

利用数字化仪实现 α 、 β 平面源表面粒子发射率的绝对测量

路天翔¹, 周倩倩², 张明², 拓飞¹, 孔淑颖¹

1. 中国疾病预防控制中心 辐射防护与核安全医学所, 北京 100088; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100029

摘要: **目的** 为验证数字化仪代替传统电子学插件进行放射性核素测量的有效性和准确性。**方法** 基于大面积流气式多丝正比计数器 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 表面粒子发射率测量装置, 采用 CAEN 公司开发的 DT5730 型数字波形采样器对 α 平面源 ^{241}Am 和不同能量的 β 平面源核素 ^{14}C 、 ^{36}Cl 和 ^{90}Sr - ^{90}Y 进行波形信号采集、幅度分析和数据处理。**结果** 在电子学阈值、高压等实验条件一致情况下, 经死时间、本底修正后得到的 α 、 β 表面粒子发射率结果与基于插件定标器得到的测量结果偏差均在 0.6% 以内, 在不确定度范围内相一致。**结论** 数字化仪可有效替代传统电子学插件实现 α 、 β 信号的采集和处理, 实现 α 、 β 发射率准确测量。

关键词: 数字化仪; 计量学; 正比计数器; 平面源; 发射率

中图分类号: TB98 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)01-0001-05

Absolute measurement of surface particle emission rates from α and β plane sources using a digitizer

LU Tianxiang¹, ZHOU Qianqian², ZHANG Ming², TUO Fei¹, KONG Shuying¹

1. National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088 China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100029 China

Abstract: **Objective** To prove the validity and accuracy of the digitizer instead of the conventional electronics plug-in for radionuclide measurement. **Methods** Based on a large-area flow-gas multi-wire proportional counter for $2\pi\alpha$ and $2\pi\beta$ surface particle emission rate measurement, the DT5730 digital waveform sampler developed by CAEN was used for waveform signal acquisition, amplitude analysis, and data processing of the α -plane source ^{241}Am and the β -plane source nuclides ^{14}C , ^{36}Cl , and ^{90}Sr - ^{90}Y of different energies. **Results** The deviations between the α and β surface particle emission rate results obtained after dead time and background corrections and the measurements obtained based on the plug-in calibrator were all within 0.6%, within the uncertainty range, under consistent experimental conditions such as electronics threshold and high pressure. **Conclusion** The digitizer is an effective alternative to conventional electronics plug-ins for α and β signal acquisition and processing and the accurate measurement of α and β emission rates.

Keywords: Digitizer; Metrology; Proportional counter; Plane source; Emission rate

Corresponding author: TUO Fei, E-mail: flytuo@163.com

随着数字脉冲形状判别 (pulse shape discrimination, PSD) 技术方法^[1]和数字化采样技术 (digital sampling technique)^[2]的发展, 高速读出电子设备在放射性核素测量方面也得到了较多的应用^[3-7]。相比于传统模拟电子学插件, 作为复杂信号高性能和高精度的波形数字化采样设备, 数字化仪具有较大的优势和较高的灵活性, 并可实现以下功能: ①进行多信号多通道同步采样, 可有效避免电子学通道一致性问题; ②通过数值算法实时对时间、脉冲形状、能量、幅

值等相关信息进行提取与处理, 并可实现离线分析; ③通过不同的参数设置对采集到的波形图、能谱图进行更深层次的信号成分以及采集原理分析。

本研究基于中国计量科学研究院的多丝正比计数器 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 粒子发射率基准装置^[8], 以数字化仪代替单道脉冲分析器、死时间控制器、定时计数器等传统模拟电子学插件, 实现 α 、 β 平面源表面粒子发射率的绝对测量, 并将数字化测量结果与电子学测量结果进行比对分析, 验证数字化仪对 α 、 β 信号采集与

