

基于事件树连锁故障推演和证据推理的制氢站设备 风险评价

刘玉成¹, 杨源², 胡宇浩², 李雨航², 赵子泰², 马志勇², 董玉亮^{2*}

(1. 中国大唐集团有限公司, 北京市 西城区 100033;

2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Risk Assessment of Hydrogen Production Station Equipment Based on Event Tree Cascading Fault Deduction and Evidential Reasoning

LIU Yucheng¹, YANG Yuan², HU Yuhao², LI Yuhang², ZHAO Zitai², MA Zhiyong², DONG Yuliang^{2*}

(1. China Datang Corporation Ltd., Xicheng District, Beijing 100033, China; 2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 针对制氢站系统复杂, 易受到外部攻击, 进而引发连锁故障及严重安全事故的问题, 采用基于事件树的连锁故障推演方法, 明确了制氢站设备连锁故障的后果和发生概率。在此基础上建立了考虑安全性、经济性和环保性的连锁故障风险评价指标体系。考虑到造成严重后果和影响的不精确性和不确定性, 采用模糊隶属度函数进行评价指标的模糊化。最后建立了基于证据推理的风险评价模型, 并应用到制氢站设备的风险评估中, 实现了制氢站设备的风险评价和排序。实例分析表明, 该方法可行有效, 为下一步制定制氢站设备安全防范措施提供了依据。

关键词: 燃煤电站; 制氢站设备; 事件树; 风险评价

ABSTRACT: The hydrogen production station system is complex and vulnerable to external attacks, causing cascading failures and serious safety accidents. The cascading failure deduction method based on event tree was adopted to determine the consequences and occurrence probability of cascading failures of hydrogen production station equipment. On this basis, a cascading fault risk evaluation index system considering safety, economy and environmental protection was established. Considering the randomness and uncertainty of serious consequences and impact, a fuzzy membership function was used to quantify the evaluation index. Finally, a risk assessment model based on evidential reasoning was established and applied to the risk evaluation of hydrogen production station equipment, to realize the risk assessment

and ranking of hydrogen production station equipment. The example shows that the method is feasible and effective, which provides a support for the next step of making safety precautions for hydrogen production station equipment.

KEY WORDS: coal-fired power station; power engineering; hydrogen production station equipment; event tree; risk evaluation

0 引言

在未来一段时间, 燃煤电站仍然是我国新型电力系统的关键支撑^[1-5], 其能否安全运行将直接影响整个电力系统的安全。随着技术的发展和运行人员素质的提高, 我国燃煤电站运行安全水平得到了极大的提升, 实现了机组的长周期安全稳定运行。然而, 燃煤电站的安全性不仅仅是正常情况下的安全运行, 还应包括特殊情况(比如遭受人、车、低空飞行器、漂浮物和投掷物等外部攻击)下的安全运行, 对于存在较大不稳定社会因素的西部地区, 后者尤为重要。

燃煤电站最容易受到外部攻击的是电站的周界设备, 主要包括制氢站、循环水系统或空冷系统、烟气脱硝系统、烟气脱硫系统、制粉系统、油站、输煤系统、变压器、升压站等。电站周界设备系统受到外部攻击后, 一方面会引起自身设备的停运、损坏, 甚至会发生爆炸、有毒气体扩散等危及人身和环境安全的事故; 另一方面也会

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC0827001)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2020YFC0827001).

通过连锁故障的方式,将事故传播到整个电站,最终殃及电网,造成更严重的后果和损失。在所有电站周界设备中,制氢站因为氢气易燃、易爆的特点,尤其应该受到重视。因此,通过开展制氢站设备遭受外部攻击的连锁故障推演和风险评估,实现制氢站设备乃至整个周界设备的风险排序,可以为发电企业制定针对外部攻击的安全防范措施提供重要依据。

在已有的关于安全风险评价研究中,常见的方法主要有情景构建分析^[6]、事件树分析(event tree analysis, ETA)^[7-11]、故障树分析(fault tree analysis, FTA)^[12-14]、事故树-风险矩阵法^[15]、证据理论^[16]、蒙特卡洛模拟^[17]、贝叶斯网络^[18-20]等。任建强等^[6]将情景构建与推演的方法应用于新能源电力设备,实现了运行风险评估。刘玉良等^[7]基于停运模型和事件树理论,开展了电力系统连锁故障的系统脆弱性分析,确定了系统重点高风险元件。传统事件树分析中,基本事件来源于统计数据,事故概率和后果被视为精确值,一旦统计资料来源不全,就无法评价后果事件发生概率的不确定性。为此,Rasool^[8]于1991年最先提出了模糊概率事件树方法,将模糊集理论引入事件树概率定量计算,用于处理风险评价中的不精确和不确定性问题。随后,2009年Ferdous等^[9]针对事件树定量分析中数据不确定性的问题,对比分析了基于模糊理论和基于证据理论的定量分析方法,仿真结果证明,基于模糊的方法适合于处理不精确性和主观性数据,而证据理论则适用于处理不一致、不完整和冲突的数据。Lower等^[10]构建了航空事故的概率事件树分析模型,用于航空事故的风险评价;Purba等^[11]将模糊概率事件树分析方法应用于核电站堆芯损坏频率计算。龙丹冰等^[12]构建了基于熵算法改进的故障树-云模型,并应用于建筑运维期失效风险的评估;吴寒梅^[13]提出了基于故障树分析的固定风险与动态风险相结合的电站设备风险评价方法,并以汽轮机为例进行了实例分析;宫运化等^[14]采用动态故障树实现了化工系统的动态风险评估。张玉涛等^[15]提出了事故树-风险矩阵法,并应用于脱硫工艺中毒窒息事故风险评估。董玉亮等^[16]构建了基于模糊理论和证据理论的电站设备

