

n-γ脉冲信号的仿真及其波形甄别技术研究

左广霞 何彬 许鹏 邱晓林 马文彦 黎素芬

(第二炮兵工程大学 西安 710025)

摘要 在中子探测过程中实现 n-γ 脉冲信号的甄别对中子探测具有重要意义。本文在 LabVIEW 平台上实现了 n-γ 脉冲信号仿真单元,并用电荷比较法和脉冲持续时间法对其产生的 n-γ 脉冲信号进行了数字化甄别。仿真实验及数据处理结果表明,电荷比较法与脉冲持续时间法都能实现 n-γ 甄别,但后者的甄别能力更强。

关键词 仿真,脉冲波形甄别,LabVIEW

中图分类号 TL8

中子在无损检测、测井、辐射医学等领域的应用广泛,对中子测量水平也提出了更高要求。由于中子与周围环境的非弹性散射、慢化中子俘获等原因,中子测量中都伴随着大量的 γ 射线本底^[1]。而许多中子探测器对 γ 射线灵敏,为提高中子测量水平,须排除 γ 射线的干扰,n-γ 甄别就成为中子探测的一项关键技术。

n-γ 甄别技术的发展与电子器件和信号处理技术的发展相适应。模拟信号处理占主导地位时,n-γ 甄别主要采用基于模拟技术的上升时间法^[3]、电荷比较法^[4]等,需专用的电子学插件。近年来,高速 ADC 的出现使完整记录数字化脉冲波形成为可能,而 DSP、FPGA 等数字器件的发展又为全数字化的 n-γ 甄别法提供了方便。早期的数字化 n-γ 甄别还曾沿用传统的甄别思想,如电荷比较法、脉冲持续时间法等,但国内外学者很快采用神经网络法^[5]、脉冲梯度法^[6]、小波变换法^[7]等基于数字技术的甄别方法。与模拟方法相比,数字化甄别法省去了大量的硬件,且大大提高了 n-γ 甄别的速度和精度。因此,数字化将成为 n-γ 甄别方法发展的主流趋势^[8,9]。

在数字化 n-γ 甄别算法的研究过程中,常需 n-γ 数字化核辐射信号对其功能进行验证。本文基于 Windows 和 LabVIEW 平台,建立一种闪烁体中子探测器的 n-γ 脉冲信号数值仿真方法,并利用该仿真信号开展电荷比较法和脉冲持续时间法的数字化甄别研究。

1 n-γ脉冲信号的仿真实现

液体闪烁体探测器具有良好的时间响应特性和 n-γ 甄别性能,且易于制成各种形状和大小,适合

于 n-γ 混合场中的中子探测。对于闪烁体而言,入射粒子激发的荧光脉冲通常可用指数衰减的快、慢成分来表示。在液体闪烁体中形成的带电粒子所产生的光脉冲形状可描述为^[2]:

$$L(t) = L_f e^{-t/\tau_f} + L_s e^{-t/\tau_s} \quad (1)$$

式中, L 为总荧光强度, L_f 、 L_s 分别为快、慢成分的发光强度, τ_f 、 τ_s 分别为快、慢成分的发光衰减时间, τ_f 即为 ns 量级, τ_s 为 μs 量级。对同一闪烁体,快、慢成分的强度比与入射粒子的类型有关。研究表明,中子与闪烁体作用产生的荧光脉冲快成分的份额小,慢成分的份额大,而 γ 射线则恰好相反。因此,中子与 γ 射线在闪烁体中产生的脉冲形状就有所不同(图 1),这些脉冲波形的差异可作为鉴别粒子的根据。现有的 n-γ 甄别方法都是利用脉冲形状的不同来进行甄别,称为脉冲形状甄别法。

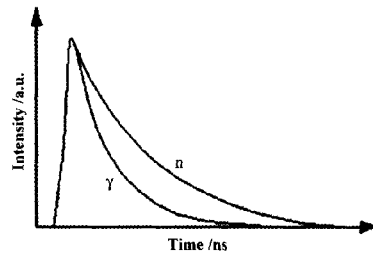


图 1 n、γ 引起的荧光脉冲形状
Fig.1 Flight pulse shape of neutrons and gamma-rays.