处理的可行性、有效性和准确性。

1 材料与amp;方法

1.1 实验装置 无窗多丝正比计数器 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 粒子发射率绝对测量装置探测器的有效面积为 $340\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ ，阳极电镀钨丝的直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ ，在腔室内间隔 25 mm 均匀排列^[9]。除了大面积无窗流气式多丝正比计数器气体探测器，发射率测量装置还包括工作气体 P10(90% 氩气和 10% 甲烷)供应单元、高压电源(ORTEC 556)、前置放大器(Canberra 2006)、主放大器(ORTEC 672)、单道脉冲分析器(ORTEC 550A)、死时间控制器(ORTEC 416A)、定时计数器(ORTEC 996)等 NIM 插件，详细的检测器和信号处理系统可见文献^[10]。实验所测量的源为活性区为 $100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的大面积 α 、 β 平面源， α 核素 ^{241}Am ；为了验证数字化采样系统对不同能量幅度的 β 信号的采集和处理能力， β 核素采用覆盖低、中、高不同能量的 β 平面源，分别为 ^{14}C 、 ^{36}Cl 和 ^{90}Sr - ^{90}Y 混合源。

数字化仪为 CAEN 生产的 DT5730，其容纳了一个 8 通道 14-bit、采样速率为 500 MS/s 的 ADC 数字转换器，在单端 MCX 同轴连接器上具有 2 V_{pp} 或 0.5 V_{pp} 的输入动态范围^[11]。通过流气正比计数器，带电粒子产生的脉冲信号经过前置放大器和主放大器处理后，送入数字化仪。数字化仪将输入的模拟信号按照一定的采样速率采样，每次采样通过把模拟信号阈值或积分值和数字化仪内部的位数比较器对比并转换成数值，其数值序列就代表了所要采集的信号^[12]。获取的信号波形可在数字化仪内部利用数字算法实时进行信号处理，也可以将波形和能谱图传到电脑利用上位机数据处理软件进行分析，最终得到 α 、 β 平面源表面粒子发射计率。

数字化仪上位机数据处理软件是由中国计量科学研究院电离活度室自行开发的计数处理分析软件。其主要功能为：①具备多道分析器的幅度分析功能；②自由选择道址，提取对应区间的积分计数；③可采用扩展死时间和固定死时间模式，对信号记录过程中的死时间进行修正。

本次实验测量装置简化结构示意图见图 1。

1.2 实验条件设置

1.2.1 工作电压 高压坪特性是衡量流气正比计数器性能的重要指标^[13]。为选定合适的工作电压，得到稳定、准确的计数率，用 ^{241}Am 和 ^{36}Cl 平面源分别测量了本次实验的 α 、 β 高压坪曲线： α 坪区为 $450\sim$

700 V ，该范围的线性拟合斜率约为 $3.0\%/100\text{ V}$ ； β 坪区为 $1\text{ }600\sim 1\text{ }850\text{ V}$ ，该范围的线性拟合斜率约为 $3.2\%/100\text{ V}$ 。在坪区范围内，选取 α 工作电压 650 V ， β 工作电压 $1\text{ }750\text{ V}$ 。

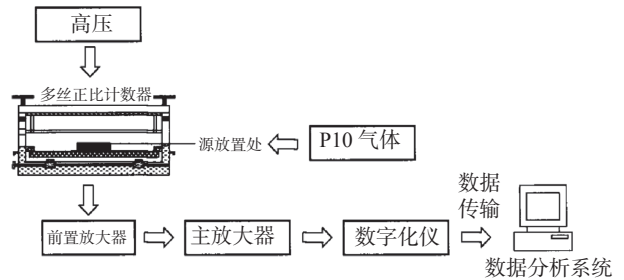


图 1 α 、 β 表面粒子发射率测量装置示意图

Figure 1 Diagram of the α and β surface particle emission rate measurement device

1.2.2 下阈值设置 根据 ISO 8679 建议^[14]，采用大面积多丝正比计数器进行 α 、 β 表面粒子发射率测量，电子学下阈值的设置原则为：对 α 测量，下阈值设置在噪声幅度之上即可；而对于 β 测量，通过测量 ^{55}Fe 源的 5.9 keV X 射线能谱，取 1/10 位置为下阈值，即 0.59 keV 对应的脉冲幅度。为此，在 α 、 β 工作电压下，使用 ORTEC 885 成型放大器将脉冲信号幅度放大至 100 倍，用多道脉冲分析器分别获取了 ^{241}Am 噪声幅度谱和 ^{55}Fe 的 X 射线能谱，并确定了 α 测量条件下电子学下阈值为 200 mV ，通过公式 1) 计算数字化阈值约为 1 640 Lsb(Least significant bit)。