安全评价模型,并进行了实例验证。Tian等^[17]建立了基于蒙特卡洛仿真的核电站恐怖袭击风险评估模型。George等^[18]构建了基于贝叶斯网络的流程工业安全与安保风险评估模型,通过更新先验概率实现了流程工厂的动态风险评估。Li^[19]构建了加权贝叶斯网络模型,并应用于恐怖袭击后果评价。Zhao等^[20]则建立基于动态贝叶斯网络和概率安全评价的核电站故障源快速预测模型,并进行了实例验证。

目前针对电站的安全风险评价模型多数是正常运行情况下的设备安全风险等级评价^[21-22],专门研究外部攻击下电站安全风险问题尚未见诸文献报道。同时,现有故障树、贝叶斯网络分析方法难以探索发电站设备事故发生和演化的复杂机理;难以分析直接及后续的次生衍生事件危害严重程度;难以从影响电站设备运行因素和电站设备故障导致的后果进行推演分析。而事件树分析方法可以很好地解决上述问题,因此本文针对制氢站设备受到外部攻击所产生故障的不确定性和连锁性,采用事件树分析方法来实现连锁故障推演,进而得到外部攻击引起的各后果事件及其发生概率。在此基础上建立风险评价指标体系,并采用模糊理论将连锁故障后果量化,最后引入证据推理的方法处理风险评价过程中的不精确性、随机性和不完整性问题,实现制氢站设备乃至整个电站周界设备遭受外部攻击的风险评价和风险排序。

1 基于事件树的连锁故障推演

事件树分析法是安全系统工程中常用的一种归纳推理分析方法,起源于决策树分析(decision tree analysis, DTA),它是一种按事故发展的时间顺序由初始事件开始推论可能的后果,从而进行危险源辨识的方法。

以制氢站为例,按照工作流程和电站故障仿真结果绘制的事件树如图1所示。由图1可以看出,制氢站遭受外部攻击发生连锁故障后,根据不同的推演路径,最终有氢气泄露扩散,氢气泄漏扩散遇明火发生火灾,氢气泄漏扩散遇明火发生爆炸3类主要后果。

考虑到外部攻击会具体到某一单个设备,为

了实现设备层面的风险评估，绘制出连锁故障推演中的关键设备(电解槽、氢分离洗涤器、氢气管道、氢除湿器、储氢罐)的故障推演事件树，并根据领域专家经验给出各中间事件的发生概率。以电解槽受外部攻击泄漏事故为例，连锁故障事件树如图2所示。