当光电倍增管工作在线性范围时,从阳极或某个打拿极引出的电流脉冲形状反映了闪烁体发射的光脉冲形状,即电流脉冲:

$$I(t) = I_f(\rho) e^{-t/\tau_f} + I_s(\rho) e^{-t/\tau_s} \quad (2)$$

第一作者:左广霞,女,1973年生,2005年于第二炮兵工程大学获得硕士学位,第二炮兵工程大学在读博士研究生,主要从事核电子学与辐射探测技术研究

收稿日期:2012-02-06,修回日期:2012-03-19

式中, τ_f 、 τ_s 及 $I_f(\rho)$ 、 $I_s(\rho)$ 分别是快、慢成分的衰减时间及电流脉冲最大值。

由于 n - γ 脉冲信号是核辐射信号, 因此仿真时必须体现出核辐射信号的统计性特征: (1) 脉冲信号的幅度是服从高斯分布; (2) n 、 γ 脉冲信号出现的相对比例是固定的, 而时间是随机的。

在 LabVIEW 编程时, 采用条件结构进行判断, 综合运用高斯噪声脉冲、双指数函数和随机函数来仿真 n 、 γ 核随机脉冲信号, 真假两分支分别代表 n 、 γ 脉冲信号的产生分支。

2 n - γ 波形甄别技术研究

2.1 电荷比较法的 LabVIEW 实现

基于模拟技术的电荷比较法的原理为: 用一个

时间常数很大的积分回路对电流脉冲积分可得总电荷 $Q = \int_0^\infty I(t) dt = I_f(\rho)\tau_f + I_s(\rho)\tau_s = Q_f(\rho) + Q_s(\rho)$ 。即电荷脉冲由快、慢两部分组成, 都是带电粒子在闪烁体中形成电离密度 ρ 的函数。不同带电粒子形成的 Q 、 $Q_f(\rho)$ 、 $Q_s(\rho)$ 、 Q_f/Q_s 或 $Q/Q_s(\rho)$ 都不一样, 由此可来鉴别粒子类型。电荷比较法电路调节较为复杂, 需要仔细调节各延迟信号的延迟时间, 使电路调整至最佳工作状态^[10]。

由电荷比较法的工作原理, 其实质是对电流脉冲信号进行积分, 即求电流脉冲所包围的面积, 利用不同的积分面积来甄别 n - γ 信号。由于仿真脉冲信号是离散的一维数组, 故经积分可得总电荷量, 然后取适当的道宽, 对总电荷量进行统计分布。电荷比较法 LabVIEW 实现的程序框图如图 2 所示。

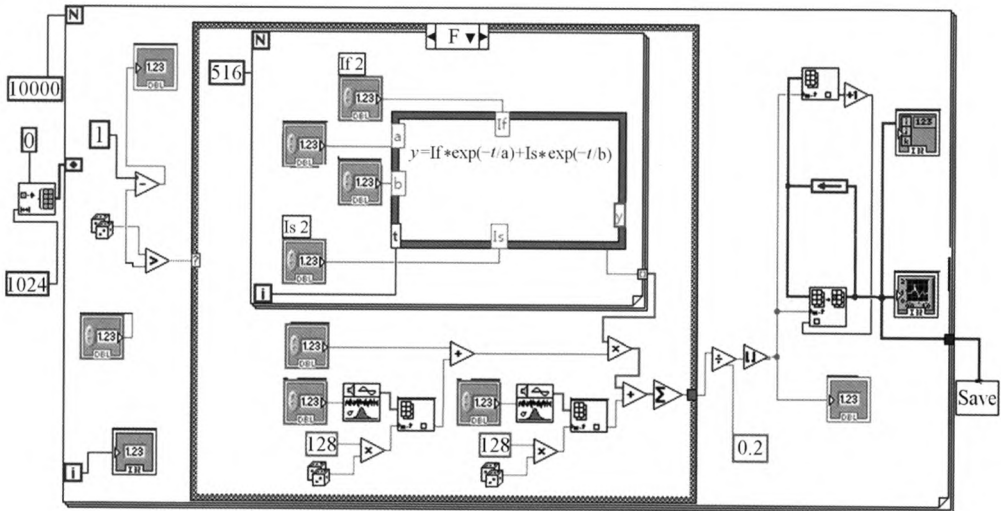


图 2 电荷比较方法 LabVIEW 实现的程序框图
Fig.2 Programm diagram of charge comparison method on LabVIEW.

