

混装堆芯下 300[#] 池式反应堆瞬发中子 衰减常数 α 实验研究

曾和荣¹, 段世林¹, 王冠博^{1,2}, 刘汉刚¹, 钱达志¹

(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. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要:利用自行研制的反应堆功率谱密度(PSD)测试系统,对 300[#] 池式反应堆在混装堆芯下的瞬发中子衰减常数 α 进行实验研究。利用紧靠堆芯对称布置的两路电离室 DL129 探测器获得中子在堆内的连续电流信号,并把该信号输入到测试系统,再应用数据采集和数据处理分析程序得到功率谱密度曲线,最后用非线性最小二乘法拟合得到瞬发中子衰减常数 α 。经比对,该实验结果与理论计算值在误差范围内符合,满足工程实际需求。

关键词:混装堆芯;300[#] 池式反应堆;功率谱密度;瞬发中子衰减常数 α

中图分类号:TL375

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2013)01-0097-04

doi:10.7538/yzk.2013.47.01.0097

Experimental Study of Prompt Neutron Decay Constant α for 300[#] Pool Reactor Under Mixed Core

ZENG He-rong¹, DUAN Shi-lin¹, WANG Guan-bo^{1,2}, LIU Han-gang¹, QIAN Da-zhi¹

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The experimental study of prompt neutron decay constant α for 300[#] pool reactor under mixed core was carried out through a suit of reactor power spectral density measurement system. The two channel continuous current signals of neutron in the reactor were acquired by ionization chamber DL129 which was symmetrically putted in reactor core. The power spectral density, for two channel signals, was computed using the application program of data acquirement and data process analysis. Finally, by using the non-linear least squares method, the prompt neutron decay constant α was fitted. By comparison, the experimental results well accord to the theory calculation within the error range. The deviation can meet the actual need of project.

Key words: mixed core; 300[#] pool reactor; power spectral density; prompt neutron decay constant α

在反应堆动态参数中,瞬发中子衰减常数 α 是其中的一个重要动态参数,它是表征堆芯动态行为的一个本征值^[1],在反应堆设计与运行中均倍受关注。

300[#]池式反应堆的堆芯使用²³⁵U富集度为10%的棒状燃料元件,轻水慢化和冷却,径向反射层由铍和石墨组成。为检验该堆堆芯采用板状燃料元件和棒状燃料元件混装运行的可能性,在堆芯内装入了两盒板状燃料元件。针对此混装堆芯的动态参数 α ,在进行物理计算时作一定的简化,这样必然导致物理计算结果与实际物理参数存在差别。为检验物理计算的反应堆动态参数 α 的可信度,确保混装堆芯的安全运行,有必要在零功率水平开展动态参数 α 的实验测量。

本工作采用两路紧靠堆芯对称布置的电离室DL129作中子探测器获得电流信号,利用自行研制的功率谱密度测试系统对该堆在缓发临界下的瞬发中子衰减常数 α 进行实验研究。

1 基本假设和计算模型

1.1 基本假设

1) 假设反应堆系统在统计学上是稳定的,统计特性不随时间而发生变化,对一反应堆系统,虽在不同的时间进行统计学测量,但得到的参数在误差范围内一致。

2) 满足点堆模型假设,即认为中子探测器放在堆内任何点进行统计测量时,所得结果均能代表整体堆芯的特性。

3) 只考虑瞬发中子,忽略缓发中子效应。

1.2 功率谱密度函数基本方程

按照傅里叶变换理论,一个可积的时间函数可用不同频率的谐波与相应振幅的乘积叠加来表示,其积分形式为:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1)$$

式中: $x(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$, $x(j\omega)$ 为 $x(t)$ 的变频谱; t 为时间; ω 为频率。

对某一频率 ω ,其振幅的平方为变频谱的实数部分和虚数部分的平方和,即:

$$|x(j\omega)|^2 = [\operatorname{Re}x(j\omega)]^2 + [\operatorname{Im}x(j\omega)]^2 \quad (2)$$

式中, $|x(j\omega)|^2$ 为 $x(t)$ 的功率谱。

由于反应堆内的中子统计涨落不能被描述为时间的确切函数,但可用服从统计规律的样本函数描述^[2]。因此,可将样本函数进行傅里叶变换,但所得频谱具有随机性质。考虑到这种随机性质,对 $|x(j\omega)|^2$ 进行统计平均,得到的平均值称功率谱密度,即:

$$\begin{aligned} \phi_{xx}(\omega) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} x(j\omega) x^*(j\omega) = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left(\int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{j\omega t} dt \right) \left(\int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j\omega t} dt \right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $x^*(j\omega)$ 为 $x(j\omega)$ 的共轭值; T 为积分周期。

相应地,对于两路平稳随机信号 $x(t)$ 、 $y(t)$,互功率谱密度为:

$$\phi_{xy}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} x(j\omega) y(j\omega) \quad (4)$$

