

# 基于层次分析法和作业条件危险性评价法的 电力有限空间作业安全风险评估

别 念, 杨振斌

(北京玖气象科技有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 为了提前预知电力有限空间的作业安全风险, 考虑作业中人员、工器具、环境和管理 4 种重要风险来源, 通过层次分析法获取不同风险因素在安全评估中所占的权重。结合作业过程中风险因素实际状态的主观评分, 对初始作业条件危险性评价进行适应性调整作为最终评估结果。此外, 综合评估了环境风险中多种有毒有害气体的耦合风险。案例分析显示, 该方法可操作性强, 能较为准确地定量给出作业危险等级。

**关键词:** 风险评估; 作业条件危险性评价法; 层次分析法; 有毒有害气体; 电力有限空间

**中图分类号:** X928.03   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0090-08

有限空间是指封闭或部分封闭、进出口受限但人员可以进入、未被设计为固定工作场所、存在有毒有害气体或者易燃易爆物质积聚或氧含量不足的场所。在敷设有电力电缆的隧道、工作井或布设其他电力设施的有限空间作业即电力有限空间作业。电力有限空间作业是指人员进入电力有限空间实施的作业活动。其存在的主要安全风险包括中毒、缺氧窒息、燃爆以及淹溺、高处坠落、触电、物体打击、机械伤害和高温高湿等, 其中, 有毒有害气体和缺氧是电力有限空间作业不同于其他电力作业的两个重要风险因子<sup>[1]</sup>。目前实际生产中电力有限空间作业判定气体风险的方法是将空间内监测到的每种气体浓度和相应最大允许浓度简单进行比较, 忽略了多种有毒有害气体共存的耦合效应<sup>[2]</sup>。Xia 等<sup>[3]</sup>收集了 2008—2018 年有限空间作业中发生的 120 起致命事故, 针对事故中人为因素的作用进行了统计分析, 提出人员行为的规范和管理提升可极大降低该类事故。巩泉泉等<sup>[4]</sup>系统梳理了有限空间作业中毒缺氧窒息危险因素一共 36 个, 可分为管理、设备设施、人员、环境相关 4 类因素, 常见的危险因素可通过前期的培训、教育、规范管理等措施规避。宋思雨等<sup>[5]</sup>邀请专家通过德尔菲法确定了

16 个影响有限空间作业中毒事故的主要风险因素, 并将其分为人员因素、管理因素、设备因素、有限空间自身因素。国家标准<sup>[6]</sup>指出, 生产过程的危险和有害因素分为人、物、环境和管理 4 个类别。类似地, 电网作业中, 安全风险来源通常分为人员、工器具、环境和管理。汪圣华等<sup>[7]</sup>建立了以危险气体体积分数为主要指标的有限空间作业风险综合评估模型, 为电力有限空间作业风险评估提供了思路。但是该模型关注点局限在人员和环境, 忽略了工器具和管理的因素。虽然宋晓燕等<sup>[8]</sup>针对电力基坑(一种电力有限空间)作业安全风险采用模糊层次分析法进行了作业前和作业中的风险评估, 该方法的关注点在于环境因子而忽略了其他危险因素。电力作业安全管理体系中风险识别和风险管控在安全管理中的重要性排在前 3 位<sup>[9]</sup>。因此, 全面梳理风险因子, 进行针对性的风险管控是保障电力有限空间作业安全的迫切任务。目前电力有限空间作业安全管控总体上呈现出环境、人员、工器具、管理风险孤立控制的特点, 多种不同风险因子的耦合风险评估的研究较少。在作业前甚至在作业中及时研判安全风险, 实施风险分级管控, 能够有效遏制电力有限空间作业事故的发生, 极大降低人员伤

**收稿日期:** 2024-08-05

**基金项目:** 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2021CXGC011301)

**作者简介:** 别念(1990—), 女, 湖北仙桃人, 博士, 中级工程师, 研究方向为基于数据分析的风险监测与评估; 通信作者 杨振斌(1974—), 男, 山西运城人, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为电力气象风险管控技术及应用服务。

