

doi: 10.7690/bgzd.2023.06.010

放射性核素能谱分析方法综述

岳昌启, 牛德青

(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)

摘要: 针对放射性核素识别需求, 将放射性核素能谱分析方法分为传统核素能谱分析方法与新型核素能谱分析方法 2 大类, 再将两者进行总结对比并对后续研究方向进行展望。结果表明, 运用和改进核素能谱分析方法可为核安全、发展核领域应用提供技术保障。

关键词: 放射性; 能谱; 核素; 快速识别

中图分类号: TJ91 **文献标志码:** A

Review of Radionuclide Energy Spectrum Analysis Method

Yue Changqi, Niu Deqing

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

Abstract: According to the demand of radionuclide identification, radionuclide spectrum analysis methods are divided into two categories: traditional nuclide spectrum analysis methods and new nuclide spectrum analysis. Then, the two methods are summarized and compared, and the future research directions are prospected. The results show that the application and improvement of nuclide energy spectrum analysis method can provide technical support for nuclear safety and the development of nuclear applications.

Keywords: radioactivity; energy spectrum; nuclide; rapid identification

0 引言

由于科技发展速度与人类生活需求的日益增长, 对核技术研究是目前也是未来必需的一环。但核技术带来便利的同时, 应对核污染、核战争等恶性事件也引起了人们的重视; 因此, 对放射性核素检测的研究也迫在眉睫。笔者将其分为传统核素能谱分析方法、新型核素能谱分析方法 2 大类, 对目前常用的放射性核素能谱分析方法进行总结对比。

1 传统核素能谱分析方法

放射性核素的识别重点是对核素能谱进行分析, 而能谱中需要关注特征峰的峰值信息, 包括特征峰位置、峰面积、半宽高等^[1]。由于受测量时间、放射性核素强度、统计涨落等因素的影响, 准确采集到特征峰的峰值信息比较困难。为获取准确的峰值信息, 需要针对不同信息采取不同的分析方法。

1.1 传统核素识别算法

传统核素识别算法主要包括本底扣除、平滑、寻峰以及对复杂谱的解谱等内容^[2]。

1.1.1 本底扣除

本底扣除方法可分为峰区本底扣除和全谱本底扣除 2 类。峰区本底扣除算法中用户只需对感兴趣的峰, 根据其分布类型, 采取适当的扣除方法^[3]。在全谱本底扣除方法中, 对整条谱线采用适当的方法扣除本底, 得到其净峰曲线。国外部分学者在阶跃本底的基础上采用 SNIP, 本底扣除方法原理简单, 易于实现, 对康普顿坪连续区域的本底扣除效果较好^[4], 目前 SNIP 扣除全谱本底已成为目前应用最广泛的方法^[5]。

1.1.2 平滑

对全能峰进行平滑处理是为在保留能谱特征信息的前提下减少统计涨落的影响^[6]。传统的平滑方法主要有几点平滑法、多项式最小二乘拟合法、离散函数褶积滑动变换法和傅里叶变换法等^[7]。尽管上述方法各有优劣, 但大多都需要实验者根据人工经验设定平滑数值或选择平滑函数, 才能得到较为准确的平滑效果。在能谱数据中背景噪声干扰大的影响下, 可能会出现假峰或遗漏真峰情况。小波变换法能同时利用能域和频域信息进行平滑, 是一种

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-03-28

作者简介: 岳昌启(1998—), 男, 四川人, 从事核素能谱分析、核素识别、机器学习研究。E-mail: 1040791536@qq.com。

非常理想的能谱平滑处理方法^[8]。

1.1.3 寻峰

寻峰的目的是找到能谱中的特征峰，也是传统核素识别主要研究方向。目前常用的寻峰方法包括导数法、协方差法、对称零面积变换法等^[9]。

导数寻峰法将寻峰问题就转换为连续曲线求极值问题。并根据极值变化规律找出峰位置^[10]。高阶导数灵敏度较高，对重峰有很强的分辨能力。但在环境本底较高时，短期内采集到的数据全能峰不明显，无法通过导数寻峰法找到峰值^[11]。

协方差寻峰法不仅有较好的分辨重峰的能力，且可以在统计涨落很大的高本底环境中寻找弱峰。协方差寻峰法利用前后的预测误差之和的最小值建立协方差方程，然后通过迭代运算进行求解。该方法计算量较大，运算速度较慢。

