

CN8801015

CNIC-00091

SINRE-0005

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

一种新的快堆中子噪声技术

—快堆中子噪声的热化测量技术



中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

**CNIC-00091**

**SINRE-0005**

# **一种新的快堆中子噪声技术**

**——快堆中子噪声的热化测量技术**

**糕凤官 金曼宜 姚世贵 苏著亭**

**(西南反应堆工程研究设计院, 四川)**

**中国核情报中心**

**北京·1987.12**

## 摘 要

本文提出了一种新的快堆中子噪声技术,称为快堆中子噪声的热化测量技术。导出了这一技术的理论关系式。设计研制了一台适合于这种测量技术的集成组件数字延迟符合时间分析装置,建立了一个小型时域分析系统。在DF-VI快中子零功率堆上验证并实际应用了这一技术,证明该技术具有一些现有中子噪声方法所不具有的突出优点。

**关键词** 反应堆噪声 反应性测量 扩散参数测量 零功率堆实验

**A NEW NEUTRON NOISE  
TECHNIQUE FOR FAST  
REACTORS — THERMALIZATION  
MEASUREMENT TECHNIQUE  
FOR THE NEUTRON NOISE  
OF FAST REACTORS**

Zhuo Fengguan Jin Manyi

Yao Shigui Su Zhuting

(Southwest Institute of Nuclear Reactor Engineering, Sichuan)

This paper gives a new neutron noise technique for fast reactors, which is known as thermalization measurement technique of the neutron noise of fast reactors. The theoretical formulas of the technique were developed, and a digital delayed coincidence time analyzer consisted of TTL integrated circuits was constructed to study this technique. The technique has tested and applied practically at DF-VI fast zero power reactor. It was showed that the provided technique in this work has a number of significant advantages in comparison with the neutron noise methods published before.

## 一、引言

目前已经发表的各种堆中子噪声技术基本上均以分析瞬发中子时间特性为基础<sup>[1,2]</sup>。因此,当用于快堆领域时,时域方法要求分析设备的时间分辨小至纳秒级,频域方法则要求设备的频宽大到几百千赫,这些严格要求造成了许多实际应用上的困难。其次,对次临界度测量来说,虽然这些现存方法中的双探测器技术具有对探测器效率要求低,结果不受中子源强度变化的影响等优点,但是,除了使用<sup>252</sup>Cf源的堆中子噪声技术<sup>[3-5]</sup>以外,都存在对瞬发空间谐波灵敏,需要对瞬发中子寿命的变化进行修正等缺点。使用<sup>252</sup>Cf源的堆中子噪声技术,虽然克服了用一般堆噪声方法测定次临界度时所遇到的一些困难,可以测定深次临界度或停堆反应性,但是<sup>252</sup>Cf源价格昂贵,不容易得到,并且当用于快堆领域时,对仪器设备的要求同其它堆噪声方法一样严格。源增殖技术<sup>[6-8]</sup>能够测定深次临界度,简单易行,但其结果易受源强变化的影响。

从试图克服上述困难的目的出发,我们从快中子系统瞬发中子裂变链持续时间短、时间密度小等基本特性出发,提出了一种新的快堆中子噪声测量技术,称为快堆中子噪声的热化测量技术。本文将描述这种技术的理论和为发展这种技术而设计研制的时域分析系统,给出在DF-VI快中子零功率堆上验证和应用这一技术的一些典型结果;分析讨论该技术的主要优点。

## 二、一般考虑

考虑如图1所示的快中子系统。假设:

1. 堆内产生的裂变快中子经反射层或再生区泄漏到堆外中子探测器2或3周围的慢化介质内。慢化介质与探测器组成“长计数管”。

慢化介质的几何尺寸足够大,能将进入其中的快中子充分慢化。因此中子在慢化介质内的行为主要决定于慢化介质本身的材料和几何特性,可用单速扩散方程来描述。

2. 在慢化介质与堆系统之间加设中子吸收材料,使慢化介质内的热中子进入堆芯的几率极小。因此堆内瞬发中子的时间特性由芯部和反射层或再生区的材料与几何特性决定,可用点堆理论近似描述。堆内的快中子由置于芯部或反射层(再生区)的探测器1来探测。

3. 堆内瞬发中子的衰减常数 $\alpha \gg \alpha_0$ , 这里 $\alpha_0$ 是长计数管内热中子基波的衰减常数。对于快堆系统, $\alpha$ 为 $10^4 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$ ,而在普通大小的含氢慢化体(如水、石蜡等)内, $\alpha_0$ 只有 $\sim 10^2$ ,较前者小几十到几千倍。所以一般情况下这一假设总可以满足。

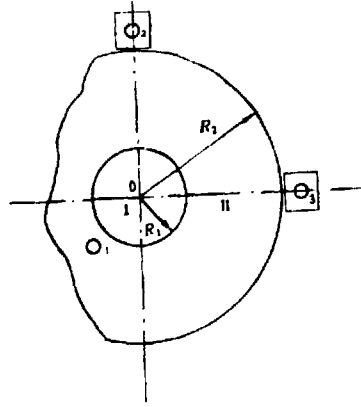


图1

I—活性区; II—反射层(或再生区)。

4. 堆内瞬发链在时间上互不重叠。对于次临界快中子系统而言,这也是容易满足的。例如,对于一个中子源强度为 $S$ 的次临界系统,在任何时刻稳定地存在于堆内的瞬发中子总数的期望值 $n$ ,由下式决定:

$$n = \frac{S}{\alpha} \quad (1)$$

与 $\alpha$ 成反比。若 $S$ 为 $10^5$ 中子/s,  $\alpha = 10^5 \text{s}^{-1}$ , 则方程(1)给出 $n = 1$ (中子), 可见在一个弱源次临界快中子系统中, 瞬发中子链在时间上是很稀疏的。