$$\frac{B}{16384} \times V_{pp} = A \tag{1}$$

式中 B 为数字化仪阈值，单位为 Lsb；16 384 为数字化仪最高道址数； V_{pp} 为数字化仪的输入动态范围； A 为电子学阈值，单位为 mV 。

β 测量条件下， 5.9 keV 的 X 射线全能峰为 1 640 道，取 1/10 位置对应的道址为 164 道，根据道址与幅值刻度定义脉冲幅度为 211 mV ，由图 2 所示，

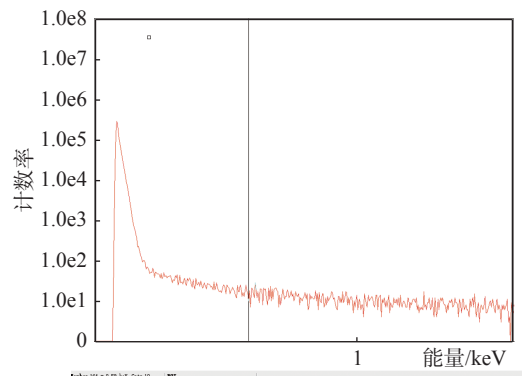


图 2 ^{55}Fe 能谱的低能部分

Figure 2 Low-energy part of the ^{55}Fe energy spectrum

明显超过噪声幅度。为保持实验条件一致性,设置 β 测量条件下电子学下阈值也为200 mV。

此外,为测试数字化仪在低阈值测量时的准确性,对数字化仪还设置了300 Lsb低阈值,数字化采样能谱图包含部分噪声信号,后续通过计数率处理软件扣除噪声。如图3,左侧峰为噪声峰,右侧为 ^{241}Am 能量峰。

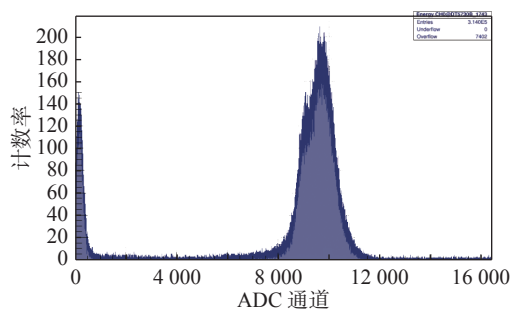


图3 300 Lsb 阈值 ^{241}Am 数字化采样能谱图

Figure 3 Digital sampling energy spectrum of ^{241}Am at the threshold of 300 Lsb

1.2.3 死时间 根据数字化仪上位机计数分析软件,设置固定死时间为20 000 ns,即20 μs 。计数分析软件死时间修正原理为设置的死时间数值只要大于系统固定死时间,即可对计数进行修正,且通过多次设置不同死时间发现,在一定的范围内(如20~30 μs),计数基本无波动。

为了与电子学插件模式下的计数率进行对比,实验中采用ORTEC 416A插件来设置电子学测量的死时间,将系统固定的死时间设定为5 μs 。并根据式2)^[15]对电子学计数器的测量计数率死时间进行修正:

$$N = \frac{N_1}{1 - \tau N_1} \quad (2)$$

其中: N 为考虑死时间修正后计数器的实际计数率; N_1 为计数率测量值; τ 为设置的死时间,单位为 μs 。

2 结果

2.1 阈值以上计数率 ①在650 V工作高压和1 750 V工作高压、放大倍数100倍、死时间20 μs 、阈值300 Lsb和1 640 Lsb条件下,对 ^{241}Am 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 和 ^{90}Sr - ^{90}Y 4个平面源进行数字化测量,单次测量时间为120 s,测量结果列于表1和表2。

②在650 V工作高压和1 750 V工作高压、放大倍数100倍、阈值200 mV、死时间5 μs 等条件下,对 ^{241}Am 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 和 ^{90}Sr - ^{90}Y 4个平面源进行电子学测量,单次测量时间为100 s,测量结果列于表3。

表1 α 、 β 平面源的数字化计数率(300 Lsb)

Table 1 Digital count rates for α and β plane sources (300 Lsb)