1.3 实验原理

对于零功率堆或临界装置,在忽略缓发中子效应及不考虑测量仪器的电子学线路噪声影响下,对于紧靠堆芯对称布置的探测器,其信号功率谱密度的幅值 $G(\omega)$ ^[2-3]满足:

$$G(\omega) = \frac{A}{\alpha^2 + \omega^2} + B \quad (5)$$

式中: $\alpha = \beta_{\text{eff}}/l$,为瞬发中子衰减常数, β_{eff} 为缓发中子有效份额, l 为瞬发中子寿命; ω 为角频率; A 和 B 是与堆功率水平、探测效率及本底有关的常数。

2 实验方法

2.1 实验堆芯简介

堆芯内的两盒板状燃料元件为MTR直板型元件,材料芯体为 U_3Si_2-Al 弥散合金,包壳为Al合金,其余燃料元件为新的棒状燃料元件,整个堆芯被安装在约7.0 m深的水下。

2.2 功率谱密度测试系统

功率谱密度测试系统由探测器、数据采集系统、控制器及测量控制系统组成,其测试系统框图如图1所示^[4]。

实验所选的探测器为中核(北京)核仪器厂生产的DL129型电离室,主要参数为:外径45 mm,有效长度355 mm,中子灵敏材料¹⁰B的富集度92%,中子灵敏度 2×10^{-14} A/nV,安装有 $\phi 4$ mm的铠装电缆。从电离室输出的电流信号经Keithley428型放大器进行放大和低通滤

波,并转换为 0~10 V 的电压信号,然后传送给数据采集器。放大器的放大倍数由控制器根据电离室的输出,通过 GPIB 进行调节,调节范围为 $10^3 \sim 10^{11}$ 。为达到系统运行可靠、方便使用和扩展的目标,系统在总体设计上采用了 PXI 总线构架。其中,嵌入式控制器 PXI-8015、数据采集器 PXI-6230 集成在 1 个 PXI-1031 机箱内,通过在控制器上外接标准鼠标、键盘和显示器进行操作。测量控制系统完成对放大器和数据采集器的控制并获得采集数据。

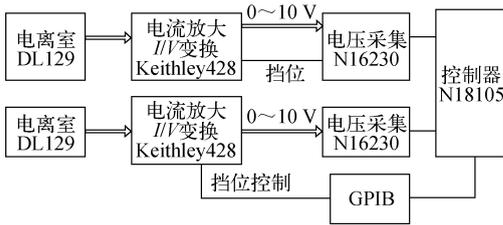


图 1 功率谱密度测试系统框图

Fig.1 Graph of power spectral density measurement system

2.3 实验步骤

1) 按照《开堆操作规程》,启动反应堆,使堆功率控制在不大于 10 W 量级,当功率指示的电流达到 1.2 mA,稳定运行 10 min 后,此时各控制棒的临界棒位分别为:2 根安全棒到顶,补偿棒和调节棒的棒位为 208 mm。

2) 不接入 2 路电离室 DL129 输出的信号,启动功率谱密度测试系统,采集 30 min 后停止,从而获取测量系统的电子学线路本底噪声。

3) 接入 2 路电离室 DL129 输出的信号。

4) 再次启动功率谱密度测试系统,从而获取堆内中子随机统计涨落信号。

5) 测量 30 min 后,停止测量。

6) 落下全部控制棒,停堆。

2.4 实验数据处理

数据处理时,首先把所采集到的数据分为 500 个数据块,每块包括 20 000 个实验点,再利用应用程序对实验数据进行离线分析处理,其分析处理流程如图 2 所示。

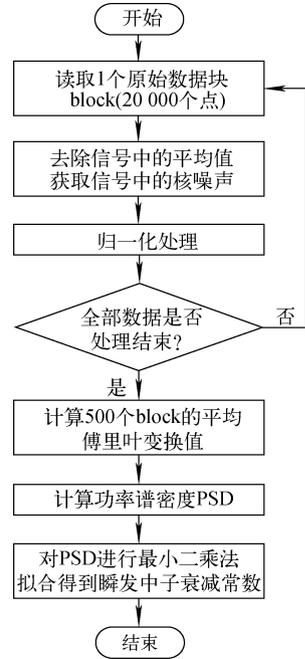
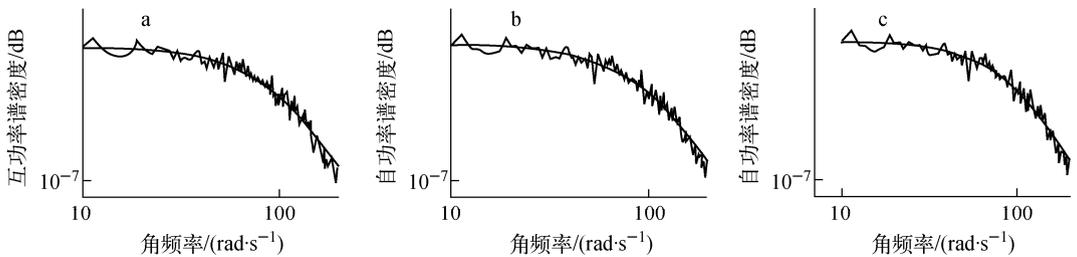