亡,并避免巨大经济损失。江苏省电力设计院针对电力建设工程中对动态风险研究不足等问题,从环境、人员、工器具和管理4类中确定了19个影响因素,引入危险源动态风险系数,基于此改进作业条件危险性分析法(LEC)评价方法,从而得到作业风险评估结果<sup>[10]</sup>。该方法在电网得到了广泛使用<sup>[11]</sup>,但是缺乏对环境、人员、工器具、管理风险的风险权重差异的重视。近年来,研究人员针对电力作业风险评估做出了更多探索。胥明凯等<sup>[12]</sup>梳理了包括有限空间在内的电力作业的风险因子,通过极大熵准则等约束机制优化风险因子的权重,提出了电力作业多源要素风险的自适应识别模型。蒋毅等<sup>[13]</sup>分析电力作业风险历史数据,基于数据挖掘方法预测风险因素的发生概率与影响权重,实现电力作业风险智能评估。这些方法都取得了不错的效果,但是忽略了作业的实际状态在风险中的重要影响。另一方面,何敏等<sup>[14]</sup>提出了面向电力系统现场作业的安全风险管控智能检测算法,监测电力人员安全帽及安全服的穿戴、电力围栏及电力警示牌等;常政威等<sup>[15]</sup>基于机器学习和图像识别开展电力作业现场安全监督研究,实时识别现场人员及其危险行为。该方法极大提高了作业现场状态跟踪的准确度,但是考虑的风险因素并不够全面。

实际上,现有的风险评估技术非常丰富,根据主要用途可分为识别风险、提供风险度量、评价风险的重要性、理解后果和可能性等<sup>[16]</sup>,包括层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、作业条件危险性分析法(LEC)、故障树分析法(fault tree analysis, FTA)等。已有研究者使用AHP辅助评估电力<sup>[8]</sup>、化工<sup>[17]</sup>、地质灾害<sup>[18]</sup>、隧道作业<sup>[19]</sup>等安全风险,使用LEC法评估水利工程<sup>[20]</sup>、桥梁施工<sup>[21]</sup>、实验室运行管理<sup>[22]</sup>等安全风险。而故障树分析作为一种识别风险的方法,可实现自上而下对事故源头进行演绎,便于识别和修正目标事件,广泛用在安全事故的风险溯源中<sup>[23-24]</sup>,包括建立有限空间中窒息事故树分析事故致因<sup>[25]</sup>。杨春丽等<sup>[26]</sup>、王莉等<sup>[27]</sup>全面考虑了多个风险来源,利用AHP计算各因素的权重,结合权重结果使用模糊综合评价法或者专家打分法对有限空间安全作业风险进行评价。刘毅等<sup>[28]</sup>针对地铁深基坑施工安全,考虑多种风险因素间的相互关系,提出了一种基于模糊决策与试验评价实验室、优劣解距离法的基坑风险评估模型。现针对电力有限空间这一特殊的

电力作业场景,综合考虑人员、工器具、环境和管理这4类风险,利用AHP确定风险类别的权重,采用FTA确定风险类别的风险系数,基于风险类别的权重与风险系数,结合LEC法定量评估作业安全风险,得出安全风险等级。以电力电缆线路敷设为例,对该方法进行实践,验证方法的可行性与正确性。

## 1 数据与方法

### 1.1 作业安全风险因子

缺氧和有毒有害气体作用作为有限空间作业的重要风险来源,应急管理部相关文件专门指出,当有限空间内气体环境复杂,气体检测结果应符合以下情况才符合安全作业条件:①氧气含量在19.5%~23.5%;②可燃性气体、蒸汽浓度低于爆炸下限的10%;③有毒有害气体、蒸汽浓度不大于相关规定的职业接触限值中待测物质的最低限值。根据电力行业推荐标准<sup>[2]</sup>,作业者不应长时间在有限空间实施作业,连续作业时间应根据气体检测结果进行调整,最长不超过2 h。此外,现有的安全作业规范对工具、人员等分别提出了比较细致的要求,在此不做更多介绍。

总体而言,电力作业有限空间作业的安全风险因子可分为4大类:环境、人员、工器具和管理。针对这4类风险来源,考虑电力作业的特性,整理了电力有限空间作业中各类别的主要作业安全风险因子,见表1。后续将基于表格内容,结合事故溯源分析方法,提取作业的风险组成。

### 1.2 LEC 风险评价方法

LEC法是对具有潜在危险性作业环境中的危险源进行半定量的安全评价方法。该方法采用与系统风险率相关的3方面指标值之积来评价系统中人员伤亡风险大小。电力作业安全风险主要针对的是人员伤亡,LEC方法非常适用。LEC方法考虑的3个指标分别为:L(事故发生的可能性)、E(人员暴露于危险环境中的频繁程度)和C(一旦发生事故可能造成的后果)。给3种因素的不同等级分别确定不同的分值,再以3个分值的乘积D(危险性)来评价作业条件危险性的大小。

$$D = LEC \quad (1)$$

D值越大,说明该系统危险性大,需要增加安全措施,或改变发生事故的可能性,或减少人体暴露于危险环境中的频繁程度,或减轻事故损失,直至调整到允许范围内。L、E、C、D不同取值及对应的含义说明见表2。