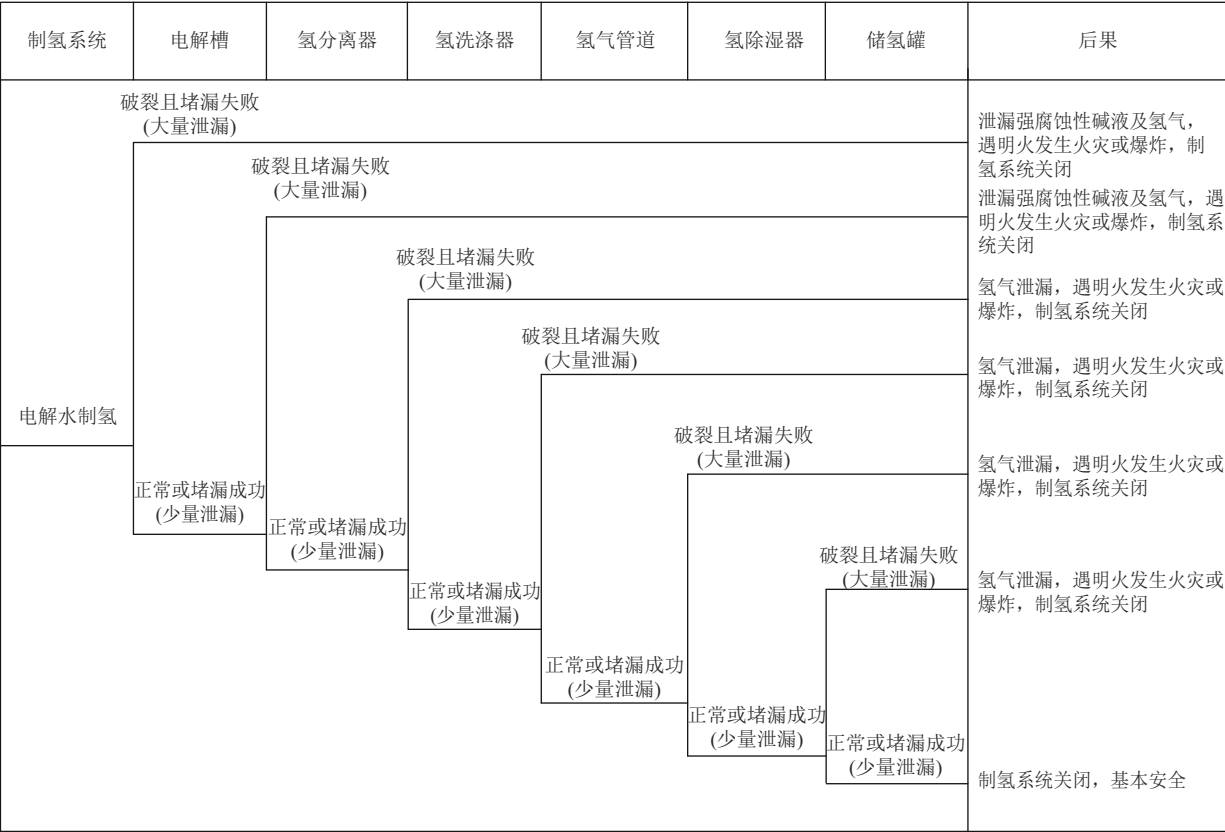


图1 制氢站及供氢系统连锁故障推演事件树

Fig. 1 Event tree for cascading failure deduction of hydrogen production station and hydrogen supply system

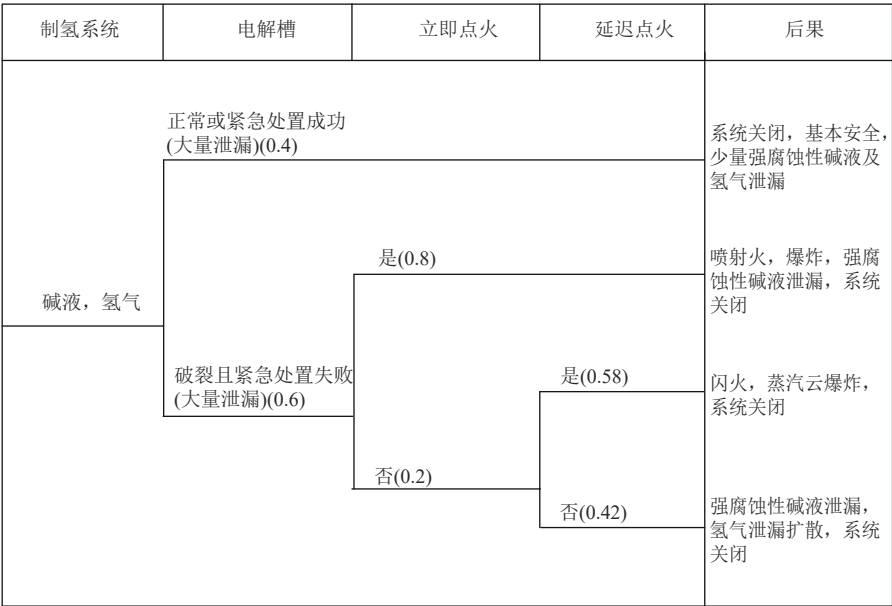


图2 电解槽泄漏事件树

Fig. 2 Event tree of electrolytic cell leakage

某一设备第*i*类后果事件概率计算公式^[23]为

$$p_i = \sum_{j=1}^M p_{ij} = \sum_{j=1}^M \prod_{k=1}^L x_{ijk} \tag{1}$$

式中：*p_{ij}*为第*i*类后果事件中第*j*个后果事件的发生概率；*x_{ijk}*为第*i*类后果事件中第*j*个后果事件的第*k*个中间事件的发生概率。

2 设备风险评价指标及量化

根据燃煤电站周界设备事故案例和专家经验，并参考文献[24-25]确定连锁故障的后果事件量化评价指标为人员伤亡、设备损失、电网影响、环境影响、经济损失、恢复时间，利用这6个指标对各设备遭受外部攻击引起的后果进行风险量化。风险量化标准如表1所示。

