

宽量程核测量系统中裂变室输出信号的仿真研究

乔宁, 李铎, 熊华胜

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 为建立一个实验室可用的宽量程核测量系统输入信号, 本工作进行了宽量程核测量系统中裂变室输出信号的仿真研究, 完成了裂变室输出的单个脉冲信号和脉冲叠加信号的仿真计算, 并实现了仿真结果的物理输出, 为宽量程核测量系统的算法设计和调试打下了基础。

关键词: 核测量系统; 裂变室; 信号仿真

中图分类号: TL36

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)10-1892-04

doi: 10.7538/yzk.2013.47.10.1892

Research on Fission Chamber Signal Simulation of Wide-range Nuclear Instrument System

QIAO Ning, LI Duo, XIONG Hua-sheng

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To establish an input signal to debug a digital wide-range nuclear instrument system (NIS) prototype, the research of fission chamber signal simulation was covered in this paper, which was composed of the simulation study of a pulse signal and a fluctuating current with pulse pile-up, and the signal output of the simulation results. The research is the first step to design and develop the algorithm of wide-range NIS prototype.

Key words: nuclear instrument system; fission chamber; signal simulation

核测量系统是核电厂最重要的测量系统之一, 用于向核电厂的其他仪表与控制系统(I&C系统)提供反应堆功率水平信息, 对于保证反应堆安全平稳运行起着极其重要的作用。早在20世纪60年代, 国外开始了宽量程中子通量测量技术的研究, 研究中应用裂变室可实现较宽范围内中子通量的监测^[1-5]; 在中子通量水平较低时, 裂变室输出脉冲形式的电信号, 脉冲的频率与中子通量水平成正比; 随着中子通量水平的提高, 脉冲信号彼此之间相互叠加, 形成具有一定

频率的脉动直流电信号, 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, 也与反应堆核功率成正比。宽量程中子测量应用脉冲测量技术和均方电压测量技术的结合, 仅用1个固定位置的裂变电离室, 完成宽量程(测量范围包括10个数量级)的中子通量测量。宽量程中子测量技术的突出优点是减少了探测器数量, 也减少了探测器与核测量装置之间的连接电缆, 同时简化了核测量系统的结构。我国在20世纪80年代也开展了类似的研究, 并有部分成果应用于

试验堆和某些特殊装置^[6-7],在此基础上开展数字化宽量程核测量系统的研究对我国的核电厂发展和某些特殊领域的应用具有重要意义。

宽量程核测量系统中裂变室探测的是反应堆中子通量信号,该信号随反应堆功率的变化而变化,但在实验室很难得到裂变室输出的反映中子通量水平的实际信号。裂变室输出信号的仿真研究目标是建立一个实验室可用的宽量程核测量系统输入信号。

1 裂变室输出单个脉冲信号的仿真研究

中子本身不带电,不会引起电离等作用,不产生直接的可观察效果,因此中子的探测是通过中子同原子核的相互作用,对反应的产物进行探测实现的。裂变室利用中子的重核裂变反应,由裂变碎片产生的强电离作用探测中子。

忽略前置放大器传递函数的影响时,裂变室-前置放大器等效电路如图 1 所示。将裂变室探头等效为恒流源 i ; C_0 为系统输入等效电容,即探头级间电容、电缆分布电容和放大器输入电容之和,取 $C_0 = 200 \text{ pF}$; R_0 为系统输入等效电阻,考虑到工程应用中常使用电压敏感型前置放大器,其输入阻抗可达 $\text{k}\Omega$ 至 $\text{M}\Omega$ 量级,取 $R_0 = 5\ 000 \ \Omega$ 。

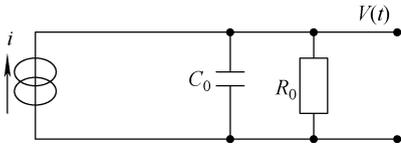


图 1 裂变室-前置放大器等效电路
Fig. 1 Equivalent circuit of fission chamber and preamplifier

如果将裂变室内发生 1 次中子裂变反应释放的电荷简化为理想脉冲,则图 1 中裂变室的输出信号即为一阶 RC 电路的冲激响应:

$$i = \delta(t)$$

$$V(t) = \frac{Q_0}{C_0} e^{-\frac{t}{R_0 C_0}} = \frac{Q_0}{C_0} e^{-\omega_0 t} \quad (1)$$