表 1 作业风险因子

风险类别	风险因子	详细说明
环境	有毒有害气体毒害指数	综合指数满足安全要求,计算方法见后文
	施工工期	满足合理工期要求
	气候状况(半密闭空间)	天气状况良好,有利于作业
	是否临近带电作业	作业地点与带电体的距离大于安全规定的距离
	交叉作业环境	多项作业同时进行
	地质条件	坚硬土或岩石,且无地下水
人员	作业人员施工经验	主要作业人员都有 3 项及以上同类工程项目经验
	作业人员生理状态	作业人员体检合格,人员一个工作日平均工作时间不超过 8 小时,且夜间作业时间占总工期比重不超过 20%
	指挥人员技能及经验	指挥人员具有 3 个及以上同类项目现场指挥经验
工器具	机械设备性能	设备已使用时间未超过设备使用年限
	机械设备维修保养	建立完善的维修保养体系,且保养记录齐全,外观检查,工况良好
	机械设备负荷情况	起吊荷载不超过起重机械额定起重量的 90%
管理	安全保证、监督体系	安全保证、监督体系完善,人员到位
	项目安全人员配备	项目部、施工队、作业点按规定要求配置安全员
	作业计划	作业计划按安全标准设计,并提供全部的危害源监测数据和作业过程记录(包括通风记录、现场照片、表单、监测数据序列等)

表 2 LEC 法变量取值及对应的含义

事故发生的可能性 L		暴露于危险环境的频繁程度 E		发生事故产生的后果 C		危险度 D	
分数值	事故发生的可能性	分数值	暴露于危险环境的频繁程度	分数值	发生事故产生的后果	数值	危险程度
10	完全可以预料	10	连续暴露	100	10 人以上死亡	>320	极其危险
6	相当可能	6	每天工作时间内暴露	40	3~9 人死亡	160~320	高度危险
3	可能,但不经常	3	每周一次或偶然暴露	15	1~2 人死亡	70~160	显著危险
1	可能性小,完全意外	2	每月一次暴露	7	严重	20~70	一般危险
0.5	很不可能,可以设想	1	每年几次暴露	3	重大,伤残	<20	稍有危险
0.2	极不可能	0.5	非常罕见暴露	1	引人注目		
0.1	实际不可能						

根据经验,总分在 20 以下被认为低危险,这样的危险比日常生活中骑自行车去上班还要安全些;如果危险分值到达 70~160,那就有显著的危险性,需要及时整改;如果危险分值介于 160~320,那么这是一种必须立即采取措施进行整改的高度危险环境;分值在 320 以上的高分值表示环境非常危险,应立即停止生产直到环境得到改善为止。一般电力有限空间作业的 LEC 评分在 70 分以下,否则,作业需要整改后才能继续进行。

### 1.3 层次分析法

层次分析法(AHP)是主观判断和客观赋权法相结合的一种赋权方法,具有简单、方便、有效的特点,在多指标综合评价中具有广泛应用。主要计算步骤包括构建层次评价模型、构造判断矩阵,根据判断矩阵可得到指标权重向量。其中,构造判断矩阵 A,比较两两指标对决策结果的重要程度,通常采用的 1~9 标度法(表 3)。

表 3 AHP 的 1~9 标度方法

标度	含义
1	表示两个元素相比,具有同样的重要性
3	表示两个元素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比,前者比后者极其重要
9	表示两个元素相比,前者比后者强烈重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
1~9 的倒数	表示相应两因素交换次序比较的重要性

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

判断矩阵各元素满足以下条件:

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 \\ a_{ji} = 1/a_{ij} \\ a_{ii} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:元素  $a_{ij}$  ( $i, j=1, 2, \dots, n$ ) 为指标分析时指标  $i$

对于指标  $j$  的相对重要性;  $n$  为指标的总数。

根据判断矩阵计算出权重向量后需要检验该结果与判断矩阵的一致性,一致性满足条件的权重向量才能作为最终结果,其他步骤在此不做详细介绍。

## 2 电力有限空间作业安全风险评估

### 2.1 电力有限空间作业有毒有害气体毒害指数计算

针对电力有限空间作业中最重要的危险来源——有毒有害气体,针对有毒有害气体计算毒害指数,对于易燃易爆气体可直接采用阈值比较法进行安全判定。对于易燃易爆气体以外的有毒有害气体,采用现有的定量风险评估模型进行职业健康危害评估。根据《工作场所化学有害因素职业健康风险评估技术导则》(GBZ/T 298—2017)<sup>[29]</sup>,详细方法如下。

