

CLYC 探测器 n/γ 聚类甄别方法研究

黄广伟¹, 周春芝^{1,*}, 许智宁², 肖无云¹, 张羽中¹, 樊海军¹

(1. 军事科学院 防化研究院, 北京 102205; 2. 湖南大学, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了高性能分辨探测中子与 γ 射线, 搭建了一套基于 Cs₂LiYCl₆:Ce³⁺ (CLYC) 探测器和数字示波器的数字化核脉冲采集系统。通过 Matlab 编程, 研究了系统聚类法和 K-means 聚类法两种 n/γ 脉冲波形甄别方法, 并与传统的电荷比较法进行了对比。结果表明, 两种聚类法均可准确分辨脉冲类别, K-means 聚类法在计算时间和内存占用方面更具优势, 有利于实时脉冲处理。该研究为研制基于 CLYC 探测器的 n/γ 双模式探测谱仪提供了一种有用的脉冲波形甄别技术解决方案。

关键词: CLYC 探测器; 脉冲波形甄别; 系统聚类法; K-means 聚类法

中图分类号: TL812.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2018)08-1481-06

doi: 10. 7538/yzk. 2017. youxian. 0708

Study on n/γ Discrimination Method Based on Clustering Analysis for CLYC Detector

HUANG Guangwei¹, ZHOU Chunzhi^{1,*}, XU Zhining², XIAO Wuyun¹,
ZHANG Yuzhong¹, FAN Haijun¹

(1. *Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China;*

2. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to discriminate neutron and γ ray with high performance, a digital nuclear pulse sampling system based on a Cs₂LiYCl₆:Ce³⁺ (CLYC) detector and a digital oscilloscope was set up. By Matlab programming, two pulse shape discrimination methods, including hierarchical clustering method and K-means clustering method were studied, and were compared with the traditional charge comparison method. The results show that both of these two methods can discriminate neutron and γ pulses accurately. The K-means clustering method is better for less computing time and memory consumption, and makes profit for real-time pulse discriminating. This research provides a useful pulse shape discrimination solution to develop the n/γ dual-mode spectrometer with CLYC detector.

Key words: CLYC detector; pulse shape discrimination; hierarchical clustering method; K-means clustering method

收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2018-01-10

作者简介: 黄广伟(1992—), 男, 黑龙江尚志人, 硕士研究生, 从事核辐射监测技术研究

* 通信作者: 周春芝, E-mail: zhouc6622@163.com

网络出版时间: 2018-03-26; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20180326.0902.002.html>

很多中子源本身伴随发射 γ 射线,中子在介质中发生非弹性散射、辐射俘获等作用也会产生 γ 射线,几乎所有中子探测应用中都存在 γ 射线干扰问题^[1]。而目前大多数常用中子探测器对 γ 射线有响应,因此 n/γ 甄别是实现中子准确测量需解决的关键技术。 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}^{3+}$ (CLYC) 是一类新型闪烁晶体,具有同时探测 γ 射线和中子的功能^[2-4]。1999年,Combes等^[5]首次发现并制备了 CLYC 晶体,随后该团队发现其在 225 nm 和 300 nm 光波之间存在衰减时间为几个 ns 的 CVL 发光现象^[6],且这种现象仅在 γ 射线照射的情况才发生。由于该现象的存在,使 γ 射线和中子入射晶体时产生的荧光衰减时间不同,据此可进行 n/γ 脉冲波形甄别。但对于体积过大的 CLYC 晶体,会由于闪烁光的自吸收而影响到其 n/γ 甄别性能^[7],目前脉冲波形甄别在 $\phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的 CLYC 晶体中依然可行^[8]。2012年,RMD公司发布了 CLYC 的商业产品,2015年该公司利用 CLYC 晶体的 n/γ 甄别能力研制了 n/γ 射线成像系统^[9]。国内对 CLYC 探测器的研究起步较晚,2017年上海大学、宁波大学利用坩埚下降法成功生长了 CLYC 晶体并测试了性能^[10],北京玻璃研究院也研制了该探测器并实现了产品化,西北核技术研究所对其产品进行了测试。实际应用中可能遇到较宽的 γ 射线能量范围,使得简单利用脉冲幅度来甄别中子和 γ 射线不太可行,目前利用 CLYC 晶体进行脉冲波形甄别所采用的方法主要是电荷比较法^[11],其优点是甄别效果较好且易于实现,缺点是积分时间窗需预先优化,积分时间窗的变化会极大程度地影响 n/γ 甄别的效果,因此每次改变实验条件均需重新确定积分时间窗。