式中: $\omega_0 = \frac{1}{R_0 C_0}$; Q_0 为裂变室中发生 1 次裂变反应释放的电荷量,根据文献[8]数据取 $Q_0 = 0.5 \text{ pC}$ 。理想脉冲假设下裂变室释放的电荷及其输出脉冲的仿真示于图 2,该波形的幅值和

脉宽与工程测量结果较接近,但波形与实际观测差别较大,这种差别主要缘于理想脉冲的假设过于简单。

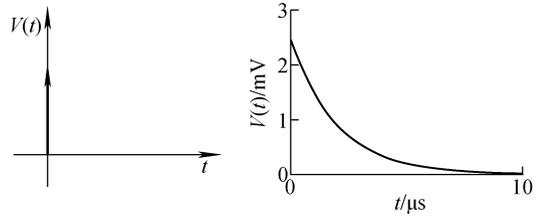


图 2 理想脉冲假设下裂变室释放的电荷及其输出脉冲的仿真
Fig. 2 Charge release under hypothesis of idea pulse and its pulse simulation

工程实际中,裂变室内发生 1 次中子裂变反应后的电荷释放过程与理想脉冲有一定差距,应更接近于 1 个有一定宽度和一定幅度的矩形波,如图 3a 所示,为了讨论方便,使用频域分析的方法。

图 1 等效电路是 1 个二端口网络,对单位阶跃信号的响应为:

$$h(t) = \frac{1}{C_0} e^{-\omega_0 t} u(t)$$

相应的传递函数为:

$$H(s) = \frac{1}{C_0(s + \omega_0)}$$

系统的输入等效为 1 个宽度为 τ_c 、幅度为 Q_0/τ_c 的矩形波,该矩形波可分解为 2 个方向相反的单位阶跃信号,中间有时延 τ_c ,相应的频域表达式为:

$$I(s) = \frac{Q_0}{\tau_c} \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{-s\tau_c}}{s} \right) = \frac{Q_0}{\tau_c} \cdot \frac{1 - e^{-s\tau_c}}{s} \quad (2)$$

在上述假设下的系统输出为:

$$V(s) = I(s)H(s) = \frac{Q_0}{\tau_c C_0} \cdot \frac{1 - e^{-s\tau_c}}{s(s + \omega_0)} \quad (3)$$

将式(3)进行拉氏反变换,即得时域下的输出脉冲表达式:

$$V(t) = \frac{Q_0 R_0}{\tau_c} ((1 - e^{-\omega_0 t})u(t) - (1 - e^{-\omega_0(t-\tau_c)})u(t - \tau_c)) \quad (4)$$

该结果与文献[7]中的结论相同,其中的 τ_c 为裂变室内 1 次裂变反应的电子收集时间,约为 $300 \sim 500 \text{ ns}$,其输出波形如图 3b 所示。可看出,裂变室输出脉冲的仿真结果更接近

实际测量的结果,但仿真波形中的波峰形状还不够理想。

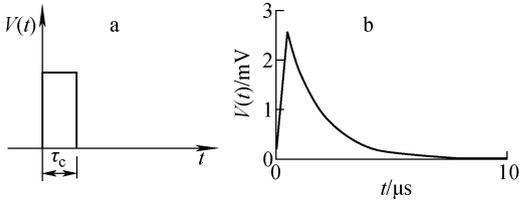


图3 电荷释放矩形波假设及其输出脉冲的仿真计算

Fig. 3 Charge release under hypothesis of rectangular wave and its pulse simulation

进一步考察上述的矩形波假设,在发生1次中子裂变反应后的电荷释放过程中,不可能是上升沿、下降沿如此理想的矩形波,而应具有一定的惯性环节,如图4a所示,对应该信号的系统输入频域表达式(2)修正为:

$$I(s) = \frac{Q_0}{\tau_c} \cdot \frac{1 - e^{-s\tau_c}}{s} \cdot \frac{1}{s+a} \quad (5)$$