(1)估算接触浓度(EC)。

$$EC = CA \quad (4)$$

式中: EC 为接触浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; CA 为空气中化学有害因素浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(2)在存在有毒有害气体浓度的情况下,按照以下方法计算危害指数:经吸入引起的非致癌风险危害商数(HQ)的计算公式为

$$HQ = \frac{EC}{RfC} \quad (5)$$

式中: RfC 为参考接触浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。各类有毒有害气体的 RfC 值可参考《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分: 化学有害因素》(GBZ 2.1—2019)<sup>[30]</sup>。

当 HQ 大于 1 时,对人体健康产生危害的风险不可接受;相反,则可接受。

(3)对多种化学有害因素进行评价时,首先应计算每种化学有害因素的危害商数(HQ),然后进行求和,从而得到多种化学有害因素危害指数(HI)的估算值。

$$HI = \sum_{i=1}^m \frac{EC_i}{RfC_i} \quad (6)$$

当 HI 大于 1 时,对人体健康产生危害的风险不可接受;相反,则可接受。有毒有害气体风险评估技术路线图如图 1 所示。

### 2.2 综合作业风险评估模型

故障树分析是一种常用的风险分析手段,它使用布尔(Boolean)逻辑分析焦点事件的原因,描述故障组合。故障树是一种特殊的倒立树状逻辑因果关系图,它用事件符号、逻辑门符号和转移符号描述系统中各种事件之间的因果关系。逻辑门的输入事件是输出事的“因”,逻辑门的输出事件是输入事件的“果”。对于具体电力有限空间作业,采用故障树分析对其危险来源事件进行分解。

综合作业风险评估模型使用了 LEC 评价法、AHP 和故障树分解法。首先基于 AHP 方法确定人员、设备、环境和管理 4 大指标的风险权重;第 2 步通过采用故障树对电力作业的风险来源进行层层分解,得到风险因子,一方面对安全状态进行打分,另一方面以指标为类别进行分类;最后基于作业条件危险性分析法(LEC)对作业风险进行综合评估,从而为电力作业安全规划提供决策支撑,减少人员伤亡。具体步骤如下。

(1)采用 LEC 评价法对有限空间作业特定作业进行作业安全危险评价,得到评价结果  $D$ 。

(2)事故故障树分解。故障树分解分为两步,第 1 步分解成风险来源的基本事件;第 2 步,将基本

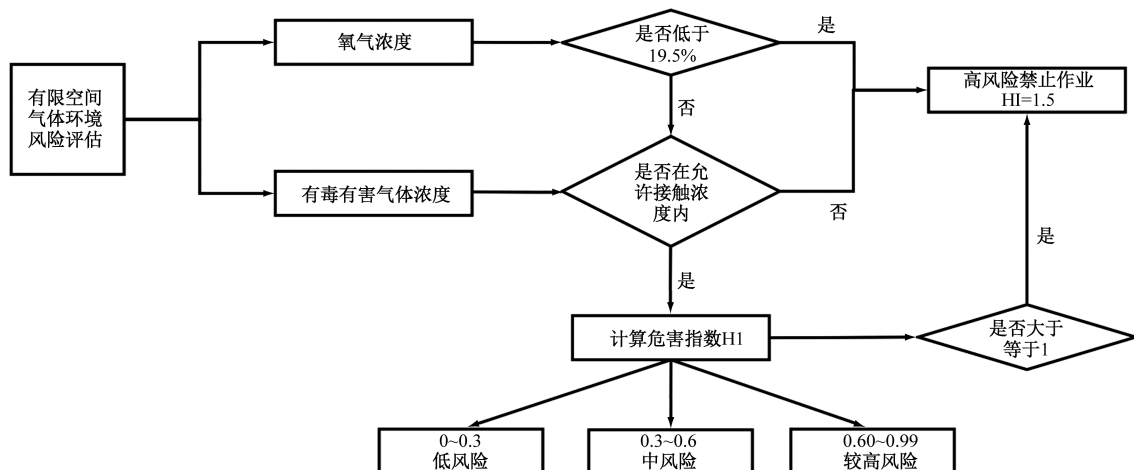


图 1 有毒有害气体风险评估技术路线图

事件进一步分解成风险因子,因子从表 1 中选取,得到风险因子集合。

(3)对每一个风险因子,评估它的风险调整系数  $b$ ,评估结果取值范围为  $0\sim 1$ 。调整系数取值方法推荐采用以下方式:风险因子风险程度越高,取值越接近 1,风险程度越低,取值越接近 0。例如,对于气候状况这个风险因子,正常状态(气温大于  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  但不超过  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风速不超过  $1.5\text{ m/s}$ ,无降雨或者降雨不超过  $9.9\text{ mm}$ )取值 1,高危状态(温度高于  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  或低于  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风速在  $5.4\sim 10.8\text{ m/s}$ ,降雨量为  $24.9\sim 44.9\text{ mm}$ )取值 0.3。

