

核电厂 γ 周围剂量当量率监测质量控制方法探讨

谢卫平 赵喜寰 陈 晔 陈全利

(江苏核电有限公司 连云港 222000)

摘要 核电厂辐射仪表监测数据的准确性,关系到工作人员的辐射安全。通过对影响核电厂工作场所 γ 周围剂量当量率监测的典型因素进行分析,采取控制监测文件的制定、监测人员的培训、监测仪表的检定和维修、监测仪表的使用、监测数据的处理等手段,可以实现 γ 周围剂量当量率监测数据的有效性和准确性。此外,还对影响监测质量的重复性、相对固有误差进行了讨论,并提出了相应的处理建议。该方法可为核电厂同行和放射性相关单位在进行工作场所 γ 周围剂量当量率监测的质量控制工作提供参考和借鉴。

关键词 γ 周围剂量当量率,仪器,监测,质量控制

中图分类号 TL75+1

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0016

Exploration of quality control methods for monitoring the dose equivalent rate round γ in nuclear power plant

XIE Weiping ZHAO Xihuan CHEN Hao CHEN Quanli

(Jiangsu Nuclear Power Corporation, Lianyungang 222000, China)

ABSTRACT The accuracy of radiation instrumentation monitoring data in nuclear power plants is related to the radiation safety of staff. By analyzing the typical factors affecting γ -perimeter dose equivalent rate monitoring in nuclear power plant workplaces, the validity and accuracy of the data can be achieved by controlling for the development of monitoring documents, training of monitoring personnel, calibration and maintenance of monitoring instruments, use of monitoring instruments, and processing of monitoring data. We have discussed the repeatability and relative inherent errors that affect the quality of monitoring, and recommended corresponding treatments. The method can provide reference for the quality control work of γ -peripheral dose equivalent rate monitoring in the workplace for nuclear power plant staff and radioactive related units.

KEYWORDS γ -peripheral dose equivalent rate, Instruments, Monitoring, Quality control

CLC TL75+1

工作场所 γ 周围剂量当量率监测的主要任务是选用适当的仪表和测量方法,测定工作场所的 γ 周围剂量当量率,检验防护设施的性能,及时发现屏蔽上的漏洞和缺陷以及工艺操作上的问题,做出适当的评价,判断工作人员的安全程度^[1]。通常情况

下,核电厂在高 γ 辐射区域、重要工艺系统区域、人员主要通道区域安装了固定式的 γ 辐射监测仪表,以实现区域 γ 辐射的实时和远程监测。同时,在监测数据高于仪表设定的阈值时会在辐射监测系统的监盘上发出声光报警,为工作人员及时发现事故

第一作者: 谢卫平,男,1987年3月出生,2010年于南华大学获学士学位,现从事辐射监测和人员辐射防护研究, E-mail: xieweiping2008@163.com

收稿日期: 初稿 2021-12-06; 修回 2022-02-27

First author: XIE Weiping (male) was born in March 1987, and obtained his bachelor's degree from South China University in 2010. Now he engages in radiation monitoring and personnel radiation protection research, E-mail: xieweiping2008@163.com

Received 06 December 2021; accepted 27 February 2022

苗头、采取补救措施提供依据。对于没有安装 γ 辐射监测仪表的区域,通常由工作人员使用 γ 周围剂量当量率仪表对区域的 γ 辐射进行手动测量,以评价区域的 γ 辐射是否满足设计要求,并为区域内检修作业的辐射防护措施的制定提供数据依据。

根据国内外发生的超剂量照射的辐射事故分析^[2-4],可靠的工作场所 γ 辐射监测是避免辐射事故发生的重要手段之一。为了确保 γ 辐射监测仪的监测数据准确可靠,必须对影响监测数据质量的各环节进行有效控制。核电厂工作场所 γ 辐射监测的对象主要为 γ 周围剂量当量率,很少开展定向剂量当量率的监测。因此,本文以核电厂 γ 周围剂量当量率监测的质量控制作为研究对象,对影响监测质

量的各种因素进行分析和讨论,并提出了相应的监测质量控制方法。

1 影响监测质量的典型因素

工作场所 γ 周围剂量当量率监测是辐射环境评价的基础,也是制定放射性工作人员受照剂量控制限值的依据。在进行 γ 周围剂量当量率监测任务时,由于各种因素的影响,最终监测结果会存在一定的不确定性,这种不确定性是不可能被完全消除的,但是可以通过制定控制措施使不确定性减小到可以接受的水平。工作场所 γ 周围剂量当量率监测质量的典型影响因素见表1。

表1 工作场所 γ 周围剂量当量率监测质量的典型影响因素
Table 1 Typical factors affecting the quality of γ -peripheral dose equivalent rate in the workplace

影响因素 Influencing factors	主要内容 Main contents
文件 Documents	主要包括监测方法、监测记录、监测质量保证制度等 Mainly includes monitoring methods, monitoring records, monitoring quality assurance system, etc.
人员 Person	主要包括人员专业知识、使用的设备和操作技能等 Mainly includes personnel expertise, equipment used and operating skills, etc.
仪器设备 Instruments	主要包括设备的定期检定/校准、仪表故障修复后性能的验证、仪表使用前的验证等 Mainly includes regular calibration/checking of the equipment, verification of the performance of the instrument after fault repair, verification of the instrument before use, etc.
数据处理 Data processing	主要包括仪表读数的修正等 Mainly includes correction of meter readings, etc.

