

水体放射性在线监测系统校准装置设计

郭生良¹ 向叶舟² 葛良全² 邓晓钦³ 王亮³ 罗明涛¹ 赖茂林² 朱小铰³

1(成都新核泰科科技有限公司 成都 610052)

2(成都理工大学 地学核技术四川省重点实验室 成都 610059)

3(四川省辐射环境管理监测中心 成都 610031)

摘要 水体放射性在线监测系统在长时间不间断地工作中,由于探测器和各种电子元件温度变化、元器件老化等原因会造成谱线漂移、谱线展宽和峰位变化,导致谱线解析困难和解析结果误差变大。针对基于溴化铯探测器的水体放射性在线监测系统,研制了一种在线校准谱线漂移的附加装置,该装置由¹³⁷Cs(豁免源)、铅挡块、校准孔、直线电机和铅屏蔽层组成。校准孔最佳的开孔半径和铅挡块最佳厚度通过蒙特卡罗模拟得到,分别为2.2 cm和5 cm;使用标准豁免级¹³⁷Cs源作为标准参考峰,通过软件对¹³⁷Cs全能峰峰位漂移及峰面积进行分析,计算增益,实时调节参数等完成峰位及峰面积的校准。最后用该装置进行现场应用验证,结果表明该装置能够把系统测量谱线的峰位变化控制在±1%以内,峰面积变化控制在±5%以内。

关键词 水体放射性在线监测系统, 刻度校准, 谱线漂移, 蒙特卡罗模拟

中图分类号 TL81

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010401

Design of calibration device for real-time on-line monitoring system of water radioactivity

GUO Shengliang¹ XIANG Yezhou² GE Liangquan² DENG Xiaochin³
WANG Liang³ LUO Mingtao¹ LAI Maolin² ZHU Xiaojiao³

1(Newray Technology Co. Ltd., Chengdu 610052, China)

2(Key Laboratory of Applied Nuclear Techniques in Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

3(Radiation Environmental Management and Monitoring Center of Sichuan Province, Chengdu 610031, China)

Abstract [Background] In the long-term uninterrupted work of the real-time on-line monitoring system of water radioactivity, the spectrum drift, line broadening and shift of peak position are caused by the temperature change of the detector and various electronic components and the aging of components, which leads to the difficulty of spectral line analysis and the error of analytical results. [Purpose] This study aims to develop a calibration device for real-time on-line monitoring system of water radioactivity based on cerium bromide detector. [Methods] The device was designed to consists of ¹³⁷Cs standard source (exemption source), lead block, lead chamber with calibration hole and linear motor. The optimum opening radius of the calibration hole and the optimum thickness of the lead block were obtained by Monte Carlo simulation. The standard ¹³⁷Cs source was used as the standard reference peak, and the calibration of peak position and peak area, the peak position drift and peak area of ¹³⁷Cs full-energy peak was analyzed by software with real-time gain calculation and parameters adjustment. Finally, the device was applied to the field application verification. [Results & Conclusions] Results of Monte Carlo simulation indicate that the optimum radius of the calibration hole is 2.2 cm and the optimum thickness of the lead block is 5 cm. The verification

国家重点研发计划(No.2017YFC0602102)、四川省重点研发计划(No.2021YFG0105)、四川省科技计划(No.2020YJ0334)资助

第一作者:郭生良,男,1981年出生,2008年于成都理工大学获硕士学位,研究领域为核技术及应用,E-mail:13831779@qq.com

收稿日期:2022-05-10,修回日期:2022-09-26

Supported by National Key R&D Program of China (No.2017YFC0602102), Key R&D Program of Sichuan Province (No.2021YFG0105), Sichuan Science and Technology Program (No.2020YJ0334)

First author: GUO Shengliang, male, born in 1981, graduated from Chengdu University of Technology with a master's degree in 2008, focusing on nuclear technology and applications, E-mail: 13831779@qq.com

Received date: 2022-05-10, revised date: 2022-09-26

results shows that the device can limit the change of peak position and peak area to $\pm 1\%$ and $\pm 5\%$, respectively.

