

裂变室输出信号数字化处理的仿真研究

袁超^{1,2,3} 李勇平^{1,3} 黄跃峰^{1,3}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

3 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

摘要 中子通量密度是核反应堆工程中的一个重要参数,利用裂变室进行宽量程中子通量密度测量的数字化处理系统较传统的模拟电路有更大优势。本文基于数字化中子通量测量方案进行仿真研究,首先用计算机模拟带电子学噪声的裂变室输出信号仿真波形,提出在低通量和高通量的中子通量密度情况下,用数字梯形形成形滤波和数字自适应参数滤波算法,不仅可以实现抗堆积和脉冲噪声有效甄别(脉冲模式)处理,提高计数率的准确度,而且能够提高均方值计算(坎贝尔模式)的准确度。

关键词 裂变室, 宽量程, 数字化

中图分类号 TL375.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010401

反应堆从启动到满功率运行对应的中子通量密度变化在十个数量级以上,通常这么宽的测量范围分为三个测量通道相互叠加来完成。裂变电离室有三种工作模式:脉冲模式、坎贝尔模式以及电流模式。正是基于裂变室的这三种工作模式,在反应堆中子通量密度测量中,可以只用裂变室实现宽量程中子通量密度测量^[1]。在中子通量水平比较低时,裂变室输出脉冲信号,通过脉冲计数测量中子通量密度;随着中子通量水平的增加,脉冲信号彼此之间相互叠加,裂变室的输出信号表现为涨落信号,根据坎贝尔理论,此时信号的均方值与中子通量水平成正比;当中子通量进一步增加时,前置放大电路有可能饱和,需改用电流模式^[2]。裂变室宽量程中子测量系统的突出优点是不仅探测器数量减少、安装布局简化、使用和维护较为方便,且具有很好的 n/γ 甄别能力,工作寿命长,事故后处理测量可信度高等^[3]。

近年来,利用裂变室进行宽量程测量中子通量密度的模拟信号处理系统已经应用在反应堆上。随着数字化技术的发展,较之模拟测量系统,数字化测量系统在信号处理上更加灵活,后端信号通信抗干扰能力强,所以,研究数字化测量系统有着十分重要的意义。本文将以前述裂变室的输出信号为基础,分别探讨数字自适应参数滤波和梯形形成形滤波算法在高低中子通量密度情况下进行数字化信号处理。

1 裂变室输出信号仿真和处理方法

由于中子源价格昂贵,使用和保管条件复杂,实验研究很难全面地获得裂变室输出反映中子通量密度水平的实际信号,本文提出一种对中子信号进行数值仿真的方法,并通过计算机软件模拟生成^[2]。根据探测器输出波形的特点,生成不同形状、幅度及时间间隔的数字中子信号波形数据,开展数字处理算法的研究。

1.1 裂变室输出信号波形的数学描述

裂变室输出信号是一系列具有特点形状随机信号,根据文献[2-3],输出波形表达式为:

$$V(t) = \frac{QR}{\tau} ((1 - e^{-wt})u(t) - (1 - e^{-w(t-\tau)})u(t-\tau)) \quad (1)$$

式中, Q 为裂变室释放的电荷量,取 $Q=0.5$ pC; R 为前放输入等效电阻,取 $R=5$ k Ω ; τ 为裂变室一次裂变反应的电子收集时间,取 $\tau=400$ ns; $w=1/RC$, $C=200$ pF^[2]。

1.2 裂变室输出信号的统计特性

(1) 脉冲信号的时间间隔。结合探测器对中子信号的测量时间与平均计数率,可以获得一段时间内形成的中子信号脉冲数量,并且各个脉冲之间满足指数分布。

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02010300)和国家自然科学基金(No.11105209)资助