由以上讨论可见, 相对于长计数管内热中子的扩散衰减而言, 可以把堆内一个快中子链的全部中子看成为一个在极短时间内发出的中子脉冲。因此, 如果用探测器1输出的堆内快中子信号, 去打开一个“理想”时域分析系统的分析循环, 而把堆外长计数管输出的热中子信号送入分析系统进行相关分析, 那么, 这两个探测器输出信号的互相关函数 $\Psi_{12}(\tau)$ (称为单侧热化互相关函数), 将会包含关于慢化介质扩散参数及堆内瞬发增殖因子的信息, 或者更进一步, 直接测量两个堆外长计数管输出的热中子信号的互相关函数 $\Phi_{22}(\tau)$ (称为双侧热化互相关函数)也将可能获得上述有关信息。显然, 这些测量也可以转到频域进行。

### 三、单侧热化互相关函数 $\Psi_{12}(\tau)$ 的理论推导

依照上述考虑, 可以把互相关函数 $\Psi_{12}(\tau)$ 的测量简化成如图2所示的模型。这里把堆和探测器1看成简单线性动态系统, 而把长计数管看作一个复合线性动态系统, 它由探测器2和慢化体两个简单线性动态系统组成。

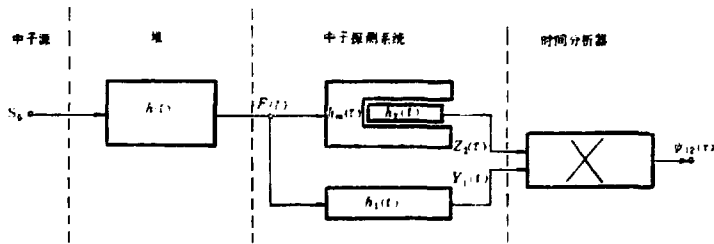


图 2

令:

$F(t)$ ——在 $t$ 时刻, 堆内单位时间发生的裂变数;

$h_1(t)$ ——一个在 $t=0$ 时进入长计数管的中子被热化, 延迟到 $t$ 时刻并在该时刻单位时间内消失的几率;

$m(t)$ ——在 $t$ 时刻, 长计数管内单位时间内消失的中子数;

$w_1$ ——探测器1的效率;

$h_i(t)$ ——探测器 $i$ (不包括慢化体)吸收一个中子的脉冲响应函数( $i=1, 2$ );

$y_i(t)$ ——探测系统 $i$ 的输出信号;

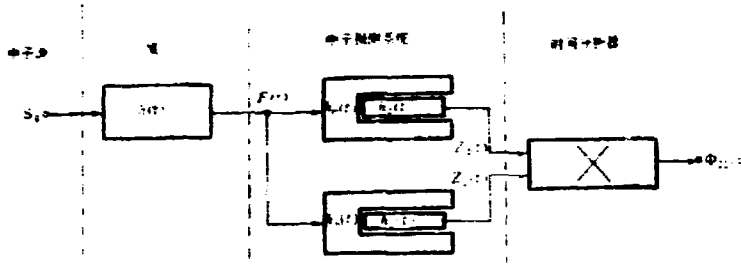


图 3

$Z_2(t)$ ——长计数管系统输出的中子信号。

设堆内每发生一次裂变，进入到长计数管内的中子数为  $\omega_1$ 。这  $\omega_1$  个中子在探测器的慢化体内慢化成热中子，并因泄漏和慢化介质及探测器 2 的吸收，最终全部消失。假设  $\omega_1$  个中子中的任意一个被探测器 2 吸收并输出一个中子信号的几率是  $\omega_2$ 。于是，长计数管的效率，即堆内每发生一次裂变探测器 2 输出一个中子信号的几率是：

$$w_2 = \omega_1 \cdot \omega_2 \quad (2)$$

利用褶积积分，可以写出下列输入-输出关系：

$$\begin{aligned} m(t) &= \omega_1 \int_{-\infty}^t h_1(t-\lambda) F(\lambda) d\lambda \\ &= \omega_1 \int_0^t h_1(\lambda) F(t-\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Z_2(t) &= \omega_2 \int_{-\infty}^t h_2(t-\zeta) m(\zeta) d\zeta \\ &= \omega_2 \int_0^t h_2(\zeta) m(t-\zeta) d\zeta \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\lambda$  和  $\zeta$  都是积分时间变量，把方程 (3) 代入 (4)，则有：

$$\begin{aligned} Z_2(t) &= \int_0^t \omega_2 h_2(\zeta) \int_0^{t-\zeta} \omega_1 h_1(\lambda) F(t-\zeta-\lambda) d\lambda d\zeta \\ &= \int_0^t h_2(\lambda) y_2(t-\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

这里

$$y_2(t-\lambda) = \omega_2 \int_0^{t-\lambda} h_2(\zeta) F(t-\lambda-\zeta) d\zeta \quad (6)$$

形式上可以看成是将探测器 2 以长计数管的效率  $w_2$  且不变更其响应直接探测堆内快中子时该探测器所输出的快中子信号。

按定义，堆内快中子信号  $y_1(t)$  和堆外长计数管输出的热中子信号  $x_2(t)$  的互相关函数  $\Psi_{x_1}(\tau)$  是：

$$\Psi_{12}(\tau) = E[y_1(t)x_2(t+\tau)] \quad (7)$$

这里  $E$  表示对时间取平均值。把方程 (5) 代入 (7), 可得:

$$\Psi_{12}(\tau) = E[y_1(t) \int_0^\infty h_n(\lambda) y_2(t+\tau-\lambda) d\lambda] \quad (8)$$

因为期望值算符  $E$  只作用于变量  $t$ , 所以, 可以把方程 (8) 重新排列, 给出:

$$\begin{aligned} \Psi_{12}(\tau) &= \int_0^\infty h_n(\lambda) E[y_1(t)y_2(t+\tau-\lambda)] d\lambda \\ &= \int_0^\infty h_n(\lambda) \varphi_{12}(\tau-\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (9)$$

