

# $^{252}\text{Cf}$ 源驱动噪声分析法测量 $\alpha$ 初步研究

连 玄<sup>1</sup>, 李建胜<sup>1</sup>, 周浩军<sup>1</sup>, 叶岑明<sup>1</sup>, 蔡竞业<sup>2</sup>, 张 翼<sup>1</sup>, 宋凌莉<sup>1</sup>, 金 宇<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川 成都 610054)

**摘要:**在一球形浓缩铀临界装置上, 采用 $^{252}\text{Cf}$ 源驱动噪声分析方法对其次缓发临界状态下的 $\alpha$ 进行测量, 在频域内分析数据得到 $\alpha$ 。对比频域内的两种数据处理方式(功率谱实虚部相除方法和功率谱取模直接拟合方法), 用互功率谱密度函数实虚部相除方法得到在 $-0.1$   $\$$ 情况下, 脉冲堆的 $\alpha$ 为 $0.58 \mu\text{s}^{-1}$ , 与 Rossi- $\alpha$ 方法的结果相吻合。

**关键词:**瞬发中子衰减常数; 噪声分析; 功率谱

中图分类号: TL811.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)11-1308-04

## Preliminary Investigation of $^{252}\text{Cf}$ Source Driven Noise Analysis Method for $\alpha$ Measurement

LIAN Xuan<sup>1</sup>, LI Jian-sheng<sup>1</sup>, ZHOU Hao-jun<sup>1</sup>, YE Cen-ming<sup>1</sup>,  
CAI Jing-ye<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, SONG Ling-li<sup>1</sup>, JIN Yu<sup>1</sup>

(1. China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-210, Mianyang 621900, China;

2. School of Communication & Information Engineering,

University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Measurements for prompt neutron decay constant  $\alpha$  were conducted with a highly enriched uranium spherical shell using  $^{252}\text{Cf}$  source driven noise analysis method, which could interpret data in the frequency domain. In these measurements carried out at a slightly subcritical state, two methods of interpreting data were compared. The value for a reactivity of  $-0.1$   $\$$  subcritical obtained by the ratio of the real to the imaginary part of the cross power spectral density with a resulting value  $0.58 \mu\text{s}^{-1}$  agrees with the Rossi- $\alpha$  result.

**Key words:** prompt neutron decay constant; noise analysis; power spectral density

瞬发中子衰减常数 $\alpha$ 是核系统的一个本征参量, 实验测量的 $\alpha$ 常用于校验理论计算。测量 $\alpha$ 的方法主要有两种: 1) 测量瞬时引入系统的大量中子产生的衰变, 即脉冲中子源方法;

2) 观测大量彼此独立的单个裂变链行为, 直到满足足够的统计可靠性。第二类方法使用较多, 一般统称为噪声分析法, 其中最具代表性的是 Rossi- $\alpha$ 方法和随机脉冲源方法, 另外, 还有

Feynman 平均比方法、计数时间间隔分布法等。<sup>252</sup>Cf 源驱动噪声分析方法是由同时进行 <sup>252</sup>Cf 随机脉冲源方法和 Rossi- $\alpha$  方法的思想发展而来,由美国橡树岭国家实验室 Milhalczo 等<sup>[1]</sup>在 20 世纪 70 年代开始研究。目前国际上该方法在基准测量、核临界安全现场测量、军控核查等方面有广泛应用<sup>[2]</sup>。该方法通过观测源信号和探测器信号的脉冲时间序列进行相关运算,然后通过傅里叶变换得到功率谱密度函数,在频域内处理信号得到  $\alpha$ 。