针对利用 CLYC 探测器测量 n/γ 混合场的需求,本文提出两种基于聚类思想的核脉冲波形甄别方法:系统聚类法和 K-means 聚类法。利用 CLYC 探测器测量²³⁹Pu-Be 源产生的 n/γ 混合场,通过 Matlab 编程,研究系统聚类法和 K-means 聚类法两种 n/γ 脉冲波形甄别方法,并将结果与传统的电荷比较法进行对比。

1 系统聚类法和 K-means 聚类法原理及步骤

聚类分析又称群分析,是用于事物分类的一种多元统计方法^[12],其目标是将 1 组数据分为若干组,组内数据是相似的,而组间数据又有明显差异。聚类分析的对象是大量样本,能在无先验知识的情况下合理地对样本进行分类。系统聚类法一般在样本间距离矩阵的基础上进行,故当样本的个数很大时,系统聚类法的计算量非常大。相比之下,K-means 聚类法不必确定距离矩阵,计算过程中也不必存储基本数据,因此更适于大数据集的处理。

1.1 系统聚类法

利用系统聚类法甄别 n/γ 脉冲的基本原理是:开始将 n 个信号各自作为 1 类,共 n 类,并规定信号之间的距离和类与类之间的距离,然后将距离最近的两类合并成 1 个新类,计算新类与其他类的距离;重复进行两个最近类的合并,每次减少 1 类,直至所有信号合并成两类,则最后的两类分别对应于两种不同的入射粒子。为了直观地反映系统聚类过程,可将整个分类系统画成一张谱系图,因此系统聚类也称为谱系分析。

将采集到的每个数字核脉冲信号记做长度为 m 的行向量,则 n 个核脉冲信号组成的矩阵 \mathbf{X} 为:

$$\mathbf{X}_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

任取第 i 和第 j 个核脉冲信号,两者间的距离 d_{ij} 常用闵可夫斯基距离来定义:

$$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^m |x_{ik} - x_{jk}|^q \right)^{\frac{1}{q}} \quad (2)$$

特别地,当 $q=1$ 时,闵可夫斯基距离即为绝对值距离,当 $q=2$ 时为欧氏距离,当 $q=\infty$ 时为切比雪夫距离。

类间距离有多种定义方法,如最短距离法、重心距离法、离差平方和法、类平均法等。其中类平均法较好地利用了所有样本间的信息,在大多数情况下被认为是一种较好的定义方法。设 G_p 和 G_q 为两个类,分别包含 n_p 和 n_q 个样本,则类平均法的类间距离 D_{pq} 定义为:

$$D_{pq}^2 = \frac{1}{n_p n_q} \sum_{i \in G_p} \sum_{j \in G_q} d_{ij}^2 \quad (3)$$

实施系统聚类法的流程如图 1 所示。

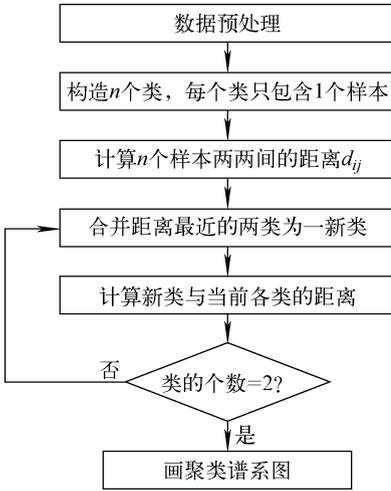


图 1 系统聚类法流程

Fig. 1 Process of hierarchical clustering method

1.2 K-means 聚类法

K-means 聚类法是一种动态聚类法,采用该方法可快速得到结果,尤其在待聚类样本数量较多时这种优势更加明显,因此应用较广泛。利用 K-means 聚类法进行脉冲波形甄别的基本原理是将准备聚类的信号分为两类,找到每个类的中心 C_1 和 C_2 ,使 $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \|x_j - C_i\|^2$ 达到最小。具体算法包含以下几个步骤:1) 从样本集中随机抽取 K 个样本作为初始聚类的中心,由这个中心代表各聚类,由于本问题中所需甄别的信号为 2 类,故取 $K=2$;2) 计算所有其他样本到 K 个样本的距离,并根据距离将其归