方程式 (9) 中,

$$\varphi_{12}(\tau-\lambda) = E[y_1(t)y_2(t+\tau-\lambda)] \quad (10)$$

形式上可以看成是在不变更探测器 2 的响应并假定它的效率为  $w_2$  的条件下, 它和探测器 1 都探测堆内快中子时, 它们的输出信号的互相关函数, 不过, 其相关间隔变量不是  $\tau$ , 而是  $(\tau-\lambda)$ 。不难看出, 方程式 (9) 是一个卷积型关系式, 它表明, 在形式上,  $\Psi_{12}(\tau)$  可通过把两个探测器都探测堆内快中子时所得到的互相关函数“输入”到慢化介质内进行“热化”来得到。所以为了导出  $\Psi_{12}(\tau)$  的表达式, 只需要计算方程 (9) 右边的卷积积分就行了。

与热中子在慢化介质内的扩散衰减时间相比, 我们不考虑堆内快中子进入慢化介质后的慢化时间。如果堆内快中子进入慢化介质延迟足够长的时间后再行测量, 那么在长计数管内基波将占支配地位。所以, 一个在时间  $t=0$  时进入长计数管的中子, 在  $t=0$  时单位时间内消失的几率  $h_n(t)$  为

$$h_n(t) = \frac{1}{l_n} e^{-\alpha_n t} = \alpha_n e^{-\alpha_n t} \quad (11)$$

这里,

$l_n = 1/\alpha_n = 1/[\nu\Sigma_a(1+L^2B^2)]$ , 是慢化介质内的热中子平均寿命;

$\Sigma_a$ ——慢化介质的热中子宏观吸收截面;

$\nu$ ——热中子的平均速度;

$L$ ——慢化介质的热中子扩散长度;

$B^2$ ——慢化体的几何曲率。

关于  $\varphi_{12}(\tau)$  的表达式已有许多作者作了推导。这里我们利用 H. Borgwaldt 的结果 [9]。将文献 [9] 给出的点堆近似下的  $\varphi_{12}(\tau-\lambda)$  表达式和方程 (11) 代入方程 (9), 完成积分, 得

$$\Psi_{12}(\tau) = w_1 F \cdot w_2 F + w_1 F \cdot w_2 D \cdot \alpha_n \frac{k_1^2}{2l^2 a (a^2 - \alpha_n^2)} [2\alpha e^{-\alpha_n \tau} - (\alpha + \alpha_n) e^{-\alpha \tau}] \quad (12)$$

利用假设条件  $\alpha \gg \alpha_n$  和关系式  $\alpha = (1-k)/l$  将上式简化, 则得所要求的  $\Psi_{12}(\tau)$  的表达式:



$$\Psi_{1,2}(\tau)\delta\tau = w_1 F [w_2 F + w_2 D, \alpha_n \frac{k_1^2}{(1-k_1)^2} e^{-\alpha_n \tau}] \delta\tau \quad (13)$$

这里, 为了应用方便, 方程 (13) 的两边都乘上了时域分析系统的分析间隔  $\delta\tau$ 。方程 (12) 和 (13) 中,

- $k_1$  —— 堆系统的瞬发中子增殖系数;
- $D$  ——  $v(v-1)/v^2$ , 是Diven因子。

#### 四、双侧热化互相关函数 $\Phi_{2,3}(\tau)$ 的理论推导

与  $\Psi_{1,2}(\tau)$  的推导类似, 我们可将互相关函数  $\Phi_{2,3}(\tau)$  的测量用图 3 所示的模型表示。这里两道的探测系统分别是置于堆外的长计数管 2 和 3, 并假定两者的延迟-消失几率函数相等, 即

$$h_{2,2}(t) = h_{3,3}(t) = h_n(t) \quad (14)$$

与关于  $\Psi_{1,2}(\tau)$  的卷积方程 (9) 相似, 可以证明可将  $\Phi_{2,3}(\tau)$  用如下卷积积分方程表示:

$$\Phi_{2,3}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{n,n}(\mu) \varphi_{2,3}(\tau - \mu) d\mu \quad (15)$$

其中,

$$\varphi_{n,n}(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{n,2}(\lambda) h_{n,3}(\lambda + \mu) d\lambda \quad (16)$$

利用方程 (14) 和 (11), 容易证明

$$\varphi_{n,n}(\mu) = \frac{1}{2} \alpha_n e^{-\alpha_n \mu} \quad (17)$$

方程 (15) 中的  $\varphi_{2,3}(\tau - \mu)$  是将探测器 2 和 3 各以其长计数管的效率  $w_2$  和  $w_3$  直接探测堆内快中子时它们输出信号的互相关函数。所以, 对于双侧热化测量来说, 按照方程 (15), 互相关函数  $\Phi_{2,3}(\tau)$  在形式上同样可以看作是堆内快中子信号的互相关函数“输入”到慢化介质内进行“热化扩展”的结果。

将 [9] 点堆近似下的  $\varphi_{2,3}(\tau - \mu)$  的表达式中给出的和方程 (17) 代入方程 (15), 完成积分, 有:

$$\Phi_{2,3}(\tau) = w_2 F \cdot w_3 F + \frac{1}{2} w_2 F w_3 D, \alpha_n \frac{k_1^2}{2\alpha_1^2 (\alpha_1^2 - \alpha_n^2)} \cdot [2\alpha e^{-\alpha \tau} + 2\alpha e^{-\alpha_n \tau}] \quad (18)$$

由于  $\alpha \gg \alpha_n$ , 故上式中含有  $e^{-\alpha \tau}$  的项及分母中的  $\alpha_1^2$  项可以忽略, 于是:

$$\Phi_{2,3}(\tau)\delta\tau = w_2 F \left[ w_3 F + \frac{1}{2} w_3 D, \alpha_n \frac{k_1^2}{(1-k_1)^2} e^{-\alpha_n \tau} \right] \delta\tau \quad (19)$$