2 监测质量控制方法制定

2.1 文件制定

在执行工作场所 γ 周围剂量当量率监测任务前,需要对监测对象的特点进行研究,明确监测任务的目的是辐射类型,确定监测方法、监测周期和监测位置,并建立监测质量保证制度。除此之外,核电厂还需要根据监测工作场所的 γ 周围剂量当量率大小、测量准确度要求等选择相适应的监测仪表类型。

2.2 人员技能培训

掌握 γ 周围剂量当量率监测仪表的正确操作方法、有效地读取仪表测量数据并进行换算,是保证

监测结果准确的前提条件。在核电厂,放射性工作人员培训需要包含 γ 周围剂量当量率监测仪表的操作方法、数据换算等理论培训内容,以及常用 γ 周围剂量当量率监测仪表的实操培训;专业的辐射防护人员还需要培训 γ 周围剂量当量率监测仪表的测量原理、仪表故障分析判断、测量数据分析等内容;培训结束后需要根据培训内容组织进行理论和实操考核,考核合格后方能上岗。除此之外,核电厂需要定期组织放射性工作人员和专业辐射防护人员进行 γ 周围剂量当量率监测仪表操作技能复训和考核,确保相关人员及时学习和掌握电站新采购仪表的操作方法。监测人员技能培训和考核方式参考表2。

表2 监测人员技能培训和考核
Table 2 Monitoring personnel skills training and assessment

培训项目 Training programs	培训方式 Training methods	考核方式 Assessment method
防人因失误工具的使用 Specifications for the use of anti-human error tools	1. 编制防人因失误工具教材,开展课堂授课 2. 建设专用防人因失误工具培训教室,设置防人因失误陷阱,开展实操培训 1. Prepare teaching materials for human error prevention tools and provide classroom instruction 2. Construction of special anti-human error tools training classroom, set up anti-human error traps, and carry out hands-on training	笔试+实操 Written test + practical exercises
专业技术知识 Technical expertise	结合岗位要求,编制对应的岗位专业知识教材,开展课堂授课 Combined with the requirements of the position, the corresponding job expertise materials are prepared and classroom lectures are conducted	笔试 Written test
监测仪表操作技能 Monitoring instrument operation skills	1. 建立实操技能培训实验室,包括典型辐射仪表模型、模拟辐射场,开展模拟现场的 γ 周围剂量当量率监测实操培训和异常响应培训 2. 建立典型的辐射监测作业的VR场景,开展体验式培训 1. Establish a hands-on skills training laboratory, including a typical radiation instrument model, a simulated radiation field, and carry out hands-on training and abnormal response training for γ -peripheral dose equivalent rate monitoring in simulated sites 2. Establish VR scenarios of typical on-site radiation monitoring operations and conduct experiential training	实操 Practical exercises

2.3 仪表检定

根据国家相关法规标准的要求,需要对 γ 周围剂量当量率监测仪表进行周期检定,以确保仪表的计量性能满足相关要求^[5]。 γ 周围剂量当量率监测仪

表的计量性能检定要求见表3。在核电厂工作现场使用的 γ 周围剂量当量率监测仪表必须检定合格,且在仪表上张贴检定合格证和校准因子(或者响应因子),以便工作人员能够对仪表的监测数据进行修正,确保数据的准确性。

表3 γ 周围剂量当量率仪计量性能要求^[6]
Table 3 γ -peripheral dose equivalent rate meter measurement performance requirements^[6]

计量性能 Metrology performance	技术要求 Technology requirements	测量条件 Measuring conditions
相对固有误差 Relative intrinsic error	-15% ~ +22%	有效测量范围至少覆盖3个数量级 Effective measurement range covering at least 3 orders of magnitude
重复性 Repetitive	$1.255(16-\dot{H}/\dot{H}_0)\%$	$\dot{H}_L \leq \dot{H}_0 \leq 11\dot{H}_0$ 且仪表响应时间 and meter response time ≤ 10 s
能量响应 Energy response	-23% ~ +43%	80 keV ~ 1.5 MeV

注: $\dot{H}_0$ 为剂量当量率有效测量范围的下限, $\dot{H}$ 为仪表读数。

Note: $\dot{H}_0$ is the lower limit of the effective measurement range of the dose equivalent rate, $\dot{H}$ is the meter reading.

