

小型化海洋核应急在线监测系统设计

周程¹, 蒋若澄^{1*}, 李强², 曹鹏涛², 汤晓斌³, 龚频³, 张金钊⁴, 周文清⁴

(1. 江苏省核与辐射安全监督管理中心, 南京 210019; 2. 连云港辐射环境监测管理站, 江苏 连云港 222047;
3. 南京航空航天大学核科学与技术系, 南京 210016; 4. 国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要: 日本福岛事故之后, 海洋核应急技术的发展越来越受到重视。本文以滨海核电厂事故环境下海水核应急监测和常规海洋辐射环境预警监测为目的, 采用小型锚系浮标搭载水下 γ 能谱仪, 研发了一套适应海洋环境、稳定可靠、测量精确的海水放射性在线监测系统, 实现了海水中 γ 剂量率和放射性核素活度浓度的连续在线自动监测, 对我国海洋核应急监测技术的发展具有重要意义。

关键词: 海洋; 核应急; 放射性监测; 剂量率; 放射性核素; 小型化

中图分类号: TL817 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2022)1-0100-05

核电是一种相对清洁能源, 发展核电对优化能源结构、保障能源安全、促进污染减排和应对气候变化具有重要作用。截至 2020 年 12 月底, 我国大陆地区商运核电机组 48 台, 总装机容量 4 988 万 kW, 仅次于美国、法国, 位列全球第三; 在建核电机组 17 台, 在建机组装机容量保持全球第一^[1]。国内商运和在建核电机组几乎全部位于沿渤海湾、黄海、东海和南海。核电厂一旦发生放射性污染, 势必造成极为严重的公共安全事故^[2]。完善海洋辐射监测网络, 强化核电厂放射性流出物对海洋生态环境影响监测, 补齐有核电省份事故早期预警及污染区

快速划定能力建设是各省在 2025 年前完成的重点建设任务之一^[3]。

海洋核应急在线监测技术是一种新型放射性监测技术^[4]。虽然世界各国近年来开展了相关研究与技术开发工作, 但并未形成突破性进展。现存在两方面不足: 一是系统集成度不高, 一般都搭载于直径 3 m 水质浮标平台, 设备造价高、体积大(直径不小于 3 m, 高不小于 4 m)、质量大(约 2 t), 运输和布放难度较大^[5-7], 难以达到应急布放的目的; 二是在海洋环境参数动态变化的条件下, 设备放射性测量数据的准确性和稳定性不佳^[8-11]。本研究针对以上两项技术难点攻关, 研发小型化海洋核应急在线监测系统, 总质量小于 70 kg, 在核应急时双人即可布放。

1 系统设计

1.1 系统组成和工作模式

小型化海洋核应急在线监测系统主要由锚

收稿日期: 2021-04-16

基金项目: 生态环境部核与辐射安全监督管理研究项目(JD202010)、江苏省第五期“333 工程”培养资金资助、江苏省重点研发计划(BE2019727)。

作者简介: 周程(1981—), 男, 四川自贡人, 高级工程师, 主要从事辐射防护与监测研究。

* 通讯作者: 蒋若澄, 男, E-mail: jrc_jnsa@163.com。

系浮标、水下 γ 能谱仪、数据采集控制系统、供电系统、通信系统和岸站接收系统组成,总高1.5 m,直径0.7 m,标体重量小于70 kg,约为常规水质浮标质量的三十分之一。核事故应急监测时,将在线监测系统投放至海上的计划监测点位,利用数据采集控制系统获取水下 γ 能谱仪得到的剂量率与核素数据,连同温湿度、气压、经纬度等数据通过4G网络发送到岸站接收系统,实现监测数据的实时显示和存储。

1.2 水下 γ 能谱仪配置

水下 γ 能谱仪的主要功能为水下 γ 剂量率和 γ 核素活度浓度测量。仪器采用 3×3 in(1 in=25.4 mm)NaI(Tl)晶体探头,通过LED稳谱技术,水下工作时,谱漂不超过 $\pm 2\%$ 。通过小波去噪平滑、对称峰零面积法寻峰和核素识别、非线性最小二乘拟合计算峰面积得到每种核素的活度浓度。剂量率测量采用 γ 能谱 $G(E)$ 函数法转化为剂量率值,结合内嵌的GM管计数,剂量率测量范围为1 nSv/h~10 Sv/h,可完成从环境级到事故级测量。