与方程 (13) 一样, 为了应用方便, 我们也将方程 (19) 的两边都乘上了分析系统的分析间隔  $\delta\tau$ 。

比较方程 (13) 和 (19), 我们看到单侧热化互相关函数和双侧热化互相关函数二者形式相同, 只是后者的相关振幅 (相关项的系数) 是前者的一半。这从物理上是不难理解的。

## 五、 $\Psi_{12}(\tau)$ 和 $\Phi_{12}(\tau)$ 的特点与应用

1. 方程 (13) 和 (19) 表明,  $\Psi_{12}(\tau)$ 和 $\Phi_{12}(\tau)$ 与快堆系统的瞬发中子衰减常数或瞬发中子寿命无关。而其相关振幅中, 除直接显含的堆的定态瞬发增殖系数 $k/(1-k_0)$ 以外, 其他的量,  $w_2$ 、 $D$ 和 $\alpha_0$ 均与堆状态无关。因此, 可以通过相关振幅的测量来测定堆的次临界度。

按照方程 (13) 和 (19), 这种测量是很容易实现的。令

$$A = \begin{cases} \int_0^T \left[ \frac{\Psi_{12}(\tau)}{w_1 P} - w_1 P \right] d\tau, & \text{对于单侧热化测量;} \\ \int_0^T \left[ \frac{\Phi_{12}(\tau)}{w_2 P} - w_2 P \right] d\tau, & \text{对于双侧热化测量。} \end{cases} \quad (20)$$

依据方程 (13) 或 (19) 完成积分, 给出:

$$A = \eta \cdot \frac{k_0^2}{(1-k_0)^2} = \eta \frac{(1-\beta)^2}{(\beta-\rho)^2} \quad (21)$$

这里,

$$\eta = \begin{cases} w_2 D \cdot (1 - e^{-\alpha_0 T}), & \text{对于单侧热化测量;} \\ \frac{1}{2} w_2 D \cdot (1 - e^{-\alpha_0 T}), & \text{对于双侧热化测量。} \end{cases} \quad (22)$$

是一个与堆的次临界度状态无关的、只依赖于长计数管特性和分析循环时间 $T$ 的常数。按照方程 (20),  $A$ 实际上是分析设备单位时间内所收集的、且对分析循环次数和道宽归一化的总相关符合计数。如果在缓发临界状态测得总相关符合计数率 $A_c$ :

$$A_c = \eta(1-\beta)^2/\beta^2 \quad (23)$$

则由方程 (21) 和 (23), 可给出被测状态下堆的次临界度 $\rho$ 为:

$$\rho = 1 - \sqrt{\frac{A_c}{A}} \quad (24)$$

如果刻度点不是临界状态, 而是一个次临界度为 $\rho_0$ 的次临界状态, 则容易证明:

$$\rho = 1 - \sqrt{\frac{A_0}{A}} [1 - \rho_0] \quad (25)$$

这里 $A_0$ 是刻度状态下测得的总相关符合计数率。方程 (25) 对于含有固有中子源的快堆系统, 如快中子钚系统是特别有用的。

值得着重指出的是, 按照方程 (24) 或 (25) 进行次临界度测量, 实质上是一种用双探测器互相关技术实现的对堆的定态瞬发增殖因子的直接测量。

2.  $\Psi_{12}(\tau)$ 和 $\Phi_{12}(\tau)$ 中的相关项衰减常数是长计数管内热中子基波的衰减常数 $\alpha_0$ , 与堆系统的状态无关。因此, 若选择适当的中子探测器作为探测器 2, 便可以忽略慢化介质内的

基波衰减常数与整个长计数管内的基波衰减常数的微小差别, 则可通过 $\Psi_{12}(\tau)$ 或 $\Phi_{23}(\tau)$ 的测量来测定慢化介质的热中子衰减常数 $\alpha_m$ 。若对一组标准几何形状的介质样品分别测得其相应的 $\alpha_m$ , 则可按方程

$$\alpha_m = \rho \Sigma_a (1 + L^2 B^2) - CB^4 \quad (26)$$

确定慢化介质的热中子扩散参数。上式中,  $C$ 是介质的扩散冷却系数。

3.  $\Psi_{12}(\tau)$ 和 $\Phi_{23}(\tau)$ 的时间相依特性仅由 $\alpha_m$ 决定。相对于堆内快中子信号的互相关函数的时间相依特性来说, 这相当于把快堆系统裂变中子的相关时间间隔由微秒量级放大到毫秒范围。因此, 测量 $\Psi_{12}(\tau)$ 或 $\Phi_{23}(\tau)$ 时, 只要分析设备的时间分辨率达到微秒量级就可以了, 很容易实现。

4. 缓发临界状态下, 总相关符合计数率 $A_c$ 与堆的缓发中子有效份额 $\beta$ 满足一简单的关系(23)。因此, 如果确定了长计数管的效率 $w_2$ 或 $w_3$ , 则可根据方程(23)来确定堆的缓发中子有效份额 $\beta$ 。

## 六、关于信号本底比和数据收集速度的讨论

信号本底比和数据收集速度是衡量一种堆噪声技术的测量精度和有效性的主要标志。

1. 令 $Q_s$ 和 $Q_d$ 分别表示单侧热化和双侧热化互相关测量的信号本底比。这里我们把信号本底比定义为相关计数(或电流)的峰值与非相关计数(或电流)的平均值的比。依照方程(13)和(19), 我们有:

$$Q_s = D \cdot \frac{k_p^2}{(1-k_p)^2} \cdot \frac{1}{L_m F} \quad (27)$$

$$Q_d = \frac{1}{2} D \cdot \frac{k_p^2}{(1-k_p)^2} \cdot \frac{1}{L_m F} \quad (28)$$

