

# 300<sup>#</sup>反应堆瞬发中子衰减常数测量

段世林, 代君龙, 曾和荣

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**利用反应堆噪声分析技术测量 300<sup>#</sup> 池式研究堆缓发临界下的瞬发中子衰减常数。堆芯采用低富集度 U 燃料装载, 燃料元件带一定燃耗。利用紧靠堆芯布置的两个中子探测器, 信号经测量系统和相关软件得到互谱密度, 用非线性最小二乘法拟合得到瞬发中子衰减常数。在 4 kW 功率水平测得缓发临界下的瞬发中子衰减常数  $\alpha_c = (83.4 \pm 0.7) \text{ s}^{-1}$ 。

**关键词:**反应堆噪声; 池式研究堆; 瞬发中子衰减常数; 互谱密度; 非线性最小二乘法

**中图分类号:** TL329.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2007)03-0321-04

## Measurements of Prompt Neutron Decay Constant for 300<sup>#</sup> Research Reactor

DUAN Shi-lin, DAI Jun-long, ZENG He-rong

(China Academy of Engineering Physics, P.O. Box 919-227, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The prompt neutron decay constant was measured by using reactor noise technology at delayed criticality for 300<sup>#</sup> pool research reactor. The reactor core uses irradiated low-enrichment fuel loading. The prompt neutron decay constant is obtained from nonlinear least-squares fitting of the cross-power spectral densities measured between two detectors placed adjacent to the core. The measured prompt neutron decay constant  $\alpha_c$  at delayed criticality with a power of 4 kW is  $(83.4 \pm 0.7) \text{ s}^{-1}$ .

**Key words:** reactor noise; pool research reactor; prompt neutron decay constant; cross-power spectral density; nonlinear least-squares fitting

利用中子噪声测量瞬发中子衰减常数是反应堆噪声分析技术的重要应用, 其优点是测量时对反应堆不引入扰动。双探测器互谱密度分析技术可以消除测量系统非相关噪声, 在反应堆传递函数、动态参数测量及堆芯构件振动监测方面得到广泛应用。相比其它方法, 互功率谱法更适用于 300<sup>#</sup> 池式研究堆这种热堆的瞬

发中子衰减常数测量。

300<sup>#</sup> 池式研究堆经长时间高功率运行后, 现有堆芯燃料带一定燃耗, 且燃耗不均匀。在零功率时, 反应堆的本底信号大, 信噪比较低。选择测量时的功率为 4 kW, 采用  $\gamma$  补偿电离室作中子探测器, 在相同工况下, 先后两次测量 2 路电离室电流信号。利用 Visual Fortran 和

Labview 软件开发应用程序对数据进行离线分析处理,得到 300<sup>#</sup>池式研究堆在缓发临界下的瞬发中子衰减常数  $\alpha_c$ 。

## 1 测量原理

堆内中子裂变、吸收、泄漏过程的统计特性使得堆中子数涨落不定,这种涨落表现为中子探测器输出的直流信号上叠加了涨落不定的噪声信号。分析这种噪声信号成为研究反应堆特性的重要手段。采用对称布置的 2 个探测器,测量输出信号的互谱密度(CPSD),消除探测器和测量系统的非相关噪声。

在忽略缓发中子效应及不考虑测量仪器电噪声影响下,紧靠堆芯布置的 2 个探测器信号的互谱密度的幅值满足如下关系式<sup>[1,2]</sup>:

$$G_{12}(\omega) = \frac{A}{\alpha^2 + \omega^2} \quad (1)$$

其中: $\alpha = \beta(1 - \rho/\beta)/l$  为瞬发中子衰减常数, $\beta$  为缓发中子有效份额, $l$  为瞬发中子寿命, $\rho$  为反应性; $\omega$  为角频率; $A$  是与堆功率水平、探测效率以及  $\alpha$  有关的常数。

$\alpha_c = \beta/l$ , 为堆处于缓发临界时的  $\alpha$  值。在 300<sup>#</sup>池式研究堆缓发临界下测量 CPSD,采用最小二乘法拟合就可得到  $\alpha_c$ 。

## 2 实验

### 2.1 堆芯装载布置

300<sup>#</sup>池式研究堆采用低富集度 U 棒状燃料元件,满功率为 3 MW。反应堆由铍和石墨作径向反射层,轻水慢化和冷却。300<sup>#</sup>反应堆的堆芯及探测器布置示于图 1。