图 2 实验数据处理流程

Fig.2 Graph of process flow for test data

3 实验结果与分析

按照实验数据的处理流程,利用自行编制的实验数据处理程序,对实验数据进行两路信号的互功率谱密度(CPSD)和单路信号的自功率谱密度(APSD)分析^[5],分析结果示于图 3。



a——两路信号(CPSD); b——第 1 路信号(APSD1); c——第 2 路信号(APSD2)

图 3 实验数据处理结果

Fig.3 Results of test data

本轮实验数据所得到的结果为同一频率下的功率谱密度,实验过程中用两路探测器获得了两路信号,对两路信号同时处理便得到 CPSD,对各路信号分别处理得到 APSD,实验时由于堆内和测量系统的电噪声所引起的本底非常弱,因此图 3a、b 和 c 的曲线几乎完全一致。用非线性最小二乘法拟合得到混装堆芯的瞬发中子衰减常数 α 分别为: $(105.12 \pm 1.70) \text{ s}^{-1}$ (CPSD)、 $(107.45 \pm 1.75) \text{ s}^{-1}$ (APSD1) 和 $(107.24 \pm 1.73) \text{ s}^{-1}$ (APSD2)。

图 4 示出相干函数的处理结果。

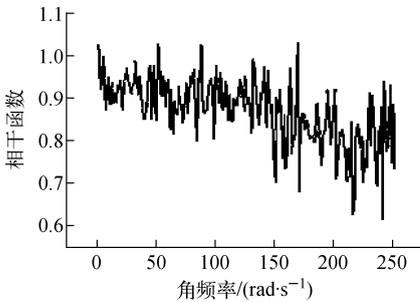


图 4 相干函数处理结果

Fig. 4 Result of coherence function

4 结论

1) 从功率谱密度可看出明显的转折特性,3 组实验结果重复性好,说明反应堆中子随机噪声技术对混装堆芯的瞬发中子衰减常数 α 测量是可行的,实验结果可信。

2) 经理论计算,MCNP 程序所给出的 α 为 $(108.72 \pm 7.01) \text{ s}^{-1}$,对于实际工程问题,其相对偏差控制在 5% 以内,在误差范围内符合,满足工程实际需求。

3) 功率谱密度测试系统在研制过程中,只用仿真信号进行了验证,本次实验是该系统在堆上的首次实堆考验。实验结果表明,该测试系统在整过实验过程中一直稳定运行,并具有较强的抗干扰能力。

4) 在分析的频率范围内,求得相干函数结

果约为 0.85,这说明两路信号的相关性好,实验真实地获得了堆内相关中子的统计涨落信号。

5) 由于外界噪声的干扰将对测量品质产生有害影响,有必要引入一物理量作为量度测量品质的标志,相干函数就是一常用且比较方便的物理量。如果外界干扰无足轻重,相干函数结果为 1,否则一般均小于 1。此外,输出和输入的非线性也会使相干函数结果小于 1。在实验测量过程中,由于测量和计算等随机误差的原因,偶尔也可能导致相干函数结果大于 1 的情况出现,这从图 4 的结果中也可看出,但这对整个测量分析没有影响。

感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所 202 室物理组李润东副研究员及全体成员对本实验的帮助。

参考文献:

- [1] 罗璋琳. 反应堆实验物理[M]. 北京:原子能出版社,1988.
- [2] 胡大璞,郑福裕. 核反应堆物理实验方法[M]. 北京:原子能出版社,1988.
- [3] 杜金峰,贺仁辅,刘汉刚. 深次临界装置 α 本征值计算方法比较研究[J]. 原子能科学技术,2004, 38(3):231-234.
- DU Jinfeng, HE Renfu, LIU Hangang. Comparison of alpha eigenvalue calculational methods in deep subcritical systems[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(3): 231-234 (in Chinese).
- [4] 曾和荣,段世林. 基于 DSP 技术的反应堆噪声测试分析系统[C]//全国核仪器应用核探测技术核测量方法学术会议论文集. 贵州:[s. n.],2007.
- [5] 戴逸松,石要武. 测量 nV 正弦电压的互功率谱方法[J]. 电工技术学报,1992(2):38-42.
- DAI Yisong, SHI Yaowu. An approach using cross power spectrum estimator for measurement of nV sinusoidal signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1992(2), 38-42(in Chinese).