Key words Real time online monitoring system for water radioactivity, Spectral calibration, Spectral line drift, Monte Carlo simulation

水资源是人类赖以生存的必需资源,根据国家《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2022)^[1],水中总 α 放射性不超过 $0.5\text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$,总 β 放射性不超过 $1\text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水中的放射性的来源主要有:核电站、研究堆等核设施的液态流出物;地质体天然放射性元素的析出,如铀系列、钍系列、钍铀系列、 ^{40}K 等;还有核试验、核事故引起的降尘等。目前,传统的水体放射性监测方式为定期采样与实验室分析,其分析的周期较长、操作繁琐、时效性差,难以实现及时预警监测。采用在线 γ 能谱测量技术实时监测水体中的放射性水平,将极大提升核事故应急效率,保障公众辐射安全和社会稳定^[2-6]。

水体放射性在线监测系统就是利用这一技术开发,该系统是把被测水样抽取到铅室中,利用探测器对水体中放射性核素进行探测。由于该监测系统需不间断工作,其中探测器晶体和各种电子元器件温度受内外部因素影响发生变化。晶体发光效率会受温度的影响造成谱漂移,二极管、电阻、电容等电子元件都会受温度影响,造成谱线展宽和峰位发生变化,导致谱线解析困难和强度测量的误差^[7]。传统的测量系统一般使用天然本底核素(K、U、Th)进行稳谱,或者通过找到温度变化与放大倍数的规律,通过建立数学模型等进行谱线校准。但在铅室中,天然本底核素放射性较弱,导致需要很长时间才能

实现较高谱线校准精度。所以,研究一种在线校准装置使其可以在低本底情况下实现谱线校准就十分必要^[8-11]。

1 水体放射性在线监测系统

水体放射性在线监测系统可通过抽取被监测流域水样,分析计算出水体放射性核素(^{40}K 、 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{214}Bi 、 ^{208}Tl 和 ^{137}Cs 等)的活度浓度,通过水体中总 γ 活度来反演计算出总 α 、 β 活度。利用能谱分析方法能够连续监测水中的各放射性元素的活度浓度并且在远程微机上实时显示、记录和分析测系统测量结果。如图1所示,水体不间断取样由两个交替运行的抽水泵来实现,可以连续从采样点把水样抽取到铅室内,铅室中放有探测器对样品进行放射性核素监测,若该样品合格则通过管道回路排出到取样地,若不合格则储存在污染水池进行处理和分析^[12-13]。由于在水体监测过程中,常用的探测器类型为NaI(Tl)、HPGe(高纯锗)、 CeBr_3 (溴化铯),探测效率与能量分辨率是决定测量结果准确性的关键,综合考虑,选用能量分辨率及探测效率均比较优秀的溴化铯探测器,探测器相对探测效率大于132%(7.6 cm NaI、1.33 MeV, ^{60}Co),能量响应范围为30 keV~3 MeV,能量分辨率为对系统662 keV峰(^{137}Cs)在4.21%左右。该系统结构如图1所示。

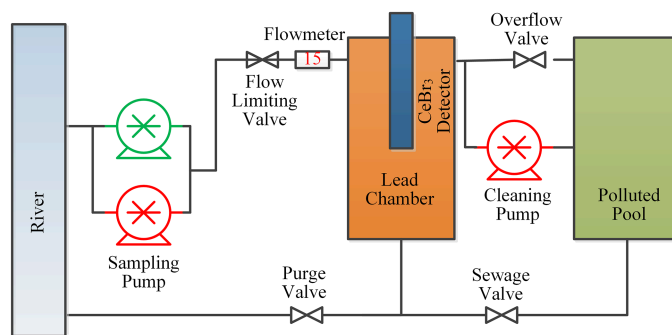


图1 水体放射性在线监测系统
Fig.1 Structure diagram of real-time on-line monitoring system of water radioactivity

2 在线校准装置的设计

在线校准装置由校准源、屏蔽层、滑动铅块、直线电机、校准孔组成。装置基于水体放射性在线监测系统运行,三个溴化铯探测器呈正三角形摆放于铅室正中央。在铅室铅壁上开校准孔,用于探测器接收校准源放出的射线;在校准孔外侧放置校准源,

根据校准源放出的射线,形成校准谱线时的参考峰;校准孔设置可遮挡校准源的滑动铅块,用于实现校准装置的开关状态;校准源周围设置屏蔽层,用于屏蔽校准源对周围环境的影响;校准装置的结构如图2所示。通过软件设置校准周期,控制直线电机,使其移动铅挡块使校准孔打开或被遮挡,实现校准功能开关状态的自由切换。工作结构如图3所示。