### 2.2 信号测量

在堆芯外围的轻水层内,紧靠堆芯大致对称位置上布置的 2 个 BZD-2 型  $\gamma$  补偿电离室作中子探测器。堆功率为 4 kW 时,电离室的输出电流略大于 0.2  $\mu$ A,直接进行 I/V 转换。在数据采集卡输入端的 SCB-68 型信号连接板上,利用 4.3 M $\Omega$  的电阻把电离室电流信号转换为能被数据采集卡接收的 1 V 左右的电压信号。采用 NI 的 PCI6143 型 16 位同步数据采集卡结合 Labview 进行数据采集控制、显示和记录,用于后端分析。同步采集得到的 2 路信号数据进入计算机进行显示、存储。为了减少

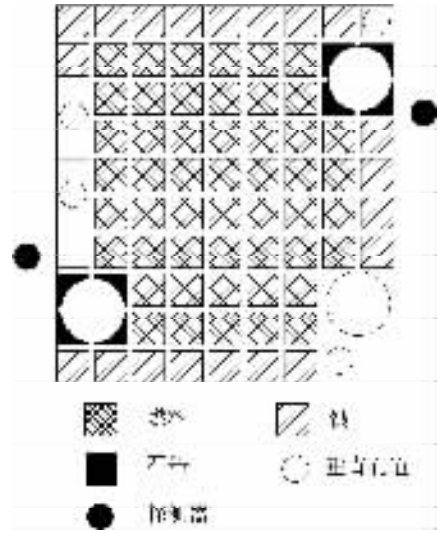


图 1 堆芯及探测器布置

Fig. 1 Scheme of core and detector locations

模拟信号处理环节中引入的噪声,将隔直和滤波等环节放在后端用软件进行处理。信号调节和数据采集系统布置在堆顶游泳池侧,尽量缩短信号传输电缆长度,以降低环境引入的干扰。

信号测量流程示于图 2。

试验时,反应堆开堆提升功率至 4 kW 并稳定 10 min 后,开始信号采集。两次实验测量持续时间分别为 2 h 和 3 h。

本实验只分析核噪声。为减小外加噪声源(如堆芯构件振动)造成的影响,测量过程中不启动一回路水泵,靠池式堆的自然循环冷却堆芯。

为了测量系统本底噪声信号的影响,在 4 kW 功率数据采集之前,进行了测试系统本底信号的测量,即在反应堆不运行情况下测量了测试系统的输出信号,近似代替实验时的本底信号,用于频域内减本底分析。本底信号测量时间为 10 min。

### 2.3 数据处理

用 Visual Frotran 6.0 结合 Labview 开发应用软件对实验数据进行离线分析处理,主要过程包括隔直、数字低通滤波、归一化、快速傅立叶变换(FFT)、对多个 FFT 取平均、求互谱密度 CPSD。对 CPSD 采用非线性最小二乘法拟合得到瞬发中子衰减常数。

利用减本底技术可以减小测试系统本底噪声的影响<sup>[2]</sup>。具体方法是,在频域内用实验测量的互谱密度与本底信号的互谱相减来得到中

子噪声的互谱密度。

2.4 实验结果

图3为实验数据及最小二乘法拟合结果。两路信号的相干系数示于图4。在分析的频率范围内,相干系数在0.2~0.5之间,随频率的增加而上升。其中,采集2h数据比采集3h数据的相干性好。两次实验结果列于表1,按测量时间进行加权平均, $\alpha_c = (83.4 \pm 0.7) s^{-1}$ 。

两次实验结果一致性较好,而且从频谱曲线上可以看出明显的转折特性。两路信号的相干性也较好。从实验结果可见,减本底前后频

表1 测量结果

Table 1 Summary of measurement

采集时间/h	本底考虑	$\alpha_c/s^{-1}$
2	减本底前	$87.3 \pm 1.5$
2	减本底后	$83.3 \pm 1.9$
3	减本底前	$85.6 \pm 1.2$
3	减本底后	$79.2 \pm 1.5$