对称零面积寻峰由 Mariscotti 提出，将面积为 0 的对称窗函数与能谱数据进行褶积滑动运算^[12]。在能谱数据清晰的情况下，该方法具有较高的识别率。但对于峰背不明显、放射性活度极低、快速移动的放射源情况下的识别效率很低。

1.1.4 解谱

解谱方法原理是对低本底低能量的能谱，由于特征峰发生重叠，直接使用寻峰分析的方法比较困难，这时需要对能谱进行解析，以确定放射性核素信息^[6]。峰区拟合函数的选择与解谱结果好坏有着直接联系，影响解谱效果的关键因素。传统的解谱方法主要包括剥谱法、逆矩阵法、逐道最小二乘法等^[7]。剥谱法和逆矩阵法不能充分利用能谱数据，误差较大，目前已经很少使用；而逐道最小二乘法^[13]，精度更高，目前依然被广泛使用。

1.2 小结

传统的针对峰分析的核素能谱分析方法在当前的的发展比较受限。其未充分利用整体能谱信息，且效果依赖寻峰结果的准确度以及人工经验，尤其在处理低能量的复杂能谱时，还会受到探测器性能等硬件条件影响，往往成谱困难或者效率低下，需要长时间的测量才能有效成谱。

2 新型核素能谱分析方法

针对传统核素能谱分析方法寻峰困难、低计数下不准确、核素混叠情况时效率低下以及步骤繁琐等问题，引入了基于全谱分析的新型核素能谱分析法。全谱分析法不同于传统方法仅将特征峰纳入主

要信息分析，同时将分支比、半衰期、峰面积、能谱图像等信息加入到能谱分析当中，并且优化或者省略以往所需步骤，减少传统核素能谱分析方法中计数不准确、检测效率低下等缺点。现全谱分析主要包括序贯贝叶斯、模糊数学、神经网络、反卷积等方法。

2.1 序贯贝叶斯方法

为解决传统核素识别方法下低放射性快速检测中检测时间与计数的冲突。序贯贝叶斯方法利用放射性核素特征信息：半衰期、分支比、特征射线能量等，对核素进行判别。与其他通过分析核素能谱的方法不同，探测模型按照时间顺序进行判别，剔除不满足条件的事件；因此，不需要将信号累加成能谱，减少了对放射量的依赖^[14]。

采用 Wald 序列概率比检验 ¹³⁷Cs，并设计了一种基于蒙特卡罗方法的阈值选择方法。表明在低计数放射性核素检测中具有极好的识别速度。国内学者提升了序贯贝叶斯方法在快速核素识别中的应用研究，减少核素判别时间并且提高了短时间内核素识别准确率^[15]。如表 1 所示，序贯贝叶斯核素识别方法相比于传统特征峰分析方法可以达到快速识别放射性核素的结果，并且在低剂量率情况下传统方法识别下限高，无法识别，而序贯贝叶斯法仍能够以较快速度识别^[16]。

表 1 2 种方法核素识别时间对比

源 剂量率 提升值/ nGyh ⁻¹	¹³⁷ Cs		⁶⁰ Co	
	序贯贝叶 斯法识别 时间/s	传统特征峰 分析法识别 时间/s	序贯贝叶 斯法识别 时间/s	传统特征 峰分析法 识别时间/s
10	10	未识别	37	未识别
20	4	37	24	121
30	4	25	15	60
40	2	20	10	33
50	2	16	6	27
100	1	8	2	12
350	1	4	1	4
500	1	4	1	3
650	1	3	1	3

但受到环境本底的影响很大，在本底较高或放射源距离较远的情况下，识别的结果误差较大。

2.2 模糊数学方法

模糊数学方法是一种不确定推理过程^[17]。通过模糊数学规则来提取核素能谱特征峰信息，再根据采取的信息识别核素并引入隶属函数将得出的隶属度形容其相关程度^[18]。目前应用最广泛的隶属函数有三角函数、sigmoid 函数以及高斯函数^[17]。在经

过定性分析后,文献[19]提出了 2 维模糊集合理论,将计数率和粒子能量作为 2 维模糊集合,通过建立 2 维模糊集合隶属函数实验目标检验。模糊数学法对不同核素的识别率如表 2 所示。