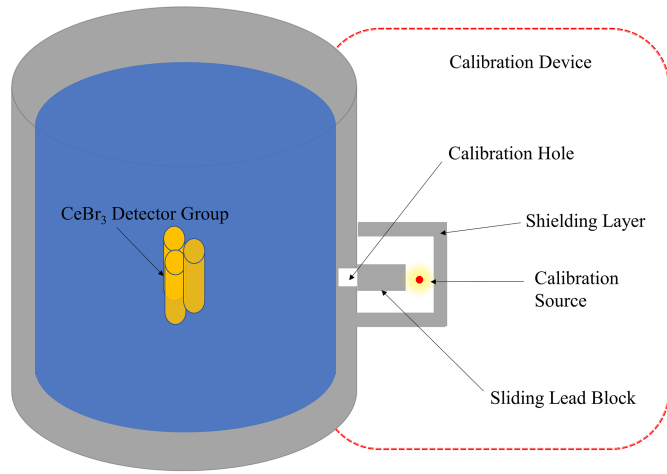


图2 校准装置示意图
Fig.2 Diagram of calibration device

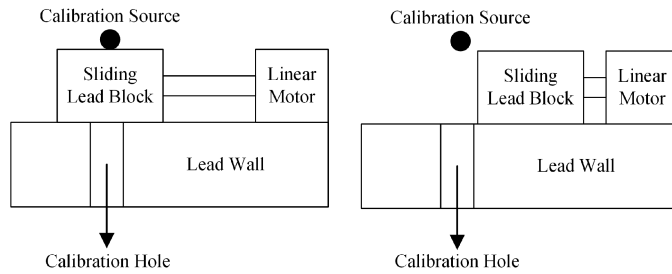


图3 校准装置工作原理示意图
Fig.3 Diagram of working principle of calibration device

当谱峰发生漂移时,软件会根据计数率、峰形等条件,查找并识别校准源特征峰,对其实时峰位和理论峰位进行判断,如果发生漂移,通过计算并设置软件增益,将特征峰拉回标准位置,再进行上位机解

谱,输出稳谱后的谱线。如果未发生漂移,直接解谱输出谱线,并生成谱线质量报告,校准装置工作原理流程如图4所示。

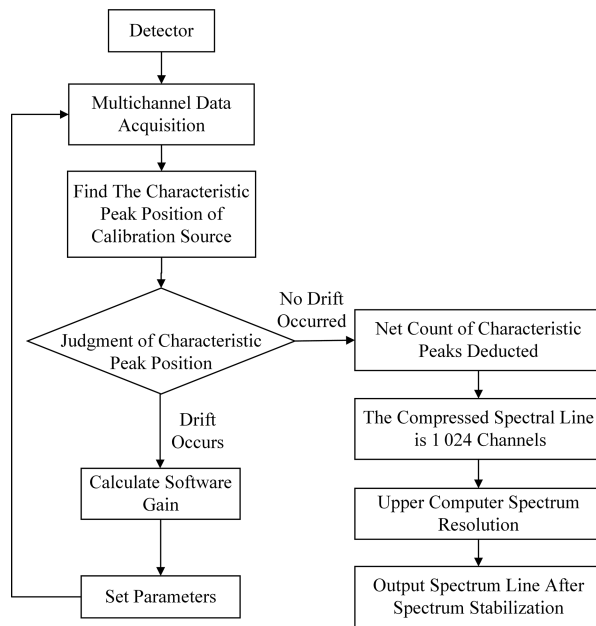


图4 装置工作流程
Fig.4 Working flow of the device

3 校准装置中各部分参数研究

在校准装置的设计过程中,考虑到各方面因素,首先要保证校准装置的有效性和准确性,形成的校准源谱峰越稳定,校准的可靠性越高,影响校准源特征峰稳定性的主要因素是探测器对校准源的探测效率。决定源探测效率的主要参数是校准源发射的 γ 射线能量和源对探测器的立体角的大小,通过蒙特卡罗模拟选取了最适合用来做校准的放射源,并且模拟计算出校准源的最佳摆放位置和铅室开孔的半径大小,由于在水体放射性在线监测系统正常运行时,需要对校准源进行屏蔽,否则会影响系统测量结果的准确性,从而进行了滑动铅块厚度的模拟计算^[14-17]。

3.1 校准源的选取

探测器对校准源的探测效率越高,短时间内形成的谱峰越明显,更利于校准谱峰的漂移。使用蒙特卡罗方法,首先对水体放射性在线监测系统中的铅室及探测器进行等尺寸大小及运行条件建模,分别设置铅室中充满水,并将其设置为各向同性的体源,射线能量设置见表1。模拟中使用F8卡进行计数,根据模拟结果求出探测效率,得到溴化铯探测器系统正常运行时在能量为59.5~2 614.7 keV的全能峰探测效率曲线,如图5所示;探测器对能量为300 keV左右的能量探测效率最高。校准源需要具备:半衰期长;产生的能量射线不会影响被测的对象的 γ 谱线。探测器对其产生的参考峰的探测效率