方程(27)和(28)表明, 在热化互相关测量中, 信号本底比与堆的瞬发增殖因子的平方成正比, 与堆的平均裂变率及慢化介质内热中子的平均寿命成反比; 并且双侧热化的信号本底比比单侧热化的信号本底比低一倍。

2. 令 $C_s$ 和 $C_d$ 分别表示单侧热化和双侧热化互相关测量中, 单位时间内所收集的总相关计数。将方程(13)和(19)右边的项目 $\tau=0$ 至 $\tau=\infty$ (相当于时间分析器的循环时间 $T \gg \alpha_m^{-1}$ )积分, 我们得到:

$$C_s = w_1 w_2 F D \cdot \frac{k_p^2}{(1-k_p)^2} \quad (29)$$

$$C_d = \frac{1}{2} w_1 w_2 F D \cdot \frac{k_p^2}{(1-k_p)^2} \quad (30)$$

值得注意的是, 热化互相关测量的数据收集速度与慢化体内热中子的平均寿命无关。

3. 为了说明问题, 我们把热化互相关测量的信号本底比和数据收集速度与理想Rossi- $\alpha$ 技术<sup>[10]</sup>作一比较。令 $Q$ 和 $C$ 分别表示Rossi- $\alpha$ 实验中的信号本底比和数据收集速度, 则:

$$Q = \frac{1}{2} D \cdot \frac{k_p^2}{(1-k_p)^2} \cdot \frac{1}{F F'} \quad (31)$$

$$C = w_1 w_2 F' D_0 \frac{k_0^2}{(1-k_0)^2} \quad (32)$$

上列方程中,  $w_1$ 和 $w_2$ 分别表示双探测器Rossi- $\alpha$ 实验中两个探测器的效率,  $F'$ 是进行Rossi- $\alpha$ 实验时堆的平均裂变率。

把方程(27)和(28)分别除以方程(31)。我们得到:

$$\frac{O_1}{Q} = \frac{2IF'}{I_0 F'} \cdot \frac{1}{(1-k_0)} \quad (33)$$

$$\frac{O_2}{Q} = \frac{IF'}{I_0 F'} \cdot \frac{1}{(1-k_0)} \quad (34)$$

因为在快堆系统中,  $l \approx 10^{-6} \sim 10^{-7} s$ , 对于通常大小的含氢慢化材料,  $l_0 \approx 10^{-4} s$ , 在临界附近,  $1/(1-k_0) \approx 10^3$ 。所以, 按照方程式(33)和(34), 如果Rossi- $\alpha$ 实验和热化测量的堆功率相同, 则热化测量的信号本底比将比Rossi- $\alpha$ 实验低大约1个量级。然而实际上, 因为Rossi- $\alpha$ 实验中所探测的是堆内快中子, 一般情况下其探测器效率较热化测量低得多, 所以为了保证一定的数据收集速度, 不得不提高堆功率, 致使Rossi- $\alpha$ 实验的信号本底甚至比热化测量更低。

把方程(29)和(30)分别除以方程(32), 我们得到:

$$\frac{C_1}{C} = \frac{w_1 w_2 F}{w_1 w_2 F'}$$

$$\frac{C_2}{C} = \frac{1}{2} \frac{w_2 w_3 F}{w_1 w_2 F'}$$

对于单侧热化测量,  $w_1 \sim w_1'$ ,  $w_2 > w_2'$ 或 $w_3 > w_3'$ ; 对于双侧热化测量,  $w_1 > w_1'$ 或 $w_2 > w_2'$  ( $i=2, 3; j=1, 2$ )。所以, 在Rossi- $\alpha$ 技术和热化测量技术适用的绝大多数情况下, 即使考虑到Rossi- $\alpha$ 实验中堆功率较高这个因素, 热化测量的数据收集速度仍然高于Rossi- $\alpha$ 实验。

## 七、在DF-VI快中子零功率堆上验证与应用的典型结果

### 1. 时域分析系统的简单描述

时域分析系统如图4所示, 是为研究和发发展我们所提出的这种快堆中子噪声热化测量技术及Rossi- $\alpha$ 技术等而设计建立的<sup>[11]</sup>。图中虚线框内是为此而设计研制的集成组件数字延迟符合时间分析装置的原理框图<sup>[12]</sup>。该装置的逻辑设计使它能够“完全地”分析和储存探测器信号序列中所包含的信息, 保证相关振幅测量的可靠性和精确度。表1给出了该装置的一些主要性能参数。

分析系统具有两种中子探测器。一种由SZJ-2型正比管和Ky-54DG1型低噪声电流前置组成, 灵敏体积为 $\phi 27 \times 400 \text{mm}^2$ 。另一种由两只并联的小型涂硼正比管和Ky54-DG1型前置组成, 灵敏体积约 $2 \times \phi 6 \times 200 \text{mm}^2$ 。两种探测系统的分辨时间均为 $0.4 \mu s$ 左右。两年多的实际应用表明, 本分析系统测量衰减常数的精度和重复性好于2%, 同一实验日内测量相关振幅

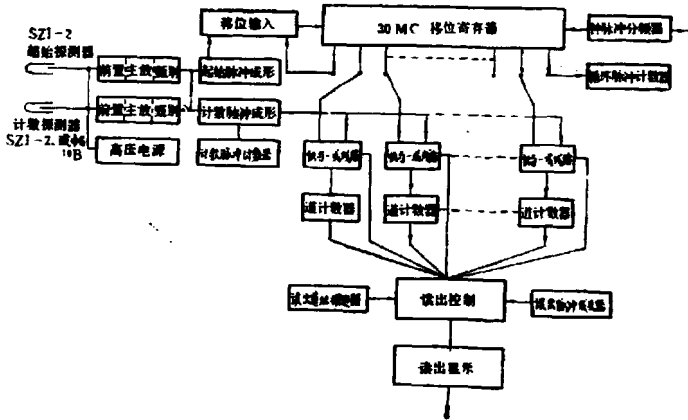


图 4

表 1 数字延迟符合时间分析装置的主要性能参数

参数名称	参 数 值
道数	10
道宽	0.2~256μs, 以0.2或2×2 <sup>n</sup> (n=0,1, ..., 7) 的方式可选
道宽与延迟时间稳定性	好于5×10 <sup>-3</sup> /gh
道位摆动与相邻道间隙	≤10ns
起始道死时间	≤1个道宽
循环起点摆动	平均为二分之一个道宽
起始与计数脉冲宽度	~19ns
符合分辨率	~10ns

