

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.014

基于双探测器的水中放射性实时在线监测装置研制

姜英轩, 田 焯, 孙 侃, 徐 田, 马国杰

(中国人民解放军 32266 部队, 广州 510600)

摘要: 针对水体的放射性监测问题, 提出一种基于双闪烁体探测器的水中放射性连续监测装置。采用双闪烁体联合设计, 整合闪烁体优秀性能, 发挥硬件最大效用, 并在能谱解析和无源效率刻度方面进行优化, 实现超低放射性核素的快速识别和活度测量。结果表明, 该方法可适用于大面积水域的快速巡回测量。

关键词: 双探测器; 溴化镧; 碘化钠; 水中放射性

中图分类号: TJ99 **文献标志码:** A

Development of Real-time On-line Monitoring Device for Radioactivity in Water Based on Double Detectors

Jiang Yingxuan, Tian Ye, Sun Kan, Xu Tian, Ma Guojie

(No. 32266 Unit of PLA, Guangzhou 510600, China)

Abstract: Aiming at the problem of radioactivity monitoring in water, a continuous monitoring device for radioactivity in water body based on dual-scintillator detector is put forward. The combined design of double scintillators is adopted to integrate the excellent performance of scintillators, maximize the effectiveness of hardware, optimize the energy spectrum analysis and passive efficiency calibration, and realize the rapid identification and activity measurement of ultra-low radionuclides. The results show that the method can be applied to the rapid itinerant measurement of large area of water.

Keywords: double detector; lanthanum bromide; sodium iodide; radioactivity in water

0 引言

水体的放射性测量一直以来都是环境辐射测量的重要部分, 2021 年日本向海洋倾倒福岛核事故废水之后, 水体的放射性监测愈加引发国际关注。除了海洋水体的放射性监测以外, 国内目前正在投入力量加强对放射性废水的处理技术研究。不论是自然界的水体还是人工干预的放射性废水, 在其处置过程中都需要对水体的放射性水平进行实时在线监测, 笔者旨在研发一套水中放射性连续监测装置, 以补充在水体放射性测量领域中的实时监测手段, 更好地服务社会, 为保障国家核安全提供技术支持。

1 装置组成及设计方案

水中放射性实时在线监测装置由双闪烁体探测器、能谱采集处理终端和分析软件组成, 用于实时监测水体中的放射性核素种类及含量。双探测器采用大体积的碘化钠探头和溴化镧探头; 能谱采集处理终端实时采集探测器输出信号, 分析并换算为实时测量的水中放射性核素活度浓度及剂量率水平; 分析软件内置高灵敏的核素识别算法, 可实时显示

水体中的剂量率曲线、计数率曲线、核素识别结果及核素剂量率等关键指标, 同时提供核素库编辑、数据存储、数据通信等功能。

1.1 双闪烁体探测器设计

1.1.1 闪烁晶体选择

水中放射性实时在线监测, 对探测器的灵敏度有较高要求, 探测器的灵敏度一方面与晶体的体积正相关, 另一方面与探测器的能量分辨率有关。选用探测效率相对较高的 1.5 L 的碘化钠闪烁体与能量分辨率更为优秀的 2 英寸的溴化镧闪烁体双闪烁体作为装置的关键探测器部件, 分别匹配 CR165 型与 CR160 型光电倍增管, 并封装成独立部件。

1.1.2 探测器结构设计

如图 1、2 所示, 探测器外壳由 316 不锈钢制作而成, 中间采用法兰密封, 只留出一个数据传输接口, 数据接插头采用耐腐蚀防水接头, 可实现水下 100 m 的耐压防水^[1]。针对海水监测的需要, 采用海水防腐涂料 ZS-711 无机防腐涂料, 提高保护壳的耐酸、耐碱、耐高温水汽腐蚀性能。

收稿日期: 2022-08-03; 修回日期: 2022-09-20

作者简介: 姜英轩(1994—), 男, 黑龙江人, 工程师, 从事核辐射监测、核生化防护与洗消研究。E-mail: 470195518@qq.com。

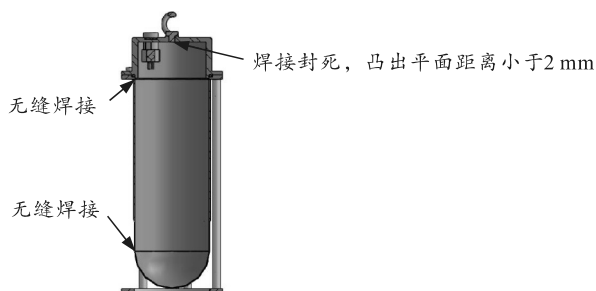


图 1 溴化镧探测器结构



图 2 碘化钠探测器结构

1.1.3 探测器稳谱设计

1) 硬件稳谱设计。

碘化钠或溴化镧晶体探头本身的发光强度会受到环境温度的影响，而探头中的 PMT 会受到地磁场的干扰，打拿级之间的电子流动会产生变化，导致最终电流信号发生改变，产生谱漂^[2]。为提高探测器的测量稳定性，通过设计保温层及选用抗磁金属材料的手段减少环境对探测器的影响。

