

核技术项目辐射安全双维度突破：检测系统优化设计与防护设施验收监测的保障机制探索

黄红强

广西居里安检测技术有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8687

[摘要] 当前，核技术已深度融入工业、医疗、农业等关键领域，在辐射加工、无损检测、医用诊疗等场景中持续赋能社会发展与民生改善，但其“双刃剑”属性也带来了不容忽视的辐射安全风险，检测精度不足、防护验收机制不完善等问题提高了风险。辐射安全是核事业发展的生命线，构建“检测-防护”双维度保障体系至关重要。基于此，本文对核技术应用辐射环境保护现状、当前核技术应用辐射环境保护存在的问题进行分析，设计科学合理的核技术项目辐射监测系统，提出科学合理的核技术项目辐射防护设施验收监测的保障策略，以供参考。

[关键词] 核技术项目；辐射防护设施；验收监测；应用；保障

[中图分类号] TL7；TL75

Double-Dimensional Breakthrough in Radiation Safety for Nuclear Technology Projects: Exploration of Guarantee Mechanisms for Detection System Optimization and Protective Facility Acceptance Monitoring

Huang Hongqiang

Guangxi Curiesan Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] Currently, nuclear technology has been deeply integrated into key fields such as industry, healthcare, and agriculture, continuously empowering social development and improving people's livelihoods in scenarios like radiation processing, non-destructive testing, and medical diagnostics. However, its "double-edged sword" nature also brings significant radiation safety risks, with issues such as insufficient detection accuracy and incomplete protection acceptance mechanisms exacerbating these risks. Radiation safety serves as the lifeline of nuclear development, making the establishment of a dual-dimensional "detection-prevention" safeguard system crucial. Based on this, this paper analyzes the current state of radiation environmental protection in nuclear technology applications, identifies existing problems, designs a scientifically sound radiation monitoring system for nuclear technology projects, and proposes effective safeguard strategies for the acceptance monitoring of radiation protection facilities in such projects for reference.

[Key words] nuclear technology project; radiation protection facilities; acceptance monitoring; application; guarantee

近年来，国内外多起辐射事故的发生，凸显出“检测系统精准性不足”与“防护设施验收监测机制不完善”的双重问题，强化核技术项目辐射安全保障已成为关乎环境安全与公众健康的紧迫课题。核技术在工业、医疗、农业等领域的广泛应用虽推动社会发展，但安全防线的薄弱环节可能引发放射性污染风险，因此构建“检测-防护”双维度安全体系至关重要。为保障核技术应用的安全性和可持续性，我国已出台《中华人民共和国放射性污染防治法》[1]、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》[2]等法律法规，并制定《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用 (HJ 1326—2023)》[3]、

《建设项目环境保护管理条例》[4]等配套标准，以规范核技术项目的环境保护设施验收工作，确保辐射防护措施的有效性。在此背景下，应聚焦检测系统优化设计，通过改良传感器灵敏度、整合智能数据处理算法、升级多场景适配功能，提升辐射剂量监测的精准度与实时性，为安全预警提供可靠技术支持。同时完善防护设施验收监测保障机制，严格遵循权威审核标准，规范验收监测程序，确保防护设施符合国家标准。通过双维度协同发力，既能持续优化监管机制与防护技术水平，有效控制放射性污染风险，又能在保障核技术项目合规运行的同时，实现经济效益、生态安全与公众健康权益的协调发展。

1 核技术应用辐射环境保护现状

1.1 核技术应用审批方面

近年来,我国持续推进核技术应用审批权限下放,以优化监管流程、促进行业发展。具体内容如下,部分I类放射源单位的审批权已下放至省级环保部门,如生产PET放射性药物的辐射安全许可审批;对碘-125放射性体外诊断试剂等低风险应用实施无条件豁免,减少行政负担;放射性药品及原材料进出口审批有效期延长至1年,降低企业运营成本。然而,这些措施虽然可以促进核技术在医疗、工业等领域的广泛应用,但是也对辐射安全管理提出了更高要求,需在简政放权的同时,强化事中事后监管,避免监管盲区,出现辐射安全事故[5]。