第一作者:袁超,男,1988年出生,2011年毕业于中国科学技术大学,现为硕士研究生,研究方向为数字化裂变室宽量程中子测量技术的研究

通讯作者:李勇平, E-mail: liyongping@sinap.ac.cn

收稿日期:2014-09-23, 修回日期:2014-10-16

(2) 脉冲幅值。幅度与裂变室探测器对入射粒子吸收能量成正比, 而吸收能量存在随机涨落特征。一般仿真时幅值可用正态分布来表示, 分布的标准差 σ 由探测器的固有能量分辨率 R 和脉冲幅值平均值 A 决定^[4], 一般有:

$$\sigma = R \times A / 2.355 \quad (2)$$

(3) 脉冲叠加原理。裂变室的系统模型是一个线性时不变系统, 根据叠加原理, 中子两个脉冲波形部分重叠时, 起止时间不变, 幅值线性相加。

(4) 脉冲噪声。由于电子器件与环境等因素的干扰, 中子信号测量过程中会引入干扰噪声。综合来说, 电子学白噪声可以用高斯分布来表示。

1.3 裂变室输出信号的数字化处理方法

裂变室在较低中子通量密度情况下输出信号主要是离散的脉冲信号, 信号输出特点是由中子产生的电流脉冲幅度要远大于由 α 和 γ 等粒子产生的脉冲幅度^[5]。所以数字化处理部分幅度甄别就能取得很好的效果。但随着中子通量密度的提高, 脉冲叠加出现的概率变大, 如果只是通过一个阈值来进行幅度甄别, 可能会带来漏计数的问题, 如图 1。图 1 中用矩形块标注处由于叠加严重, 采用阈值(直线标注)比较法会产生漏计数的情况。而且裂变室的宽量程测量之间有两个量程的覆盖, 通过分离脉冲堆积, 可以提高脉冲计数模式量程的最大计数率, 这样将增大脉冲模式和坎贝尔模式的覆盖区间, 更有利于两个量程的标定。

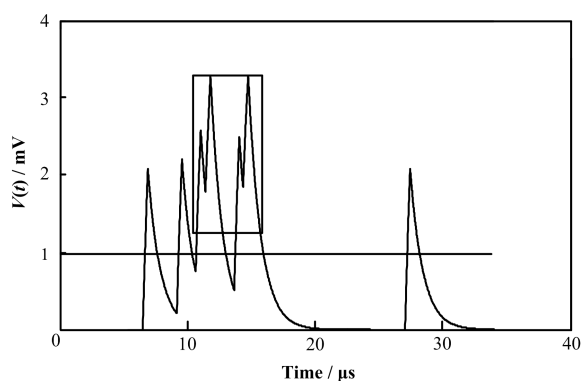


图 1 中子信号堆积图
Fig.1 Accumulation of neutron signal.

与传统的采用电子器件的模拟处理方法相比, 数字信号处理方法利用高速高分辨率的模/数转换器数字化器件和微处理器来实现数字滤波、抗堆积等处理, 采用应用于数字多道中的梯形成形滤波算

法可以解决这个问题。梯形成形滤波是指将脉冲成形为脉宽和平顶宽度均可调节的等腰梯形。梯形成形算法具备一定的低通滤波能力, 具有算法简单快速、脉冲前后沿时间相等、脉冲窄、下降快、脉冲宽度和平顶宽度可独立调整等优点^[6], 可以根据需求设定, 有利于实时处理。

当中子信号叠加增多时, 计数模式不再适用。据坎贝尔定理均方值 σ 与中子通量密度 $\bar{N}$ 成正比^[7]可知:

$$\sigma^2 = \overline{NQ} \int_{-\infty}^{\infty} (t - \tau) d\tau = \bar{N} \times \overline{Q^2} \times \frac{R}{2C} = K \times \bar{N} \quad (3)$$

数字化后可得:

$$\bar{N} = \frac{1}{K} \times \sigma^2 = \frac{1}{K} \times \overline{(V_i - \bar{V})^2} \quad (4)$$

式中, V_i 为数字化后的信号电压值; $\bar{V}$ 为数字化后均方值计算周期内信号电压的均值。信号 V_i 可以看做实际中子信号与噪声信号的叠加, 如式(5):

$$V_i = V_i^{\text{act}} + V_i^{\text{noise}} \quad (5)$$

式中, V_i^{act} 为数字化后实际中子信号电压值; V_i^{noise} 为数字化后噪声信号电压值。

将式(5)代入式(4)中可得:

$$\begin{aligned} \bar{N} &= \frac{1}{K} \times \overline{(V_i - \bar{V})^2} = \frac{1}{K} \times \overline{(V_i^{\text{act}} + V_i^{\text{noise}} - \bar{V})^2} \\ &= \frac{1}{K} \times \overline{(V_i^{\text{act}} - \bar{V})^2} + \frac{1}{K} \times \overline{(V_i^{\text{noise}})^2} + \frac{2}{K} \times \overline{(V_i^{\text{act}} - \bar{V}) \times V_i^{\text{noise}}} \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)中第一项为中子信号的均方值, 第二项和第三项是由噪声引入的计算误差, 所以数字滤波显得十分重要。常用模拟的滤波方案参数单一, 不同中子通量密度的信号采用单一的滤波参数不利于最佳滤波。为得到最佳滤波, 可以设计一个参数可调的数字自适应滤波。为得到好的滤波参数, 需要对仿真信号进行功率谱分析。