2.2 脉冲持续时间法的 LabVIEW 实现

探测器产生的 n 、 γ 脉冲的持续时间是不同的, n 脉冲持续时间稍长, 而 γ 脉冲稍短, 因此我们可以进行 n - γ 甄别。脉冲持续时间法 LabVIEW 实现的程序框图如图 3 所示。

3 数据处理

理想的 n - γ 甄别方法应把中子和 γ 事件完全区分开。衡量 n - γ 甄别性能的优劣可以用品质因数 FOM(Figure of Merit)来表示, 其定义为^[1]

$$FOM = \Delta D / (FWHM_\gamma + FWHM_n) \quad (3)$$

式中, ΔD 为 γ 射线和中子对应峰位之间的距离, $FWHM_\gamma$ 和 $FWHM_n$ 分别为 γ 射线和中子射线对应峰的半高宽。

为了比较电荷比较法和脉冲持续时间法的 n - γ 甄别性能, 设置 n 、 γ 随机脉冲信号的幅度均值、幅度标准偏差、噪声标准偏差相同, 而其它波形参数如表 1 所示。

表 1 n 与 γ 射线脉冲波形参数
Table 1 Neutron-gamma pulse wave parameters

type	τ_f	τ_s	$I_f(\rho)$	$I_s(\rho)$
γ	5	19	-1	1.5
n	5	30	-2	2

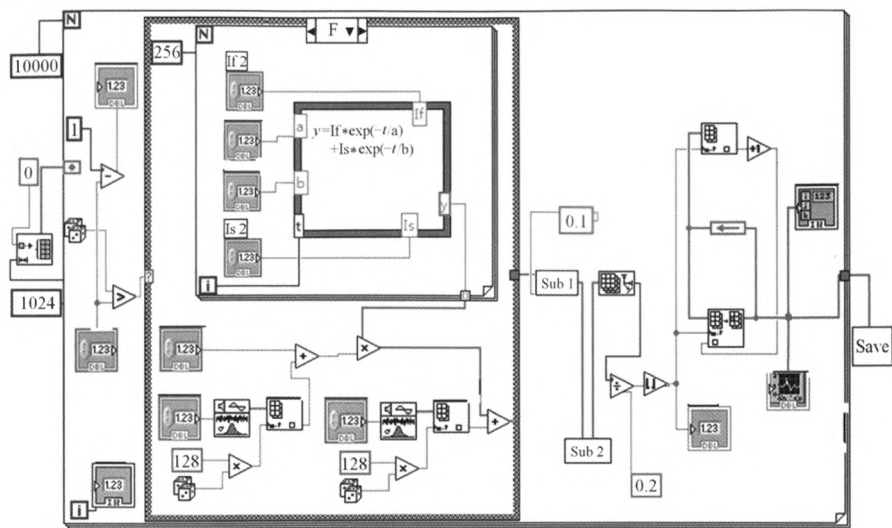


图 3 脉冲持续时间法 LabVIEW 实现的程序框图
Fig.3 Programm diagram of pulse duration method on LabVIEW.

控制 LabVIEW 程序随机产生 10,000 个 n、γ 脉冲信号，其产生的比例为 1:1，分别用电荷比较法和脉冲持续时间法进行 n-γ 甄别。用电荷比较法进行 n-γ 甄别的结果为 $FOM=\Delta D/(FWHM_{\gamma}+FWHM_n)=1.32$ (图 4)。

利用脉冲持续时间法进行 n-γ 甄别的结果为 $FOM=2.08$ (图 5)。

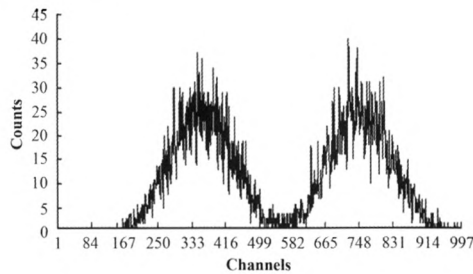


图 4 电荷比较法的甄别结果
Fig.4 Discrimination results using the charge comparison method.