表 2 模糊数学法对不同核素的识别率 %

核素	置信度	核素	置信度
²³⁵ U	93.59	²¹² Bi	99.17
²¹² Pb	99.89	²¹⁴ Bi	99.85
²¹⁴ Pb	99.95	²⁰⁸ Tl	99.97
²²⁸ Ac	99.98	⁴⁰ K	99.98
²²⁸ Th	99.78		

根据上表结果得出在复杂环境下,使用模糊数学法进行判断分类可以准确有效识别出多种核素。在经过模糊规则判别分类后总共筛选出 154 个特征峰,符合标准有 144 个;而未使用模糊规则筛选的仅有 132 个符合标准。模糊数学方法解决了传统方法在复杂环境下无法精确识别的缺点。

2.3 神经网络方法

神经网络被认为是一种在简单或者复杂能谱情况下都能够快速并且准确识别核素的高效解谱方法。神经网络具有可以模拟任意函数的特性,其可以利用放射性核素的全谱信息进行分析,并且不需要平滑、寻峰、峰拟合等复杂操作,可以达到快速识别核素的功能。

早年国外学者使用 BP 神经网络预测能谱分析的误差结果,在误差和统计结果上效果比较明显^[20]。后来将 BP 网络和 RBF 网络进行对比,发现 BP 网络泛化能力低、依赖参数多、耗时长并且容易陷入局部最优的问题中。而 RBF 神经网络相比于 BP 网络识别精度和识别准确度都有所提升,并且检测速度更快^[21]。使用 CNN 模型直接对核素能谱进行特征提取,将能谱数据进行数据切割分析,能够快速准确识别出单源及混合核素^[22]。无外界干扰情况下不同核素识别方法结果准确率如表 3 所示。

表 3 无外界干扰下不同核素识别方法结果准确率 %

方法	对称零面积寻峰法	CNN
¹⁵² Eu	100.00	100.00
¹³⁷ Cs	100.00	100.00
⁶⁰ Co	94.00	100.00
⁶⁰ Co+ ¹³⁷ Cs	87.54	99.98
⁶⁰ Co+ ¹⁵² Eu	87.93	100.00
¹³⁷ Cs+ ¹⁵² Eu	88.76	100.00

并且在加入噪声条件后,传统的对称零面积寻峰法识别准确率会随着噪声强度大幅下降至 20%,而神经网络的方法即使在强干扰下也保持有至少 80%的准确率。针对多核素混叠检测困难的问题,采用 Bi-GRU-Attention 方法进行混合核素识别研

究。对不同时间状态下的信息进行特征提取,再对影响核素分类效果的信息进一步特征提取,最终实现对混合核素的分类效果^[22]。

神经网络训练需要极大的运算,但建立好训练模型之后,对新数据的处理速度快,现广泛用于快速核素识别中。

2.4 小结

新型核素能谱分析方法相比于传统方法在低计数、高本底、混叠核素的复杂情况下都有更快更好的识别结果。并且增加自动提取特征信息功能,减少人工经验影响并简化核素检测步骤,提高生产效率。

3 展望

根据上述核素能谱分析方法的发展趋势,对未来研究方法进行展望:

1) 数据上:现阶段核素能谱的数据集大多数是 Monte Carlo 软件的模拟数据,实测的本底以及核素能谱数据集很少,并且环境或者距离位置的不同,数据集也不同。实测核素能谱数据多元化能够防止结果过拟合发生。

2) 方法上:当采用机器学习类型的方法时,其对训练集结果的准确性依赖大,防止测试数据与训练集的准确率出现较大差异,需要构造合适的训练集。此外,由于黑匣子模型的特性,并不知晓具体运算过程,当重点在于得到输入与输出之间明确的关系时,就得选取其他方式,同时算法的准确性和稳定性只能通过大量数据训练来验证。

近年来,研究方向更加偏向于多种方法结合进行核素识别判断,如将序贯贝叶斯方法中提取的特征信息作为输入函数,采用神经网络的方法进行结果输出;采用信号理论进行字典构建,分析微弱核素信号识别等。

3) 硬件上:由于采集到的结果往往受限于探测器性能,因此对谱仪系统的研究也是未来发展方向之一。其中包括前端闪烁体探测器对粒子接受效率的提升、数字化能谱采集系统性能的升级等。