表1 各核素对应的特征峰能量
Table 1 Characteristic peak energy corresponding to each nuclide

核素 Nuclide	特征峰 Peak energy / keV
²⁴¹ Am	59.537
²³⁸ U	66.376
¹³³ Ba	80.997, 276.4, 302.851, 356.013
¹⁵² Eu	121.782, 344.279, 778.904, 964.079, 1 085.869, 1 112.069
⁵⁷ Co	122.06, 136.48
²³⁵ U	143.76, 185.72
²²⁶ Ra	186.21
¹³¹ I	284.3, 636.97
¹⁹² Ir	295.96, 308.46, 316.51, 364.48, 468.07
²⁰⁸ Tl	510.84, 583.84, 860.37, 2 614.7
²² Na	511, 1 274.5
²¹⁴ Bi	609.31, 1 120.3, 1 764.5
¹³⁷ Cs	661
⁶⁰ Co	1 170, 1 330
⁴⁰ K	1 460

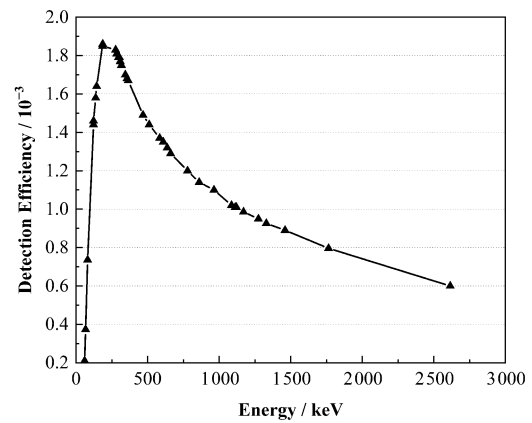


图5 能量-效率曲线
Fig.5 Energy-efficiency curve

高。分析常见的 γ 放射源的特性,根据国家环保总局发布的《电离辐射防护与辐射源安全标准》(GB 18871—2002)最终选取¹³⁷Cs(豁免源,活度为 9.87×10^3 Bq,相对扩展不确定度为3.5%)作为校准源^[18]。该源的半衰期为30 a,稳定性强,而且处于低能段,散射造成的影响较小,且探测器对其源峰的探测效率相对较高,可以较快生成参考峰实现及时的刻度校准。

3.2 开孔半径和校准源位置的模拟计算

3.2.1 理论基础

使用MCNP程序来进行探测效率的模拟计算模拟校准源为放出的 γ 光子能量为0.661 MeV的各向同性源,对光子和电子进行全程跟踪,包括次级反应,用F8卡和E8卡记录特征峰对应道址产生的能量脉冲和计数率,从而求出源峰探测效率。通过模拟计算不同条件下校准装置中探测器的源峰探测效率,即^[19-20]:

$$\varepsilon_{sp} = \omega \cdot \varepsilon_{inp} \quad (1)$$

式中: ε_{sp} 为源峰探测效率; ε_{inp} 为本证探测效率; ω 为几何因子;

几何因子为入射到探测器灵敏体积的粒子数与源发射的粒子数之比,即:

$$\omega = N_0/N = \frac{A \cdot t \cdot P_\gamma \cdot \frac{\Omega}{4\pi}}{A \cdot t \cdot P_\gamma} = \frac{\Omega}{4\pi} \quad (2)$$

式中: N 为入射在探测器灵敏体积上的粒子数; N_0 为探测器计数; A 为源的活度; P_γ 为光子发射概率(分支比); t 为测量时间; Ω 为整个探测器晶体对校准源所张立体角。

即:

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{inp} \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \quad (3)$$

由式(3)可知,源峰探测效率只与探测器晶体对校准源所张立体角有关。

图6中 θ 为放射源与校准孔夹角的一半, D 为放射源到铅室外侧的径向距离, l 为铅室厚度, r 为校准

孔半径, L 为探测器左侧与铅室内侧的径向距离, L_0 为探测器左侧到校准孔入射方向最大剖面面积的距离, H 为探测器的高, Φ 为探测器的半径。

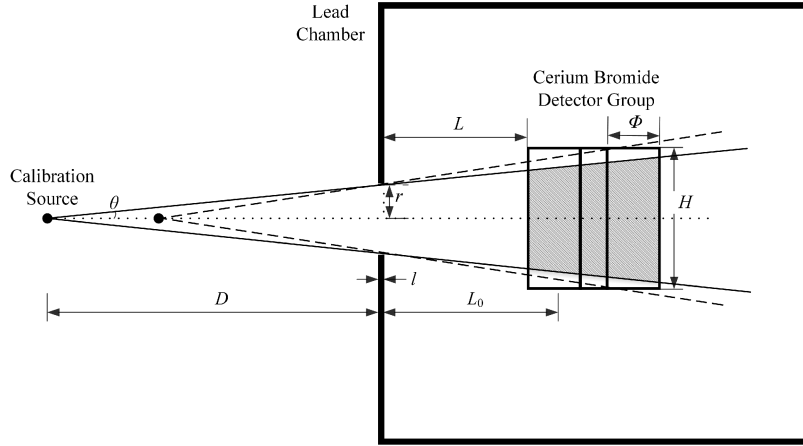


图6 校准装置模型示意图
Fig.6 Diagram of calibration device model

如图6所示,探测器通过校准孔对放射源所张立体角可看作顶角为 2θ 的圆锥的立体角,即:

$$\Omega = \int_0^{\theta} \sin \theta' d\theta' \int_0^{2\pi} d\phi \quad (4)$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta) \quad (5)$$