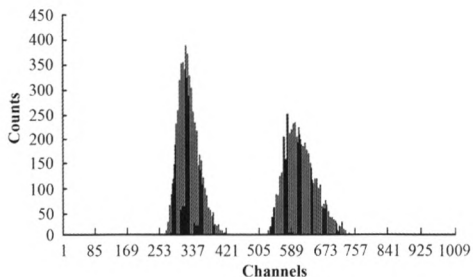


图 5 持续时间法的甄别结果
Fig.5 Discrimination results using the pulse duration method.

4 结语

本文基于 Windows 和 LabVIEW 平台，建立了一种闪烁体中子探测器的 n-γ 脉冲信号数值仿真方法，并利用该仿真信号开展了电荷比较法和脉冲持续时间法的数字化甄别研究。数据处理结果显示，持续时间法的品质因数要大于电荷比较法的，即持续时间法的甄别能力要优于电荷比较法，与基于模拟技术的波形甄别结论是相符的。

参考文献

- 1 Knoll G F. Radiation Detection and Measurement[M]. Third ed. New York: Wiley, 2000
- 2 复旦大学, 清华大学, 北京大学合编. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1997
Fudan University, Tsinghua University, Peking University. Nuclear physics experimental methods [M]. Beijing: Agency Press, 1997
- 3 Nowicki L, Piasecki E, Sobolewski J, et al. Investigation of polar emission in ^{252}Cf and $^{235}\text{U}+n_{\text{th}}$ fission[J]. Nuclear Physics A, 1982, 375(2): 187–192
- 4 Adams J M, White G A versatile pulse shape discriminator for charged particle separation and its application to fast neutron time-of-flight spectroscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1978, 156: 459–476
- 5 Liu G, Aspinall M D, Ma X, et al. An investigation of the digital discrimination of neutron rays with organic scintillation detectors using an artificial neural network[J].

- Nuclear Instruments and Methods A, 2009, **607**(3): 620-628
- 6 Mellow B D, Aspinall M D, Mackin R Q, *et al.* Digital discrimination of neutrons and γ -rays in liquid scintillators using pulse gradient analysis[J]. Nuclear Instruments and Methods A, 2007, **578**(1): 191-197
 - 7 Yousefi S, Lucchese L, Aspinall M D. Digital discrimination of neutrons and γ -rays in liquid scintillators using wavelets[J]. Nuclear Instruments and Methods A, 2009, **598**(2): 551-555
 - 8 罗晓亮, 刘国福, 杨俊, 等. 液体闪烁体探测器 n- γ 甄别方法的现状与发展[J]. 核电子学与探测技术, 2010, (6): 802-806
 - LUO Xiaoliang, LIU Guofu, YANG Jun, *et al.* Development of the discrimination of neutrons and gamma rays in liquid scintillators[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, (6): 802-806
 - 9 Söderström P A, Nyberg J, Wolters R. Digital pulse-shape discrimination of fast neutrons and γ rays[J]. Nucl Instru Methods Phys Res A, 2008, **594**(1): 79-89
 - 10 陈宇, 王子敬, 毛泽普, 等. 电荷比较法测量液体闪烁体 n- γ 分辨性能[J]. 高能物理与核物理, 1997, **23**(7): 616-621
 - Chen Yu, Wang Zijing, Mao Zepu, *et al.* Charge comparison method used to discriminate photons and neutrons in liquid scintillators[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1997, **23**(7): 616-621

Simulation of neutrons and gamma pulse signal and research on the pulse shape discrimination technology

ZUO Guangxia HE Bin XU Peng QIU Xiaolin MA Wenyan LI Sufen

(The Second Artillery Engineering Nniversity, Xi'an 710025, China)

Abstract In neutrons detection, it is important to discriminate the neutron signals from the gamma-ray background. In this article, simulation of neutrons and gamma pulse signals is developed based on the LabVIEW platform. Two digital algorithms of the charge comparison method and the pulse duration time method are realized using 10000 simulation signals. Experimental results show that neutron and gamma pulse signals can be discriminated by the two methods, and the pulse duration time method is better than the charge comparison method.

Key words Simulation, Pulse shape discrimination, LabVIEW

CLC TL8