

固定棒位法测量控制棒总价值

霍兴凯, 陈晓亮, 喻宏, 范振东, 陈效先

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要: 控制棒价值测量的准确度与效率对核电厂的安全性及经济性具有重要影响。在动态刻棒等反应性测量工作中, 本底与中子源对探测器有显著影响, 致使根据实测电流计算得到的反应性显著偏离真实值。基于点堆逆动态方程, 通过对本底与中子源影响的分析, 利用固定棒位状态下的测量数据计算反应性并得到控制棒总价值, 给出了一种不受本底与中子源影响的简便的控制棒总价值测量计算方法, 并在零功率实验装置上进行验证。结果表明, 该方法可有效避免本底和中子源组件对反应性探测的影响, 并简化了离线理论计算, 其与周期法计算结果的相对偏差在1%以内。

关键词: 恒定反应性法; 反应性; 本底电流; 控制棒价值; 动态刻棒

中图分类号: TL364.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2017)08-1447-04

doi: 10.7538/yzk.2017.51.08.1447

Measurement of Total Worth of Control Rod by Static-rod-position Method

HUO Xing-kai, CHEN Xiao-liang, YU Hong, FAN Zhen-dong, CHEN Xiao-xian

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-34, Beijing 102413, China)

Abstract: The precision and efficiency of the measurement of control rod worth are of great importance to the safety and economy of nuclear power plants. During reactivity measurements, such as the dynamic control rod worth measurement, the background and neutron source have significant impact on the detectors, resulting in a significant error of the measured reactivity. Based on the point-reactor inverse kinetics equation, the background and neutron source were analyzed, and the reactivity and control rod worth were obtained by use of the data measured with the control rods being at static positions. Accordingly, a practical method was developed for the measurement of the total worth of control rods, which is free from the impact of background and neutron source, and tested on a zero power facility. It is shown by the test results that the method effectively eliminates the impact of background and neutron source and simplifies the offline calculation. The relative difference between the result of this method and that of the periodic method is below 1%.

Key words: steady-reactivity method; reactivity; background current; control rod worth; dynamic control rod worth measurement

反应堆在初装料和每次换料后均需进行控制棒价值刻度。20世纪末从美国西屋公司发展起来的动态刻棒法在控制棒连续快速下插过程中进行价值刻度,通过离线程序的计算进行空间效应修正,大幅缩减了测量时间,并减少了人因失误的可能性^[1]。但动态刻棒法需要反应堆物理及中子动力学程序计算出静态空间修正因子和动态空间修正因子,同时易受到本底电流和中子源引入电流的影响。由于控制棒下插速度的限制,降棒过程通常需要3 min左右,在此期间中子通量将下降2~3个数量级,致使动态刻棒末段本底电流在实测电流中所占份额较大,由此实测电流计算得到的反应性显著偏离真实值^[2]。此外,对于初始装料的反应堆,中子源直接产生的中子相对较强,由此产生的电流在实测电流中所占份额较大,致使实测反应性与真实反应性有较大差别。

针对以上问题,本文拟开发一种简便的反应性测量计算方法——固定棒位法,以避免本底与中子源对反应性测量的影响,并在零功率堆上对该方法进行验证。

1 理论模型

一般反应堆的反应性测量以点堆模型为基础,点堆中子动力学方程详见文献^[3]。由此可推导出点堆逆动态方程:

$$\rho(t) = \left(-\Lambda \sum_i \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t} - \sum_i \beta_i \lambda_i \int_0^t n(t') e^{-\lambda_i(t-t')} dt' + \Lambda \frac{dn(t)}{dt} + \beta n(t) - \Delta S \right) / n(t) \quad (1)$$

其中: $n(t)$ 为 t 时刻的全堆中子总数; $\rho(t)$ 为 t 时刻的反应性; β 为堆芯总的缓发中子有效份额; β_i 为第 i 组缓发中子的有效份额,一般计算中缓发中子分为6组; Λ 为中子代时间; λ_i 为第 i 组缓发中子先驱核的衰变常量; $C_i(0)$ 为初始时刻第 i 组缓发中子先驱核的原子核密度; S 为中子源强度。

式(1)中的 $-\Lambda \sum_i \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t}$ 表示初始时刻缓发中子先驱核引入的电流,显然它随时间迅速衰减。由于测量过程开始时反应性仪往往已运行了一段时间,因此一般可将该项