某一设备第*j*个风险评价指数计算公式^[21]为

$$R_{1j} = \sum_{i=1}^N p_i \cdot r_{ij} \tag{2}$$

式中*r_{ij}*为第*i*类后果事件对应的第*j*个风险评价指数量化值。

考虑到风险评价指数进行评价的不精确性和不确定性，风险评价前进行模糊化处理，采用梯形隶属函数进行转化^[26]，该隶属函数根据领域专家经验获得。风险指数模糊化隶属关系如图3所示。

3 基于证据推理的电站周界设备风险评价模型

典型的基于证据推理的风险评价分析模型如图4所示^[27]。

在评价分析模型中，评价等级*S_n*可看作D-S证据理论的一个基本假设，因素*e_kⁱ*可看作一条证

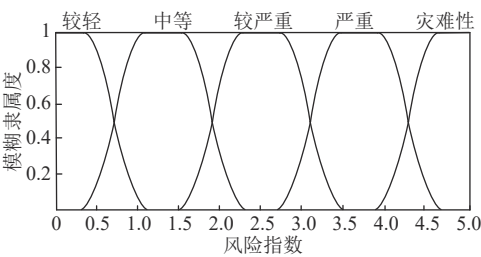


图3 风险指数模糊化隶属关系图

Fig. 3 Fuzzy membership diagram of risk index

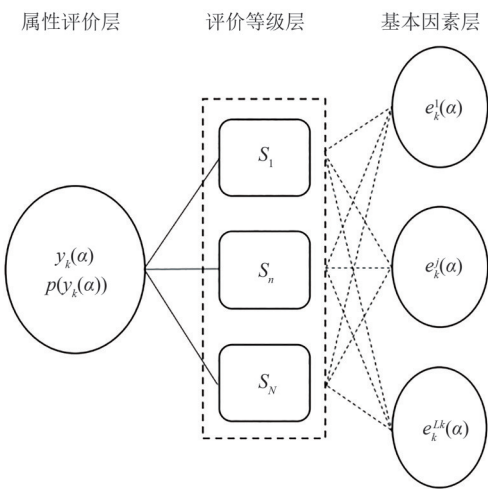


图4 典型的决策树评价分析模型

Fig. 4 Typical decision tree evaluation and analysis model

据，基本概率分配可通过信任度获得，*S*中的评价等级独立且包含所有可能的等级，这样鉴别框架可定义为

$$\Theta = S = \{S_1, \dots, S_n, \dots, S_N\} \tag{3}$$

令 *M*(*S_n*/*e_kⁱ*(*α*))表示证据 *e_kⁱ*支持设备 *α* 风险等级为 *S_n* 这一假设的基本概率赋值；同时令 *β*(*e_kⁱ*(*α*))表示决策者考虑对于设备 *α* 的证据 *e_kⁱ* 属性的状态为确定的确信度。

如果在因素集 *E_k* 中只有一个因素 *e_kⁱ*，则

表1 风险指数量化标准

Tab. 1 Quantitative standard of risk index

量化指标	风险指数				
	1	2	3	4	5
人员伤亡/人	[1, 2]	[3, 4]	[5, 7]	[8, 10]	(10, +∞)
半致死范围/m	[0, 100)	[100, 250)	[250, 400)	[400, 500)	[500, +∞)
设备损失/万元	[0, 1)	[1, 5)	[5, 10)	[10, 20)	[20, +∞)
电网影响/供电能力	[100%, 90%)	[90%, 80%)	[80%, 70%)	[70%, 60%)	[60%, 100%)
环境影响/m	[0, 500)	[500, 2 000)	[2 000, 4 000)	[4 000, 7 000)	[7 000, +∞)
经济损失/万元	[0, 200)	[200, 400)	[400, 650)	[650, 1 000)	[1 000, +∞)
恢复时间/d	[0, 1)	[1, 5)	[5, 10)	[10, 15)	[15, +∞)

$m(S_n/e_k^i(\alpha))$ 应该等于 $\beta(e_k^i(\alpha))$ ；如果在因素集 E_k 中有多个因素，则有：

$$M(S_n/e_k^i(\alpha))=\lambda_k^i\beta(e_k^i(\alpha)) \quad (4)$$

式中 λ_k^i 为 E_k 中各因素 e_k^i 的相对权重。

在获得基本概率赋值后，可利用下面的证据推理算法计算全局概率分配。

分别按式(5)、(6)定义因素子集 $e_{L_k(i)}(\alpha)$ 和合并概率分配 $MM_{r,i}^C(\alpha)$ ：

$$e_{L_k(i)}(\alpha)=\{e_k^1(\alpha), \dots, e_k^i(\alpha)\}, 1 \leq i \leq L_k \quad (5)$$

$$MM_{r,i}^C(\alpha)=M\left(\frac{C}{e_{L_k(i)}(\alpha)}\right)=M_{r,i}^C(\alpha) \quad (6)$$