1.2 监管机构队伍建设方面

2023年,习近平总书记在全国生态环境保护大会上强调要“构建严密的核安全责任体系”,推动核安全监管现代化。当前,我国越来越关注核辐射环境保护,已初步形成四级监管架构,但仍面临挑战,需进一步拓宽其覆盖范围,加大对监管机构团队的建设力度。目前,大多数省级环保部门已设立辐射安全监管处,配备专业团队,能够依托核与辐射安全中心等技术支持单位开展风险评估,采用“定期检查+突击抽查”相结合的方式,对研究堆的运行机构进行定期、例行以及非定期的检查,及时发现并解决问题。但部分市县监管力量薄弱,专业人才不足,难以应对日益复杂的核技术应用场景[6]。

2 当前核技术应用辐射环境保护存在的问题

2.1 安全管理任务与隐患多

据《中国核技术应用产业发展报告(2023)》显示,截至2022年底,我国民用研究堆(含临界装置)在役18座,其中5座可生产同位素;另有约23万台各类在用射线装置,以及15.7万枚在用放射源,反映出国内核技术应用的规模与范围。随着核技术应用领域的不断拓展,放射源与射线装置的数量持续攀升,种类日益复杂,安全管理工作开展难度上升。经过统计分析,我国核技术应用领域的辐射安全事故中,超剂量照射事故占比居高不下,其背后原因呈现多元化特点,包括使用的检测仪表精度不足,对放射源流转、射线装置使用等环节的监管不够严密,操作人员培训不足,对安全规程掌握不扎实等,反映出核技术应用领域存在的安全隐患,亟需通过强化防护措施与监督机制加以解决。

2.2 单位缺乏安全文化

从工作开展的情况来看,部分核技术应用单位缺乏健全的安全文化体系,存在明显的重效益轻安全倾向,将经济效益置于首位,对辐射安全投入不足,未能营造“安全第一”的文化氛围。同时,安全培训工作流于形式,培训内容针对性不强,培训方式单一,导致工作人员安全意识淡薄,对辐射危害的认知不足,难以遵循规定进行操作,安全事故发生率上升。

2.3 辐射监测体系不完善

辐射监测体系的不完善进一步加剧了辐射环境风险。例如,非法辐射行为屡禁不止,一些个人或单位未经许可擅自实施放射性物品及设备的购买、储存与使用等行为,漠视法律规定的安全审查及授权程序,增加了监管工作的难度,导致潜在的辐射风险难以被及时察觉和有效管控[7]。

又例如,即便是经过批准的放射性物质,其全生命周期的跟踪、控制与应用监管也存在明显短板。相关监督机构受限于人员编制不足、财力资源匮乏等问题,难以对放射性物质的生产、运输、使用、回收等环节实施全方位、高效化的控制与检验,导致辐射源操作不规范、应急处置措施不到位、放射性废弃物处理不当等问题频发,进而引发辐射泄露、意外照射等安全事故。

3 核技术项目辐射监测系统设计

3.1 基于 ZigBee 的无线传感器网络

无线传感器网络由大量具备自主感知、数据处理与通信能力的传感器节点构成,可实时采集、传输监测区域信息,广泛应用于环境监测等领域,兼具实时性强、覆盖广、成本低的优势。其整体包含感知环境信息的传感器节点、负责节点通信的通信网络,以及处理分析数据的数据处理中心。传感器节点硬件涵盖采集信息的传感器、处理控制数据的微处理器、存储数据的存储器、实现通信的通信模块与供电的电源模块;软件则由提供基础服务的嵌入式操作系统、控制数据采集的传感器驱动程序、保障节点通信的通信协议栈,以及实现具体功能的应用程序组成。ZigBee 是基于 IEEE802.15.4 标准的低功耗、低速率无线通信技术,专为低成本传感器设备设计,可靠性高,适合构建大规模传感器网络。将其应用于无线传感器网络,可实现节点间低功耗、低成本通信,有效提升网络性能与可靠性。

3.2 核辐射监测系统的整体设计

本系统以光电传感器等高精度元件作为信息采集核心,构建区域环境核辐射监测体系,能精准采集环境中核辐射剂量,经数据编码后通过无线传输技术发送至控制中心。控制中心借助专用软件对接收的核辐射信息实时分析处理,并绘制辐射曲线,为决策者制定应对方案、规避潜在风险提供数据支撑。该系统采用层次型网络结构,如图1所示,底层为传感器节点,中层包含协调器与路由器,最上层为监控主机,实现核辐射监测的分层协作与高效运行。ZigBee 传感器节点自组织构建高效无线网络,协作感知采集监控区域核辐射强度。网络由多星形网络组成,均衡节点功耗、规范组网;路由器汇总处理终端节点信息传至协调器,协调器管理网络、分配回收地址、更新密钥,并实现终端与监控主机双向通信。