2 数字信号处理结果与分析

通过仿真不同计数率下的裂变室输出中子信号波形, 开展脉冲计数模式和坎贝尔模式的数字化处理算法研究。波形仿真算法流程图如图 2 所示, 利用 MATLAB 分别仿真计数率为 $f=10^4$ Hz、 $f=10^6$ Hz 的波形图, 如图 3 所示。

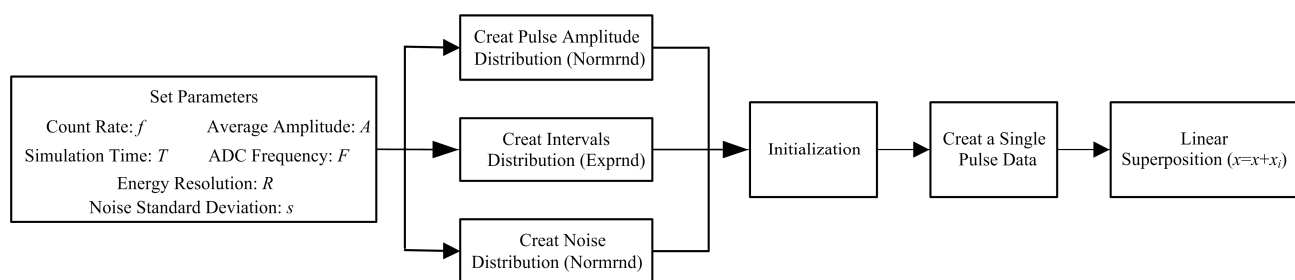


图2 裂变室输出仿真信号流程图
Fig.2 Flow chart of fission chamber simulation output signal.

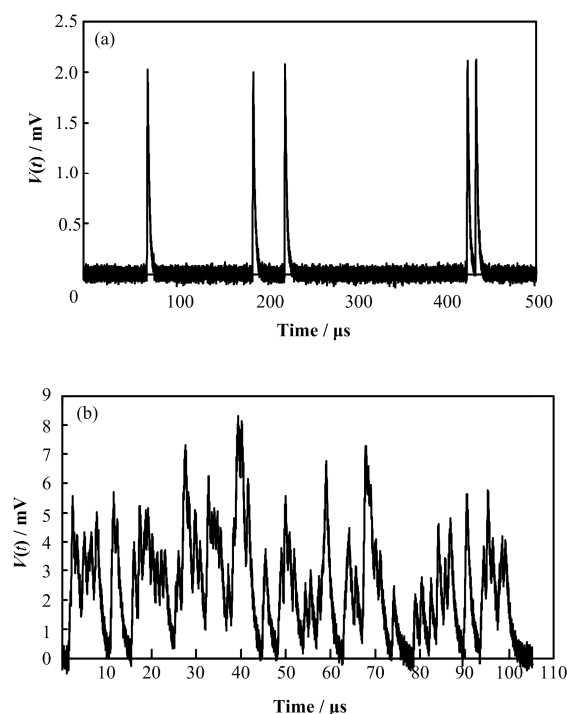


图3 仿真信号
(a) $f=10^4$ Hz, (b) $f=10^6$ Hz
Fig.3 Simulation signal.
(a) $f=10^4$ Hz, (b) $f=10^6$ Hz

2.1 低中子通量（计数模式）情况下的抗堆积甄别处理

首先利用 MATLAB 设置仿真时间、计数率、采样时间等参数，仿真计数率为 $f=10^5$ Hz 的加噪声中子信号。由图 4，原始仿真脉冲信号之间有叠加，经过梯形成形滤波后，各个脉冲波形变得尖锐，且噪声信息也得到了抑制。通过调整梯形成形参数，图 4 中用矩形块标注的堆积脉冲均得到很好的分离，且处理后的波形与未处理的波形个数保持一致，如果取幅度比较阈值为 1，梯形成形滤波前，脉冲计数值将会有漏计数，梯形成形后增加了计数的准确性。通过调节数字梯形成形的参数，可以更好地分离抗堆积脉冲，可以增大系统的最大计数率，增大与坎贝尔模式测量的覆盖区域，更有利于后续的