对点源有:

$$\cos \theta = \frac{D + l}{\sqrt{(D + l)^2 + r^2}} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)积分,得到:

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{D + l}{\sqrt{(D + l)^2 + r^2}}\right), r \leq \frac{H(D + l)}{2(D + L_0 + l)} \quad (7)$$

由于三个探测器摆放朝向对距离有一定的影响,经过计算其中 L_0 的范围为:

$$L + \frac{1}{2}\Phi \leq L_0 \leq L + \frac{(\sqrt{3} + 1)}{2}\Phi \quad (8)$$

由于 l 为定值,由式(7)可知,源对探测器所张立体角(探测器对源的探测效率)与源到校准孔的垂直距离和校准孔的半径有关。在 r 与 D 均满足式(7)关系时, D 值越小, r 值越大,探测器相对于校准源的立体角越大,即探测器对校准源的探测效率越大。

对立体角计算式(7)中校准孔半径 r 和源到校准孔的距离 D 进行讨论,取不同参数的两者对整个模型立体角的影响见图7。

当小孔半径一定时,源与校准孔距离越小,模型立体角越大,并且随着距离的增大,立体角的变化趋

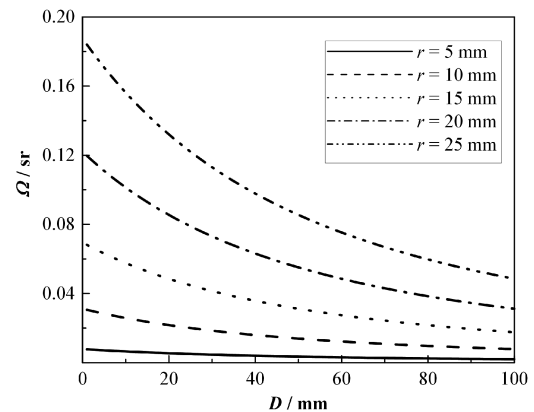


图7 小孔半径 r 和源到校准孔的距离 D 对立体角 Ω 的影响
Fig.7 Effect of small hole radius and distance from source to calibration hole on solid angle

势逐渐减小。当源到校准孔的距离一定时,孔径越大,立体角越大,且随着孔径的增大,立体角变化趋势越快。由此可以得出,源到校准孔的距离越小、小孔半径越大,整体装置的立体角越大,增幅也越大。

3.2.2 模拟模型的建立

刻度校准装置的模拟模型如图8所示,以三个溴化铯探测器下平面正中心为圆点,建立模型,铅室的高度为800 mm,厚度为120 mm,铅室内径为600 mm,外径为800 mm,铅内外均由12 mm的钢外壳包裹。探测器由高为410 mm,半径为70 mm的不锈钢支撑架固定,三个溴化铯探测器呈正三角形摆放于铅室正中心,探测器的溴化铯晶体尺寸为 $\varnothing 51 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$,晶体外部由2 mm的铝壳包裹。

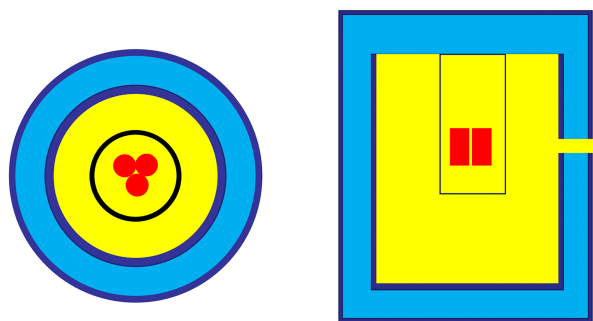


图8 刻度校准装置模拟模型示意图
Fig.8 Diagram of simulation model for calibration device

3.2.3 校准源位置的模拟计算

将开孔半径 r 设置为固定值 (2.5 cm), 模拟校准源在距校准孔不同距离时, 探测器对源峰的探测效率变化。初始将校准源放置在距校准孔圆心 1 cm 的同一水平线上, 设置参数, 按 1 cm 逐步递增, 观察源峰探测效率的变化, 如图 9 所示; 随着源相对校准孔距离的增加, 探测器对源的探测效率逐渐下降, 与理论相符。