相应的系统输出频域表达式(3)修正为:

$$V(s) = \frac{Q_0}{\tau_c C_0} \cdot \frac{1 - e^{-s\tau_c}}{s(s+\omega_0)(s+a)} \quad (6)$$

将式(6)进行拉氏反变换,即得修正后的时域输出脉冲表达式:

$$V(t) = \frac{Q_0 R_0}{\tau_c a} \left(\left(1 - \frac{\omega_0}{\omega_0 - a} e^{-at} - \frac{a}{a - \omega_0} e^{-\omega_0 t} \right) \cdot u(t) - \left(1 - \frac{\omega_0}{\omega_0 - a} e^{-a(t-\tau_c)} - \frac{a}{a - \omega_0} e^{-\omega_0(t-\tau_c)} \right) u(t - \tau_c) \right) \quad (7)$$

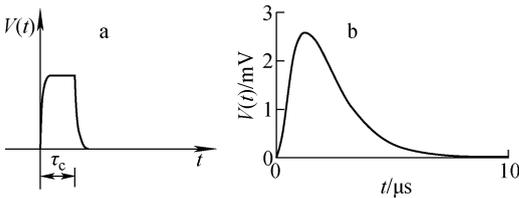


图4 电荷释放修正矩形波假设及其输出脉冲的仿真计算

Fig. 4 Charge release under hypothesis of revised rectangular wave and its pulse simulation

选择适当的 a 值(表示图4a中波形的弯曲程度),根据式(7)得到的裂变室输出脉冲的仿

真计算如图4b所示,经矩形波修正后,仿真计算结果与工程实际观测的结果较接近。

2 裂变室输出脉冲叠加信号的仿真研究

大量中子作用在裂变室上生成的脉冲序列是概率问题,这些脉冲的产生是彼此独立的并符合泊松分布,因此在1个脉冲输出信号仿真研究的基础上可进一步分析脉冲叠加后输出波形的信号仿真问题。

设 $\{N(t), t \geq 0\}$ 为 $[0, t]$ 时间内到达的中子数, $N(t)$ 满足泊松过程。令 τ_n 为第 n 个中子到达的时刻,则 $T_n = \tau_n - \tau_{n-1} (n > 0)$ 为第 n 个中子同第 $n-1$ 个中子到达时刻的时间间隔, $\{T_n, n \geq 1\}$ 称为 $[0, t]$ 时间内中子到达时间间隔的序列。可证明,强度为 λ 的泊松过程 $\{N(t), t \geq 0\}$ 对应的到达时间间隔序列 $\{T_n, n \geq 1\}$ 满足均值为 λ^{-1} 的指数分布,即 T_1, T_2, \dots, T_n 是相互独立的均值为 λ^{-1} 的指数分布序列,其中 λ^{-1} 的物理意义是中子注量率。

根据上述分析,可实现如下裂变室输出脉冲叠加信号的仿真算法:

1) 根据特定的 λ^{-1} 值,生成 n 个满足指数分布的随机变量,这些变量的物理意义是 n 个中子到达的时间间隔;

2) 根据上述 n 个时间间隔,可计算得到每个中子到达的时刻,即模拟 n 个中子到达的泊松过程;

3) 每个中子产生的脉冲波形可应用式(7)计算得到类似图5a的仿真结果;

4) 图1中的裂变室-前置放大器电路的系统模型是一个线性时不变系统,根据叠加定理, n 个中子中两个波形部分重叠时,起止时间不变,幅值线性相加。

应用上述算法进行了裂变室输出信号计数率为 1×10^5 、 5×10^5 、 1×10^6 和 $5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 时的仿真计算,计算结果如图5所示。根据计算结果可看出,裂变室输出信号计数率为 $1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 时,输出的脉冲信号是彼此独立的; $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 时脉冲信号开始彼此叠加,单个脉冲难以分辨出来;随着裂变室输出信号计数率水平的升高,脉冲信号的叠加更加严重,形成了一种脉动直流信号。这个仿真计算结果基本与工程实测相符。