则有以下迭代算法。

初始条件： $MM_{r,1}^n=M_{r,1}^n$ ， $MM_{r,1}^S=M_{r,1}^S$ 。

递推公式：

$$\begin{cases} MM_{r,i+1}^n=K_{r,i+1}(MM_{r,i}^nM_{r,i+1}^n+MM_{r,i}^nM_{r,i+1}^S+ \\ MM_{r,i}^S M_{r,i+1}^n), n=1, \dots, N \\ MM_{r,i+1}^S=K_{r,i+1}MM_{r,i}^S M_{r,i+1}^S \end{cases} \quad (7)$$

其中， $K_{r,i+1}=[1-\sum_{t=1}^N \sum_{s=1, s \neq t}^N MM_{r,i}^t M_{r,i+1}^S]^{-1}$ ； $i=1, \dots, L_k-1$ ； $r=1, \dots, R$ 。

可以推出，由因素集 $E_k(\alpha)$ 确定的，对 C 的全局概率分配为 MM_{r,L_k}^C ，且 $MM_{r,L_k}^C=0(C \subseteq H, C=H_n$ 和 H 除外)。这样，针对设备 α 的全局优先度可以按下式计算：

$$p_{rk}=p(y_k(\alpha_r))=\sum_{n=1}^N MM_{r,L_k}^n p(S_n)+MM_{r,L_k}^S p(S) \quad (8)$$

式中 $p(S)=\sum_{n=1}^N \frac{p(S_n)}{N}$ 。

各因素权重分配的合理与否直接影响状态评价结果的准确性，目前权重的确定多单独采用主观或客观的方法，如德尔菲法、层次分析方法、主成分分析法、复相关系数法、熵方法等。本文利用层次分析法与复相关系数法相结合并进行乘法合成的方法来确定各个定量指标的权重。将2种赋权方法得出的权值，采用线性加权组合法得出最终的组合权数：

$$\theta_j=\sum_{i=1}^k b_i w_{ij} \quad (9)$$

式中： b_i 为第 i 种方法的权系数； w_{ij} 为第 i 种方法得出的第 j 个指标的权数。

使用上述方法进行各个指标权重的计算，本

文中的各个指标对应权重如表2所示。

表2 指标权重

Tab. 2 Weight of risk indexes

指标	人员 伤亡	设备 损失	电网 影响	环境 影响	经济 损失	恢复 时间
权重	0.489 0	0.183 0	0.137 0	0.099 2	0.036 2	0.055 6

4 火电厂制氢站设备风险评价实例

以某火电厂制氢站设备为例进行分析。本次评价对制氢站的事故风险以关键设备为单位进行定量评价，即对电解槽、氢除湿器、氢分离洗涤器、储氢罐、氢气管道5个关键设备进行定量风险评价，并按照风险度进行排序。针对上述制氢站及供氢系统，根据连锁故障推演事件树，采用式(1)可计算出各关键设备遭受外部攻击后3类后果事件的发生概率，如表3所示。

表3 制氢站设备遭受外部攻击连锁故障后果事件发生概率

Tab. 3 Probability of occurrence of cascading failure consequences from external attack on hydrogen production station equipment

事件后果	制氢站设备				
	电解槽	氢除湿器	氢分离 洗涤器	储氢罐	氢气管道
氢气泄漏扩散	0.050 40	0.080 784 0	0.090 480	0.038 850	0.044 640
氢气泄漏火灾事故	0.302 28	0.552 948 8	0.515 411	0.368 263	0.545 228
氢气泄漏爆炸事故	0.247 32	0.046 267 2	0.292 887	0.292 887	0.030 132

表1中给出了不同连锁故障后果下风险评价指标对应的风险指数取值标准。设备遭受外部攻击后果可由表1进行量化。仍以电解槽遭受攻击损坏为例，事故后果定量分析结果如表4所示。

根据制氢站各关键设备的连锁故障后果定量分析结果，利用式(2)可计算出设备不同风险指标对应的风险指数，然后采用图3给出的风险指数模糊隶属函数，实现风险指数的模糊化。计算结果如表5、6所示。

由以上风险评价结果可知，在制氢站设备中氢气储罐风险度最高，因为其储存了大量的压缩氢气，如若遭受外部攻击，导致氢气泄漏，遇明火，将会发生重大火灾甚至爆炸事故，危及电厂工作人员的生命安全及其周边设备的正常运行，并

表 4 电解槽连锁故障后果定量分析结果

Tab. 4 Quantitative analysis result of consequences of cascading faults in electrolytic cell