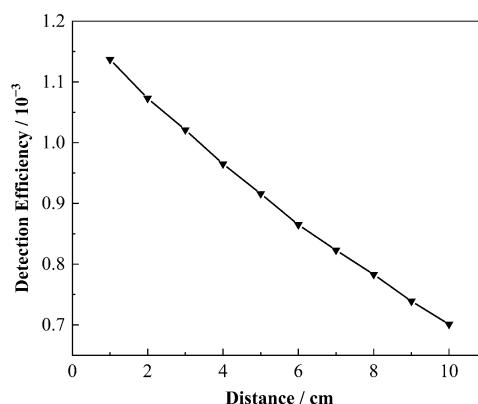


图9 校准源位置与探测效率的关系
Fig.9 Relationship between calibration source position and detection efficiency

3.2.4 滑动铅块厚度模拟计算

根据上述模拟, 建立校准孔半径 r 为 2.5 cm, 表面积尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的铅挡块模型, 依次增加挡块厚度, 校准源紧贴滑动铅块外侧与校准孔位于同一水平线, 计算探测器对校准源的源峰探测效率, 通过观察探测器的相对探测效率, 计算屏蔽效果, 选取最佳的铅挡块厚度 (表 2)。

表2 蒙特卡罗模拟得出滑动铅块厚度对探测效率的影响

Table 2 Monte Carlo simulation shows the influence of sliding lead block thickness on detection efficiency

滑动铅块厚度 Thickness of sliding lead block / cm	有滑动铅块屏蔽下探测器 对 ^{137}Cs 的探测效率 Detection efficiency of ^{137}Cs under the shielding of sliding lead block	无滑动铅块屏蔽下探测器 对 ^{137}Cs 的探测效率 Detection efficiency of ^{137}Cs by detector without sliding lead block shielding	与无屏蔽状态相比探测效率减少的百分比 Percentage reduction in detection efficiency compared to unshielded state / %
1	3.432×10^{-4}	1.137×10^{-3}	69.82
2	1.022×10^{-4}	1.073×10^{-3}	90.48
3	2.87×10^{-5}	1.021×10^{-3}	97.19
4	8.775×10^{-6}	9.65×10^{-4}	99.08
5	2.375×10^{-6}	9.16×10^{-4}	99.74

通过模拟计算结果可知, 滑动铅块厚度在 5 cm 时, 探测器对校准源的探测效率相对于无滑动铅块遮挡时减少了 99.74%, 可以说明, 系统在正常运行时几乎不受到校准源的影响。

3.2.5 开孔半径的模拟计算

将校准源设置在探测器中心同一水平线上, 距铅室直线距离为 5 cm 处, 在保证校准源位置不发生改变的情况下, 模拟在开孔半径增大的情况下, 溴化铯探测器对 0.662 MeV 特征峰的探测效率的变化, 开孔半径从 11 mm 开始, 按 1 mm 依次递增, 记录不同半径下探测器对源峰的探测效率, 如图 10 所示, 随着开孔半径增大, 探测器的源峰探测效率逐渐增大, 当开孔半径增加到 2.2 cm 后, 探测器的源峰探测效率几乎不在发生改变。

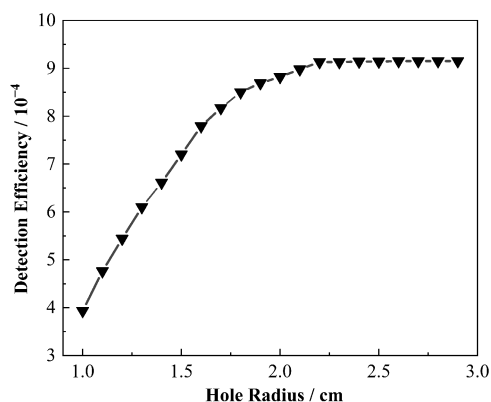


图10 开孔半径与探测效率的关系
Fig.10 Relationship between opening radius and detection efficiency

4 现场应用

4.1 系统本底测试

校准装置安装后,由于校准源在铅屏蔽的状态下也会对系统测量结果造成一定影响,需计算校准源对测量结果的影响,并根据影响程度进行校正。系统中本底来源主要有自然环境和宇宙中在通过铅

室屏蔽后衰减的 γ 射线,在安装校准装置后,系统本底中会增加校准源在通过屏蔽层衰减后 γ 射线,在铅室中装满纯净水,分别记录小孔打开和关闭1 h时探测器对校准源(^{137}Cs)的峰位和计数,计算求出总计数率,分析放置校准源后系统本底的变化,从而计算校准源对结果的影响,结果如表3所示。

表3 校准装置本底测试(1 h)
Table 3 Background test of calibration device (1 h)

