

CNIC-01873

CAEP-0185

辐射指纹的解析技术研究

伍怀龙 刘素萍 郝樊华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

在核弹头的辐射指纹比较研究中,发现现在流行的 γ 能谱解谱软件有很多缺点,这些缺点直接影响到辐射指纹比对的准确性。设计了新的解谱程序,并分别使用该程序、ORTEC公司的GAMMAVISION软件、CANBERRA公司的GENNIE2000软件进行解谱比较。新的解谱程序不仅可用于涉及核弹头的核裁军核查研究中,还可用于放射性测量分析的各个领域。

关键词: γ 能谱 解谱 软件

Investigation of Gamma Spectra Analysis

(In Chinese)

WU Huailong LIU Suping HAO Fanhua

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

During the investigation of radiation fingerprint comparison, it is found out that the popular gamma spectra analysis softwares are faultful, which decrease the precision of radiation fingerprint comparison. So a new analysis software is developed for solving the problems. In order to display the advantage of new program, some typical simulative gamma spectra of radiation source are analyzed respectively by our software and GAMMAVISION and GENNIE2000. The software can be applied not only in nuclear warheads deep-cuts verification, but also in any radiation measurement field.

Key words: Gamma energy spectra, Spectrum unscrambling, Software

引言

放射源的辐射指纹能起到标识和鉴别放射性物体特性的作用。在涉及核弹头不可逆销毁过程的深度核裁军核查中,核弹头的辐射指纹对标识和鉴别裁减下来的核弹头将起到关键作用。射线指纹识别机制的研究,就是要找出一种合适的方法,以较高的置信度,描述两个正在进行比较的射线指纹是否为同一放射源的指纹。此比对分为两步:一是辐射指纹的获得,二是采用合适的比较机制判断指纹是否同一^[1]。辐射指纹是指核材料所发出的能反映核材料信息的放射性射线,射线指纹是其中的射线能量和强度,射线指纹识别即为分析其中的射线而鉴别出核弹头。核弹头的放射性特征是非常复杂的,在一个普通的核弹头中不但含有各种铀、钚同位素,还有它们的自发裂变产物及衰变产物,这些核素所放出的射线种类繁多、强度分布大,要进行完整的辐射指纹解析非常困难,它要求所使用的解谱软件具有充分的有效性。对模拟核弹头的 γ 能谱使用当前通用的解谱软件,如 ORTEC 公司的 GAMMAVISION 软件^[2]、CANBERRA 公司的 GENNIE2000 软件^[3]进行解谱分析时,发现分析结果有很多偏差,这直接导致用射线指纹识别软件进行甄别时出现错误判断。因此开发能更好获得辐射指纹的解谱软件成为现实的必要。

1 解谱机制

辐射指纹指各个核素的特征能量和它们的强度,对应于解谱就是寻峰和峰面积计算。

1.1 寻峰

GAMMAVISION 软件和 GENNIE2000 软件所使用的寻峰判据为^[4]:

$$C''(n) < -2 \sqrt{C(n) \sum_{i=1}^{2j} (k_i)^2} \quad (1)$$

$$C''(n) < G \cdot C'(n \pm 1) \quad (2)$$

式中: $C(n)$ ——计数对道数的函数,即第 n 道的计数;

$C''(n)$ ——第 n 道计数对道数的二次微分;

G ——与探测器分辨率有关的常数;

k_j ——二次微分因子。

如果满足条件式(1)和(2),即认为在第 n 道有峰存在。

本工作认为以这两个条件作为寻峰判据过于简单,它是造成峰错误判断的主要原因,这些错误判断包括漏掉真峰和将平台上的涨落判断为峰(假峰)。

因此对能峰的判断不能简单地从一、两个条件采取一次通过的方法。在本工作的研究中,将采取较为复杂、细致的寻峰过程,对一个可疑峰将反复从各方面进行验证以达到不漏掉一个真峰及不虚假判断一个假峰的目的。

本工作的寻峰步骤如下:

第 1 步:粗选。判断某道附近可能有峰的判据为:

$$C(n) - B_l > 2 | C(n - W) - B_l | \quad (3)$$

$$C(n) - B_r > 2 | C(n + W) - B_r | \quad (4)$$

$$C(n) \geq C(n + 1) \quad (5)$$

$$C(n) \geq C(n - 1) \quad (6)$$

其中 FWHM 为 1/2 峰最大值处对应道全宽度所对应的道数(也即通常所说的能峰半高宽, 但是以道数为计量单位)。取值按探测器的实际, 在程序中有 $\text{FWHM} = a + b \cdot \sqrt{E}$ (E 为能量), 对一个稳定正常的探测器, 参数 a 和 b 是确定的, 需根据探测器的固有数据输入到程序中。

$$B_l = \frac{C(n-W) + C(n-W+1) + C(n-W-1)}{3}$$

$$B_r = \frac{C(n+W) + C(n+W+1) + C(n+W-1)}{3}$$

满足式(3)~(6)的第 n 道被认为峰可能存在。需要说明的是公式(3)~(6)是非常宽松的条件, 它在大范围内将可疑峰完全包含在内, 但其中还包含许多虚假的峰。

第 2 步: 峰中心的确定。先找峰顶点, 在较小一个 FWHM 范围内寻找, 找出计数最大道为峰顶点, 若找出的峰顶点不满足大于等于附近两道的条件, 则以 2FWHM 步长增大寻找范围。

然后确定峰中心, 在峰顶点左、右一个 FWHM 范围内根据权平均方法以计数为权找出峰中心 M :

$$M = \frac{\sum_{i=-W}^W i \cdot C_i}{\sum_{i=-W}^W C_i} \quad (7)$$

此方法与 GAMMAVISION 和 GENNIE2000 软件使用的相同。

第 3 步: 峰的基本高斯形判断。在讨论之前, 先说明以下的各道计数 C 都是指扣除相应本底的计数。

各个判据的定义为: 峰中心左、右 FWHM/2 道净计数 LAVE01、RAVE01 和 3 道平均净计数 LAVE 和 RAVE 如下:

$$C_{\text{LAVE}} = \frac{\sum_{i=-1}^1 C(M-W/2+i)}{3} \quad (8)$$

$$C_{\text{LAVE01}} = C(M-W/2) \quad (9)$$

RAVE01 和 RAVE 只需将式(8)和(9)FWHM 前的负号换为正道, 以下的左(L)、右(R)的定义有相似的约定。

同理, 定义峰中心左、右 FWHM/3 道净计数 LAVE21, RAVE21 和 3 道平均净计数 LAVE2 和 RAVE2:

$$C_{\text{LAVE}} = \frac{\sum_{i=-1}^1 C(M-W/2+i)}{3} \quad (10)$$

$$C_{\text{LAVE21}} = C(M-W/3) \quad (11)$$

同样, 峰中心左、右 FWHM 道的 3 道平均净计数 LAVE1 和 RAVE1。定义峰中心处左、右 3 道平均净计数 AVE0。

由此产生如下几个用于峰的基本高斯形判断的判据:

$$C_{\text{AVE0}} > 0.6 \times (C_{\text{LAVE}} + C_{\text{RAVE}}) \quad (12)$$

$$C_{AVE0} > G_A \times G_{LAVE1} \quad (13)$$

$$C_{AVE0} > G_A \times G_{RAVE1} \quad (14)$$

$$[C(M-W) + C(M+W)]/2 > G_A \times (C_{LAVE1} + C_{RAVE1})/4 \quad (15)$$

其中, G_A 因子为:

$$G_A \begin{cases} 5 + 0.2 \cdot \sqrt{C(M)} & G_A < 10 \\ 10 & G_A > 10 \end{cases} \quad (16)$$

由于计数统计涨落等原因,光电峰只是大概的高斯形,并不是纯粹数学上的高斯函数。式(12)~(16)带有一定的经验性质。

通过(12)~(15)判据检验的峰便可进入第4步的细致峰形判断。

第4步:峰形的细致判断。由式(8)~(11)定义的各个参数给出峰形细致判断的十个判据。

$$C_{LAVE01} > 0; \quad C_{RAVE01} > 0; \quad C_{LAVE21} > 0; \quad C_{RAVE21} > 0 \quad (17)$$

$$C_{LAVE01} > 1.5 \times C_{LAVE1}; \quad C_{RAVE01} > 1.5 \times C_{RAVE1} \quad (18)$$