风险量化指标	电解槽损坏后果		
	氢气持续泄漏, 大气扩散, 碱液泄漏	氢气持续泄漏, 遇明火、喷射火、闪火	氢气持续泄漏, 遇明火, 沸腾液体膨胀蒸汽爆炸、蒸汽云爆炸
人员伤亡	1	2	5
设备损失	1	2	2
电网影响	1	2	3
环境影响	2	2	4
经济影响	1	2	2
恢复时间	1	2	4

表 5 制氢站设备风险评价输入数据

Tab. 5 Input data for risk assessment of hydrogen production station equipment

制氢站核心设备	风险指标	风险指数	模糊化结果
电解槽	人员伤亡	1.892	(0,0.145,0.392,0,0)
	设备损失	1.150	(0,0.866,0,0,0)
	电网影响	1.397	(0,0.804,0,0,0)
	环境影响	1.695	(0,0.407,0.195,0,0)
	经济损失	1.150	(0,0.866,0,0,0)
	恢复时间	1.644	(0,0.474,0.144,0,0)
氢除湿器	人员伤亡	0.646	(0.709,0.194,0,0,0)
	设备损失	1.913	(0,0.116,0.413,0,0)
	电网影响	1.279	(0,0.961,0,0,0)
	环境影响	1.291	(0,0.945,0,0,0)
	经济损失	1.326	(0,0.899,0,0,0)
	恢复时间	1.326	(0,0.899,0,0,0)
氢分离洗涤器	人员伤亡	0.692	(0.616,0.256,0,0,0)
	设备损失	1.904	(0,0.129,0.404,0,0)
	电网影响	1.298	(0,0.936,0,0,0)
	环境影响	0.650	(0.7,0.2,0,0,0)
	经济损失	1.904	(0,0.129,0.404,0,0)
	恢复时间	1.948	(0,0.07,0.448,0,0)
氢气储罐	人员伤亡	1.833	(0,0.223,0.333,0,0)
	设备损失	2.315	(0,0,0.815,0,0)
	电网影响	1.361	(0,0.852,0,0,0)
	环境影响	1.172	(0,0.895,0,0,0)
	经济损失	1.361	(0,0.852,0,0,0)
	恢复时间	1.947	(0,0.071,0.447,0,0)
氢气管道	人员伤亡	0.636	(0.729,0.181,0,0,0)
	设备损失	1.771	(0,0.306,0.271,0,0)
	电网影响	1.226	(0,0.967,0,0,0)
	环境影响	0.121	(1,0,0,0,0)
	经济损失	1.226	(0,0.967,0,0,0)
	恢复时间	1.256	(0,0.993,0,0,0)

直接关系到发电机组的冷却问题，导致停机，对电厂和电网的安全稳定运行造成重大影响。电解槽的

表 6 制氢站设备风险评价结果

Tab. 6 Risk assessment results of hydrogen production station equipment

设备名称	评价结果	风险度	风险排序
电解槽	(0,0.342,0.150,0,0)	0.161	2
氢除湿器	(0.256,0.298,0.034,0,0)	0.092	3
氢分离洗涤器	(0.278,0.233,0.055,0,0)	0.086	4
氢气储罐	(0,0.131,0.476,0,0)	0.271	1
氢气管道	(0.329,0.249,0.022,0,0)	0.073	5

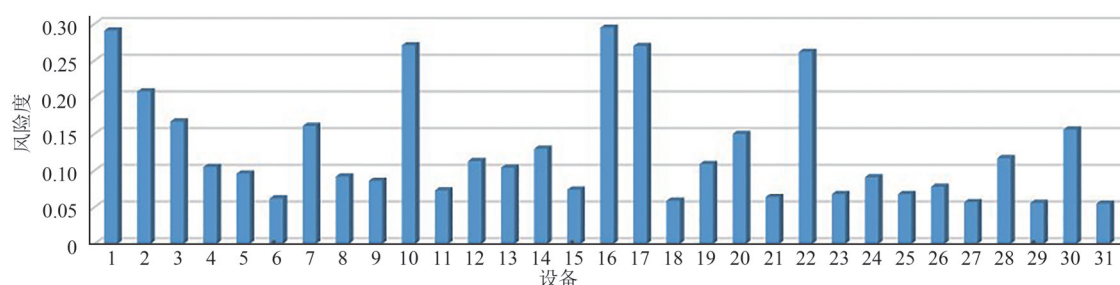
风险度较高，因为其在制氢过程中有大量的有害化学物质，如果发生破坏导致泄漏，会对工作人员生命安全及环境产生严重危害。氢除湿器、氢分离洗涤器及氢气管道的风险水平依次下降。

根据评价结果(风险度)，可以将电站周界设备划分为 3 类：高风险设备、中风险设备和低风险设备。表 7 给出了 3 类风险等级周界设备的列表及相应的安全防范措施。利用上面的方法计算出主要电站周界设备的风险度，如图 5 所示。

