin[1,2], LIANG Long[1,2], ZHANG Jie[1,2], SONG Junhan[1,2]

(1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China;
2. State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha 410012, China)

Abstract: To address the explosion risk control needs in the daily operation and maintenance of explosion-proof electrical equipment in natural gas stations, with the core objective of preventing electrical sparks from causing natural gas combustion and explosion accidents, a risk assessment model based on the analytic hierarchy process (AHP) and expert confidence weighting was constructed. This model enabled the scientific quantification and hierarchical management of potential risks in explosion-proof electrical systems. An evaluation system for the explosion-proof electrical safety of natural gas stations was established, comprising 24 secondary indicators selected from four aspects: "non-conforming product quality" "selection factors" "non-compliant installation quality" and "production and maintenance issues". For a case study, a natural gas station in Zhejiang Province was selected, and the risk levels of the evaluation indicators were classified into extremely low risk, low risk, medium risk, high risk, and extremely high risk. A team of 25 experienced experts was formed. Considering the varying experience and backgrounds of these 25 experts, an expert confidence weighting index method for on-site scoring of the evaluation indicators was incorporated. Based on the principle of normal distribution, the risk probability scores of evaluation indicators across different risk levels are comprehensively determined. Combined with AHP calculations, the risk levels of primary indicators for explosion-proof electrical safety in the natural gas stations are derived. The overall risk level of the station is assessed as "medium risk" with "non-compliant installation quality" identified as the highest risk level, which aligns with the actual situation. The robustness of the evaluation model is verified through a sensitivity analysis of the primary indicators. The core advantage of the proposed AHP and confidence-weighted risk assessment model lies in its ability to transform qualitative safety risks into quantifiable indicators. This capability for quantitative risk assessment not only enables precise judgment of risk levels but also guides safety managers in risk prioritization and optimal resource allocation, thereby significantly enhancing the scientific and refined level of safety management at natural gas stations.

Keywords: natural gas station; explosion-proof electrical equipment; fuzzy risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); expert confidence weighting