		^{137}Cs 峰位 ^{137}Cs peak position	^{137}Cs 能窗总计数率 ^{137}Cs energy window count rate	平均值 Average value	
未放置校准源 Calibration source not placed	校准孔打开 Calibration hole open	465	0.142	0.138	
		465	0.138		
		465	0.133		
	校准孔关闭 Calibration hole close	465	0.115		
		465	0.111	0.108	
		465	0.099		
放置校准源 Place calibration source	校准孔打开 Calibration hole open	465	0.523		0.536
		464	0.550		
		465	0.533		
	校准孔关闭 Calibration hole close	465	0.184		
		465	0.188	0.187	
		465	0.189		

从表2可知未加校准源,校准孔处于关闭状态下,铯窗本底计数率为 0.108 s^{-1} ,安装校准源后,校准孔处于关闭状态下,铯窗本底计数率为 0.187 s^{-1} ,计数率变化较小,由此可知校准源在系统正常运行时,对系统测量结果贡献极少,在检测水体中铯浓度时,可根据实验结果进行校正。

4.2 实际应用

将在线校准装置安装于系统中后,系统连续运行一个月,选取其中部分数据,如表4所示; ^{137}Cs 峰位变化在 $\pm 1\%$ 以内, ^{137}Cs 峰全能峰总计数相对变化率在 $\pm 5\%$ 以内。在线校准装置达到了预期目标。

表4 实测校准数据
Table 4 Measured calibration data

校准时间 Calibration time	^{137}Cs 标准峰位 ^{137}Cs standard peak position	校准后 ^{137}Cs 峰位 ^{137}Cs peak position after calibration	峰位偏差 Peak position deviation / %	^{137}Cs 峰全能峰标准总计数 Total standard count of ^{137}Cs peak	校准后 ^{137}Cs 峰全能峰总计数 Total count of ^{137}Cs peak after calibration	^{137}Cs 峰全能峰总计数相对变化率 Total totipotency peak relative change rate of ^{137}Cs / %
2020/11/25	464	467	0.22	200	204	2.00
2020/12/1	464	467	0.65	200	203	1.50
2020/12/8	464	462	0.65	200	191	-4.50
2020/12/14	464	461	-0.43	200	208	4.00
2020/12/23	464	463	-0.65	200	200	0.00
2020/12/30	464	465	-0.22	200	209	4.50

5 结语

通过模拟计算和实际验证,确定了在线校准装置各部分参数,校准孔半径设置为2.2 cm,滑动铅块厚度设置为5 cm,校准源摆放位置为紧贴滑动铅

块外侧距校准孔外侧径向距离为5 cm,将在线校准装置安装在系统中后,通过一个月连续不间断运行,峰位变化在 $\pm 1\%$ 以内,峰面积变化在 $\pm 5\%$ 以内。解决了系统由于温度、硬件等原因发生谱线漂移问题,提高了系统测量的稳定性和精确性。

作者贡献声明 郭生良：论文撰写，提出研究思路、制定实验方案、参与实验；向叶舟：制定实验方案、参与实验，数据收集与处理；葛良全：全程给予指导意见，修订最终版论文；邓晓钦：背景调查，对实验方案进行指导和监督，参与实验；王亮：参与实验，做了装置设计方面的相应工作；罗明涛：参与实验，做了数据模拟测量方面的相应工作；赖茂林：背景文献调研；朱小纹：提出相应意见并修改论文。