(4)按照人员、工器具、环境、管理 4 种类别对风险因子进行分类。

(5)通过同一类别风险因子的风险调整系数求平均的方法,按人员、工器具、环境、管理这 4 个类别分别计算平均调整系数  $b_i$ 。 $i$  取值范围为  $1\sim 4$ ,对应以上 4 个类别。

$$b_i = \sum_{j=1}^m \frac{b_j}{m} \quad (7)$$

式中: $m$  为对应于该类别的风险因子数量。

(6)采用 AHP 方法确定人员、工器具、环境、管理的风险权重  $a_i$ 。

(7)根据电力行业成熟的风险评估技术<sup>[11]</sup>,按照如下方法计算得到调整系数  $k$ 。

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i b_i)}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (8)$$

式中: $n$  为考虑的指标维度,包括人员、工器具、环境、管理, $n=4$ ; $a_i$  为对应指标权重值,来源于第(6)步; $b_i$  为对应维度中各子项风险因素的平均值,来源于第(5)步。

(8)基于(1)中采用 LEC 评价法对有限空间作业特定作业的评价结果  $D$ ,采用以下公式计算调整后的风险值  $D_s$ 。

$$D_s = \frac{D}{k} \quad (9)$$

将  $D_s$  按照 LEC 评价结果进行归类,即可得到具体作业的风险等级。技术路线如图 2 所示。

### 3 以电力电缆线路敷设为例

以夏季隧道内电力电缆线路敷设作业为例,人员和管理方面,4 名具有 1 年以上工龄的作业人员和 1 名 5 年以上工龄的指挥人员参与这项工作,5 名人员均持有工作证。其中 3 名工作人员有 2 起以上同类作业经验,指挥人员近一年内参加过 2 起

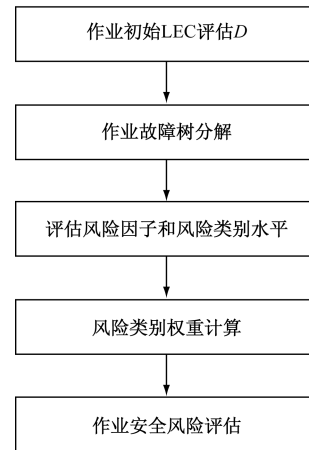


图 2 有限空间综合风险评估技术路线图

该类作业的指导工作,有 1 名工作人员存在违规操作记录。5 人身体无明显不健康特征,存在睡眠不足、长期体力劳累带来的健康副作用。为了尽快完成施工,计划施工时间为每日 9 h,其中夜间作业 2 h。工器具方面,携带的工具包括便携式气体检测报警仪、安全带、安全绳、手电筒、大功率机械通风设备等,这些工具购买时间超过 5 年,本月质检合格满足安全要求和性能要求。环境方面,湿度 75%,气温  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,地面以混凝土为主,施工通道比较狭窄,不存在高空作业。有毒有害气体检测结果为:氧气浓度正常,存在少量硫化氢、二氧化碳和一氧化碳,浓度分别为毒性危险值的 30%、10%、10%。对于该作业,安全风险评估具体步骤如下。

#### 3.1 安全风险 LEC 法事前评估

对于一个各项准备工作齐备的电力电缆线路敷设作业,根据经验,事故发生的可能性较小, $L=1$ ,暴露于危险环境的频繁程度属于偶然的级别, $E=3$ ,根据对电力电缆线路已经发生的事故进行分析,发生事故可能造成 1 或 2 人死亡,因此  $C=15$ ,则作业条件危险性的计算参照式(1)。

$$D = LEC = 1 \times 3 \times 15 = 45。$$

#### 3.2 故障树分解

对于具体电力有限空间作业(电力电缆线路敷设),中毒或窒息事故是最常见的安全事故。采用故障树对其危险来源进行分解,如图 3 所示。

根据分类结果,依托细分风险因子进行进一步分解,详细分解结果见表 4 中的细分基本事件。

#### 3.3 评估风险因子和风险类别水平

针对作业中的细分因子进行评估,作为风险因子调整系数  $b$ 。对照作业要求,作业现场条件偏离越大,则评估结果取值越小;作业现场条件偏离作业要求越小,则评估结果取值越大。部分评估依据见表 5。