的精度和重复性在1~?%左右。

## 2. 验证实验的典型结果

利用上述时域分析系统,在DF-VI快中子零功率装置上对所提出的技术的理论与适用价值进行了多方面的实验研究,实验的安排如图5所示。

图6至图9给出了验证实验的一些典型结果。其中图6和7是用单侧热化技术测得的两组 $\Psi_{1,2}(\tau)$ 曲线随堆次临界度 $\rho$ 的变化。图8是依方程(25)计算得到的归一化总相关符合计数率A与图6给出的实验值的比较。虽然图7中的曲线存在热中子高次谐波影响,但仍可以得出与图8同样的结果。图9比较了用单、双侧热化技术测得的堆外石蜡层内热中子的衰减特性,其中单侧热化测量的探测器2与图7所示的实验相同。双侧热化测量的两路探测器均与图7所示实验中的长计数管相同,为了进行相关振幅的比较,仔细调整了探测器2、3在石蜡层中的位置,以使它们的效率分别接近单侧热化测量两探测器的效率。利用图9中的数据确定的堆外石蜡层内热中子的衰减常数已标在该图中。该图中的 $\alpha_{\text{外}}$ 是利用文献<sup>[17]</sup>给出的用脉冲源技术测得的石蜡扩散参数按方程(26)计算的。

上述实验结果表明:

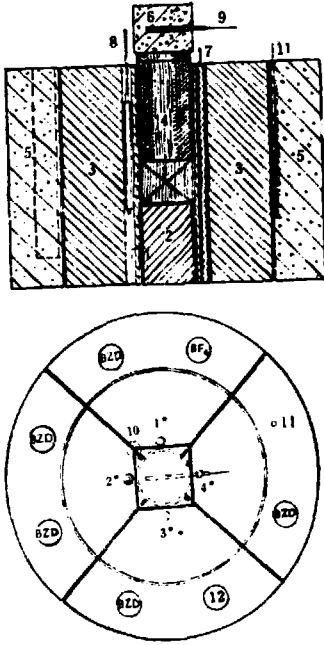


图5 在DF-VI快中子零功率堆进行热化测量的实验安排

1. 堆芯, 2. 安全块, 3. 调反射层, 4. 上反射层, 5. 石蜡层, 6. 石蜡样品, 7. 控制棒, 8. SZJ-2正比管, 9.  $\phi 6$ 小型涂硼管, 10.  $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源, 11.  $\phi 6$ 小型涂硼管, 12. SZJ-2正比管。

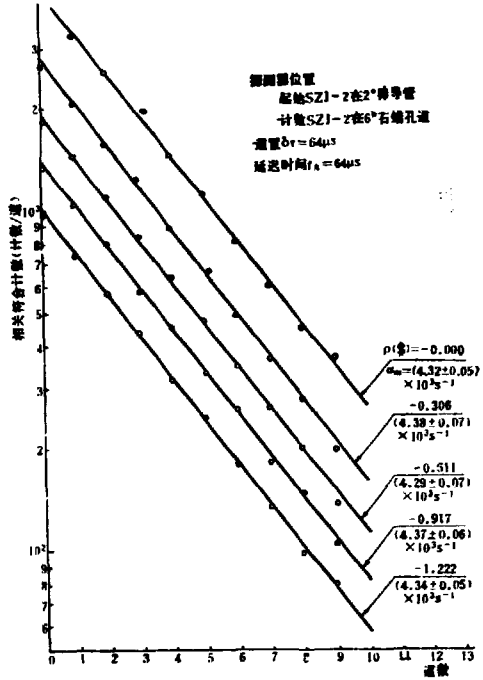


图6

(1) 归一化总相关符合计数率 $A$ 的测量值在约2%的实验误差范围内满足理论方程(25), 证明可以利用热化测量技术很方便地测定堆的次临界度。

(2) 对于一定材料和几何形状的慢化体, 不论堆的次临界状态如何,  $\Psi_{1,2}(\tau)$ 或 $\Phi_{2,3}(\tau)$ 的衰减常数在约1%的测量误差内保持不变; 证明 $\Psi_{1,2}(\tau)$ 或 $\Phi_{2,3}(\tau)$ 的时间相依特性与堆状态无关, 只由慢化体的材料和几何特性决定。

(3) 单、双侧热化技术都用来精确测量慢化介质内的热中子衰减常数。所得DF-VI装置外石蜡层内的 $\alpha_m$ 与脉冲源技术的测量结果在2%以内符合。

(4) 单、双侧热化测量的相关振幅之比近似等于2, 与方程(13)和(19)所预言的一致。

(5) 在实验中, 一般用15~30分钟的数据收集时间, 测量结果的统计误差就能小到1~2%, 比在DF-VI装置上进行Rossi- $\alpha$ 实验快得多。得到的信号本底比为5~20, 也比同样条件下的Rossi- $\alpha$ 实验高。