闪烁晶体探测器受到温度的影响会造成能谱漂移,进而影响测量和分析结果。海水中放射性核素含量较低,采用人工核素稳谱会对测量结果造成较大偏差,而采用天然核素稳谱所需的测量时间长,测量误差大,因此本系统采用LED稳谱,用LED发出的光做参考峰,实时调节探测器高压和增益,得到很好的稳谱效果。为了满足海洋测量环境要求,选用衰减系数小、耐压强度大、耐腐蚀的钛合金壳体对水下 γ 能谱仪整体封装。壳体内部采用铝合金钣金支撑,通过PVC塑料底托与探测器固定,并在固定环周边设置橡胶柱,增强抗震性。

1.3 数据采集控制系统设计

数据采集控制系统是小型化海洋核应急在线监测系统的核心部分,负责系统各部分的数据采集、数据处理、数据存储、数据通信等,同时还负责监控整个系统的工作状态。数据采集控制系统主要由电路、壳体、接线、航空插头等部分组成,系统功能框图见图1。

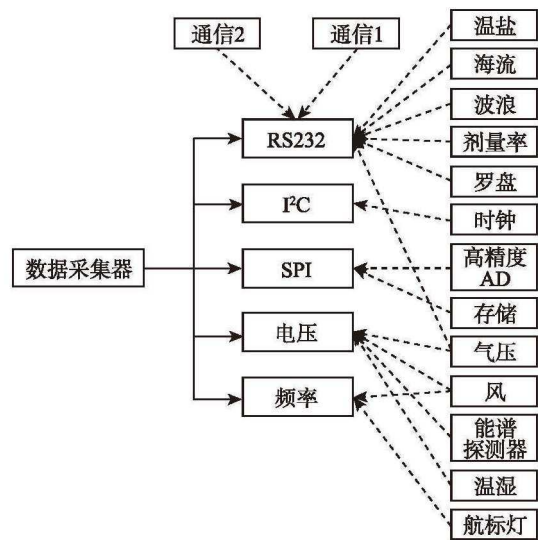


图1 数据采集控制系统功能框图

2 系统溯源刻度

2.1 能量刻度

选取 ^{57}Co (122.1 keV)、 ^{133}Ba (356.02 keV)、 ^{137}Cs (661.7 keV)、 ^{60}Co (1 173.2 keV, 1 332.5 keV)和 ^{152}Eu (121.8 keV, 344.3 keV, 964.1 keV, 1 112.1 keV, 1 408.0 keV)等5种标准点源对水下 γ 能谱仪进行能量刻度。能量刻度时,源与探测器轴向距离不小于25 cm,采用最小二乘法对其进行拟合。

2.2 效率刻度

使用标准液体源水罐实施效率刻度实验。标准液体源液面高2.5 m,直径2.5 m,内含有 ^{60}Co (1 Bq/L)、 ^{137}Cs (1 Bq/L)、 ^{40}K (12 Bq/L)。测量共进行15次,每次1 h。测量前开启水泵,将水罐中的液体搅拌30 min。工作人员穿戴好救生衣、手套等安全防护用品,登上扶梯平台,将水下 γ 能谱仪固定到定位支架上,并使得设备处于水罐中心位置。水泵在实验全程中保持开启状态以保证水罐内溶液的均匀性。利用MC模拟的探测效率刻度曲线计算3种核素的活度浓度,并与参考值进行对比,测量结果见表1。

表 1 标准液体源中实测的放射源活度浓度

序号	活时间/s	总计数	剂量率/ μSv	$^{137}\text{Cs}/\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$	$^{40}\text{K}/\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$	$^{60}\text{Co}/\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$
1	3 574.2	78 242.0	3.55×10^{-3}	1.049	14.422	0.851
2	3 574.8	78 485.0	3.59×10^{-3}	0.918	14.535	0.783
3	3 574.8	78 202.0	3.56×10^{-3}	0.886	12.147	0.822
4	3 575.5	78 445.0	3.59×10^{-3}	0.914	12.905	1.035
5	3 574.8	78 420.0	3.62×10^{-3}	1.055	13.396	1.009
6	3 575.2	78 671.0	3.63×10^{-3}	0.935	13.223	1.091
7	3 574.8	78 312.0	3.54×10^{-3}	1.048	15.591	1.161
8	3 574.8	78 630.0	3.60×10^{-3}	1.074	14.674	0.963
9	3 575.1	78 334.0	3.61×10^{-3}	1.065	13.144	0.771
10	3 574.3	78 507.0	3.54×10^{-3}	0.904	12.984	0.902
11	3 575.0	78 531.0	3.57×10^{-3}	0.851	14.692	0.957
12	3 574.4	78 332.0	3.58×10^{-3}	0.783	12.605	0.874
13	3 575.0	78 343.0	3.56×10^{-3}	0.822	13.555	1.125
14	3 575.0	78 608.0	3.59×10^{-3}	1.035	12.510	1.053
15	3 574.8	78 429.0	3.57×10^{-3}	1.009	14.264	1.000
平均	3 574.8	78 432.7	3.58×10^{-3}	0.957	13.643	0.960

