

doi: 10.7690/bgzd.2025.12.012

基于核素定位的人体内照射准确测量方法

杨奕昕¹, 傅 灿², 侯 鑫¹, 廖 鹏¹, 岳昌启¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能测控事业部, 四川 绵阳 621000;

2. 中广核惠州核电有限公司安全防护部, 广东 惠州 516399)

摘要: 为提高全身计数器对人体内照射测量的准确度, 提出放射性核素在人体内沉积的有效判定方法。设计 4 种测量分析模式, 针对不同测量模式分别定义效率刻度曲线。试验结果表明: 该方法能准确识别各种核素, 测量误差小, 测量数据能准确反映人体内照射实际情况。

关键词: 放射性; 内照射; 核素定位; 效率刻度

中图分类号: TP73 **文献标志码:** A

Accurate Measurement Method For Internal Radiation in Human Body Based on Radionuclide Localization

Yang Yixin¹, Fu Can², Hou Xin¹, Liao Peng¹, Yue Changqi¹

(1. Department of Intelligent Measurement and Control, Automation Research Institute Co., Ltd., of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. Safety Protection Department, CGN Huizhou Nuclear Power Co., Ltd., Huizhou 516399, China)

Abstract: To enhance the accuracy of whole-body counter measurements for internal radiation exposure in humans, an effective method for determining the deposition of radioactive nuclides in the human body is proposed. Four measurement analysis modes are designed, and efficiency calibration curves are defined for each mode. Experimental results indicate that this method can accurately identify various nuclides, exhibits small measurement errors, and the measured data accurately reflect the actual situation of internal radiation exposure in humans.

Keywords: radioactivity; internal exposure; radionuclide localization; efficiency calibration

0 引言

随着原子能研究的不断发展, 人工和天然放射性核素在科学研究、工农业、医学、核能和核技术利用等领域得到广泛应用。长期从事放射性工作的人员越来越多, 放射性物质进入人体的机会越来越大。准确地测量人体放射性核素的含量是正确估算人体内照射剂量、评估健康效应的前提和基础^[1-2]。

通常, 放射性核素通过多种途径进入人体, 在体内形成不均匀分布, 主要沉积在人体特定器官中, 如甲状腺、肺部、肠胃部, 且放射性污染在人体内含量较低。测量人体内放射性核素的仪器为全身计数器^[3], 该仪器对最小探测活度 (minimum detection activity, MDA) 有较高的要求^[4]。目前, 通用的站立式全身计数器均是基于放射性核素在人体内均匀分布的假设基础上进行测量分析的, 将导致测量结果与实际情况不符、测量误差偏大。针对以上现状, 笔者开展人体内放射性核素有效定位方法研究。

1 人体内放射性核素测量及定位方法

为了能够实现对人体内放射性核素多方位的检测并方便后续判断, 需要采用 2 个及以上探测器; 然后根据 2 个及以上探测器的计数率匹配对应的测量分析模式; 根据放射性核素在人体内沉积的实际情况, 将测量分析模式划分为甲状腺测量、肺部测量、全身测量和肠胃部测量 4 种模式。具体的测量分析模式可以更加精准地匹配人体受到的辐射状态, 有效地解决了假设人体内放射性核素均匀分布单一模式进行测量时误差较大的问题。通过对放射性污染在人体内沉积情况进行分辨, 然后在测量分析模式下进行加权分析, 可以使计数结果更加接近人体内的放射性核素污染的实际情况, 有效减小了测量误差。

基于放射性核素有效定位的人体内照射污染测量原理如图 1 所示, 将全身计数器上下位置探测器的计数比率值划分为 4 个不同的比值范围, 并对应

收稿日期: 2024-10-10; 修回日期: 2024-11-11

基金项目: 四川省区域创新合作项目 (2024YFHZ0183)

第一作者: 杨奕昕 (1974—), 男, 四川人。

4 个特定的测量模式。测量分析模式可以表示人体受到的辐射状态,通过 2 个及以上探测器的计数率进行匹配的方式,可使匹配更加精准,有效避免现有站立式全身计数器检测的局限性。根据实际测量时上下探测器计数率比值 R ,基于比值判定该放射性在人体内的沉积区域,从甲状腺测量模式、肺部测量模式、全身测量模式和肠胃部测量模式中,自动选择最优化测量模式对 2 个及以上探测器的计数率进行加权分析得出计数结果,可使计数结果更接近实际结果,从而保证了仪器测量结果更加符合人体实际情况。