2.4 仪表维修管理

仪表在现场使用时,会由于工作人员操作不当等原因造成仪表故障^[7],尤其是影响仪表计量特性的故障,如果继续使用将导致仪表测量数据出现较大偏差,成为辐射安全隐患。为了确保仪表维修质量和对维修过程的控制,避免未修复或者未经过性能验证的仪表误投入现场使用,核电厂必须制定严

密的故障仪表维修管理文件。在仪表维修室内,故障、修复中和已修复的仪表需要张贴醒目的标识进行区分,并分开存放,确保故障仪表维修的各相关环节均处于有效管控。同时,核电厂还应根据故障仪表维修的部件和对计量性能的影响,制定不同等级的故障仪表修复后验收制度。核电厂仪表维修分级管理参见表4。

表4 核电厂仪表维修分级管理
Table 4 Nuclear power plant instrumentation maintenance hierarchy management

维修分级 Maintenance classification	维修内容 Maintenance content	仪表修复后验收要求 Acceptance requirements after instrument repair
一级维修 First maintenance	更换计数管、显示屏、探测主板等会影响到仪表计量性能的维修 Replacement of the counting tube, display, detection motherboard, will affect the meter measurement performance of the repairs	按照仪表检定规程进行检定 Calibration in accordance with the instrument calibration protocol
二级维修 Secondary maintenance	紧固仪表、焊接探头连接线等无需拆卸仪表外壳的维修 Fastening the instrument, soldering the probe connection wire and other repairs without removing the instrument housing	对仪表性能进行检查和测试 Inspection and testing of instrument performance
三级维修 Tertiary maintenance	更换电池、仪表背带、仪表清洁等简单维护保养的维修 Replacing batteries, meter straps, meter cleaning and other simple maintenance repairs	仪表管理人员进行检查验证 Inspection and verification by instrumentation managers

2.5 仪表使用管理

为了确保从事放射性工作人员的辐射安全,核电厂要求工作班组负责人使用 γ 辐射仪表对作业场所的 γ 周围剂量当量率进行自主监测,并实时关注作业场所辐射水平的变化,在出现辐射水平异常升高或者突变时,第一时间组织班组成员撤离现场并按照要求汇报。工作结束后,工作负责人需要使用小件物品监测仪或者表面污染监测仪对使用过的 γ 周围剂量当量率仪表进行表面污染测量,测量没有异常后由辐射防护人员进行检查验收。

核电厂需要在现场的仪表贮存处设置用于仪表计量性能检验的放射源,并制定各类型仪表的放射源检验判定标准。根据运行核电厂的经验,出于降低仪表检验用放射源对工作人员的影响以及放射源的管理要求,一般选用豁免源作为现场仪表的检验用放射源。

2.6 监测数据处理

在进行监测任务时,监测仪表读取的数据往往需要进行处理,以获取最终所需要监测对象的测量结果。在监测结果的计算过程中,为了确保监测结果的准确性,往往需要考虑仪表刻度因子,该因子由计量检定员在完成仪表检定后填写在仪表检定证书内。同时,核电厂也会将该因子张贴在仪表上,供现场工作人员在进行测量结果计算时使用。式(1)为刻度因子修正公式。

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \times C_f \quad (1)$$

式中: $\dot{H}$ 为周围剂量当量率的估算值; $\dot{H}_0$ 为周围剂量当量率的仪表读数; C_f 为仪表刻度因子。

3 监测实践典型问题讨论

3.1 仪表重复性

重复性是由于仪表的统计涨落引起的,属于仪表固有的计量特性,无法从根本上彻底消除仪表监测数据因为重复性引入的误差。重复性(变量用 V_i 表示)可以用式(2)表示。

$$V_i = \frac{1}{\bar{H}_i} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^n (H_{ji} - \bar{H}_i)^2} \quad (2)$$

式中: n 为重复测量次数; V_i 为重复性; $\bar{H}_i$ 为第 i 个测量点仪表读数的算术平均值; $\dot{H}_{ji}$ 为第 i 个测量点仪表第 j 次读数。

3.2 相对固有误差

在进行 γ 周围剂量当量率监测时,测量得到的数据都可以看成是一个随机变数,即使所有的测量条件都是稳定的,若进行多次测量所得到的数据也是不完全相同的,而是围绕其约定值上下涨落^[8]。在实际测量中,只能进行有限次测量,即计算得到的算术平均值只能在某种程度上看成是约定值的近似值。测量的次数越多,计算得到的算术平均值就越接近约定值。这就给测量结果带来了误差,影响测量数据的准确度。仪表测量点的相对固有误差(相对偏差)可以用(3)式表示。

$$I_i = \frac{\bar{H}_i - \dot{H}_{ic}}{\dot{H}_{ic}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\bar{H}_i$ 为第 i 个测量点的剂量当量率算术平均值; $\dot{H}_{ic}$ 为第 i 个测量点的剂量当量率约定值。