将实验测量结果与参考值相比较, ^{60}Co 、 ^{137}Cs 相对误差均小于 5%, ^{40}K 由于受天然环境本底影响,测量值较参考值偏大,达到 13.7%。实验表明,水下 γ 能谱仪对于人工放射性核素的测量精度可以满足海洋环境水下测量要求。

3 主要性能测试与讨论

3.1 水静压力测试

系统的目标应用场景是海洋环境,耐压深度测试是检验压力容器制造过程中的一个重要环节。本系统按 1 000 m 的标准进行设计,按照《海洋仪器基本环境试验方法 试验 Q 水静压力试验》(HY 016.15—1992)^[12],利用 60 MPa 便携式水静压力实验装置进行测试,在 15 MPa 压力下进行了 1 h 的耐压测试,检验系统结构密封性和仪器的宏观强度。试验结果表明,系统未发生变形,内部无渗漏,系统能够在此水深下工作。

3.2 长期稳定性测试

按照《地面 γ 能谱测量规范》(EJ/T 363—1998)^[13],开展水下 γ 谱仪长期稳定性测试,以评定探测器长期稳定性。每天使用仪器

前后,对 ^{137}Cs 标准源(活度 7 800 Bq,扩展不确定度 3.0%)进行测量,每次测量时间 10 min,取 3 次测量的平均值,实验数据见图 2。结果表明,监测结果与标准源相对误差低于 5%。

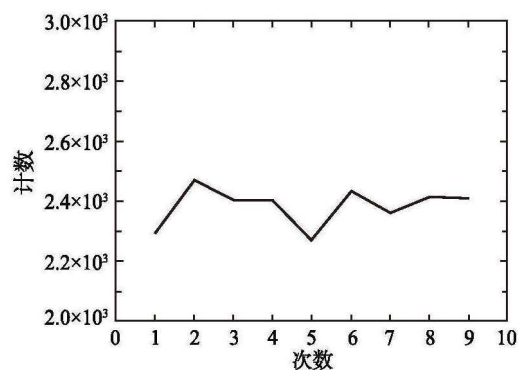


图 2 长期稳定性测试数据图

3.3 短期稳定性测试

按照《地面 γ 能谱测量规范》(EJ/T 363—1998)^[13],开展水下 γ 谱仪短期稳定性测试,以评定探测器短期稳定性。实验采用 ^{137}Cs 标准源(活度 7 800 Bq,扩展不确定度 3.0%)。开机 8 h,在标准放射源上按等时间间隔进行 45 次测量,每次测量时间不少于 5 min。测试

结果表明, ^{137}Cs 计数均方差 σ 为3.30,见图3,远低于标准限值(29.19)。

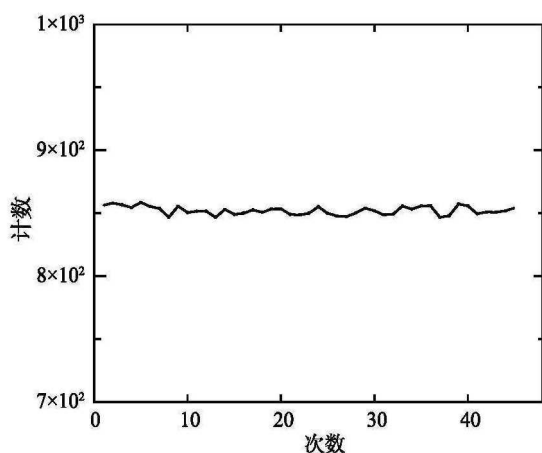


图3 短期稳定性测试数据图

3.4 能量分辨率测试

按照《 γ 谱仪检定规程》(JJG 417—2006)^[14],开展水下 γ 谱仪能量分辨率测试,实验地点为国防科技工业电离辐射一级计量站,测量时间10 min, ^{137}Cs 总计数422 887,计算水下 γ 谱仪能量分辨率为6.7%,优于常规碘化钠探测器的性能指标。