覆盖区域系数的标定^[8]。

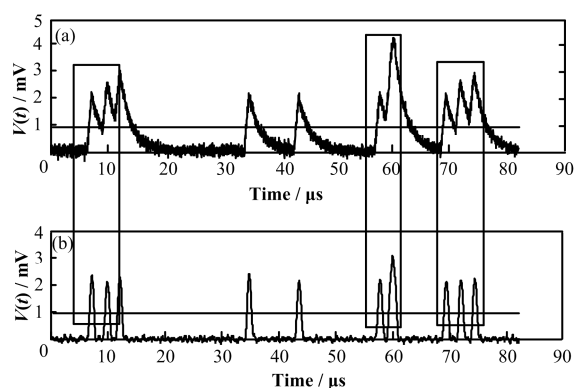


图4 仿真中子信号(a)及梯形成形处理后(b)
Fig.4 Simulation of neutron digital signal (a) and processing of trapezoidal shape filtering (b).

2.2 高中子通量（坎贝尔模式）情况下的均方根计算处理

为实现较高通量密度中子信号的数字滤波，首先要对信号的特点进行分析，由于中子的信号的随机性，无法直接使用常规频域分析方法，因此通过随机信号功率谱分析对不同中子通量的信号在频域上的分析，为设计数字滤波器提供重要参考。针对数字滤波的分析，设计了相应的实例进行验证。下面分别以中子通量密度计数率 $f=10^5$ Hz、 $f=10^6$ Hz、 $f=10^7$ Hz 为例来进行功率谱分析。

通过图 5 对功率谱的分析可知，随着中子计数率的提高，功率谱并未发生突变，只是主瓣的位置不一致。中子信号能量主要集中在低频，高频的分量较低，而高斯白噪声的能量在频率上是均匀分布的，高频分量主要由噪声决定。所以可以设计一个参数可变的数字低通滤波器，截止频率取决于信号对应的中子通量密度。信号数字化后通过数字滤波器后再计算均方值，通过降噪滤波来提高中子通量密度测量的准确度。下面分别以中子通量密度计数率 $f=10^6$ Hz、 $f=2 \times 10^6$ Hz 为例进行验证，结果如表 1 所示。

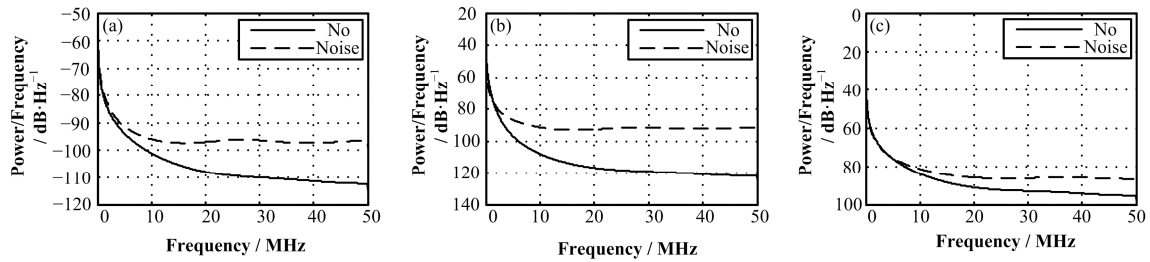


图5 仿真波形功率谱分析
(a) $f=10^5$ Hz, (b) $f=10^6$ Hz, (c) $f=10^7$ Hz
Fig.5 Simulation waveform power spectrum analysis.
(a) $f=10^5$ Hz, (b) $f=10^6$ Hz, (c) $f=10^7$ Hz

表1 数字滤波器对均方值的影响
Table 1 Digital filter's influence on the mean square values.