次数	650 V		1750 V	
	^{241}Am 计数率/ s^{-1}	^{14}C 计数率/ s^{-1}	^{36}Cl 计数率/ s^{-1}	^{90}Sr - ^{90}Y 计数率/ s^{-1}
1	2 602.0	2 203.1	2 385.8	2 216.8
2	2 606.0	2 198.7	2 389.3	2 214.0
3	2 607.2	2 196.0	2 381.7	2 226.7
平均值	2 605.1	2 199.3	2 385.6	2 219.2

注:已扣除噪声信号。

表2 α 、 β 平面源的数字化计数率(1 640 Lsb)

Table 2 Digital count rates for α and β plane sources (1 640 Lsb)

次数	650 V		1750 V	
	^{241}Am 计数率/ s^{-1}	^{14}C 计数率/ s^{-1}	^{36}Cl 计数率/ s^{-1}	^{90}Sr - ^{90}Y 计数率/ s^{-1}
1	2 575.8	2 327.2	2 511.6	2 307.2
2	2 582.6	2 326.5	2 507.7	2 306.9
3	2 572.5	2 334.3	2 513.1	2 311.1
平均值	2 577.0	2 329.3	2 510.8	2 308.4

表3 α 、 β 平面源电子学计数率(200 mV)

Table 3 Electronical count rates for α and β plane sources (200 mV)

次数	650 V		1750 V	
	^{241}Am 计数率/ s^{-1}	^{14}C 计数率/ s^{-1}	^{36}Cl 计数率/ s^{-1}	^{90}Sr - ^{90}Y 计数率/ s^{-1}
1	2 563.0	2 309.1	2 484.3	2 296.1
2	2 554.5	2 312.3	2 489.6	2 290.5
3	2 555.2	2 318.8	2 491.6	2 296.4
4	2 564.9	2 313.1	2 489.5	2 293.0
5	2 557.3	2 317.4	2 486.2	2 290.2
6	2 563.6	2 313.3	2 485.1	2 294.3
7	2 550.5	2 315.1	2 485.0	2 287.5
8	2 560.4	2 315.8	2 488.0	2 290.8
9	2 557.6	2 310.7	2 488.2	2 305.7
10	2 569.6	2 313.8	2 488.9	2 285.9
平均值	2 559.7	2 313.9	2 487.6	2 293.0

2.2 本底计数率 不放置平面源,放置与平面源大小一致、材质类似的平面盘,保证与测量平面源相同实验条件下测量 α 、 β 计数率,以此作为系统的本底计数率。测量结果的统计涨落不确定度控制到不超过1%($k=1$),即总计数达到10 000以上。数字化仪在300 Lsb阈值 α 本底计数率为11.2 s^{-1} , β 本底计数

率为 23.3 s^{-1} ; 数字化仪在 1640 Lsb 阈值 α 本底计数率为 0.23 s^{-1} , β 本底计数率为 13.5 s^{-1} ; 电子学 α 本底计数率为 0.26 s^{-1} , β 本底计数率为 15.8 s^{-1} 。

2.3 计数率修正与结果比对 结合上述数字化仪和电子学测量计数率, 对死时间、本底计数率、放射性核素衰变进行修正, 得到测量比对分析结果如表 4。

表 4 数字化和电子学测量比对分析结果

Table 4 Comparative analysis results of digital and electronic measurements

平面源类型	200 mV	300 Lsb	1640 Lsb	300 Lsb和200 mV测量结果 相对偏差(%)	1640 Lsb和200 mV测量结果 相对偏差(%)
	修正后计数率/s ⁻¹	修正后计数率/s ⁻¹	修正后计数率/s ⁻¹		
²⁴¹ Am	2 618.0	2 619.5	2 602.2	0.05	-0.60
¹⁴ C	2 326.9	2 177.6	2 317.5	-6.4	-0.40
³⁶ Cl	2 503.2	2 362.3	2 497.3	-5.6	-0.24
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	2 667.5	2 544.9	2 659.6	-4.6	-0.30