2) 软件稳谱设计。

碘化钠探测器采用天然本底中的 Tl-208^[3]和 K-40 全能峰进行稳谱，溴化镧探头采用自身本底峰(32 keV 和 1 468 keV)进行稳谱，稳谱效果良好。通过微调放大器增益和调节高压的方式实现了软件稳谱。

1.2 能谱采集处理终端设计

探测器的输出信号需要通过能谱采集处理终端中相应的电子学系统进行收集和处理，转换成数字信号传输至 PC 端，由能谱分析软件解析，最终输出核素识别的结果、核素活度浓度、剂量率等信息。

1.2.1 能谱采集处理终端组成

能谱采集处理终端主要包括前放与多道板、信号传输处理单元和电源及数据传输模块。

1) 前放与多道板：闪烁体发射的荧光经 PMT 光电转化、放大后，信号依然比较微弱，在进行信号采集和处理时，首先需要采用前端处理电路放大，然后送入多道电路板进行处理。表征 γ 信息的信号进入多道分析器，通过信号传输转换后连入计算机进行能谱解析；

2) 信号传输处理单元：目前采用的便携式多道，其信号输出为 RS232 协议，传输距离较短，需

设计 RS232 转 RS485 模块电路板，增加探测数据传输距离；

3) 电源和数据传输模块：此设备在电脑旁边，用于探测器供电和电脑通信。

电路的结构原理如图 3 所示、流程如图 4 所示。

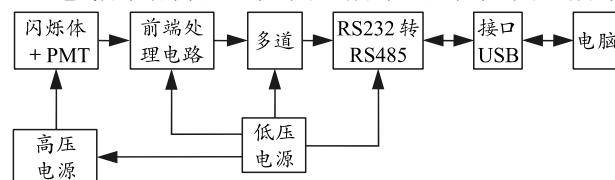


图 3 电路结构原理

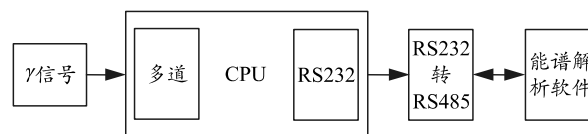


图 4 信号传输处理流程

1.2.2 小型化电路设计

为提高装置测量灵敏度，装置水下部分外壳的体积应尽量小。针对实际测量需求对能谱采集处理终端的水下部分进行了小型化设计。

能谱采集处理终端的水下部分内置关键的电路系统，包括分压板、小型高压模块、小型多道分析器、RS485 数据处理模块，可以完成数据的采集与数字化传输。

供电和数据接收电路这类大功率的电路单独封装成控制盒，测量时放在 PC 电脑旁边，控制盒与水下谱仪之间通过一根 8 芯数据线缆连接。经过电路的分装，水下谱仪的结构缩小。

水下谱仪内置电路如图 5 所示。

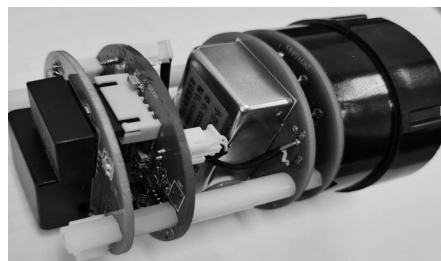


图 5 水下谱仪内置电路实物

2 谱分析技术研究

2.1 能谱解析与极低水平放射性核素识别

针对双闪烁体能量分辨率的性能特点，对能谱解析算法做如下优化：

1) 优化峰拟合算法，具有高斯拟合、前拖尾+高斯拟合、后拖尾+高斯拟合、前拖尾+高斯+后拖尾拟合，可拟合单峰、双峰，最多 7 个全能峰的叠

加峰，并在能谱图上显示拟合效果；

2) 采用基于序贯贝叶斯的方法，充分利用放射性核素的半衰期、特征 γ 射线能量和分支比等信息对核素的存在进行判断，极大地提高了核素识别灵敏度^[3]。

2.2 高灵敏核素识别算法

能谱分析采用基于序贯贝叶斯法的核素识别算法，充分利用了放射性核素半衰期、特征 γ 射线能量和分支比等信息对核素的存在进行判断，具有核素识别速度快、识别下限低的优点，特别适用于极低水平核素的快速识别。

