

核电厂外部人为事件筛选与评价的标准化流程研究

熊宏亮

山东电力工程咨询院有限公司 山东省济南市 250100

摘要：核电厂外部人为事件筛选与评价标准化流程研究，是保障国家关键能源基础设施安全运行的核心课题。此类事件具有来源广泛、类型复杂、影响不确定等特点，直接威胁能源供应稳定、公众健康及生态环境安全。本文系统研究其标准化流程：首先明确外部人为事件的定义、特征及潜在影响，论证研究必要性；其次梳理筛选流程关键步骤，包括确定目标范围、识别事件类型；进而探讨评价流程核心，涵盖初步评估指标设计与深入评价技术路径；随后提出流程构建要素，强调逻辑连贯性与通用特殊平衡；最后论述人员培训、技术数据支持的保障作用，总结其对提升安全管理能力和风险应对能力的意义，为核电厂风险管理提供理论参考与操作框架。

关键词：核电厂；外部人为事件；筛选；评价；标准化流程

1. 引言

核电厂的安全运行是能源领域关注的焦点问题，其不仅涉及复杂的工程技术体系，更与外部环境中的多重风险因素紧密关联。在众多风险来源中，外部人为事件因其不可控性强、影响范围广、后果严重性高等特点，成为核电厂安全管理的重要挑战。随着核电厂建设规模的扩大和运行年限的增加，外部人为事件对核电厂安全运行的潜在威胁日益凸显。建立科学、规范的筛选与评价标准化流程，是核电厂识别风险、制定防控措施、保障安全稳定运行的基础性工作。本文旨在通过系统研究，提出一套符合实际需求、具有可操作性的外部人为事件筛选与评价标准化流程，为核电厂风险管理提供理论支撑与实践指导。

2. 核电厂外部人为事件概述

2.1 外部人为事件的定义与基本特征

核电厂外部人为事件是指起源于核电厂外部，由人类活动或社会行为引发，可能对核电厂结构完整性、运行功能或应急响应能力产生不利影响的事件。这类事件区别于核电厂内部设备故障或操作失误，其核心特征表现为来源的外部性、主体的多样性以及影响的复杂性。从来源看，外部人为事件可能源自核电厂周边的工业生产活动、交通运输过程、社会公共事件等；从主体看，涉及企业运营、个人行为、政府管理等多个层面；从影响看，既可能直接作用于核电厂的物理设施（如建筑物、管道系统），也可能间接干扰核电厂的运行管理（如安保系统失效、应急通道阻塞）。这些特征

决定了外部人为事件的风险评估需要综合考虑多维度因素。

2.2 外部人为事件对核电厂运行的潜在威胁

外部人为事件对核电厂安全运行的影响贯穿多个层面。在物理层面，周边工业设施的爆炸、化学品泄漏等事件可能破坏核电厂的实体结构，如安全壳的完整性受损、通风系统的功能失效；在环境层面，交通运输事故导致的有毒物质扩散、周边区域的生态破坏可能影响核电厂的外部环境条件，增加运行风险；在社会层面，群体性事件、恐怖袭击等行为可能直接威胁核电厂的安保体系，干扰正常运行秩序；在管理层面，外部人为事件可能暴露核电厂应急响应能力的不足，如信息传递延迟、资源调配困难等。这些潜在威胁表明，外部人为事件是核电厂全生命周期安全管理中不可忽视的关键环节，需通过系统化的筛选与评价流程进行有效管控^[1]。

3. 外部人为事件筛选流程的构建

3.1 筛选目标与范围的科学界定

筛选目标需精准回答“需关注哪些外部人为事件”的核心命题，其设定必须紧密结合核电厂的地理区位特征、周边环境敏感要素及运行功能需求。以沿海核电厂为例，除常规关注点外，需特别强调风暴潮、海啸等自然灾害引发的次生人为事件风险，如港口设施损坏导致的危化品泄漏、沿海工业区事故引发的连锁反应等；而内陆核电厂则需重点排查化工园区爆炸、河流上游有毒物质污染、铁路运输危险品泄漏等特定风险。

地理边界的界定需采用“核心区—缓冲区—外围区”

三层结构：核心区通常为核电厂围墙外 1-2 公里范围，重点关注直接威胁设施安全的物理破坏与环境污染；缓冲区可扩展至 5-10 公里，纳入人口密集区、交通枢纽、生态敏感区等间接影响区域；外围区则根据事件类型动态扩展，如针对网络攻击需覆盖全国性通信网络节点^[2]。时间维度需贯穿核电厂全生命周期，既包括建设期、运行期的高频事件监测，也需预判退役期可能出现的设施拆除风险、长期放射性废物管理风险等。科学界定需通过专家论证、历史数据回溯、地理信息系统模拟等多维度验证，确保目标设定既避免过度宽泛导致资源浪费，又防止范围过窄遗漏关键风险。