计数率 f Counting rate f / Hz	均方值 Value / mV			
	仿真波形 Simulation waveform	仿真波形滤波 Simulation waveform +filtering	仿真波形(噪声) Simulation waveform +noise	仿真波形(噪声)滤波 Simulation waveform +noise+filtering
1×10^6	2.682	2.671	3.274	2.689
2×10^6	5.343	5.301	5.881	5.399

由表 1, 理想仿真波形通过滤波器后均方值基本没有变化, 可以说明有用的频率分离基本被保存下来, 仿真波形加入噪声后, 均方值发生了变化, 可以说明数字滤波的必要性, 通过滤波后均方值更加准确地反应了中子通量密度的准确性。

3 结语

数字化中子通量密度测量系统较模拟测量系统有着更大的优势, 本文针对裂变室的宽量程输出信号的波形仿真以及数字化信号处理中出现的问题, 分别在高低中子通量密度情况下采用数字自适应参数滤波和梯形形成形滤波算法对仿真波形处理, 得到较好的效果。本文通过理论上的仿真和分析, 为后续数字化中子通量密度测量系统的研制提供了参考和思路。

参考文献

- 李洪才, 魏昌武, 韩世菊. 宽量程中子测量装置[J]. 核动力工程, 1981, 2(1): 1-9
LI Hongcai, WEI Changwu, HAN Shiju. The device of wide range of neutron measurement[J]. Nuclear Power Engineering, 1981, 2(1): 1-9
- 乔宁, 李铎, 熊华胜. 宽量程核测量系统中裂变室输出信号的仿真研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(10): 1892-1895

- QIAO Ning, LI Duo, XIONG Huasheng. Simulation research on wide range of nuclear fission chamber output signal in the measurement system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(10): 1892-1895
- 张连文. 宽量程中子监测技术[J]. 核动力工程, 1981, 2(5): 71-76
ZHANG Lianwen. The technology of wide range of neutron measurement[J]. Nuclear Power Engineering, 1981, 2(5): 71-76
- 李强, 江虹, 伍晓利. 基于数字微分滤波与降噪分析的核信号脉冲检测[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(1): 74-78
LI Qiang, JIANG Hong, WU Xiaoli. The pulse detection in nuclear signal based on the analysis of digital differential filter and noise reduction[J]. Electronics & Detection Technology, 2013, 33(1): 74-78
- Thermo Fisher Scientific. 裂变室技术堆外中子探测器原理及与传统电离室的比较[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(4): 809-810
Thermo Fisher Scientific. Fission chamber technology in reactor neutron detector principle and the comparison with traditional ionization chamber[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(4): 809-810
- 杨彬, 颜拥军, 周剑良. 核信号数字滤波成形算法仿真研究[J]. 核技术, 2010, 33(11): 818-823

- YANG Bin, YAN Yongjun, ZHOU Jianliang. Simulation study on digital filter to nuclear signals[J]. Nuclear Techniques, 2010, **33**(11): 818–823
- 7 黄自平, 钟明光, 熊国华. 基于坎贝尔定理的中子监测技术的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, **33**(9): 1054–1056
- HUANG Ziping, ZHONG Mingguang, XIONG Guohua. Research on neutron monitoring technology base on Campbell theorem[J]. Electronics & Detection Technology, 2013, **33**(9): 1054–1056
- 8 Li S P, Xu X F, Cao H R, *et al.* Dynamic linear calibration method for a wide range neutron flux monitor system in ITER[J]. Nuclear Science and Techniques, 2013, **24**(4): 040402

Simulation study on digital processing of fission chamber output signal

YUAN Chao^{1,2,3} LI Yongping^{1,3} HUANG Yuefeng^{1,3}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Background: Neutron flux density is an important parameter related to nuclear power of the reactor. Digitized processing of neutron flux density in a wide measurement range of fission chamber detector has more advantages than the traditional analog circuits. **Purpose:** The aim is to improve the accuracy of neutron counting in the pulse mode, as well as mean square value calculation in the Campbell mode. **Methods:** The waveform of the output signal of fission chamber with various electronic noise was simulated, and then a trapezoidal shape filtering and digital adaptive filtering were employed to deal with digitized waveform signal of fission chamber in both low neutron flux density (pulse mode) and high neutron flux density (Campbell mode) circumstances. **Results:** By using these two methods, the accuracy of both the pulse counting and mean square value calculation was improved. **Conclusion:** Trapezoidal shape filtering and digital adaptive filtering can be applied to process digitized fission chamber output signal to achieve precise measurement of the neutron flux density in a wide range.

Key words Fission chamber, Wide range, Digital

CLC TL375.4