由表 4 可以看出, 在相同阈值情况下, 电子学和数字化仪对 α 、 β 平面源测量结果相对偏差均在 0.6% 以内, 在不确定度范围内相一致; 在 300 Lsb 时, 对 β 平面源测量结果相对偏差较大。具体原因可能是由于阈值设置较低时, 数字化仪会采集较多的振荡信号, 如图 4, 在蓝色基线以上的波动信号会被采集下来。且在长门(红色)的采集时间内, 死时间会导致采集到的真实信号减少, 从而导致实际计数率减少, 产生较大的偏差。从图 5 能谱图中亦可看出, 在噪声附近存在着较多的计数, 与上述原因分析一致。

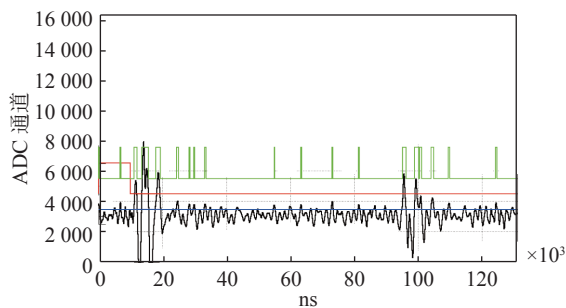


图 4 数字化仪采样波形图

Figure 4 Sampling waveform diagram of the digitizer

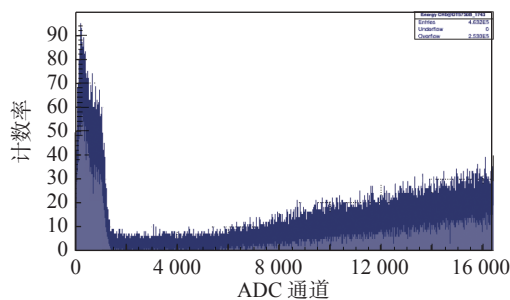


图 5 300 Lsb 阈值 ¹⁴C 数字化采样能谱图

Figure 5 Digital sampling energy spectrum of ¹⁴C at the threshold of 300 Lsb

器, 利用数字化仪和传统模拟电子学插件分别对 ²⁴¹Am、¹⁴C、³⁶Cl 和 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 等不同类型、不同衰变能量的平面源表面粒子发射率进行测量。结果表明: 相同阈值条件下的测量结果相对偏差均在 0.6% 以内, 在不确定范围内一致, 验证了数字化仪在放射性核素测量方面的有效性和准确性; 且 ¹⁴C (156.5 keV, 100%)、³⁶Cl (709.5 keV, 98.1%) 和 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y (2.3 MeV, 99.98%) 3 个源分别代表了低能、中能、高能的 β 源, 说明数字化仪的应用具有一定的适用性和普遍性; 但在低阈值测量条件下, 数字化仪测量存在一定的误差和局限性, 不能通过扣除本底的方式剔除小幅度震荡信号对计数率测量结果的影响。

在放射性核素测量方面, 代表着电子学最新进展和技术的数字化仪正逐步替代传统模拟电子学插件。数字化仪可实时对不同脉冲的形状、时间、幅值等相关信息进行提取与处理; 也可将脉冲高度和时间信息以列表模式记录下来, 并将这些信息记录在基于 FPGA (field-programmable gate array) 的设备中, 通过特定的上位机软件进行离线处理。这 2 种方式都有各自的优势, 实时状态下可以及时发现测量过程中的异常信息, 并提供了一个能够报告的系统; 离线处理模式不仅可以获得测量的估算值, 还可以将估算值的整个数据集提供给其他人员进行核查与验证, 拥有较大的自由度。且 FPGA 算法和软件分析程序可以随时进行编程, 对所需信息进行提取, 而不需要购置额外的硬件, 这也是数字化仪的优势所在。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 路天翔负责研究思路、数据处理和分析、论文撰写; 周倩倩负责数据处理和分析; 张明负责研究思路、