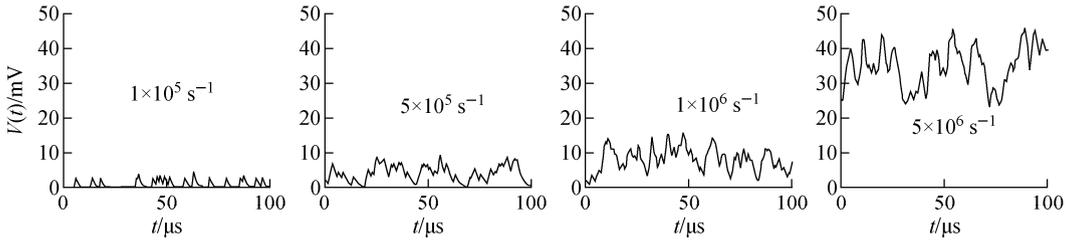


图5 裂变室输出脉冲叠加波形的仿真计算

Fig. 5 Simulation of fluctuating current with pulse pile-up from fission chamber

3 裂变室仿真信号的物理输出

裂变室仿真信号的物理输出是模拟裂变室输出的仿真信号,可在数字化宽量程核测量系统信号处理算法的研究中作为输入信号使用。

裂变室仿真信号物理输出中的主要问题是实际物理信号的幅值很小(mV量级),为保证输出信号波形的精度,本研究中应用可编程信号发生器输出1个幅值放大的混叠波形电平信号,再经1个信号衰减电路还原出裂变室输出信号的仿真计算结果。图5中裂变室输出信号计数率为 $1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 信号的物理输出的示波器监测画面示于图6。

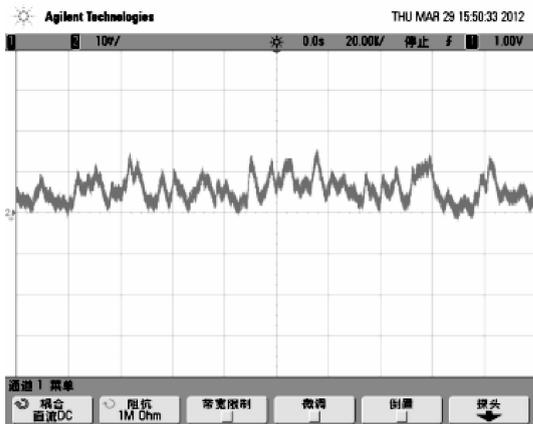


图6 裂变室仿真信号的物理输出

Fig. 6 Oscilloscope picture of output signal based on fission chamber simulation

4 结论

本工作进行了宽量程核测量系统中裂变室输出信号的仿真研究,实现了裂变室输出单个脉冲信号和脉冲叠加信号的仿真计算。本文的

研究是初步的,进一步的仿真研究还需考虑裂变室输出信号中的噪声信号(包括 α 噪声和 γ 噪声)的仿真计算等问题。

参考文献:

- [1] DWINN D, TRENHOLME W. A log N and period amplifier utilizing statistical fluctuation signals from a neutron detector[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1963, 10: 1-9.
- [2] THOMAS H A, MCBRIDE A C. Gamma discrimination and sensitivities of averaging and RMS type detector circuits for Campbelling channels[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1968, 15: 15-21.
- [3] TRENHOLME W. A neutron flux measuring channel covering ten decades of reactor power with a single fixed-position detector[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1967, 14: 253-260.
- [4] ODA M, BADONO S. A wide range counting-Campbelling nuclear instrumentation system[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1976, 23: 512-516.
- [5] ROSLER H, MILLARD J K, HILL N W. Fast timing from a fission ionization chamber[J]. Nucl Instrum Methods, 1972, 99: 477-486.
- [6] 李洪才,魏昌武,韩世菊. 宽量程中子监测装置[J]. 核动力工程,1981,2(1):1-9.
LI Hongcai, WEI Changwu, HAN Shiju. A device of wide range neutron measurement[J]. Nucl Power Eng, 1981, 2(1): 1-9(in Chinese).
- [7] 张连文. 宽量程中子监测技术[J]. 核动力工程, 1981,2(5):71-74.
ZHANG Lianwen. A wide range neutron measurement technique[J]. Nucl Power Eng, 1981, 2(5): 71-74(in Chinese).
- [8] 安继刚. 充气电离室[M]. 北京:原子能出版社, 1997.