入最近的聚类里,这里的距离定义与系统聚类法中距离定义相同;3) 调整聚类中心,即将聚类中心移动到聚类的质心(即平均值)处;4) 重复步骤 2、3 直到聚类中心不再移动,此时算法收敛。

K-means 算法中第 1 步初始聚类中心的选取是随机的,但不同的初始聚类中心可能导致完全不同的聚类结果,针对这个缺陷,可采用 K-means++ 算法解决^[13]。该算法确定初始聚类中心的步骤为:1) 从数据集中随机选取 1 个样本作为初始聚类中心 C_1 ;2) 首先计算每个样本与当前已有聚类中心之间的最短距离,用 $D(x)$ 表示,然后计算每个样本被选为下一个聚类中心的概率 $D(x)^2 / \sum_{x \in X} D(x)^2$,最后按照概率抽取下一聚类中心 $C_i (i=2, 3, 4, \dots)$;3) 重复步骤 2,直至选择出 K 个聚类中心。确定聚类中心后,后续过程与 K-means 算法相同。

2 核脉冲采集

图 2 为 n/γ 波形采集系统组成示意图。该系统由放射源、CLYC 晶体、光电倍增管、高压模块、数字示波器和计算机组成。放射源为 $^{239}\text{Pu-Be}$ 源,产生 n/γ 混合辐射场;CLYC 晶体由北京玻璃研究院提供,采用垂直布里奇曼法生长,尺寸为 $\phi 14 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$;光电倍增管型号为 HAMAMATSU 公司的 R2076,由高压模块提供 $-1\ 000 \text{ V}$ 的外部电压;数字示波器为泰克 DPO4034,用于观测信号及对信号进行数字化采样,采样周期为 0.4 ns ,每个脉冲的采样点数为 10 000;在计算机上通过 Matlab 编程实现采样控制和数据处理,实际采集和处理的 n、γ 脉冲总数为 5 000 个。

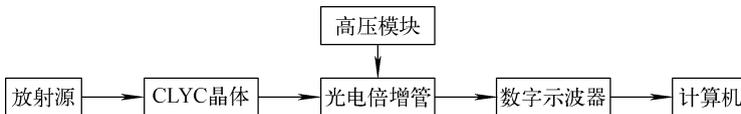


图 2 n/γ 波形采集系统组成

Fig. 2 Scheme of n/γ signal acquisition system

3 算法实现

3.1 数据预处理

一般地,核脉冲信号预处理过程的步骤为:

1) 平滑滤波;2) 基线恢复;3) 幅度归一化。图 3

为典型的预处理过程中子和 γ 射线信号。对于后续不同的算法处理,预处理过程是相同的。

平滑滤波采用滑动平均滤波法,滤除高频噪声。设 y_i 为待平滑的第 i 道数据,左右各取

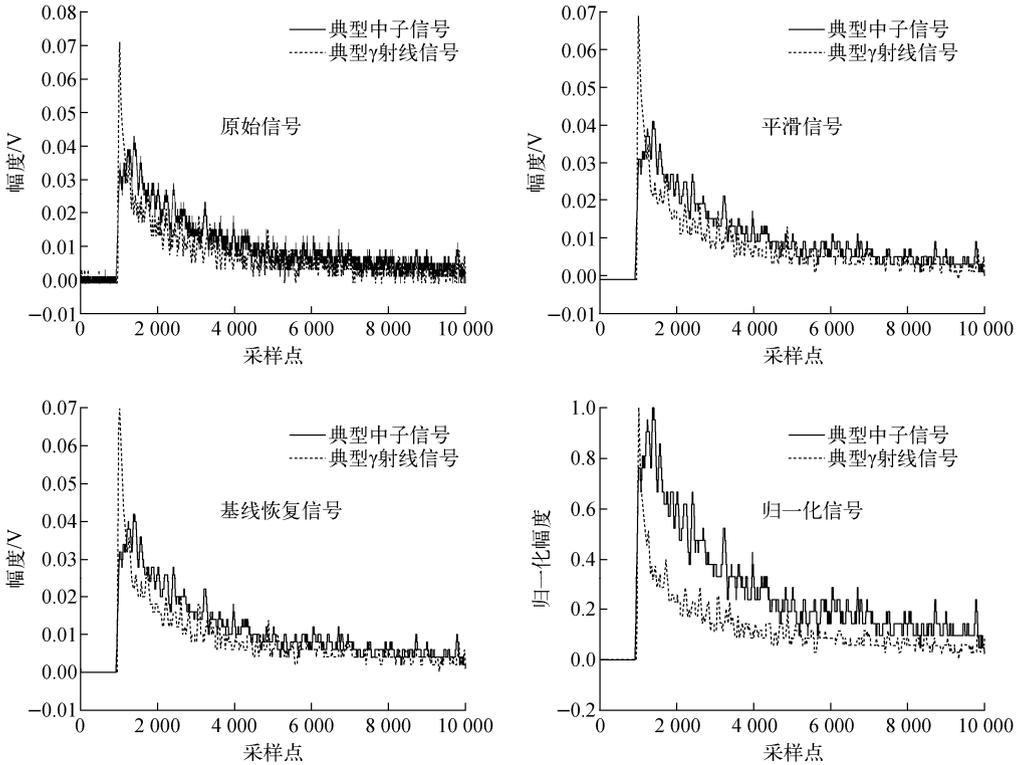


图3 预处理过程两种信号对比

Fig. 3 Comparison of two signals in pretreatment process

m 道数据, 则共有 $2m+1$ 个点的数据, 用所有 $2m+1$ 个点的算术平均值作为该道的修正值, 即:

$$y_i^* = \frac{1}{2m+1} \sum_{j=-m}^m y_{i+j} \quad (4)$$

式中: y_i 为原始数据; y_i^* 为平滑后的数据。该方法两端各有 m 个点得不到平滑, 存在边沿损失, 但对整个脉冲波形影响可忽略不计。通过调整发现, m 取 10 时效果较为理想。

将信号到达前的 600 点数据取平均作为基线, 通过对整个信号扣除该基线实现基线恢复。幅度归一化的目的是消除幅度差异对脉冲波形甄别的影响, 本文采用的方法是最大值归一。此外, 预处理过程中还应包含堆积脉冲处理^[14]。由于采样所用的放射源强度较小, 堆积脉冲很少, 在预处理前就已对小概率的堆积脉冲进行了人工舍弃。预处理后产生的初始矩阵规模为 $5\,000 \times 10\,000$ 。

3.2 电荷比较法的 n/γ 甄别实现

由于中子和 γ 射线产生的核脉冲包含比例不同的快慢成分, 相应地, 在等效输出回路电容

上积累的电荷会由快慢两种成分组成, 即:

$$Q = Q_f + Q_s \quad (5)$$

式中: Q 为总电荷; Q_f 和 Q_s 分别为电荷快成分和慢成分。两种粒子在探测器中产生的核脉冲快慢成分比例不同, 导致两种粒子的 Q_f 、 Q_s 、 Q_f/Q_s 、 Q_s/Q_f 等均有差异, 可将此作为依据进行 n/γ 甄别。选择 Q_f 作为参数进行甄别, 经调整, 将积分时间窗确定为信号起始至起始后的 850 ns, 此时甄别效果最好, 结果如图 4 所示。

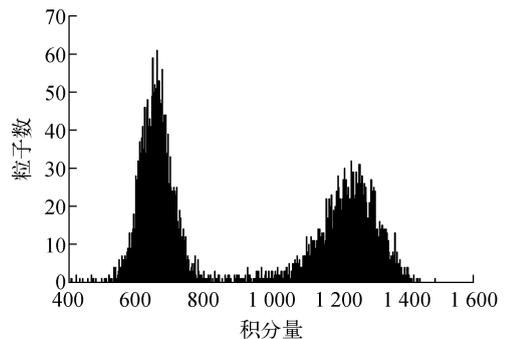


图4 电荷比较法甄别结果

Fig. 4 Result of discrimination by charge comparison method

对于大多数脉冲波形甄别方法,通常定义品质因子 FOM^[15] 为:

$$FOM = \frac{s}{FWHM_n + FWHM_\gamma} \quad (6)$$

式中: s 为 neutron 峰与 γ 射线峰间的距离; $FWHM_n$ 、 $FWHM_\gamma$ 分别为 neutron 峰与 γ 射线峰的半高宽。FOM 值越大,表示甄别效果越好。对图 4 所示的两个峰分别做高斯拟合,得到各自的峰位和半高宽,从而计算出品质因子为 2.00。一并统计得到了两种脉冲的个数,其中 γ 射线脉冲为 2 641 个,neutron 脉冲为 2 359 个。