本工作在 CFBR-II 脉冲堆上采用 <sup>252</sup>Cf 源驱动噪声分析方法在频域范围内测量  $\alpha$ 。

## 1 测量原理

### 1.1 噪声分析系统原理

在次临界系统中放入外中子源后,外中子源产生的中子在时间上是随机的;而由其诱发核材料裂变产生的中子,在时间上有相关性。通过分析记录的中子时刻信息,可得到次临界系统信息。随机脉冲源方法测量的是 <sup>252</sup>Cf 源信号和探测器信号的时间相关性,Rossi- $\alpha$  方法测量的是探测器事件之间的相关性。而在 <sup>252</sup>Cf 源驱动噪声分析方法中,同时测量了源和探测器及探测器之间的自相关函数和互相关函数,然后变换为自功率谱函数和互功率谱函数,在频域中进行分析。

<sup>252</sup>Cf 源驱动噪声分析方法测量原理如图 1 所示。系统分为 3 路,第 1 路是 <sup>252</sup>Cf 快电离室<sup>[3]</sup>,既为测量对象的输入驱动中子噪声源,又作为一个探测器,探测每次 <sup>252</sup>Cf 自发裂变放出的裂变碎片。第 2 路与第 3 路是完全相同的,探测次临界装置的泄漏中子和  $\gamma$  射线。3 路信号经放大成形后,经恒比定时器精确定时,给出准确的反映探测器事件时刻信息的脉冲信号,同步输入高速数据采集系统,在此系统对脉冲信号分块后进行相关运算,然后,傅里叶变换得到功率谱密度。测量得到的参数主要有 3 个互相关函数  $CC_{12}(\tau)$ 、 $CC_{13}(\tau)$ 、 $CC_{23}(\tau)$  和 3 个功率谱密度(CPSDs)  $G_{12}(\omega)$ 、 $G_{13}(\omega)$ 、 $G_{23}(\omega)$ ,互功率谱密度函数一般有实部和虚部。

不考虑偶然符合事件及探测器的频率响应时,在无内源情况下,Milhalczo 等<sup>[2]</sup>利用点堆动力学方程推导得到 <sup>252</sup>Cf 源与中子探测器间

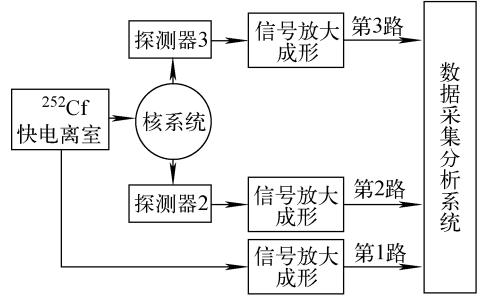


图 1 <sup>252</sup>Cf 源驱动噪声分析方法测量原理

Fig. 1 Method of <sup>252</sup>Cf source driven noise analysis

的相关函数为:

$$CC_{12}(\tau) = \frac{\epsilon_s \epsilon_2 \bar{\nu}_c F_s e^{-\alpha\tau}}{\bar{\nu}\Lambda}$$

$$CC_{13}(\tau) = \frac{\epsilon_s \epsilon_3 \bar{\nu}_c F_s e^{-\alpha\tau}}{\bar{\nu}\Lambda}$$

$$CC_{23}(\tau) = \epsilon_2 \epsilon_3 \left[ \frac{\bar{\nu}_c F_s}{\alpha\Lambda} + \frac{\bar{\nu}_c (\nu_c - 1) F_s}{\bar{\nu}\Lambda} \right] \cdot \frac{e^{-\alpha|\tau|}}{2\alpha(\bar{\nu}\Lambda)^2} \quad (1)$$

其中:下标数字 1、2、3 分别表示 <sup>252</sup>Cf 电离室、第 2 路探测器和第 3 路探测器; $\tau$  为相关函数的时间延迟量; $\epsilon_s$  为源事件探测效率,即第 1 路效率; $\epsilon_2$  和  $\epsilon_3$  为第 2、3 路探测器射线探测效率; $F_s$  为源的裂变率; $\Lambda$  为中子代时间; $\nu_c$  和  $\nu$  分别为 <sup>252</sup>Cf 源和核材料诱发裂变放出的中子数。