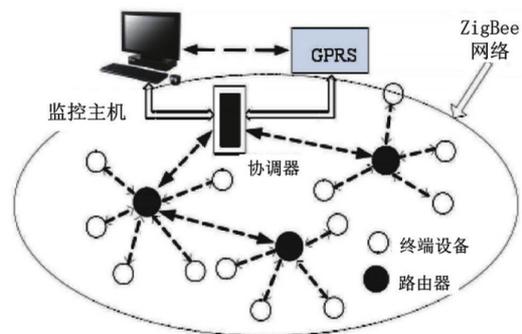


图1

3.3 核辐射监测系统的硬件设计

区域环境核辐射监测系统开发的核心是搭建稳健硬件平台,为软件设计奠定基础。系统硬件整体包含数据采集、无线通信、微处理器及电源四大环节,结构如图2所示。

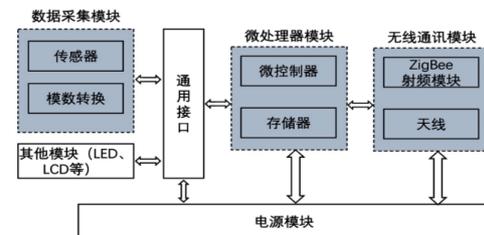


图2

其中,数据采集环节至关重要,由 ZigBee 传感器终端与模数转换器组成,分布于终端设备节点和路由器节点,负责采集核辐射信息并转换为数字信号传输至微处理器。微处理器环节含微控制器与存储器,承担任务管理、路由协议、功耗管理及数据处理功能。无线通信环节保障数据传输与控制消息交换的安全可靠。电源环节为全网供电,其中 ZigBee 协调器采用

交流电或 USB 供电, 终端设备节点则使用碱性电池供电。

3.4 核辐射监测系统的软件设计

软件质量对核辐射监测系统的可靠性与健壮性起关键作用, 本节围绕系统软件总体方案展开介绍。基于 ZigBee 无线传感器网络的环境核辐射系统软件, 包含三大核心子模块: ZigBee 传感器网络终端节点软件、ZigBee 网络中心节点软件及监控主机软件, 且软件总体结构呈层次化网络拓扑, 涵盖传感器节点、路由节点与中心节点。各模块功能明确, ZigBee 传感器网络终端节点软件专注于核辐射环境数据的采集与传输; ZigBee 网络中心节点软件承担数据传输及网络节点管理职责, 同时网络中部分节点设为路由节点, 通过信号中继转发扩大传输范围, 中心节点作为网络控制核心, 负责汇集、处理和管理传感器节点数据; 监控主机软件则具备实时数据显示、数据存储与调用、综合数据分析以获取感知对象信息等功能。其中, 监控主机软件与 ZigBee 网络中心节点软件是系统核心, 功能设计直接影响系统性能与稳定性; 此外, 汇聚节点除接收、处理传感器节点数据并传输至上位机外, 还负责网络配置与管理, 包括定义通信信道、配置网络参数、响应节点入网请求等。

3.5 核辐射监测系统的性能测试

在完成核辐射监测系统的总体结构设计、软硬件设计, 并完成系统搭建、硬件电路调试与软件程序调试后, 即可开展系统性能测试。本次测试针对所建系统, 重点开展四类测试: 网络实现测试、数据收发测试、协调器与路由器功能测试, 以及稳定性测试。其中, 稳定性测试在模拟实验室环境中进行, 该环境参数设定为: 温度 10-25℃、空气湿度约 50%。测试时将核辐射环境监测系统置于该环境下连续运行 12h, 通过观察系统工作状态, 判断其稳定性及是否出现异常。周围环境剂量率测量数据如图 3 所示。