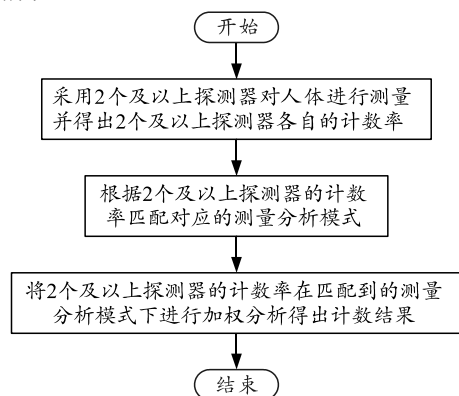


图 1 人体内照射污染测量原理

计数率比值 R 计算公式如下:

$$R = C_{\text{upper}} / C_{\text{under}} \quad (1)$$

式中: C_{upper} 为上探测器的计数率; C_{under} 为下探测器的计数率。

由于人体内的放射性污染沉积位置不同,当采用上下 2 个及以上探测器时,会得到 2 个及以上不同的结果。根据上探测器的计数率 C_{upper} 和下探测器的计数率 C_{under} 的比值 R 就可以确定放射性核素在人体内的大致分布:当 $R > 5.5$ 时,说明上探测器的计数率远大于下探测器的计数率,放射性核素主要分布于甲状腺;当 R 为 $2.5 \sim 5.5$ 时,说明上探测器的计数率大于下探测器的计数率但增量不大,放射性核素主要分布于肺部;当 R 为 $0.5 \sim 2.5$ 时,说明上探测器的计数率与下探测器的计数率差别不大,放射性核素在人体均匀分布;当 $R < 0.5$ 时,说明上探测器的计数率远小于下探测器的计数率,放射性核素主要分布于肠胃部。

甲状腺测量模式、肺部测量模式、全身测量模式和肠胃部测量模式包含特定的效率刻度文件及全身计数分析方法。为使测量结果更加符合实际情况,需对甲状腺、肺部、全身和肠胃部 4 种测量分析模式的效率刻度曲线进行分别定义。

1) 甲状腺测量分析模式效率刻度曲线 E_1 的计算公式如下:

$$\ln(\text{Eff}) = -10.17 + 2.51 \times \ln(\text{Eng}) - 0.23 \times (\ln(\text{Eng}))^2 \quad (2)$$

2) 肺部测量分析模式效率刻度曲线 E_2 的计算公式如下:

$$\ln(\text{Eff}) = -33.63 + 8.89 \times \ln(\text{Eng}) - 0.68 \times (\ln(\text{Eng}))^2 \quad (3)$$

3) 全身测量分析模式效率刻度曲线 E_3 的计算公式如下:

$$\ln(\text{Eff}) = -13.11 + 2.85 \times \ln(\text{Eng}) - 0.23 \times (\ln(\text{Eng}))^2 \quad (4)$$

4) 肠胃部测量分析模式效率刻度曲线 E_4 的计算公式如下:

$$\ln(\text{Eff}) = -7.85 + 1.24 \times \ln(\text{Eng}) - 0.12 \times (\ln(\text{Eng}))^2 \quad (5)$$

式中: Eng 为射线能量; Eff 为射线能量 Eng 的效率值。

2 测试实验分析

模拟放射源射线对探测器的计数率响应,以实现仪器对辐射探测响应的仿真计算分析^[5]。全身计数器样机采用 NaI(Tl)探测器,因其具有本底计数低、探测效率高、性能稳定等优点^[6],非常适合人体内照射测量。在测试实验中采用混合放射源,包含 ^{109}Cd 、 ^{57}Co 、 ^{139}Ce 、 ^{203}Hg 、 ^{113}Sn 、 ^{137}Cs 、 ^{88}Y 、 ^{60}Co 共 8 种放射性核素,其特征 γ 射线参数如表 1 所示。