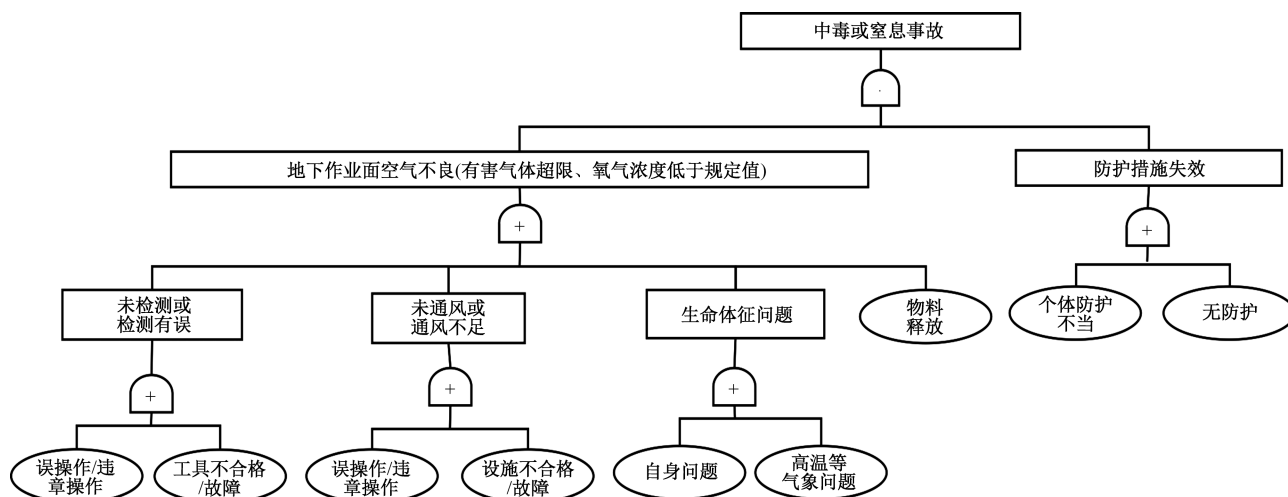


图3 电力电缆线路敷设作业故障树

表4 细分基本事件风险系数和指标类别结果

序号	基本事件	细分基本事件	序号	基本事件	细分基本事件
1	误操作/违章操作	①施工经验;②生理状态;③指挥人员经验	4	恶劣气候与环境导致生命体征问题	①有毒有害气体和缺氧危害指数 HI;②施工工期;③气候状况(密闭空间);④临近带电作业;⑤地质条件
2	工具不合格/故障	①机械设备性能;②机械设备维修保养;③机械设备负荷情况	5	防护不当	①施工经验;②指挥人员经验
3	自身生命体征(健康)问题	生理状态	6	无防护	①施工经验;②指挥人员经验

表5 风险因子调整系数确定依据

风险因素	$b=1$	$b=0.6$	$b=0.3$
施工经验	主要作业人员都有3项及以上同类工程项目经验	超过50%的主要作业人员有3项及以上同类项目经验	主要作业人员无同类项目经验
生理状态	作业人员体检合格;人员一个工作日平均工作时间不超过8h,且夜间作业时间占总工期比重不超过20%	作业人员体检合格;人员作业时间大于8但不超过10h,且夜间作业时间占总工期大于20%但不超过30%	作业人员体检合格;人员作业时间大于10小时,夜间作业时间占总工期大于30%
指挥人员技能及经验	指挥人员具有3个及以上同类项目现场指挥经验	指挥人员具有1或2个同类项目现场指挥经验	指挥人员无同类项目现场指挥经验
气候状况(密闭空间)	正常状态(气温大于17℃但不超过26℃)	不良天气(气温高于5℃但不超过17℃或高于26℃但不超过35℃)	坏天气(温度高于35℃或低于5℃)
施工工期	满足合理工期要求	达到80%及以上合理工期的	未达到80%及以上合理工期的
临近带电作业	作业地点与带电体的距离大于安全距离	作业地点与带电体的距离小于安全距离但大于安全活动的距离,且按照规定要求采取完善的安全措施	作业地点与带电体的距离小于相关法规、标准、规程等规范规定的安全距离,未按照规定要求采取安全措施
地质条件	坚硬土或岩石,且无地下水	中硬土或中软土	软弱土
气体 HI	0~0.3	0.3~0.6	0.6~0.99
机械设备性能	设备已使用时间未超过设备使用年限的	设备已使用时间达到设备使用年限,但经过鉴定可以降级使用的	设备使用时间已超过设备使用年限,且未经鉴定合格