第 2 路与第 3 路完全相同,测量信号是完全等价的,所以,  $CC_{13}(\tau)$  和  $CC_{12}(\tau)$  的形式相似,仅把下标对换即可。

对相关函数进行傅里叶变换,将式(1)中的  $e^{-\alpha\tau}$  换为频域内等价的复数形式  $\frac{1}{\alpha + j\omega}$ ,  $\frac{e^{-\alpha|\tau|}}{2\alpha}$  换

为  $\frac{1}{\alpha^2 + \omega^2}$ ,即得到对应的功率谱密度函数。其中, $\omega$  为角频率,  $\omega = 2\pi f$ 。

$$G_{12}(\omega) = \frac{\epsilon_s \epsilon_1 \bar{\nu}_c F_s}{\bar{\nu}\Lambda} \cdot \frac{1}{\alpha + j\omega}$$

$$G_{23}(\omega) = \frac{\epsilon_2 \epsilon_3}{(\bar{\nu}\Lambda)^2} \left[ \frac{\bar{\nu}_c F_s}{\alpha\Lambda} + \frac{\bar{\nu}_c (\nu_c - 1) F_s}{\bar{\nu}\Lambda} \right] \cdot \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} \quad (2)$$

### 1.2 $\alpha$ 的测量方法

在 <sup>252</sup>Cf 源驱动噪声分析方法中,由于可同时测量得到时域的相关函数和频域的功率谱密

度函数,在时域和频域中均可获得  $\alpha$ ,时域中的方法类似于 Rossi- $\alpha$  方法<sup>[4]</sup>和随机脉冲源方法<sup>[5]</sup>。

在频域分析中, $G_{12}(\omega)$ 、 $G_{13}(\omega)$ 、 $G_{23}(\omega)$  均可用来分析得到  $\alpha$ ,且方法也多样。在文献[1]中利用  $G_{12}(\omega)$  的虚实部相除法可得到,具体推导为:

$$G_{12}(\omega) = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_1 \bar{\nu}_c F_s}{\nu \Lambda} \cdot \frac{1}{\alpha + j\omega} = \frac{F}{\alpha + j\omega}$$

$$\alpha + j\omega = \frac{F}{|G_{12}(\omega)|^2} (G_{12,R}(\omega) - jG_{12,i}(\omega)) \quad (3)$$

其中: $F$  为常数; $G_{12,R}(\omega)$ 、 $G_{12,i}(\omega)$  分别为  $G_{12}(\omega)$  的实部和虚部。

等式两边实虚部相除得到:

$$\alpha = -\omega \frac{G_{12,R}(\omega)}{G_{12,i}(\omega)} \quad (4)$$

在具体实验测量中,当  $G_{12,i}(\omega)$  接近零或绝对值较小时, $\omega \frac{G_{12,R}(\omega)}{G_{12,i}(\omega)}$  并不为常数。仅在  $G_{12,i}(\omega)$  绝对值较大时,式(4)右端才近似为常数。

## 2 测量结果和讨论

CFBR-II 脉冲堆是一带贫化铀反射层的球形浓缩铀临界装置。测量时电离室放置在脉冲堆的辐照腔。第2、3路探测器选用了锂玻璃探测器,以减少脉冲堆大量缓发  $\gamma$  射线影响,探测泄漏中子信号。两个探测器相对于电离室和核系统近似对称放置。

在脉冲堆次临界度分别为  $-1$  和  $-0.1$  的情况下进行了测量。根据理论计算,两种状态的  $\alpha$  分别约为 1 和  $0.5 \mu\text{s}^{-1}$ ,对应的转折频率约为 160 和 80 kHz。实验采用的采集频率为 1.562 5 MHz,根据香农采样定理,实际有效分析频率为 781 kHz,约为转折频率的 5~10 倍。