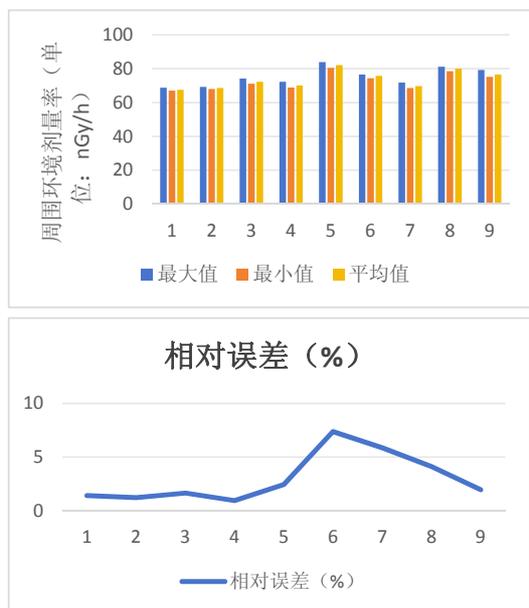


图 33

上述结果表明所设计的区域环境核辐射监测系统表现出良好的工作状态和高度的稳定性。

4 核技术项目辐射防护设施验收监测的保障机制

一是明确验收监测主要内容。验收监测工作应重点围绕以下方面展开。(1) 辐射防护设施性能测试: 屏蔽效果、联锁装置、报警系统等关键防护设施的功能验证; (2) 工作场所辐射水平监测: 系统测量操作位、控制室、边界区域等; (3) 三废处理系统监测: 重点监测废气、废液处理设施的净化效率

及排出口辐射水平; (4) 个人剂量监测: 连续监测工作人员操作位剂量率; (5) 环境调查: 调查项目周边环境 γ 辐射剂量率及关键核素。需要注意的是, 在完成环境影响验收监测后, 核技术应用项目投入运行后, 需对项目周边环境及环境敏感保护目标进行全方位监测[8]。

二是明确验收监测放射性污染因子。根据项目特点确定特征核素, 如核医学项目重点关注碘-131、碘-125 铯-99m、氟-18 等; 工业探伤项目关注铀-192、钨-75、钴-60 放射源、X 射线探伤机等; 辐照装置关注钴-60 等。监测指标应包括 X 射线辐射剂量水平、 γ 射线辐射剂量水平、X/ γ 射线辐射剂量水平、本底辐射剂量水平、 α 表面污染、 β 表面污染、中子剂量当量率、空气气溶胶放射性核素检测等。同时, 在监测过程中需从实际出发, 建立分级监测体系, 重点区域实施连续监测、一般区域进行定期抽样。

三是明确验收监测工况要求。监测需在项目正常运行负荷达到 75% 以上的状态下开展, 若国家或地方标准对生产负荷有特定要求, 则需按相应标准执行。监测前进行仪器校准、同步开展空白样和平行样分析、监测过程全程记录。

四是有效开展验收监测结果评价工作。应严格遵循相关标准, 把握好基本原则, 需完全符合环评报告及其批复文件规定的标准要求、结合项目所在地天然本底辐射水平或建设前本底调查数据进行科学评估、依据最新国家标准对辐射照射剂量和放射性流出物排放限值进行系统分析, 并在具体实施过程中采用统计学方法分析监测数据, 与环评预测值进行对比分析, 同时参照国内外相关标准进行评价, 注重监测数据的代表性和可比性, 确保评价结果客观准确, 为项目验收提供可靠依据。

综上所述, 核事业的发展是一个产生、发育直至成熟的过程。随着核技术的快速发展, 大型辐射装置和放射源设备数量不断增多, 在推动能源、医疗和工业发展的同时, 也带来了潜在的辐射安全风险。当前核技术应用辐射环境保护存在安全管理任务与隐患多、单位缺乏安全文化、辐射监测体系不完善等问题, 应设计核技术项目辐射监测系统, 通过一系列保障策略强化验收监测工作, 提升核技术项目辐射防护设施验收监测质量, 创造安全文化氛围。

【参考文献】

- [1] 中华人民共和国放射性污染防治法[A] 铁路环保法规汇编[C]. 中国铁道学会, 2013: 8.
- [2] 无. 放射性同位素与射线装置安全和防护条例[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2005 (31): 30-39.
- [3] JT/CSES88-2023, 建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 污染影响类总则[S].
- [4] 郜凤涛. 建设项目环境保护管理条例释义[M]. 中国法制出版社, 2017.
- [5] 佚名. 生态环境部发布《建设项目环境影响评价分类管理名录 (2021 年版)》[J]. 环境经济, 2020 (24).
- [6] 全国人大环境与资源保护委员会法案室. 中华人民共和国环境影响评价法释义[M]. 中国法制出版社, 2003.
- [7] 姜坤. 生态环境背景下的辐射环境保护现状及对策探析[J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2024 (10): 0026-0029.
- [8] 帅泽民, 王博智, 于丹颖. 核技术应用中的辐射安全研究[J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2023 (5): 61-64.

作者简介: 黄红强 (1991.05-), 男, 壮族, 广西贵港市人, 本科, 研究方向: 核技术利用。