对于毒害气体,在案例中, $HI=30\%+10\%+10\%=0.5$ 。

在分析案例中,评估结果见表6。对于细分基本事件,按照人员、工器具、环境、管理4种类别进行

分类。

按照式(6)计算人员、工器具、环境和管理这4类风险类别的调整系数 $b$ ,结果分别为0.6、0.8、0.8、0.8。

表 6 细分基本事件风险系数和指标类别结果

名称	$b$	类别
施工经验	0.6	人员
生理状态	0.6	
指挥人员经验	0.6	
机械设备性能	0.8	工器具
机械设备维修保养	0.8	
机械设备负荷情况	0.8	
生理状态	0.6	人员
有毒有害气体和缺氧危害指数 HI	0.6	环境
施工工期	0.6	
气候状况(密闭空间、半密闭空间)	0.6	
临近带电作业	1.0	
地质条件	1.0	人员
施工经验	0.6	
指挥人员经验	0.6	
施工经验	0.8	管理
指挥人员经验	0.8	

### 3.4 风险类别权重计算

(1)明确人员、工器具、环境和管理作为影响作业安全的重要因子,形成层次结构模型。

(2)根据实际经验,结合专家知识,构造判断矩阵  $A$ ,见表 7。

(3)求取权重向量  $M$ ,并进行一致性检验,避免出现与判断矩阵矛盾的情形出现。计算结果见表 8。

表 7 判断矩阵  $A$ 

$A$	人员	工器具	环境	管理
人员	1	3	3	0.2
工器具	0.333 33	1	2	0.2
环境	0.333 3	0.5	1	0.2
管理	5	5	5	1

表 8 权重计算结果

类别	权重	类别	权重
人员	0.216	工器具	0.116
环境	0.080	管理	0.609

### 3.5 作业安全风险评估

(1)按照式(7)计算得到风险调整系数  $k$ 。 $k = (0.216 \times 0.6 + 0.116 \times 0.8 + 0.080 \times 0.8 + 0.609 \times 0.8) / (0.216 + 0.116 + 0.080 + 0.609) = 0.757$ 。

(2)基于式(8)计算调整后的风险值  $D_s$ 。 $D_s = 45 / 0.757 = 59.4$ 。

将  $D_s$  按照表 1 给出的 LEC 评价结果与作业风险等级对应表进行归类,即可得到具体作业的风险等级,该作业属于一般危险。在实际情况中,该作业总体来说人员、工器具、环境、管理各方面条件准备充分,风险可控,可安全开展作业。

## 4 结论

(1)根据生产过程中的重要风险来源确定了人、工器具、环境和管理 4 种类别作为风险评价指标,通过 AHP 方法得到风险类别的权重,既融入了实际生产经验,又降低了人为主观因素对权重的影响,使最终得到的权重具有信服力。采用故障树对具体作业的安全风险来源进行层层分解,在此基础上评估环境、工器具、人员和管理不同因素在作业时的状态。该方法逻辑严密,全面考虑了多重风险类别,吸纳了专家知识和现场施工情况,不同风险类别的权重差异化处理更符合安全生产经验,并且具有较强的操作性。

(2)方法考虑了多种有毒有害气体大量共存时单一气体浓度不超过安全阈值的情况,极大补充了现行操作中多种气体逐一风险评估的不足,避免了电力有限空间作业中可能存在的低浓度高密度有毒有害气体的风险。

(3)案例实践表明评估结果较为准确,可在电力有限空间作业计划阶段、作业开展阶段,根据该方法进行安全风险评估,基于评估风险开展人员分配调整、工器具更换、作业时段调整等决策,在作业前加强风险防范,在作业中提高警惕,降低电力有限空间作业安全风险概率,减少相关的人员伤亡。值得注意的是,该方法在初始 LEC 分数计算时需要根据具体作业进行适应性调整。

## 参考文献

- [1] 刘艳,杨春丽.有限空间作业事故特征及其原因分析[J].中国安全科学学报,2017,27(3):141-146.
- [2] 电力管道有限空间作业安全技术规范:DL/T 2520—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [3] XIA J, LIU Y, ZHAO D, et al. Human factors analysis of China's confined space operation accidents from 2008 to 2018[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 71: 104480.
- [4] 巩泉泉,谢连科,窦丹丹,等.有限空间作业中毒缺氧窒息危险因素的系统分析[J].职业与健康,2023,39(7):970-976,983.
- [5] 宋思雨,徐克,张贝,等.基于ISM的有限空间作业中毒事故风险分析[J].安全与环境工程,2019,26(2):140-144.
- [6] 生产过程危险和有害因素分类与代码:GB/T 13861—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [7] 汪圣华,贾波,陈文杰,等.有限空间作业动态风险评估模型研究与应用[J].中国安全科学学报,2018,28(8):87-92.
- [8] 宋晓燕,崔凤庆,陈家聪,等.基于模糊层次分析法的电