谱特性曲线的形状不变,测试系统本底噪声信号对测量结果的影响在5%以内,这说明了噪声互谱分析技术对300#这种带燃耗元件热堆

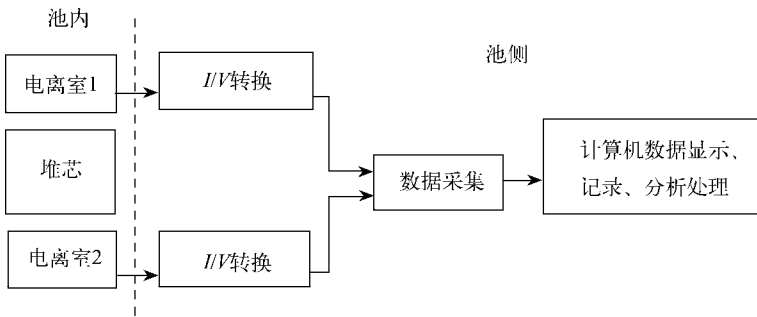


图2 测量系统方框图

Fig. 2 Diagram of measuring system

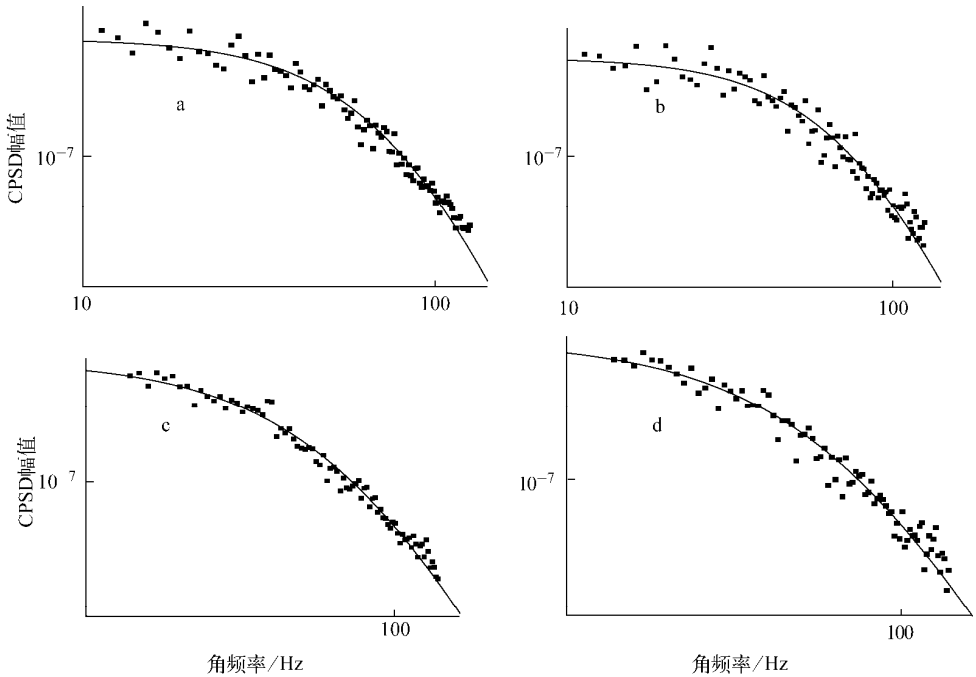


图3 测得的实验数据与拟合结果

Fig. 3 Measurement data and least-squares fitting

■——实验数据;实线——最小二乘法拟合

a, b——采集2h; c, d——采集3h; a, c——减本底前; b, d——减本底后

的动态参数测量的适用性。与 4 kW 功率下的测量时间相比,本底噪声信号的测量时间较短,数据样本小,其影响体现在图 3 上是减本底后的数据比减本底前的分散些。

由于 300<sup>#</sup> 池式研究堆以前未进行过瞬发中子衰减常数的测量,为了校核实验结果,对 300<sup>#</sup> 反应堆的  $\alpha_c$  进行理论计算。

根据微扰理论,反应堆瞬发中子寿命  $l$  可由堆内引入空间均匀分布的微量纯  $1/\nu$  吸收体后有效增值系数  $k_{eff}$  的相对变化来得到<sup>[3]</sup>:

$$l = \lim_{N \rightarrow 0} \frac{\delta k_{eff}}{k_{eff}} / (N \sigma_{a0} v_0) \quad (2)$$