表 1 混合放射源参数

核素	能量/ keV	半衰期/d	活度/Bq	相对扩展不确定 度($K=2$)/%
^{109}Cd	88.0	4.614E+04	6.421E+04	4.1
^{57}Co	122.1	2.717E+02	1.513E+03	3.4
^{139}Ce	165.9	1.376E+02	2.272E+03	3.6
^{203}Hg	279.2	4.659E+01	4.769E+03	3.5
^{113}Sn	391.7	1.151E+02	3.912E+03	3.9
^{137}Cs	661.7	1.099E+04	1.906E+03	4.1
^{88}Y	898.0 1 836.1	1.066E+02	6.418E+03	3.7
^{60}Co	1 173.2 1 332.5	1.925E+03	3.045E+03	3.9

将模拟放射源置于全身计数器测试区域,从上至下、从左至右对不同位置点进行定点测量和扫描测量^[5],针对人体感兴趣部位如甲状腺、肺部等采取定点测量,而对全身测量模式则采用扫描测量方式,测量时长设定为 60 s。下面以全身测量模式为例进行分析。

在测试实验中上下探测器对不同能量射线响应的能谱如图 2—3 所示。

根据能谱图 2—3 可知:上探测器的总计数为 229 166 378,下探测器的总计数为 211 407 999,测量时间为 60 s。根据式(1)计算出计数率比值 R 为:

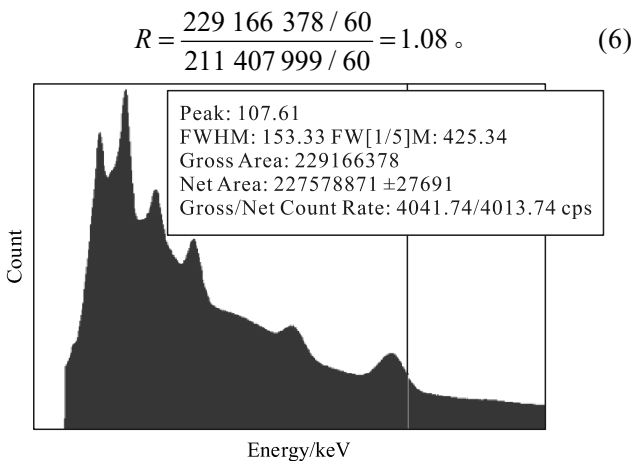


图 2 上探测器能谱

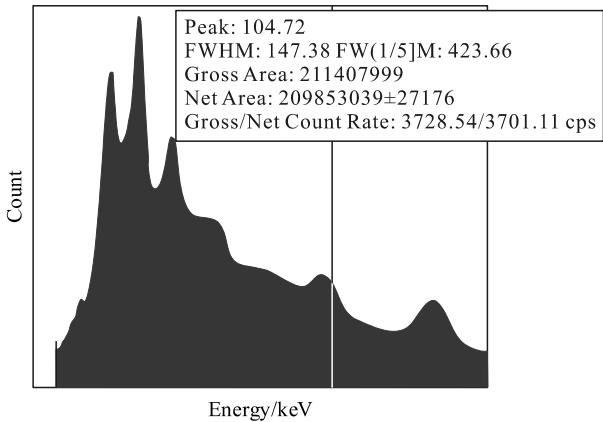


图 3 下探测器能谱

说明放射性核素均匀分布，对应全身测量分析模式，采用式(4)进行能量和效率刻度，上下探测器的能量刻度曲线、效率刻度曲线如图 4—7 所示，对应的刻度数据如表 2—5 所示。

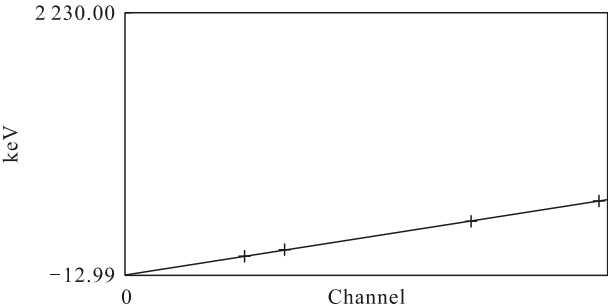


图 4 上探测器能量刻度曲线

表 2 上探测器能量刻度数据

Energy/keV	Channel	Fit/keV	Delta/%
88.00	110.86	87.07	1.056 2
122.10	148.49	121.30	0.652 6
279.20	321.59	280.54	-0.478 2
391.70	441.95	392.96	-0.320 8
661.70	724.19	662.06	-0.054 8
898.00	964.60	897.35	0.072 7
1 173.20	1 238.04	1 171.74	0.124 7
1 332.50	1 395.50	1 333.02	-0.038 8
1 836.10	1 872.76	1 836.47	-0.020 2