参考文献

- 1 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration of Market Supervision and Administration, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- 2 郭生良, 熊茂淋, 葛良全, 等. 水体在线放射性测量系统阵列溴化铯闪烁探测装置优化[J]. 核技术, 2021, 44(11): 110203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110203.
GUO Shengliang, XIONG Maolin, GE Liangquan, *et al.* Optimization of array CeBr₃ scintillation detection device for water on-line radioactivity measurement system[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(11): 110203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110203.
- 3 赵奎. 水体放射性在线监测系统设计和分析方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
ZHAO Kui. Design and evaluation of on-line monitoring system for water radiation[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- 4 徐立鹏. 水体在线 γ 能谱测量关键技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
XU Lipeng. Research on the key technologies of online gamma-energy spectrum measurement of water[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- 5 徐园, 孔海宇, 王希涛, 等. 水体环境中的放射性污染及测量[J]. 核安全, 2020, 19(1): 75 - 79. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2020.01.009.
XU Yuan, KONG Haiyu, WANG Xitao, *et al.* Radioactive pollution in water environment and its measurement[J]. Nuclear Safety, 2020, 19(1): 75 - 79. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2020.01.009.
- 6 朱珠. 水体 α/β 放射性在线探测技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
ZHU Zhu. Research on the on-line detection technology of α/β radioactivity in water[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- 7 屈国普, 凌球, 郭兰英, 等. NaI(Tl)闪烁谱仪谱漂移原因分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2005, 19(1): 47 - 50. DOI: 10.19431/j.cnki.1673-0062.2005.01.012.
QU Guopu, LING Qiu, GUO Lanying, *et al.* Analysis of the cause for the spectrum-drifting of NaI(Tl) scintillation spectrometer[J]. Journal of Central-South Institute of Technology (Science and Technology), 2005, 19(1): 47 - 50. DOI: 10.19431/j.cnki.1673-0062.2005.01.012.
- 8 李江坤, 李艺舟, 刘士凯, 等. 基于 ${}^7\text{Be}$ 峰的航空 γ 能谱稳谱方法研究[C]//中国核科学技术进展报告(第七卷)——中国核学会2021年学术年会论文集第1册(铀矿地质分卷、铀矿冶分卷). 烟台, 2021: 225 - 232.
LI Jiangkun, LI Yizhou, LIU Shikai, *et al.* Study on the stable spectral method of aerial γ -energy spectrum based on ${}^7\text{Be}$ peak[C]//Progress Report on Nuclear Science and Technology in China (Volume 7) - Proceedings of the Annual Conference of the Chinese Nuclear Society 2021, Volume 1 (Uranium Geology Sub-volume, Uranium Mining and Metallurgy Sub-volume). Yantai, 2021: 225 - 232.
- 9 刘靖楠. NaI γ 能谱修正及其全谱定量分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2021.
LIU Jingnan. Correction and total spectral quantitative analysis of NaI γ spectra[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2021.
- 10 谢奇林, 白立新, 张一云, 等. NaI(Tl) γ 能谱分析中谱漂移的分时动态修正方法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2003, 40(3): 502 - 506. DOI: 10.3969/j.issn.0490-6756.2003.03.023.
XIE Qilin, BAI Lixin, ZHANG Yiyun, *et al.* A time-dividing dynamic modification method of spectrum-drifting in the analysis of NaI(Tl) spectrum[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2003, 40(3): 502 - 506. DOI: 10.3969/j.issn.0490-6756.2003.03.023.
- 11 谷懿. 航空 γ 能谱测量大气氡校正方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
GU Yi. Study on radon influence estimation in airborne gamma-ray spectrometry[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- 12 曾国强, 朱珠, 葛良全, 等. 水体 γ 放射性测量中高纯锗探测效率刻度[J]. 核技术, 2017, 40(12): 120402. DOI:

- 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.120402.
ZENG Guoqiang, ZHU Zhu, GE Liangquan, *et al.* Efficiency calibration of HPGe detector used in water γ radioactivity measurement[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(12): 120402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.120402.
- 13 孙高山, 葛良全, 管弦, 等. 基于HPGe水体在线 γ 测量估计水体总 α/β 比活度[J]. 四川环境, 2019, **38**(1): 120 - 124. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2019.01.020.
SUN Gaoshan, GE Liangquan, GUAN Xian, *et al.* Using HPGe water gamma monitoring system to assess the α/β radioactivity in water[J]. Sichuan Environment, 2019, **38**(1): 120 - 124. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2019.01.020.
- 14 Guan X, Ge L Q, Zeng G Q, *et al.* Determination of gross α and β activities in Zouma River based on online HPGe gamma measurement system[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(12): 120. DOI: 10.1007/s41365-020-00828-0.
- 15 Yang B L, Zhou Q, Zhang J, *et al.* Performances of different efficiency calibration methods of high-purity-germanium gamma-ray spectrometry in an inter-comparison exercise[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(3): 37. DOI: 10.1007/s41365-019-0562-x.
- 16 Rasouli A, Tavakoli-Anbaran H. Study of relation between the gamma flux buildup factors and source geometry by M-C simulation[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(9): 136. DOI: 10.1007/s41365-017-0279-7.
- 17 Zhu G L, Liu J L, Wang Q, *et al.* Ultrasonic positioning system for the calibration of central detector[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(1): 5. DOI: 10.1007/s41365-018-0530-x.
- 18 国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: GB 18871—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- 19 刘合凡, 葛良全, 谢希成, 等. 基于蒙特卡罗方法的XRF探测器立体角分析[J]. 核技术, 2015, **38**(6): 060502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060502.
LIU Hefan, GE Liangquan, XIE Xicheng, *et al.* Calculation of desired X-ray collection angle on XRF analyzer designed by Monte Carlo method[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(6): 060502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060502.
- 20 Zhang J X, Jin Y F, Zhao X, *et al.* MC simulates the detection efficiency of different sizes of BaClBr(Eu) [J]. OALib, 2020, **7**(8): 1 - 8. DOI: 10.4236/oalib.1106655.