表 7 电站周界设备风险分级及防范措施

Tab. 7 Risk rating of equipment around the power station and preventive measures

风险等级	设备列表	防范措施
高风险 (风险度>0.15)	油罐区、液氨储罐、氢气储罐、输油管道、升压站、液氨管道、液氨蒸发槽、电槽、空冷轴流风机	配备在线监测系统(如雷达、红外摄像头)
中风险 (1≤风险度≤0.15)	翻车机、吸收系统、空冷散热器表面、浆液制备系统、贮煤场、氢气管道、烟道、气系统	定期巡视(间隔短)
低风险 (风险度<0.1)	氨气缓冲槽、氢除湿器、引风机、氢分离洗涤器、主变压器重瓦斯、脱硫副产物处理系统、氢气管道、送风机、变压器冷却系统、带式输送机、氨空混合器及后端管道、取料机、主变压器出线端、汽轮机末级排汽管道、凝结水箱	定期巡视(间隔长)



1—液氨储罐；2—液氨管道；3—液氨蒸发槽；4—氨气管道；5—氨气缓冲槽；6—氨空混合器及后端管道；7—电解槽；8—氢除湿器；9—氢分离洗涤器；10—氢气储罐；11—氢气管道；12—浆液制备系统；13—烟气系统；14—吸收系统；15—脱硫副产物处理系统；16—油罐区；17—输油管道；18—取料机；19—贮煤场；20—翻车机；21—带式输送机；22—升压站；23—送风机；24—引风机；25—变压器冷却系统；26—主变压器重瓦斯；27—主变压器出线端；28—空冷散热器表面；29—汽轮机末级排汽管道；30—空冷轴流风机；31—凝结水箱。

图5 电站周界设备风险评价结果

Fig. 5 Risk assessment results of equipment around the power station

5 结论

1) 采用事件树分析方法，建立了制氢站关键设备的事件树，通过连锁故障推演确定出制氢站设备遭受外部攻击后的3类主要后果事件分别是氢气泄漏遇明火发生爆炸、氢气泄漏遇明火着火和氢气泄漏大气扩散，通过概率计算获得制氢站各关键设备的3类后果事件发生概率。

2) 建立了包含人员伤亡、设备损失、电网影响、环境影响、经济损失和恢复时间的风险评价指标体系，利用给出的连锁故障后果结合层次分析法与复相关系数法，通过乘法合成确定各个定量风险评价指标的权重。

3) 在评价指标量化的基础上，利用给出的隶属度函数进行模糊化，最后采用证据推理算法计算出制氢站各关键设备的风险度，其中储氢罐和电解槽的风险度分别为0.271和0.161，远高于其他3个设备的风险度，因而可以作为制定防范措施时的重点关注对象。

4) 提出的基于事件树连锁故障推演和证据推理算法的风险评价方法可以直接应用到整个燃煤电站的周界设备，从而实现全部周界设备的风险排序，为燃煤电站制定预防措施提供依据。

参考文献

- [1] 冯伟忠, 李励. “双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 452-461.
FENG W Z, LI L. Research and practice on

development path of low-carbon, zero-carbon and negative carbon transformation of coal-fired power units under “double carbon” targets[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 452-461.

- [2] 张全斌, 周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154.

ZHANG Q B, ZHOU Q F. Research on the development path of China's thermal power generation technology based on the goal of “carbon peak and carbon neutralization” [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 143-154.

- [3] 董洁, 乔建强. “双碳”目标下先进煤炭清洁利用发电技术研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 202-212.

DONG J, QIAO J Q. A review on advanced clean coal power generation technology under “carbon peaking and carbon neutrality” goal[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 202-212.

- [4] 张兴平, 何澍, 王泽嘉, 等. 不同新能源渗透率下燃煤机组行为策略分析[J]. 电力建设, 2022, 43(5): 9-17.

ZHANG X P, HE S, WANG Z J. Behavior strategy of coal-fired units under different new energy penetration rate[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(5): 9-17.

- [5] 王晓彬, 孟婧, 石访, 等. 煤电与清洁能源协同演进优化模型及综合评价体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 43-52.

WANG X B, MENG J, SHI F. An optimization model and comprehensive evaluation system for the synergistic evolution of coal-fired power plants and clean power sources[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 43-52.