序贯贝叶斯核素识别算法将放射性核素的每条特征 γ 射线视为一个独立的单能 γ 源，利用贝叶斯算法对每个光子的半衰期、特征 γ 射线能量和分支比信息进行考察，把属于同一单能源的光子归为一个光子事件组，形成一个辐射脉冲序列；然后根据预设的参数分析光子序列，利用序贯概率比检验计算核素存在的概率；最后综合多种单能射线源的计算结果，判断是否检出了放射性核素^[3-4]。

2.3 探测效率刻度研究

装置的测量效果会受到样品的几何尺寸、样品与探测器之间的距离、样品材质、屏蔽层等诸多因素影响。针对水下环境的放射性测量而言，水体的材质和密度是固定的(忽略因温度和杂质含量导致的水体密度变化)，影响探测效率的主要为水体的大小，即探测器在水中的相对位置。当水体的尺寸大于临界尺寸时，探测效率曲线固定不变。对于不满足饱和和效率探测条件的测量水体，可通过蒙卡模拟现场进行计算，求得准确的探测效率曲线^[5]。

采用蒙卡方法模拟得到探测效率曲线，并利用 KCL 水溶液进行饱和和探测效率的测试，验证蒙卡模拟的准确性，并对模拟值进行校准刻度，最终得到如图 6、7 所示的探测效率曲线。

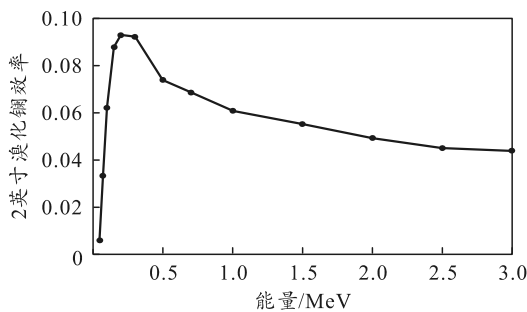


图 6 溴化铯探测器的效率曲线

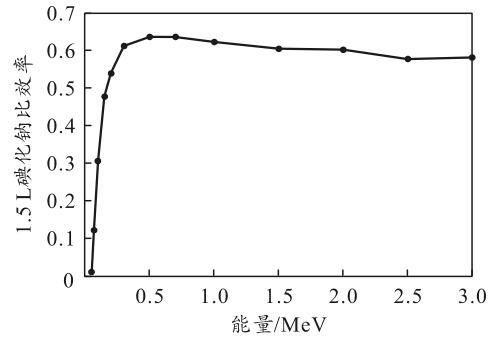


图 7 碘化钠探测器的效率曲线

3 装置达到的性能指标

水下谱仪性能参数如表 1 所示。

表 1 水下谱仪性能参数

项目	NaI(Tl)	LaBr3(Ce)
探测器	1.5 L 碘化钠	2 英寸溴化铯
射线类型	γ 射线	γ 射线
能量范围/MeV	0.03~3.0	0.03~3.0
γ 射线的剂量率范围/(nGy/h)	10~100 000	10~100 000
剂量率不确定度/%	± 30	± 30
多道分析器道数	4 096	4 096
能量分辨率/%	7.45	2.77
读数更新时间/s	≥ 1	≥ 1
防水/m	20	20
自动能量刻度	有	有
无源效率刻度	内置饱和效率曲线	内置饱和效率曲线
核素库	自由编辑	自由编辑
可预置报警阈值	剂量率报警、核素报警	剂量率报警、核素报警

4 结束语

采用双探测器的设计，研制一套水中放射性实时在线监测装置，并在能谱解析和无源效率刻度方面进行优化，实现了超低放射性核素的快速识别和活度测量。该装置既可适用于大面积水域的快速巡回测量，又可用于核电站流出物、实验室流出物、地表水、地下水、饮用水等水体的放射性实时连续监测。

参考文献：

[1] 姜英轩, 李企良, 田焯, 等. 水下伽马谱仪的外壳结构: 13807993[P]. 2021-07-30.

[2] 陈伯显, 张智. 核辐射物理及探测学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 42.

[3] 刘勇刚. γ 能谱数据分解方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.

[4] 庞巨丰. γ 能谱数据分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1990: 110-137.

[5] 金惠民, 艾大芝, 夏益华, 等. 用 NaI(Tl)探测器在线测定大体积水中的 γ 弱放射性[J]. 原子能科学技术, 1989, 23(1): 20.