3.2 外部人为事件类型的系统识别

事件类型识别需遵循“全领域覆盖、多层次分解、动态更新”的原则，构建层次清晰、逻辑严密的事件分类体系。从行业维度划分，工业活动类需涵盖石化企业爆炸、金属冶炼厂有毒气体泄漏、电力设施故障引发的连锁反应等；交通运输类需包括船舶碰撞码头、飞机坠毁风险区、危险品运输车辆事故、轨道交通信号干扰等；社会公共类需考虑恐怖袭击、群体性事件、公共卫生事件（如传染病爆发）引发的次生风险^[3]。按作用机制分类，物理破坏类涵盖爆炸冲击、机械撞击、电磁脉冲攻击等直接破坏形式；环境干扰类包括大气污染扩散、水体放射性污染、土壤重金属渗透等间接影响；管理干扰类则涉及人为操作失误、安全监管漏洞、应急响应迟缓等制度性风险。新兴风险识别需纳入网络攻击导致的控制系统失灵、人工智能误判引发的误操作、气候变化引发的极端天气与人为活动叠加效应（如热浪导致电力中断 + 人为火灾）。

识别方法需采用“自上而下”与“自下而上”结合的模式：通过专家工作坊、德尔菲法征集行业权威意见，结合历史事件数据库挖掘高频事件类型，同时运用大数据分析技术监测社交媒体、新闻舆情中的潜在风险信号。事件清单需定期更新，通过年度评审机制纳入新型风险类型，淘汰过时分类，确保识别体系始终反映最新风险特征，为后续筛选提供科学、全面、动态的基础数据支撑。

4. 外部人为事件评价流程的设计

4.1 初步评价的核心指标与方法

初步评价作为风险分级的第一道关卡，需通过“可能性 - 影响程度”双维度指标实现快速筛查。可能性指标体系包含三个层级：历史维度需统计同类事件在核电厂周边区域的发

生频率，如近五年内工业区爆炸事件次数、网络攻击监测数据；区域活动强度需评估周边人口密度、交通流量、工业活动密度等动态参数，例如化工园区日均危化品运输量、港口船舶停泊频率；人为行为动机需结合社会安全环境分析，如恐怖袭击风险等级、社会矛盾激化程度。

影响程度指标则聚焦三个层面：对物理设施的直接破坏需评估爆炸冲击波覆盖范围、电磁脉冲对电子设备的干扰程度；对运行功能的间接干扰需分析电力中断时长、冷却系统失效概率、安全仪表误动作风险；对环境与公众的辐射风险需量化放射性物质泄漏后的扩散路径、人口暴露剂量、生态修复成本。初步评价方法采用“定性 + 半定量”混合模式，通过专家工作坊构建风险矩阵，将可能性分为极低、低、中、高、极高五级，影响程度分为可忽略、轻微、中等、严重、灾难性五级，综合评分确定事件优先级，筛选出需深入评价的高风险事件^[4]。

4.2 深入评价的技术路径与重点内容

深入评价需针对初步筛选的高风险事件开展系统性分析，技术路径遵循“机理推演 – 系统影响 – 措施验证 – 后果量化”四阶段流程。事件发生机理推演需结合故障树分析、事件树分析等方法，模拟外部人为事件从触发到演化的全链条过程，例如网络攻击如何通过工业控制系统入侵核电厂，引发设备误操作或数据篡改。多系统影响分析需构建核电厂三维数字孪生模型，集成物理系统、控制系统、应急系统数据，分析事件对反应堆冷却、安全壳完整性、应急电源等关键系统的耦合影响。防护措施有效性验证需通过实验测试与模拟仿真双重手段，例如测试防爆墙抗冲击性能、验证防火墙对网络攻击的拦截效率、模拟应急响应预案的执行效果。后果量化评估需运用放射性后果模型、环境扩散模型、经济成本模型等工具，计算放射性物质泄漏后的公众健康风险、环境修复成本、经济损失等量化指标。

重点内容还包括对核电厂运行许可证条件的合规性审查，如事件是否触发监管要求的应急响应阈值；对公众信任度的长期影响评估，如事件引发的社会舆论风险、公众恐慌程度。通过深入评价形成详细的风险评估报告，明确事件的具体风险水平、防控措施优先级、资源投入需求，为制定针对性防控策略提供科学依据。整个评价流程需确保逻辑严密、数据可靠，定期通过第三方审计验证方法有效性，持续优化评价模型与技术路径，适应外部人为事件风险特征的变

化趋势。

5. 标准化流程的构建要素与关键原则

5.1 流程逻辑的连贯性与协同性

标准化流程的构建需确保各环节之间的逻辑连贯性与协同性。筛选流程与评价流程需形成有机整体：筛选环节输出的“待评价事件清单”应直接作为评价流程的输入，避免信息断层；初步评价与深入评价需体现递进关系，前者确定风险优先级，后者聚焦高风险事件的具体分析。同时，流程内部各步骤需相互协同，例如筛选阶段的目标与范围设定需为评价阶段的指标设计提供依据，评价阶段发现的新风险点需反馈至筛选阶段以完善事件清单。这种连贯性与协同性能够提升流程的整体效率，确保风险管控的系统性^[5]。