3.3 讨论

由式(2)、式(3)和表3可知,重复性的计算比较复杂,且重复性要求测量点的剂量当量率不超过仪表有效测量范围下限的11倍,因此,在工作现场很难通过仪表的读数直接判断出重复性是否满足表3的要求,一般只能通过实验室的标准辐射场来判断。但对于相对固有误差,可以通过在工作现场设置检验放射源等措施进行快速判断。在工作中通常可以采用如下措施来确保或者判断仪表的重复性、相对固有误差满足表3的要求:(1)按照JJG 393—2018《便携式X、 γ 辐射周围剂量当量(率)仪和监测仪检定规程》的要求定期开展仪表检定,仪表检定合格后才允许使用;(2)涉及到影响仪表计量性能(如更换探测器等)的维修,在仪表修复后需要重新进行检定,确保仪表的重复性、相对固有误差等满足要求;(3)在工作现场设置检验用放射源(一般选择豁免的Cs-137源),并结合相对固有误差的要求制定出每种型号仪表的判定标准,仪表每次使用前通过检验,用放射源验证仪表的相对固有误差是否满足要求;(4)尽量选择在仪表屏幕上有相对固有误差实时显示的仪表。

4 总结

本文制定的工作场所 γ 周围剂量当量率监测质量控制方法,可以为同行或者相关单位在制定放射性监测的质量控制方法时提供参考和借鉴。当前尚没有 γ 周围剂量当量率监测质量控制的标准文件,各单位在进行质量控制的具体做法上存在一定的差异,后续还需要同行共同努力不断优化和改进监测手段,利用大数据和智能化技术平台,不断完善 γ 周围剂量当量率监测的质量控制方法,提高监测水平。

作者贡献说明 谢卫平提出了本文的研究思路和论文写作;赵喜寰对论文中监测实践典型问题的分析部分提供了指导;陈麟、陈全利对论文的构思作出了贡献。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 李德平,潘自强.辐射防护监测技术[M].北京:原子能出版社,1988:169.
LI Deping, PAN Ziqiang. Radiation protection monitoring technology[M]. Beijing: Atomic Energy

Press, 1988: 169.

- 李宝廷,石二为,李顺福.国内外人员受过量照射的辐射事故分析[J].工业卫生与职业病,2005,31(4):258-259. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7164.2005.04.021.
LI Baoting, SHI Erwei, LI Shunfu. Accident analysis on distribution of excess dose exposure[J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 2005, 31(4): 258-259. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7164.2005.04.021.
- 上伟,王守正,张惠生,等.2003—2018年我院处置的辐射事故病例分析[J].辐射防护,2021,41(1):76-80.
SHANG Wei, WANG Shouzheng, ZHANG Huisheng, et al. Analysis of radiation accident cases handled in our hospital from 2003 to 2018[J]. Radiation Protection, 2021, 41(1): 76-80.
- Keshmiri S, Nabipour I, Assadi M. Covid-19: lessons from hospital preparedness for radiation accidents[J]. World Journal of Nuclear Medicine, 2020, 19(3): 315-316. DOI: 10.4103/wjnm.WJNM_40_20.
- 张子晔.浅论计量检定工作中存在的问题及应对措施[J].科技视界,2021(27):170-171. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2021.27.70.
ZHANG Ziye. A brief discussion on the problems and countermeasures in the measurement and verification work [J]. Science and Technology Perspectives. 2021 (27): 170-171. DOI: 10.19694/j. cnki. issn2095-2457. 2021.27.70.
- 国家市场监督管理总局.便携式X、 γ 辐射周围剂量当量(率)仪和监测仪:JJG 393—2018[S].北京:中国质检出版社,2019.
State administration for market regulation. Portable X, γ radiation around the dose equivalent (rate) meter and monitor: JJG 393—2018 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2019.
- 王亚龙,李宝英,李秉谦,等.仪器仪表设备计量管理与维修[J].现代制造技术与装备,2020(1):181-182. DOI: 10.16107/j.cnki.mmte.2020.0082.
WANG Yalong, LI Baoying, LI Bingqian, et al. Measurement management and maintenance of instruments and equipment[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020(1): 181-182. DOI: 10.16107/j.cnki.mmte.2020.0082.
- 张瑞,史吉隆,邢明磊.影响仪器仪表测量误差的因素分析[J].当代化工研究,2021(4):63-64. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8114.2021.04.029.
ZHANG Rui, SHI Jilong, XING Minglei. Analysis of factors affecting measurement error of instruments and meters[J]. Modern Chemical Research, 2021(4): 63-64. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8114.2021.04.029.