在扣除采用数据分块计算相关函数的影响后,测量得到第1路和另外两路的互相关函数  $CC_{12}$  或  $CC_{13}$ 。在横轴以  $^{252}\text{Cf}$  自发裂变时刻为 0 时刻,在此之前的负轴的  $CC_{13}$  基本为零,在正轴处, $CC_{13}$  形状近似为指数衰减曲线,衰减常数为  $\alpha$ ,与随机脉冲源测得的相关谱基本一

致,进行拟合分析即可得出  $\alpha$ 。类似地,修正后的  $CC_{23}$  等价于 Rossi- $\alpha$  的相关谱,是以  $\alpha$  为系数的双边指数衰减曲线。

图2示出  $-0.1$  下测得的功率谱的模  $|G_{12}|$  和  $|G_{23}|$  形状。 $|G_{12}|$  和  $|G_{13}|$  为频率的一阶函数,在低频部分近似为常数。 $|G_{23}|$  为  $\omega$  的二阶函数,同样测量时间下曲线收敛性更好点。

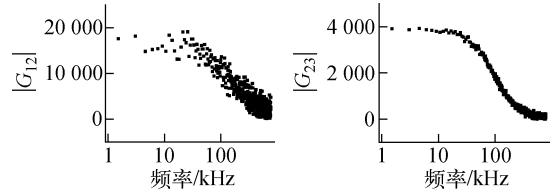


图2  $-0.1$  下脉冲堆3路信号之间的互功率谱  
Fig. 2 Cross power spectral densities at reactivity of  $-0.1$  subcritical of CFBR-II

采用了两种方法进行数据处理:1) 利用 Milhalczko 等提出的方法,即采用实虚部相除法;2) 对  $|G_{13}|$  和  $|G_{23}|$  直接利用最小二乘法拟合。根据式(2)可得:

$$|G_{12}| = \frac{F}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}$$

$$|G_{23}| = \frac{F}{\alpha^2 + \omega^2} \quad (5)$$

其中: $F$  和  $\alpha$  为待拟合的参数。

图3示出  $-0.1$  下测得的  $G_{13}$  实部和虚部。虚部在高频部分和接近零频率附近的绝对值较小,导致  $\omega \frac{G_{12,R}(\omega)}{G_{12,i}(\omega)}$  在零频率附近和频率在 300~800 kHz 之间的数据不是常数(图4)。

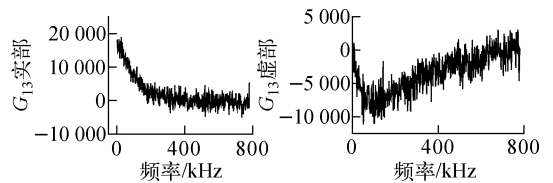


图3  $-0.1$  下  $G_{13}$  实部和虚部随频率的变化  
Fig. 3 Real and image parts of CPSD at reactivity of  $-0.1$  subcritical of CFBR-II

根据图3中  $G_{13}$  虚部绝对值较大的区域和图4中  $\omega \frac{G_{13,R}(\omega)}{G_{13,i}(\omega)}$  为常数的区域,最终选定平

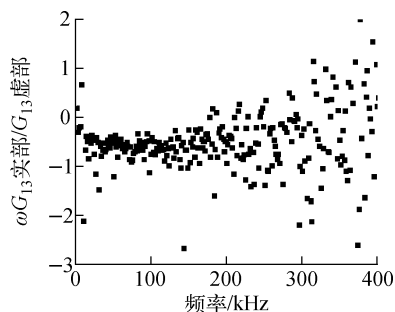


图4  $-0.1 \$$  下瞬发中子衰减常数  
Fig. 4 Prompt neutron decay constant  
at reactivity of  $-0.1 \$$  subcritical

均区域在频率为  $50 \sim 150$  kHz。对这段数据区平均得到瞬发中子衰减常数为  $0.59 \mu\text{s}^{-1}$ 。

用第2种方法,使用数学软件 Origin 8.0,用式(5)进行非线性拟合。分别对  $G_{13}$  和  $G_{23}$  进行拟合,得到的  $\alpha$  分别为  $0.57$  和  $0.62 \mu\text{s}^{-1}$ 。