3.5 探测下限测试

按照《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》(GBT 11713—2015)^[15],开展水下 γ 谱仪探测下限测试。测试地点选择远离陆地,海水深度超过3 m,将探测器置于水面以下1.5 m,测量24 h本底能谱,经计算,水下 γ 谱仪海水中 ^{137}Cs 探测下限为 $0.02 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$,满足常规海洋放射性环境预警监测和核电厂事故环境下海水核应急监测要求。

4 结论

本论文完成了小型化海洋核应急在线监测系统设计,并通过了相关的放射性测试与海洋环境适应性实验,达到了设计要求,该系统具有的体积小、质量小、功耗低、测量精度高、工作稳定等优点,便于快捷地布放至海上监测点位,对水下剂量率和放射性核素活度浓度实施在线测量和分析,适用于常规海洋放射性环境预警监测和核电厂事故环境下海水核应急监测,有效提升了核电厂周边海域的海洋放射性监测

能力。

参考文献:

- [1] 中国核能行业协会.中国核能发展报告 2021[EB/OL]. <http://www.caea.gov.cn/n6758881/n6758890/c6811524/content.html>, 2021.
- [2] 周程,张起虹,朱晓翔,等.核电厂放射性流出物监督性监测工作的一些探讨[J].辐射防护,2012,32(03):186-192.
- [3] 环境保护部(国家核安全局).核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标[EB/OL]. http://nnsa.mee.gov.cn/qmgjanjyr/zywj/201704/t20170414_411587.html, 2017.
- [4] 陈立奇,何建华,林武辉,等.海洋核污染的应急监测与评估技术展望[J].中国工程科学,2011,13(10):34-39+82.
- [5] Aakenes U. Radioactivity monitored from moored oceanographic buoys [J]. Chemistry and Ecology, 1995,10(1-2):61-69.
- [6] 冯现东,刘东彦,刘岩,等.基于大浮标的海洋放射性原位监测系统研究[J].海洋技术学报,2019,38(03):51-58.
- [7] Byun J, Choi S, Song M, et al. A large buoy-based radioactivity monitoring system for gamma-ray emitters in surface seawater [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2020,162:109172.
- [8] Jones D G. Development and application of marine gamma-ray measurements: a review [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001,53(3):313-333.
- [9] Bagatelas C, Tsabaris C, Kokkoris M, et al. Determination of marine gamma activity and study of the minimum detectable activity in 4pi geometry based on Monte Carlo simulation [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010,165(1-4):159-168.
- [10] 苏健,曾志,何建华,等.海水放射性监测报警装置对 ^{137}Cs 直接测量的不确定度分析[J].辐射防护,2015,35(01):55-64.
- [11] Zhang Y, Wu B, Liu D, et al. Research on minimum detectable activity (MDA) of underwater gamma spectrometer for radioactivity measurement in the marine environment [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2020,155:108917.
- [12] 中华人民共和国机械工业部.海洋仪器基本环境试验方法—试验Q水静压力试验:HY 016.15—1992[S]. 1985.
- [13] 国家国防科技工业局.地面伽马能谱测量规范:

EJ/T 363—2012[S]. 2013.
[14] 国家质量监督检验检疫总局. γ 谱仪检定规程:
JJG 417—2006[S]. 2006.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中
国国家标准化管理委员会. GBT 11713—2015 高
纯锗 γ 能谱分析通用方法[S]. 2015.

Design of a Miniaturized Marine Nuclear Emergency Online Monitoring System

ZHOU Cheng¹, JIANG Ruo-cheng^{1*}, LI Qiang², CAO Peng-tao²,
TANG Xiao-bin³, GONG Pin³, ZHANG Jin-zhao⁴, ZHOU Wen-qing⁴

(1. Jiangsu Nuclear and Radiation Safety Supervision and Management Center, Nanjing 210019, China;
2. Radiation Environment Monitoring and Management Station of Lianyungang, Lianyungang, Jiangsu 222047, China;
3. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing
210016, China; 4. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: After the Fukushima accident in Japan, the development of marine nuclear emergency technology has received more and more attention. This paper aims at the seawater nuclear emergency monitoring and conventional marine radiation environment early warning monitoring under the accident environment of coastal nuclear power plants, and adopts the method of small moored buoys equipped with underwater gamma spectrometers, and develops a set of suitable marine environment, stable and reliable, and accurate measurement. The seawater radioactivity online monitoring system realizes continuous online automatic monitoring of gamma dose rate and radionuclide activity concentration in seawater, which is of great significance to the development of my country's marine nuclear emergency monitoring technology.

Key words: Marine; Nuclear Emergency; Radioactivity Monitoring; Dose Rate; Radionuclide; Miniaturization