$$C_{LAVE21} > 2 \times C_{LAVE1}; \quad C_{RAVE21} > 2 \times C_{RAVE1} \quad (19)$$

$$C_{LAVE21} > C_{LAVE01}; \quad C_{RAVE21} > C_{RAVE01} \quad (20)$$

此时在用此十个判据进行峰检验时不再用“一票否决制”,只需满足十个中任八个或以上判据的可疑峰即可确定为真峰。这样处理的原因是容许有少量条件不满足,利于找弱峰。

从以上四个步骤的寻峰过程可见,相对于以往解谱软件简单的寻峰操作,对真峰的判别要细致得多,对一个可疑峰要经过反复验证以确定它是否真实的峰。

1.2 本底平台和峰面积的计算

与以往软件将本底作为一个整体不同,将本底分为左、右两部分,由峰中心左、右2倍FWHM处3道平均计数计算左、右本底LEBACK和RIBACK:

$$B_{LE} = \frac{\sum_{i=M-2 \times W-1}^{M-2 \times W+1} C(i)}{3} \quad (21)$$

$$B_{RI} = \frac{\sum_{i=M+2 \times W-1}^{M+2 \times W+1} C(i)}{3} \quad (22)$$

经过如此处理,当两个峰靠得很近或有峰重叠时也可准确扣除本底。此时引入本底平台斜率的概念:

$$S = \frac{(B_{LE} - B_{RI})}{2 \times W} \quad (23)$$

对于每一个已认定峰,首先判断它的中心与前一个已确认峰距离是否小于4倍FWHM,如果满足此条件,则左方本底的计算改为:

$$B_{LE} = B_{RI} + S' \times 2 \times W \quad (24)$$

此处的 S' 表示离此峰最近的已确认孤峰的本底平台斜率。孤峰是指没有其他峰与它靠得很近或与它有峰重叠的峰。

同样,如果它的中心与后一个已确认峰距离小于4倍FWHM,则右方本底的计算改为:

$$B_{RI} = B_{LE} - S' \times 2 \times W \quad (25)$$

在这里,本工作的处理完全不依赖核素库所给出的额外信息。过去对这方面的处理是利用给出的核素库以确定何处可能有峰重叠。本工作的新处理方法对某些没有或不能利用核素库的情况,如在核弹头的辐射指纹比较研究中,是有现实意义的。

在峰中心左、右 2 倍 FWHM 范围内计算出峰面积净计数:

$$A = \sum_{i=M-2 \times W}^{M+2 \times W} \left[C(i) - \frac{B_{RI} + B_{LE}}{2} \right] \quad (26)$$

对计数有重叠的双峰,峰面积的计算为:根据在左右 1/4 到 2/3 倍 FWHM 宽度出现的奇异单调变化,判断为左双峰或右双峰。双峰重叠处的计数用对边的计数代替。

2 解谱结果比较

2.1 寻峰效果比较

为了表明本程序的寻峰效果,对一重 4.485 kg 的 Pu 样品(模拟核弹头)进行 γ 放射性测量,距离 1 m。此源的主要成分为 ^{239}Pu 和其他一些钚同位素及它们的自发裂变产物及衰变产物。本程序的寻峰效果与用 Gammavision(GV)程序的结果列于表 1。“N”表示判断为不存在,“Y”表示为判断存在。

表 1 对 Pu 源模拟核弹的寻峰结果比较

能量/ keV	实际 存在	本程序 判断	GV 程序 判断	能量/ keV	实际 存在	本程序 判断	GV 程序 判断	能量/ keV	实际 存在	本程序 判断	GV 程序 判断
37.74	N	N	Y	207.96	Y	Y	Y	413.77	Y	Y	Y
50.41	N	N	Y	219.34	N	N	Y	422.50	Y	Y	Y
59.52	Y	Y	Y	255.33	Y	Y	N	426.74	Y	Y	N
94.67	Y	Y	Y	266.94	N	N	Y	451.42	Y	Y	Y
98.78	Y	Y	Y	271.63	N	N	Y	497.18	Y	Y	Y
101.15	N	N	Y	323.76	Y	Y	N	645.94	Y	Y	N
103.64	Y	Y	Y	332.86	Y	Y	Y	652.18	Y	N	Y
111.12	Y	Y	Y	335.98	Y	Y	N	658.91	Y	Y	N
115.11	Y	Y	N	341.46	Y	Y	Y	661.91	Y	Y	N
115.96	Y	Y	N	344.95	Y	Y	Y	703.69	Y	Y	N
116.85	Y	Y	N	367.89	Y	N	Y	722.14	Y	Y	N
120.71	Y	Y	Y	375.00	Y	Y	Y	724.26	Y	Y	N
129.31	Y	Y	Y	380.11	Y	Y	Y	756.69	Y	Y	N
182.22	N	N	Y	382.73	Y	Y	Y	765.92	Y	Y	Y
195.74	Y	Y	N	392.95	Y	Y	Y	769.29	Y	Y	Y
203.60	Y	Y	Y	411.15	Y	Y	N	1 461.28	Y	Y	N