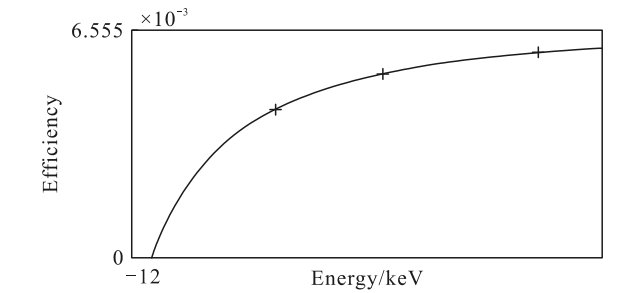


图 5 上探测器效率刻度曲线

表 3 上探测器效率刻度数据

Energy/keV	Efficiency	Fit	Delta/%
0	=====	=== knee ===	=====
88.11	4.2895E-003	4.2877E-003	0.042 1
165.64	5.3203E-003	5.3336E-003	-0.249 4
279.06	5.9595E-003	5.9404E-003	0.320 4
1 172.71	5.6490E-003	5.6920E-003	-0.761 4
1 332.29	5.5534E-003	5.5355E-003	0.321 8

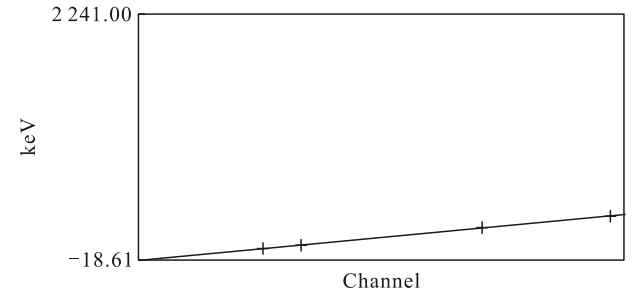


图 6 下探测器能量刻度曲线

表 4 下探测器能量刻度数据

Energy/keV	Channel	Fit/keV	Delta/%
88.00	113.41	87.16	0.956 6
122.10	149.87	121.36	0.602 8
279.20	316.59	279.00	0.071 0
391.00	435.93	393.09	-0.534 4
661.70	714.07	663.04	-0.202 7
898.00	951.69	898.15	-0.017 1
1 173.20	1 222.98	1 171.63	0.133 5
1 332.50	1 378.87	1 331.22	0.096 2
1 836.10	1 862.04	1 837.14	-0.056 7

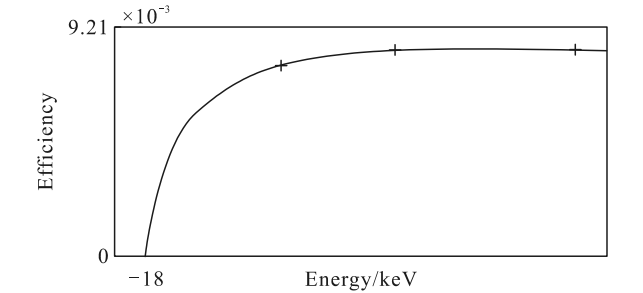


图 7 下探测器效率刻度曲线

表 5 下探测器效率刻度数据

Energy/keV	Efficiency	Fit	Delta/%
0	=====	=== knee ===	=====
88.00	7.6771E-003	7.7062E-003	-0.378 5
165.10	8.3731E-003	8.3228E-003	0.600 2
279.00	8.3507E-003	8.3435E-003	0.086 3
1 172.71	6.1268E-003	6.3047E-003	-2.903 4
1 332.50	6.1812E-003	6.0255E-003	2.519 2

经测试实验分析可知:系统能准确识别放射源包含的各种核素,能量刻度曲线(上探测器最大误差 1.056 2%、下探测器最大误差 0.956 6%)线性较为理想,效率刻度曲线(上探测器最大误差-0.761 4%、下探测器最大误差-2.903 4%)能准确计算出放射源对应核素的活度。测试结果说明:该测量方法误差小于 3%,测量数据能准确反映人体内照射情况,满足设备性能指标要求。