- 力基坑气体环境安全风险评估[J]. 电力安全技术, 2024, 26(3): 39-42.
- [9] 高阳, 朱坤双, 黄海静, 等. 我国电力作业安全管理体系构建及分析研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2022, 44(6): 894-898.
- [10] 杨磊, 何顺华, 丘滨. 电力建设工程重大危险源动态风险界定及级别划分[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(7): 185-190.
- [11] 国家电网公司输变电工程施工安全风险识别、评估及预控措施管理办法; 国网(基建/3)176—2019[Z]. 北京: 国家电网有限公司, 2019.
- [12] 胥明凯, 朱坤双, 李元良, 等. 电力作业多源要素风险的自适应识别模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(6): 1047-1059.
- [13] 蒋毅, 欧郁强, 梁广, 等. 基于数据挖掘的现场作业风险态势评估方法[J]. 计算机与现代化, 2020(4): 78-84.
- [14] 何敏, 秦亮, 赵峰, 等. 面向电力系统现场作业的安全风险管控智能检测算法[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2442-2457.
- [15] 常政威, 彭倩, 陈纓. 基于机器学习和图像识别的电力作业现场安全监督方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 155-160.
- [16] 全国风险管理标准化技术委员会. 风险管理 风险评估技术: GB/T 27921—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [17] 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.
- [18] 冯培华, 向灵芝, 罗亮, 等. 基于灾害熵与层次分析法的泥石流危险性评价对比分析: 以甘肃省迭部县为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12416-12426.
- [19] 安小宇, 王德健, 李楠, 等. 基于两级信息融合的隧道掘进机拆装装置作业安全预警模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 422-428.
- [20] 杨凯, 吕凤. 基于改进的 LEC 对水利工程安全风险评价研究[J]. 四川水利, 2023, 44(1): 146-148, 152.
- [21] 晁铁彦, 王旭东, 张新华, 等. LEC 法在变截面连续梁施工危险源识别与风险评估中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(15): 90-97.
- [22] 杨亚琪, 周艳, 陈全. 基于 AHP-LEC 的科研院所实验室的风险评估研究[J]. 安全, 2022, 43(11): 17-22.
- [23] 刘俊杰, 张晴. 民航失控类事故致因分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(7): 2759-2767.
- [24] 安慧, 黄艾, 安敏, 等. 基于模糊故障树的建筑施工高处坠落全面风险评估[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8568-8576.
- [25] 王燕妮, 李静, 张振超. 基于 FTA 和 ISM 的有限空间中窒息事故致因分析[J]. 安全, 2024, 45(1): 14-21.
- [26] 杨春丽, 刘艳, 秦妍, 等. 市政有限空间气体危害因素检测及作业安全风险评估[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 931-937.
- [27] 王莉, 马衔青, 王涛, 等. 基于 IAHP-熵权法和模糊综合评价法的市政有限空间气体安全风险评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1319-1325.
- [28] 刘毅, 孙庆文, 刘贵香, 等. 地铁深基坑施工安全评估 FDEMATEL-TOPSIS 模型及应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4253-4260.
- [29] 工作场所化学有害因素职业健康风险评估技术导则: GBZ/T 298—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [30] 工作场所所有害因素职业接触限值 第 1 部分: 化学有害因素: GBZ 2.1—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

## Safety Risk Assessment of Electric Confined Spaces Based on Analytic Hierarchy Process and Risk Assessment Method for Working Conditions

BIE Nian, YANG Zhenbin

(Beijing Jiutian Meteorological Technology Co. Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to realize the prediction of safety risks for working in electric confined spaces, considering four risk sources including personnel, tools, environment, and management, the safety risk weight of different sources was calculated using analytic hierarchy process, meanwhile the actual safety conditions of risk sources were judged by subjective evaluation. Based on that, the final operating condition risk assessment method score was obtained by adjusting the initial LEC score. In particular, for environmental risk, the method assessed coupling risks from multiply kinds of toxic and harmful gases. A case study in electric confined spaces shows that the method is highly operable, presenting accurately quantitative evaluation on work risk level.

**Keywords:** risk assessment; operating condition risk assessment method; analytic hierarchy process; hazardous gas; electric confined space