从表 1 可见,本程序只有两个峰的判断与实际不符,而 GV 程序有 24 个峰的判断与实际不符,所以,本程序在寻峰效果方面已证实得到提高。

需要说明的是,探测器都存在一探测下限,分支比很小的 γ 射线可能已不能被探测到,或者可能有一些计数但被淹没在本底的统计涨落中而不能被判别出,此问题已不是单纯地改进解谱程序所能解决的。另外,测量所用的 Pu 源是有一定形状、体积的(为一直径几厘

米的半球体),而不是点源或面源。因为不同能量的 γ 光子与物质反应的截面不同,能量较低的 γ 光子穿出Pu球体而被探测器探测到的几率比能量较高的小,所以,有可能分支比较低而能量较高的射线被判别出的同时而分支比较高而能量较低的射线未被判别出。

2.2 峰面积计算比较

使用— ^{152}Eu 标准源(活度 $1.59 \times 10^5 \text{ Bq}$)的解谱计数计算结果为例,说明峰面积计算达到的较高精度。

将源放在离探测器10 cm处测量,测量活时间有意地选择较短的100 s。效率使用LABSOCS软件进行计算,它得出的效率可达到很高精度^[5]。

将解析各能峰得出的源活度与它的实际活度比较列于表2。

表2 对 ^{152}Eu 标准源使用解谱程序进行活度分析结果

能量/keV	分支比/%	解谱峰强度	解谱活度/ 10^5 Bq	解谱活度/实际活度
121.78	28.4	791.62	1.56	0.981
244.69	7.49	180.09	1.57	0.987
344.27	26.5	537.11	1.58	0.994
778.89	12.7	166.11	1.59	1.000
964.01	14.4	165.18	1.57	0.987
1 085.78	9.93	116.71	1.62	1.019
1 089.70	1.71	19.340	1.55	0.975
1 112.02	13.3	146.39	1.63	1.025
1 407.95	20.7	193.41	1.57	0.987

注:表中的分支比使用B6库的数据^[6]。

3 结 论

本程序在寻峰准确性方面已得到很大提高,为指纹比对技术提供了坚实的基础。从表2可见,所有能峰(包括分支比很低的峰,如1 089.70 keV峰分支比只有1.71%)算出的活度值与真实值都在3%以内(大多在2%以内)。需要指出的是,此差别是由多方面引起的,除了峰面积计算的偏差,还有效率计算的偏差,计数统计涨落等的贡献。一般活度测量要求误差在5%以内,因此,此解谱程序的峰面积计算可以认为具有较高精度。

参 考 文 献

- 1 刘素萍,伍怀龙,古当长,等. 类型 γ 射线能谱指纹的识别机理. 物理学报,2002,50(11):2411~2416
- 2 EG&G ORTEC. Gamma Vision Software Manual, USA: Advanced Measurement Technology, Inc. 1998:82~104
- 3 CANBERRA. Gennie 2000 Software Manual, USA: CANBERRA, Inc. 2002:113~150
- 4 Mariscotti M A. A Method for Automatic Identification of Peaks in the Presence of Background and Its Application to Spectrum Analysis. Nucl. Instru. Methods, 1967, 50:309~319
- 5 伍怀龙,杨晓波. 低能探测效率理论计算的补偿修正[R]. 四川,绵阳:中国工程物理研究院,2002
- 6 Richard B. Firestone 1996 Table of Isotope(8th Edition), USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 5712~5725