3.3 系统聚类法的实现

以处理 30 个随机样本为例,从所建立的初始矩阵中随机抽取 30 行作为待分类样本,采用欧氏距离方式计算其距离矩阵(对角元素为 0 的 30×30 的下三角矩阵),采用类平均法计算其类间距离,并逐步进行类合并,至 30 个样本全部归为一类。聚类谱系图如图 5 所示。

由图 5 可看出,编号为 5、6、11、24、26、23、

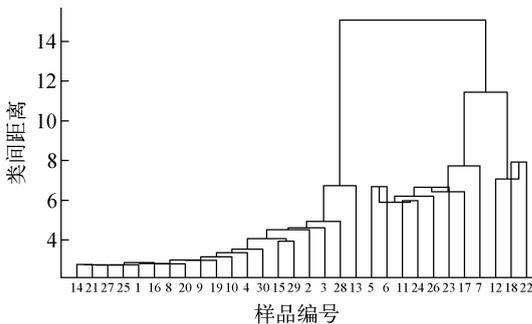


图 5 聚类谱系图

Fig. 5 Clustering dendrogram

17、7、12、18、22 的粒子为一类,其余粒子为另一类。观察这些信号形状发现,前一类样本均为 neutron 信号,后一类样本均为 γ 射线信号,准确率为 100%,证实了算法的可行性。对 5 000 个样本进行系统聚类处理,统计出两种脉冲个数: γ 射线为 2 642 个,neutron 为 2 358 个。此结果与电荷比较法得到的结果基本一致,可见,通过系统聚类法能很好地实现 neutron 脉冲和 γ 射线脉冲分类。

3.4 K-means 聚类法的实现

利用 5 000 个信号的初始矩阵进行 K-means 聚类处理。初始聚类中心设置为 2 个,采用 K-means++ 算法计算得到的 2 个聚类中心如图 6 所示。

用欧氏距离定义样本与聚类中心间的距离,分别计算每个信号与这两个聚类中心的距离,进行聚类分析并统计粒子个数: γ 射线脉冲为 2 535 个,neutron 脉冲为 2 465 个。

4 结果对比与分析

两种聚类方法均可将 neutron 脉冲和 γ 射线脉冲区分开(表 1)。系统聚类法的精确度略高于 K-means 聚类法。这是由于脉冲噪声较大,使用 K-means 聚类法时会出现少部分脉冲错判。下一步实验中可从电子学角度出发,尽量提高信噪比以实现更精确的聚类。从计算时间角度来看,处理相同 5 000 个随机信号, K-means 聚类法的计算时间约为 2 s,与电荷比较法差异不大,而系统聚类法的计算时间约为 90 s;从内存占用角度来看, K-means 聚类法不依赖距

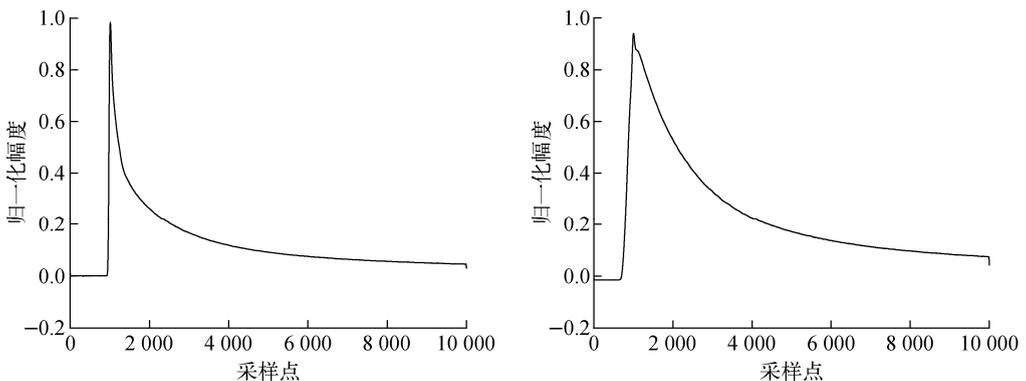


图 6 K-means++ 算法确定的两个聚类中心

Fig. 6 Two clustering centers calculated by K-means++ arithmetic

离矩阵,可节省大量内存。随着样本量的增加,K-means 聚类法在处理时间和内存占用上的优势会更加明显。与电荷比较法相比,两种方法均不依赖积分时间窗的选择,即不需要预先进行参数调整,直接对信号类别进行判断,具有较好的鲁棒性。