4 结束语

为应对目前放射性核素监测、核应急处理、核灾害防护的需求,运用和改进核素能谱分析方法将为我国核安全、发展核领域应用提供坚实的技术保障。

参考文献：

- [1] 任俊松. 伽马能谱分析与核素识别方法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- [2] 陈晔. γ 能谱信息复原技术研究[D]. 北京: 军事科学院, 2021.
- [3] 刘永刚. γ 能谱数据分解方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [4] MIROSLAVM, JANK, VLADISLAWM, et al. Backgroundelimination methods for multidimensional coincidence gamma spectra[J]. Nuclear Instruments and Mehods in Physics A, 1997, 401: 113-132.
- [5] CACCIA M, EBOLESE A, MASPERO M, et al. Background removal procedure based on the SNIP algorithm for γ -ray spectroscopy with the CAEN Educational Kit[R]. Viareggio: CAEN, 2017.
- [6] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法(上册)[M]. 北京: 原子能出版社, 1981: 284-291.
- [7] 庞巨丰. γ 能谱数据分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1990: 355-363.
- [8] GANG X, LI D, BENAI Z, et al. A nonlinear wavelet method for data smoothing of low-level gamma-ray spectra[J]. Journal of nuclear science and technology, 2004, 41(1): 73-76.
- [9] 何剑锋. 低能量分辨率 γ 能谱数据解析方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [10] 陈维锋. 多道伽玛能谱仪测量分析软件的开发[D]. 武汉: 中国地质大学, 2011.
- [11] Anonymous. 2018. Nuclear Radiation-Detecting Device[J]. NASA Tech Briefs, 42(7): 597-601.
- [12] MARISCOTTI M A. A method for automatic identification of peaks in the presence of background and

- its application to spectrum analysis[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1967, 50(2): 35-41.
- [13] 陈亮, 魏义祥, 屈建石. 便携式 γ 谱仪中的核素识别算法[J]. 清华大学学报, 2009(5): 635-638.
- [14] CANDY J, SALE K, GUIDRY B, et al. Bayesian processing for the detection of radioactive contraband from uncertain measurements[C]// 2007 2nd IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing. IEEE, 2007.
- [15] GAO C, FANG Z L, WEN Q L, et al. 2019 Study on Sequential Bayesian Radionuclide Identification Approach: Threshold and Detection Capability[C]// 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2019.
- [16] 向清沛. 基于序贯贝叶斯分析的放射性核素快速识别方法研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014.
- [17] ALAMANIOTIS M, YOUNG J, TSOUKALAS L H. Assessment of fuzzy logic radioisotopic pattern identifier on gamma-ray signals with application to security[J]. International Journal of Monitoring and Surveillance Technologies Research, 2014, 2(1): 1-21.
- [18] 王崇杰, 张爱莲. 基于模糊识别的 γ 能谱定性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2003(5): 1028-1030.
- [19] 王一鸣, 魏义祥. 基于模糊逻辑的 γ 能谱核素识别[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(12): 1736-1740.
- [20] 李飞. 基于蒙特卡罗模拟和人工神经算法的伽马射线能谱数据处理技术[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [21] 刘议聪, 王伟, 牛德青. 基于人工神经网络的核素识别分析方法[J]. 兵工自动化, 2015, 34(11): 86-91.
- [22] 王瑶, 刘志明, 万亚平, 等. 基于长短时记忆神经网络的能谱核素识别方法[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(10): 154-161.

(上接第 29 页)

参考文献：

- [1] 李国新, 程国元, 焦清介. 火工品实验与测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 9-10.
- [2] 魏保华. 一种导弹火工品测试仪设计[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 20-23.
- [3] 杜永龙, 薛宇博, 罗炳海. 基于 ESAD 静态开关隔离测试电路的解除保险指示方法[J]. 自动化应用, 2021(9): 148-151.
- [4] 庄金良, 高欣宝, 武洪文. 弹药装备在役考核安全风险探析[J]. 兵工自动化, 2021, 40(1): 92-96.
- [5] 王雨时, 纪永祥. 引信安全性现状分析与试验考核建议[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(4): 1-9.
- [6] 汪仪林, 张龙山, 马秋华. 从美军标看我国引信安全性的差距[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(3): 1-5.