3 讨论

本实验基于 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 多丝正比计数器气体探测

论文修改和审阅; 拓飞负责论文审阅; 孔淑颖负责文献调研和整理

参考文献

- [1] Pausch G, Moszyński M, Wolski D, et al. Application of the pulse-shape technique to proton-alpha discrimination in Si-detector arrays[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A:Accel, Spectrom, Detect Assoc Equip, 1995, 365 (1) : 176-184. DOI: 10.1016/0168-9002(95)00488-2.
- [2] Jordanov VT, Knoll GF, Huber AC, et al. Digital techniques for real-time pulse shaping in radiation measurements[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A:Accel, Spectrom, Detect Assoc Equip, 1994, 353 (1/3) : 261-264. DOI: 10.1016/0168-9002(94)91652-7.
- [3] 杜成名. 数字化波形采样技术在粒子探测中的应用与研究[D]. 兰州: 中国科学院研究生院(近代物理研究所), 2016.
Du CM. The application and research of the digital waveform sampling technology in particle detection[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [4] Morishita Y. Development of a portable alpha -beta -gamma radioactive material continuous air-monitoring system[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A:Accel, Spectrom, Detect Assoc Equip, 2022, 1027: 166258. DOI: 10.1016/j.nima.2021.166258.
- [5] Morishita Y, Di Fulvio A, Clarke SD, et al. Organic scintillator-based alpha/beta detector for radiological decontamination[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A:Accel, Spectrom, Detect Assoc Equip, 2019, 935: 207-213. DOI: 10.1016/j.nima.2019.04.024.
- [6] Kim C, Yeom JY, Kim G. Digital n- γ pulse shape discrimination in organic scintillators with a high-speed digitizer[J]. J Radiat Prot Res, 2019, 44 (2) : 53-63. DOI: 10.14407/jrpr.2019.44.2.53.
- [7] Chepurinov AS, Gavrilenko OI, Kirsanov MA, et al. Study of the influence of ADC sampling rate on the efficiency of neutron-gamma discrimination by the pulse shape[J]. J Phys:Conf Ser, 2017, 934: 012054. DOI: 10.1088/1742-6596/934/1/012054.
- [8] 梁珺成, 李奇, 柳加成, 等. $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 粒子发射率的绝对测量[J]. 计量学报, 2016, 37 (2) : 209-213. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2016.02.22.
Liang JC, Li Q, Liu JC, et al. The absolute measurement for $2\pi\alpha$ and $2\pi\beta$ particle emission rate[J]. Acta Metrol Sin, 2016, 37 (2) : 209-213. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2016.02.22.
- [9] 李语奇, 王仁生, 张明, 等. 多丝正比计数器工作气体压强变化对 α 、 β 表面粒子发射率测量的影响[J]. 计量学报, 2019, 40 (1) : 153-158. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2019.01.25.
Li YQ, Wang RS, Zhang M, et al. Gas pressure dependence in the multi-wire proportional counter on the absolute measurement for α and β sources surface emission rates[J]. Acta Metrol Sin, 2019, 40 (1) : 153-158. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2019.01.25.
- [10] Kumar M, Gandhi SS, Nuwad J, et al. An electrochemical pathway to prepare circular planar $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ sources for the calibration of surface contamination monitors[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2014, 302 (1) : 709-719. DOI: 10.1007/s10967-014-3272-1.
- [11] User manual UM3148 DT5730/DT5730S 8 channel 14 bit 500/250 MS/s digitizer[EB/OL]. Viareggio, Italy, 2021. <https://www.caen.it/products/dt5730/>.
- [12] 李朋杰, 李智焕, 陈志强, 等. 硅探测器的数字化脉冲形状甄别[J]. 原子核物理评论, 2017, 34 (2) : 177-183. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.34.02.177.
Li PJ, Li ZH, Chen ZQ, et al. Digital pulse shape discrimination for silicon detector[J]. Nucl Phys Rev, 2017, 34 (2) : 177-183. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.34.02.177.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20131—2006 α/β 流气式正比计数器的标定和使用[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 20131 —2006 Calibration and usage of α/β gas proportional counters[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [14] ISO. ISO 8769: 2020 Measurement of radioactivity — Alpha-, beta- and photon emitting radionuclides — Reference measurement standard specifications for the calibration of surface contamination monitors[S]. Geneva: International Standards Organization, 2020.
- [15] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 第三版. 北京: 原子能出版社, 1997.
Fudan University, Tsinghua University, Peking University. Methods of nuclear physical experiments[M]. 3rd Ed. Beijing: Atomic Energy Press, 1997.

(收稿日期:2022-08-09)