### 3. 次临界度测量的部分结果

如表2所列, 是用单侧热化技术测得的, 所用探测器类型与位置 and 图6所示实验相同。

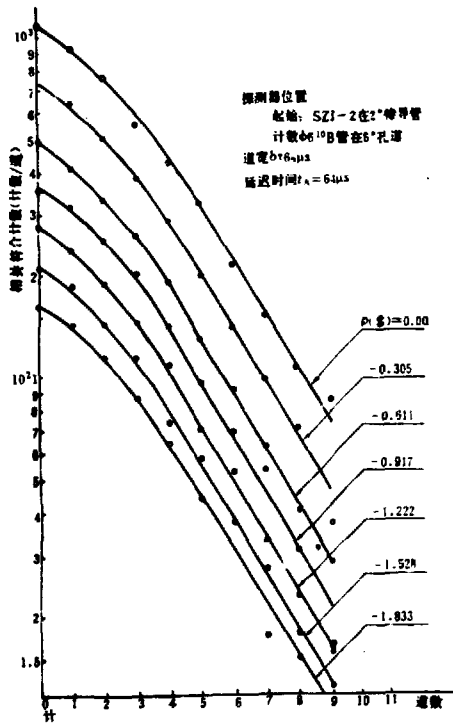


图 7

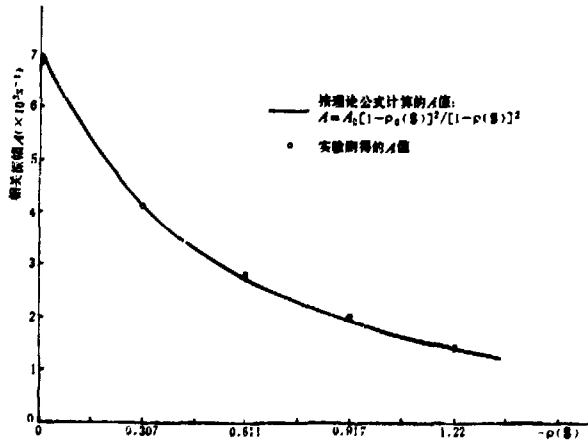


图 8

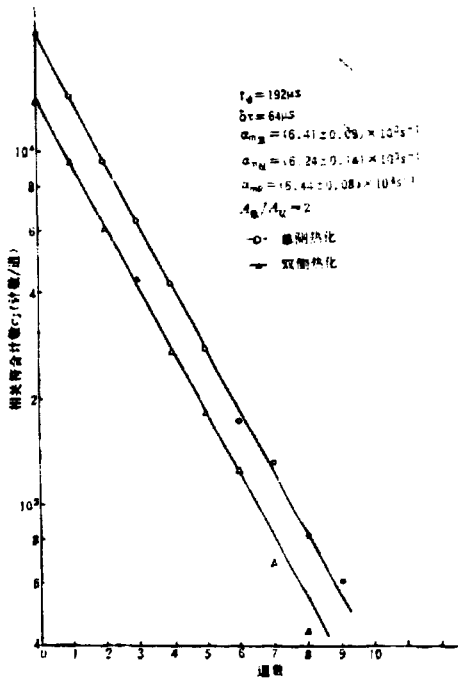


图 9

测量时通过逐步抽出堆内燃料元件来改变堆的次临界度。为了减小元件间的干涉效应，使被抽元件的位置尽可能相互远离。表 2 右边栏内的数据是将周期法或数字逆动态技术<sup>[13, 14]</sup>测得的元件反应性价值相加得到的。单根元件的反应性价值的误差约 1%。

分析表 2 中的数据可见，当次临界度不大于几元时，热化技术的结果与经典方法符合很好；当次临界度大于 10 元时，热化技术的结果明显较大。但是考虑到实验已经证明 DF-VI 装置燃料元件间的干涉效应是正的<sup>[15]</sup>，单根元件反应性价值简单叠加所得的次临界度值偏小，所以热化技术的结果应更为准确。

表 2 给出的  $\rho$  误差是统计误差。实际测量表明，即使堆的次临界度大到 13 元，只要 1 小时左右的数据收集时间就可以使结果的统计误差小到 ~8%。

#### 4. 石蜡热中子扩散参数的测量结果<sup>[16]</sup>

如表 3 和表 4 所列。测量中使用了五个石蜡样品，它们的几何曲率已列在表 3 中。测量样品 1 至 4 时，用厚 1mm 的锡将样品包裹，置于 DF-VI 装置芯部顶端。样品 5 就是 DF-VI 活性区外侧的石蜡层（图 5）。

为了便于比较，表 4 同时列出了文献[17]给出的用指数实验和脉冲源技术测量的结果。该表中的数据表明，热化技术所测得的结果与经典方法测得的经典结果符合得很好。



表 2 次临界度测量的部分结果

序号	次临界度 $\rho$ (%)	
	单侧热化技术	周期法或数字逆动态技术
1	-0.58±0.02	-0.611
2	-0.85±0.03	-0.875
3	-0.90±0.01	-0.917
4	-1.18±0.04	-1.165
5	-1.188±0.016	-1.222
6	-1.50±0.02	-1.528
7	-1.82±0.02	-1.833
8	-3.87±0.07	-3.808
9	-8.10±0.20	-7.73
10	-13.7±1.1	-9.63

表 3 石蜡样品内热中子衰减常数 $\alpha_n$ 的测量结果

序号	样品曲率 ( $\times 10^{-2} \text{cm}^{-2}$ )	温度 (°C)	$\alpha_n$ ( $\times 10^3 \text{s}^{-1}$ )
1	15.83	14.1	9.84±0.11
2	11.70	13.5	8.90±0.18
3	9.16	12.7	8.31±0.15
4	6.03	12.5	7.34±0.08
5	2.57	14.9	6.41±0.09

表 4 石蜡的热中子扩散参数

测量技术	温度 (°C)	石蜡密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	样品的 $B^2$ ( $\times 10^{-2} \text{cm}^{-2}$ )	$D_0$ ( $\times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ )	L (cm)	文献
热化技术	~13.5	0.886	$2.57 \leq B^2 \leq 15.83$	$2.607 \pm 0.079$	$2.13 \pm 0.09$	本文
指数实验	室温	0.890	—	—	$2.42 \pm 0.04$	[16]
脉冲源	室温	0.890	$4.50 < B^2 < 94.7$	$2.660 \pm 0.050$	$2.13 \pm 0.04$	[16]
脉冲源	室温	0.890	—	$2.639 \pm 0.088$	$2.14 \pm 0.07$	[16]