其中: $N$  为  $1/\nu$  吸收体的原子密度; $v_0$  为参考速度(2 200 m/s); $\sigma_{a0}$  为在  $v_0$  时的吸收截面。

选取  $^{10}\text{B}$  作  $1/\nu$  吸收体。用 MCNP 程序分别计算  $^{10}\text{B}$  在浓度为  $2.5 \times 10^{-24} \text{ cm}^{-3}$  和  $5 \times 10^{-32} \text{ cm}^{-3}$  时的  $k_{eff}$ ,利用式(2)外推到  $^{10}\text{B}$  浓度到 0,得到瞬发中子寿命  $l = 7.75 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。

300<sup>#</sup> 堆测量过新燃料装载的缓发中子有效份额  $\beta$ ,为 0.007 9。由于采用低富集度 U 燃

料,长期运行后,部分  $^{238}\text{U}$  会转变为  $^{239}\text{Pu}$ ,而  $^{239}\text{Pu}$  的  $\beta$  比  $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$  的  $\beta$  小,快中子和热中子引发裂变的  $\beta$  分别为 0.002 和 0.002 2。根据目前燃耗元件堆芯的成份及中子能谱,计算总的  $\beta = 0.007 2$ ,并得到理论  $\alpha_c = 92.9 \text{ s}^{-1}$ 。

### 3 结论

与理论计算值相比,实验测量结果小 10.2%。考虑到理论计算时对元件燃耗进行均匀化处理带来的误差及测量系统的限制,本次实验结果还是可信的。另外,根据文献[3,4]的实验结果证实,燃耗元件堆芯上测得的谱密度曲线上转折频率明显降低,这对 300<sup>#</sup> 池式研究堆动态参数的影响如何还有待继续研究。

在噪声分析理论及实验技术上,得到了中国原子能科学研究院罗璋琳、史永谦等专家的大力帮助和指导,在此深表谢意。在系统调试和实验过程中,得到了李润东、王学杰、窦海峰等的协助,一并表示感谢。

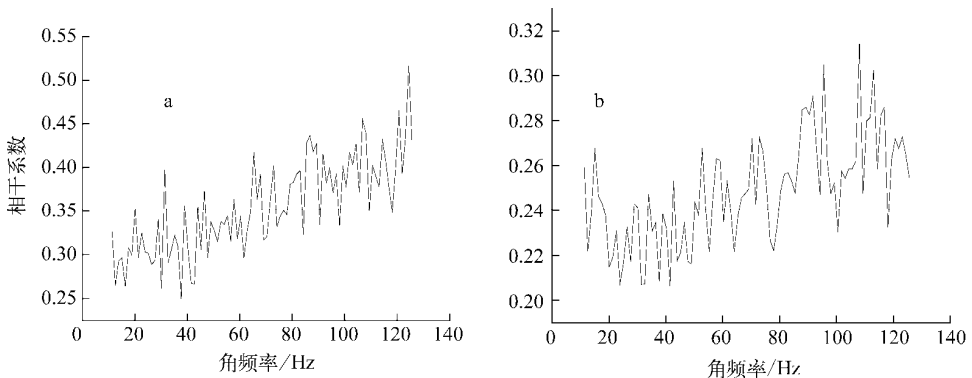


图 4 采集不同时间的相干系数

Fig. 4 Coherence for different time

a——采集 2 h; b——采集 3 h

### 参考文献:

- [1] UHRIG R E. Random noise techniques in nuclear reactor systems[M]. New York: The Ronald Press Co, 1970:99-129.
- [2] 罗璋林,罗安仁. 实验反应堆物理[M]. 北京:原子能出版社, 1987:208-236.
- [3] RAGAN G E, MIHALCZO J T, ROBINSON R C. Prompt neutron decay constant at delayed criticality for the Oak Ridge Research Reactor with 20 and 93 WT%  $^{235}\text{U}$  enriched fuel[J]. Ann

Nucl Energy, 1997, 24(1):21-31.

- [4] 卢桂平,彭风,易洁宜. 双探测器互相关噪声技术及其在反应堆动态参数测量中的应用[J]. 核科学与工程, 1988, 8(3):252-259.  
LU Guiping, PENG Feng, YI Jieyi. Two-detector cross-correlation noise technique and its application in measuring reactor kinetic parameters[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1988, 8(3):252-259 (in Chinese).