- [6] 任建强, 王璐阳, 吴家浩, 等. 基于情景构建与推演的新能源电力设备运行风险评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(10): 1571-1578.
REN J Q, WANG L Y, WU J H, et al. Operating risk assessments of new energy power equipment based on scenario construction and deduction[J]. Journal of Tsinghua University (Nature Science Edition), 2022, 62(10): 1571-1578.
- [7] 刘玉良, 刘耀年, 术茜, 等. 停运模型与事件树理论在电力系统脆性风险评估中的应用[J]. 黑龙江电力, 2011, 33(1): 58-61.
LIU Y L, LIU Y N, ZHU X, et al. The application of outage mode and event tree theory in power system brittleness risk assessment[J]. Heilongjiang Electric Power, 2011, 33(1): 58-61.
- [8] RASOOL K. Event-tree analysis by fuzzy probability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1991, 40(1): 120-124.
- [9] FERDOUS R, KHAN F, SADIQ R, et al. Handling data uncertainties in event tree analysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87(5): 283-292.
- [10] LOWER M, MAGOTT J, SKORUPSKI J. Analysis of air traffic incidents using event trees with fuzzy probabilities[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 293: 50-79.
- [11] PURBA J H, TJAHYANI D T S, WIDODO S, et al. Fuzzy probability based event tree analysis for calculating core damage frequency in nuclear power plant probabilistic safety assessment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 125: 103376.
- [12] 龙丹冰, 解丽萍, 杨成. 基于熵算法改进的故障树-云模型风险分析方法[J]. 安全与环境学报, 2021, 5: 1-11.
LONG D B, XIE L P, YANG C. Visual risk assessment method based on the fault tree analysis coupled cloud models using modified entropy algorithm[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 5: 1-11.
- [13] 吴寒梅. 电站设备故障风险分析与维修决策[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
WU H M. Risk analysis and maintenance decision for power plant equipment faults[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [14] 宫运化, 徐越. 基于动态故障树的化工系统动态风险评估[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(2): 134-138.
GONG Y H, XU Y. Dynamic risk assessment for chemical system based on dynamic fault tree[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(2): 134-138.
- [15] 张玉涛, 林国钺, 李亚清. 基于事故树J-风险矩阵法的脱硫工艺中毒窒息事故风险评估[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(1): 40-48.
ZHANG Y T, LIN G C, LI Y Q. Risk assessment of suffocation and poisoning accidents in desulfurization process based on FTA-risk matrix method[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(1): 40-48.
- [16] 董玉亮, 李亚琼, 王珍和, 等. 基于证据理论的燃煤电站安全评价研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(3): 179-183.
DONG Y L, LI Y Q, WANG Z H, et al. Safety evaluation on fuel-fired power plant based on evidence theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(3): 179-183.
- [17] TIAN Y C, LEE M. Assessment of terrorist attack risk of a BWR nuclear power plant using Monte Carlo simulations[J]. Nuclear Technology, 2021, 207(12): 1913-1933.
- [18] GEORGE P G, RENJITH V R. Evolution of safety and security risk assessment methodologies towards the use of Bayesian networks in process industries[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 758-775.
- [19] LI M, ZHANG R. Evolving a weighted Bayesian network for consequence assessment of terrorist attack[J]. IEEE Access, 2020, 8: 88282-88293.
- [20] ZHAO Y, TONG J, ZHANG L. Rapid source term prediction in nuclear power plant accidents based on dynamic Bayesian networks and probabilistic risk assessment[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 158: 108217.
- [21] 宋贵安. 基于数据驱动的电站设备性能劣化评估方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
SONG G A. Research on performance deterioration evaluation method of power plant equipment based on data-driven[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [22] 张芳, 张随平, 张萍. 电站设备运行风险分析[J]. 甘肃科技, 2014, 30(9): 56-58.
ZHANG F, ZHANG S P, ZHANG P. Operation risk analysis of power station equipment[J]. Gansu Science and Technology, 2014, 30(9): 56-58.
- [23] 蔡庄红, 黄庭刚. 安全评价技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
CAI Z H, HUANG T G. Safety evaluation technology

- [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [24] 刘诗飞, 詹予忠. 重大危险源辨识及危害后果分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- LIU S F, ZHAN Y Z. Identification of major hazard sources and hazard consequence analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [25] 王建. 储罐区可燃气体泄漏扩散模拟及爆燃灾害评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- WANG J. Simulation of combustible gas leakage and diffusion and deflagration disaster assessment in tank area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [26] 刘合香. 模糊数学理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- LIU H X. Fuzzy mathematics theory and its application [M]. Beijing: Science publishing house, 2012.
- [27] YANG J B, SINGH M C. An evidential reasoning approach for multiple attribute decision making with uncertainty[J]. IEEE Transactions on System, Man,

and Cybernetics, 1994, 24(1): 1-18.

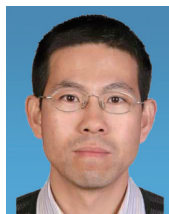
收稿日期: 2023-01-27。

作者简介:



刘玉成

刘玉成(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为发电设备安全高效运行及维修管理, 2537061185@qq.com;



董玉亮

董玉亮(1973), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大型火电机组安全经济运行, 本文通信作者, 0313dongyl@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)