## 八、讨 论

理论及实验研究表明, 本文所提出的“快堆中子噪声热化测量技术”, 对一般中子噪声方法难以应用的中小型快堆系统是一项具有很高实用价值的堆中子噪声技术。和文献上发表的各种堆中子噪声方法相比, 该技术具有下列一些突出优点。

1. 采用热化技术测定次临界度, 不仅简单易行, 而且更重要的, 由于它本质上是脱开堆的瞬发中子时间特性用互相关方法直接测定堆内中子源的定态瞬发增殖因子, 因此该技术不仅具有一般双探测器互相关技术的优点, 同时还兼有源增殖方法的优点, 并克服了后二者的一些缺点。如能测深次临界度, 结果不依赖于源强或位置的变化, 无需考虑瞬发中子寿命变化的影响, 对瞬发空间谐波不灵敏, 对探测器效率要求低等。还应强调指出的是, 由于

$\Psi_{1,2}(\tau)$ 和 $\Phi_{2,3}(\tau)$ 与之有关的堆特性只是定态瞬发增殖因子,因此,对于存在双指数瞬发衰减特性的快堆系统,如DF-VI装置及用不锈钢或镍等强散射材料作反射层的快中子实验堆等,该技术同样适用。这种情况下,它避免了使用一般中子噪声方法时所遇到的理论处理上和探头布置方面的困难。已经获得的经验表明,采用这种技术在DF-VI装置上测量大到15元的次临界度是不困难的。这是除了利用钚源的中子噪声方法以外其它堆噪声技术都很难作到的。

2. 利用这种热化噪声技术可在快中子零功率堆上直接测量慢化介质的热中子扩散参数。其测量精度与速度可与脉冲源技术相比。从而为扩散参数的测量提供了一种适用的新方法。

3. 对于Rossi- $\alpha$ 技术能够应用的绝大多数系统,热化噪声技术的信号本底比与Rossi- $\alpha$ 技术大致相等,但其数据收集速度更快。

4. 这种热化噪声技术用物理方法(即热化方法)将快堆瞬发中子的相关间隔由微秒量级放大到毫秒范围,然后进行分析,因而大大降低了对探测器和分析设备的要求,避免了把一般堆中子噪声技术用于快堆领域时,因对设备的时间响应要求严格而造成的技术困难。

由于 $\Psi_{1,2}(\tau)$ 和 $\Phi_{2,3}(\tau)$ 的相关振幅与瞬发增殖因子的平方成正比,因而使深次临界状态下的数据收集速度受到限制。此外,对于大型快堆系统,因处于堆外的长计数管的效率相对降低及堆内 $\alpha$ 值变小,将使热化技术的应用遇到困难。

张玉山、许汉铭两同志曾仔细审阅了本文原稿,并提出了宝贵意见。罗椿英、张映华、寇顺学、车玉兰和徐变禄等同志参加了零功率堆的运行与检修,在此一并致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] R. E. Uhrig, *Random Noise Techniques in Nuclear Reactor Systems*, Ronald Press, New York (1970) .
- [2] M. M. R. Williams, *Random Processes in Nuclear Reactors*, Pergamon Press, Oxford (1974) .
- [3] J. T. Mihalcz, et al., *Theory of Correlation Measurement in Time and Frequency Domains With  $^{252}\text{Cf}$* , *Annals of Nuclear Energy*, 2, 97 (1975) .
- [4] J. T. Mihalcz, et al., *Time Domain Measurements for Fast Metal Assemblies With  $^{252}\text{Cf}$* , *Annals of Nuclear Energy*, 2, 161 (1975) .
- [5] J. T. Mihalcz, et al., *Determination of Reactivity from Power Spectral Density Measurements with Californium - 252*, *Nucl. Sci. Eng.*, 66, 29 (1978) .
- [6] J. F. Walter, et al., *The Asymmetric Source Method of Measuring Reactor Shutdown*, *Nucl. Sci. Eng.* 32, 333 (1968) .
- [7] H. W. Glauner, et al., *A Static Method for Subcritical Determination in Fast Breeders*, *KFK-1148* (1970) .
- [8] A. R. Buhl, et al., *Intercomparison of nonperturbing Techniques for Inferring the Reactivity of fast Reactors*, *Nucl. Technology*, 21, (1974) .
- [9] H. Borgwaldt, *A Common Theory for Neutron Noise Analysis Experiments in Nuclear Reactors*, *Nukleonik*, 7, 313 (1965) .
- [10] J. D. Odoff, *Prompt Neutron Periods of Metal Critical Assemblies*, *Nucl. Sci. Eng.* 2, 450 (1957) .
- [11] 嵇凤官等, DF-VI快中子零功率装置上的Rossi- $\alpha$ 测量, 夹江堆物理会议报告(1979.10) .
- [12] 金曼宜等, 数字延迟符合技术在时域堆噪声实验中的应用, 全国第二次堆物理会议报告, 苏州, (1980.5) .
- [13] 嵇凤官等, DF-VI快中子零功率堆1号芯部的临界研究, 成果报告(1973.10) .

- [14] 嵇凤官等, DF-VI快中子零功率装置上的数字逆动态技术及其应用,“反应堆物理”,(全国第一次堆物理会议资料汇编),p9~22,原子能出版社,(1980)。
- [15] 金曼宜、姚世贵等,在DF-VI快中子零功率装置上对蒸汽效应的模拟测量,成果报告(1978)。
- [16] Reactor Physics Constants, ANL-5890, p115 (1963)。
- [17] 嵇凤官、金曼宜、姚世贵等,在快中子零功率堆上用热化噪声技术测量慢化介质的热扩散参数,成果报告,(1980)。

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



P.O. Box 2103  
Beijing, China

**China Nuclear Information Centre**