3 结束语

笔者对人体内放射性核素直接检测及有效定位方法进行了分析。测试实验结果表明:该方法能有效测量人体内照射剂量,检测结果更加符合人体实际情况。该方法已经应用于站立式全身计数器产品,提高了人体内照射测量准确度,促进了我国核医疗及辐射防护技术的发展。

(上接第 39 页)

3) 利用基于 USBKey 的双因子、TCM 认证技术,实现对通道的安全性度量。

4) 采用多轮复合加密算法进行逆向运算,从而获得能够保障通信系统间相互信任的安全密钥。通过对所确定的初值进行相关时刻的求解,可以在相关时刻进行信息的保密传输。

参考文献:

- [1] 刘军,张立立,姜向宏,等.基于卫星通信系统的多元 RC-LDPC 信息安全传输算法[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(2):196-200.
- [2] 凌天斌,康亚坤.基于扩展贝叶斯分类的网络涉密信息安全传输[J].计算机仿真,2022,39(8):377-382.
- [3] 杨维永,刘苇,崔恒志,等.SG-Edge:电力物联网可信边缘计算框架关键技术[J].软件学报,2022,33(2):641-663.
- [4] 张磊,刘辛彤,蔡硕,等.基于 Storm 架构的电力物联网流数据处理[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):112-119.
- [5] 赵丙镇,王栋,钱雪,等.基于区块链的电力物联网信任网关设计与实现[J].中国电力,2021,54(7):192-197.
- [6] 陈俊,黄飞宇,黎作明.基于 DQN 的电力物联网 5G 边缘切片资源管理研究[J].电测与仪表,2022,59(1):155-161.
- [7] 姚楠,刘子全,秦剑华,等.基于电力物联网的边缘计

参考文献:

- [1] 郭蒙蒙,王军艳,陈凌,等.超声测定人体胸壁厚度及组织成分在内照射监测中的应用[J].中国辐射卫生,2016,25(4):393-397.
- [2] 王红波,张庆召,张震,等.核医学科工作人员职业性内照射研究进展[J].中国辐射卫生,2016,25(2):251-254.
- [3] ICRU. ICRU report 69: Direct determination of the body content of radionuclides[R]. UK: Nuclear Technology Publishing, 2003.
- [4] 李进,周巍,姚飞,等.基于蒙特卡罗方法的全身计数器设计研究[J].强激光与粒子束,2017,29(12):100-103.
- [5] 吴治华,赵国庆.原子核物理试验方法[M].北京:原子能出版社,1997:12-26,99-165.
- [6] 方晓明,李欣年.碘化钠探测器和高纯锗探测器 γ 能谱仪性能比较[J].上海大学学报,2004,10(4):389-399.
- [7] 算任务卸载优化[J].科学技术与工程,2022,22(16):6577-6584.
- [8] 杨挺,蔡绍堂,闫鹏,等.面向电力物联网异构信息安全的多任务调度算法[J].电力系统自动化,2022,46(15):162-170.
- [9] 周振宇,王翌,廖海君,等.电力物联网 5G 云-边-端协同框架与资源调度方法[J].电网技术,2022,46(5):1641-1651.
- [10] 毛水强,洪健,任华,等.面向电力物联网的 5G 移动边缘计算任务卸载方法[J].电测与仪表,2022,59(2):105-111.
- [11] 张娟,李俊午.全时空量测环境下基于双向长短期记忆的电力物联网损耗计算[J].电子器件,2022,45(2):408-414.
- [12] 薛宏利,蔡泽祥,谭炜豪,等.面向电力物联网的 LoRa 通信建模与性能仿真分析[J].南方电网技术,2022,16(3):108-115.
- [13] 向敏,饶华阳,张进进,等.基于图卷积神经网络的软件定义电力通信网络路由控制策略[J].电子与信息学报,2021,43(2):388-395.
- [14] 黄兴,张文杰,李曦,等.一种面向电力物联网的认知 D2D 网络能效资源分配算法[J].电测与仪表,2023,60(2):97-103.
- [15] 孟思琦,胡俊,马亮.一种可重构的可信密码模块模拟器实现方法[J].武汉大学学报(理学版),2022,68(1):44-50.