表 1 3 种 n/γ 甄别方法对比

Table 1 Comparison of three n/γ discrimination methods

| 方法 | γ 射线 信号 | 中子 信号 | 品质 因子 | 计算 时间/s |
|-------------|-------------------|----------|----------|------------|
| 电荷比较法 | 2 641 | 2 359 | 2.00 | 2 |
| 系统聚类法 | 2 642 | 2 358 | | 90 |
| K-means 聚类法 | 2 535 | 2 465 | | 2 |

5 结论

CLYC 探测器具备优异的 n/γ 甄别能力。系统聚类法和 K-means 聚类法均可通过核脉冲信号聚类分析实现基于 CLYC 探测器的 n/γ 脉冲波形甄别,且准确度高、鲁棒性强。在计算时间和内存占用方面 K-means 聚类法具有明显优势,更适于实时 n/γ 甄别应用。将 CLYC 探测器和 K-means 聚类法相结合,有望研制出高性能的 n/γ 双模式探测谱仪。

参考文献:

- [1] 丁大钊,叶春堂,赵志祥. 中子物理学[M]. 北京:原子能出版社,2001.
- [2] GLODO J, HAWRAMI R, van LOEF E, et al. Pulse shape discrimination with selected elpasolite crystals[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(5): 2 328-2 333.
- [3] BOURNE M M, MUSSI C, MILLER E C, et al. Characterization of the CLYC detector for neutron and photon detection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2014, 736: 124-127.
- [4] GLODO J, HAWRAMI R, SHAH K S. Development of $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$ scintillator[J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 379: 73-78.
- [5] COMBES C M, DORENBOS P, van EIJK C W E, et al. Optical and scintillation properties of pure and Ce^{3+} -doped $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$ and LiYCl_6 : Ce^{3+} crystals[J]. Journal of Luminescence, 1999, 82(4): 299-305.
- [6] van LOEF E, GLODO J, HIGGINS W M, et al.

- Optical and scintillation properties of $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$: Ce^{3+} and $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$: Pr^{3+} crystals[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, 52(5): 1 819-1 822.
- [7] GLODO J, HIGGINS W M, van LOEF E, et al. $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$: Ce scintillator for nuclear monitoring applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(3): 1 257-1 261.
 - [8] HIGGINS W M, GLODO J, SHIRWADKAR U, et al. Bridgman growth of $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$: Ce and ^6Li -enriched $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$: Ce crystals for high resolution gamma ray and neutron spectrometers[J]. Journal of Crystal Growth, 2010, 312(8): 1 216-1 220.
 - [9] WHITNEY C M, SOUNDARA-PANDIAN L, JOHNSON E B, et al. Gamma-neutron imaging system utilizing pulse shape discrimination with CLYC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2015, 784: 346-351.
 - [10] 王晴晴,史坚,李焕英,等. $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$:Ce 闪烁晶体的光学及闪烁性能[J]. 无机材料学报,2017, 32(2):175-179.
WANG Qingqing, SHI Jian, LI Huanying, et al. Optical and scintillation properties of $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$: Ce crystal[J]. Journal of Inorganic Materials, 2017, 32(2): 175-179(in Chinese).
 - [11] DOLYMPIA N, CHOWDHURY P, LISTER C J, et al. Pulse-shape analysis of CLYC for thermal neutrons, fast neutrons, and gamma-rays[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, 714: 121-127.
 - [12] DUDA R O, HART P E, STORK D G. Pattern classification[M]. US: John Wiley & Sons, 2012.
 - [13] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. K-means ++: The advantages of careful seeding[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007, 11(6): 1 027-1 035.
 - [14] 肖无云,魏义祥,艾芸芸,等. 数字化多道脉冲幅度分析技术研究[J]. 核技术,2005,28(10):787-790.
XIAO Wuyun, WEI Yixiang, AI Xianyun, et al. Research on digital multi-channel pulse height analysis techniques[J]. Nuclear Techniques, 2005, 28(10): 787-790(in Chinese).
 - [15] KNOLL G F. Radiation detection and measurement[M]. New York: Wiley, 2000.