在  $-0.1 \$$  和  $-1 \$$  情况下对数据进行相似处理,得到的  $\alpha$  和用 Rossi- $\alpha$  系统测得的数据列于表1。

表1 不同方法测得的瞬发中子衰减常数  $\alpha$   
Table 1 Prompt neutron decay constant  
by different methods

方法	$\alpha/\mu\text{s}^{-1}$	
	$-1 \$$	$-0.1 \$$
Rossi- $\alpha$ 方法	1.02	0.58
实虚部相除法 <sup>1)</sup>	0.98	0.59
直接拟合法(拟合对象 $G_{13}$ )	1.05	0.57
直接拟合法(拟合对象 $G_{23}$ <sup>2)</sup> )	—	0.62

注:1) 对  $G_{12}$  进行处理的结果;

2) 在  $-1 \$$  情况下结果未收敛

从表1可看出,  $^{252}\text{Cf}$  源驱动噪声分析方法在频域内获得的  $\alpha$  与 Rossi- $\alpha$  方法测得的结果在一定范围内吻合。对于两种处理方法的比较,实虚部相除拟合方法只需对一定区间内取平均运算,处理方法较简单,且结果较稳定,只是取平均的频率区间需人为观察。而利用功率谱密度的模量直接拟合法借助了数学软件进行非线性拟合,结果随数据量的影响较大,且存在可能不收敛的问题,拟合区间和拟合方法的

选取对结果也有不同的影响。相比来说,前者的处理方法更方便准确。由于是首次利用  $^{252}\text{Cf}$  源驱动噪声分析方法进行测量  $\alpha$ ,在实验条件、测量参数选取等方面还有一些问题,同时合理地评估  $\alpha$  误差的方法需进一步研究。

### 3 结论

$^{252}\text{Cf}$  源驱动噪声分析方法测量瞬发中子衰减常数  $\alpha$  的实验结果表明,该方法在频域内分析得到  $\alpha$  是可行的,其中用实虚部相除的数据处理方法简单稳定,较其他方法有一定的优越性。

### 参考文献:

- [1] MIHALCZO J T, PARE V K, RAGAN G L, et al. Determination of reactivity from power spectral density measurements with californium-252 [J]. Nucl Sci Eng, 1978, 66: 29-59.
- [2] VALENTINE T E. Review of subcritical source-driven noise analysis measurements, ORNL/TM-1999/288[R]. Oak Ridge; Oak Ridge National Laboratory, 1999.
- [3] 李建胜,张翼,金宇,等.  $^{252}\text{Cf}$  快裂变室研制[J]. 核电子学与探测技术,2001,21(4):264-267.  
LI Jiansheng, ZHANG Yi, JIN Yu, et al. Development of  $^{252}\text{Cf}$  fast fission fission chamber [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2001, 21(4): 264-267(in Chinese).
- [4] 刘晓波,范晓强,蒋勇,等. Rossi- $\alpha$  方法测量 CFBR- II 堆瞬发中子衰减常数[J]. 核动力工程,2007,28(增刊):10-13.  
LIU Xiaobo, FAN Xiaoqiang, JIANG Yong, et al. Measurement of prompt neutron decay constant with Rossi- $\alpha$  on CFBR- II reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28 (Suppl.): 10-13(in Chinese).
- [5] 宋凌莉,周浩军,金宇,等.  $^{252}\text{Cf}$  随机脉冲源法测量深次临界缓发中子衰减常数[J]. 原子能科学技术,2006,40(6):714-717.  
SONG Lingli, ZHOU Haojun, JIN Yu, et al. Measurement of prompt neutron decay constant for deep subcritical assembly using  $^{252}\text{Cf}$  as randomly pulsed neutron source[J]. At Energy Sci Technol, 2006, 40(6): 714-717(in Chinese).