5.2 通用框架与特殊需求的平衡

标准化流程需兼顾通用性与特殊性，以满足不同核电厂的实际需求。通用框架是指适用于大多数核电厂的基础流程，包括明确的筛选目标设定方法、通用的事件类型分类体系、基础的评价指标与技术路径等，确保流程的可复制性与推广性。特殊性则体现在针对特定核电厂的个性化调整，例如位于人口密集区的核电厂需强化社会公共事件的筛查权重，处于生态敏感区的核电厂需重点关注环境干扰类事件的影响。通过“通用框架 + 特殊调整”的模式，既能保证流程的标准化程度，又能适应不同核电厂的差异化风险特征。

6. 标准化流程的实施保障与实践意义

6.1 人员能力与培训体系的支撑作用

标准化流程的有效实施依赖于专业人员的能力水平，包括对外部人为事件风险的认知能力、筛选与评价技术的应用能力、以及跨部门协作的沟通能力。为此，需构建系统的人员培训体系：一是加强核安全文化教育，提升人员对风险防控的重视程度；二是开展技术培训，涵盖事件识别方法、数据分析工具、评价模型应用等内容；三是组织实战演练，通过模拟外部人为事件场景检验人员的应急响应与决策能力。通过持续的人员能力提升，确保标准化流程的执行质量。

6.2 技术工具与数据资源的保障机制

技术工具与数据资源是标准化流程运行的基础支撑。技术工具方面，需开发或引入适用于外部人为事件管理的信息化系统，如地理信息系统（GIS）用于风险空间分析、数据库管理系统用于事件信息的存储与检索、风险评估软件用于定量计算等。数据资源方面，需建立多源数据整合机制，

收集核电厂周边的工业活动数据、交通流量数据、人口分布数据、历史事件记录等，并通过定期更新确保数据的时效性与准确性。同时，需加强与地方政府、行业协会的信息共享，获取周边区域的规划动态与社会发展数据，为流程运行提供全面的数据支持。

7. 结论

核电厂外部人为事件的筛选与评价标准化流程是核电厂风险管理体系的核心支柱，其科学性与可操作性直接影响核电厂安全运行水平。本文系统剖析外部人为事件的定义与特征，明确其具有来源广泛、类型复杂、影响不确定等特点，涵盖工业活动、交通运输、社会公共等多领域行为，如恐怖袭击、设备误操作、违规施工等，并论证建立标准化流程的必要性。研究设计包含目标界定、类型识别、初步评价、深入评价的闭环标准化流程：目标界定需结合核电厂地理位置、周边环境特征及运行功能需求，划定地理边界与时间维度；类型识别遵循全领域覆盖与动态更新原则，通过德尔菲法与数据挖掘技术构建事件分类体系；初步评价采用“可能性 - 影响程度”双维度指标，结合历史数据与专家经验进行风险分级；深入评价则运用故障树分析、事件树分析及数字孪生模型等技术路径，量化事件后果并验证防护措施有效性。流程构建强调逻辑连贯性与通用特殊平衡，既需满足行业共性需求，又要适应不同核电厂的个性化特征。实施保障方面，从人员能力提升、技术工具开发、数据资源共享三维度提出具体措施，包括构建“培训 - 考核 - 演练”能力提升体系，开发基于人工智能的风险预测系统，建立多源数据整合平台。研究表明，该标准化流程可显著提升核电厂对外部人为风险的识别精度与应对能力，为安全运行提供坚实保障，并为监管部门制定政策提供理论参考。未来需持续优化流程，适应技术发展与环境变化，通过动态调整机制与专家共识机制保持流程的时效性与科学性，以应对新兴风险挑战。

参考文献：

- [1] 周耀权, 杜红燕, 郑伟. 核电厂周围液态有毒化学品类外部人为事件危险源评价方法研究 [J]. 原子能科学技术, 2015, 49(12):2145–2149.
- [2] 汪卫卫, 谭承军. 核电厂周围外部人为事件调查内容及方法探讨 [J]. 环境影响评价, 2017, 39(04):82–84.
- [3] 核电厂外部人为事件调查与评价技术规范 :NB/T

20200–2013[S],2013.

[4] 吴中旺 . 核设施厂址选择的外部人为事件研究 [J]. 清华大学学报 (自然科学版),1998,(07):40–43.

[5] 于飞 . 浅析核电厂外部人为事件中的飞机坠毁因素 [J]. 科技创新导报 ,2020,17(14):11–12.

作者简介: 熊宏亮 1983 年 1 月 男 汉族 山东禹城 本科 高级工程师 从事的研究方向 : 核电厂、火电厂环境保护设计, 环境影响评价;

项目编号: 核电厂外部人为事件筛选与评价技术研究
37-K2024-028