直接忽略。

在反应性测量中,反应性仪直接测量得到的并不是式(1)中的 $n(t)$,而是堆外裂变电离室的测量电流。为了利用式(1)进行逆动态计算,要求实测电流与点堆模型中的 $n(t)$ 呈正比。然而这一条件难以满足,因为实测电流受以下几方面因素的影响^[4]。

1) 本底电流。反应堆在运行过程中产生的裂变产物以及堆内和堆外材料在长期辐照下产生的活化产物将持续产生 γ 射线;这些 γ 射线也会在堆外裂变电离室中沉积能量而产生电流。除此以外,整个反应性探测系统本身存在电路噪声,给实测电流带来电学本底电流。这就导致了实测电流与探测器所在位置处的中子通量水平不呈正比。

2) 中子源效应。中子源组件产生的中子通量也会直接使探测器产生响应,即式(1)中的 ΔS 项。实践中发现,对于商用压水堆大部分情况下该项对反应性测量的影响不大,但对于首次启动的“净”堆该项尤其显著,因为此时其他本底电流较弱,该项的影响便凸显出来。

3) 静态空间效应。这一效应由点堆模型的局限性导致。堆外裂变电离室仅能探测其所在位置处的中子通量,而实际堆芯中子通量是三维分布的,并受棒位影响,因此实测电流与点堆模型中的 $n(t)$ 并不呈正比,所以要对其进行修正。

4) 动态空间效应。当堆芯状态发生改变时,如控制棒的移动,缓发中子的通量分布变化缓慢,滞后于瞬发中子的通量分布。这就使得仅靠静态空间修正是不够的,还要依靠中子动力学程序的三维时空动力学计算进行动态空间修正,消除缓发中子通量分布变化滞后的影响。

对于本底与中子源的影响可通过对点堆逆动态方程的数学变换和推导进行处理。

将本底电流用 I_b 表示,按照前面的分析,它是一个与堆内中子学过程无关的独立而恒定的电流分量。这样,实测电流可表述为:

$$I = nF_n + I_b + SF_s \quad (2)$$

其中, F_n 和 F_s 分别为点堆的中子数和源强度与实测电流间的转换系数。显然这两个转换系数是受空间效应影响的,但棒位不动时可认为两者均为常数。将式(2)代入式(1),按照

前面的分析进行整理可得:

$$\rho(t) = \left(- \sum_i \beta_i \lambda_i \int_0^t I(t') e^{-\lambda_i(t-t')} dt' + \sum_i \beta_i \lambda_i \int_0^t (I_b + SF_s) e^{-\lambda_i(t-t')} dt' + \Lambda \frac{dI(t)}{dt} + \beta(I(t) - I_b - SF_s) - \Delta SF_n \right) / (I(t) - I_b - SF_s) \quad (3)$$

将式(3)中分子上除与本底和中子源相关项以外的其他项求和,并记为 $f(t)$,即:

$$f(t) = - \sum_i \beta_i \lambda_i \int_0^t I(t') e^{-\lambda_i(t-t')} dt' + \Lambda \frac{dI(t)}{dt} + \beta I(t) \quad (4)$$

将其代入式(3)可得:

$$f(t) = \rho I(t) + b \quad (5)$$

$$b = \Delta SF_n - \rho(I_b + SF_s) \quad (6)$$

式(5)表明:如果在某段时间内通过固定控制棒棒位使反应堆维持一个恒定、非零的反应性,即 $\rho(t)$ 为恒定、非零的数值 ρ ,那么式(5)中仅有 $f(t)$ 与 $I(t)$ 是与时间相关的变量,其他项均为常数,因此 $f(t)$ 与 $I(t)$ 将呈线性关系。

理论上式(5)仅需要两组数据(两个测量点)即可求解出线性方程的斜率 ρ 和截距 b 。但反应性仪是连续地每秒(甚至每 0.1 s)采集 1 个数据点,因此仅选用两个数据点显然是不准确的,应选用连续多个数据点进行线性拟合,线性拟合得到的斜率即为反应性 ρ 。需要注意的是,这里得到的反应性是刨除了本底、源项影响的反应性。

由于这一过程中控制棒棒位是固定的,堆芯状态维持恒定,因此计算过程不受静态空间效应的影响。此外,由于控制棒行程末端价值较小,此时中子通量分布变化已经不大,又由于棒位停止移动后的反应性恒定状态可维持几十秒乃至几分钟,因此可不考虑缓发中子通量分布变化滞后的影响,即忽略动态空间效应。本文提出的固定棒位法可不进行静态空间修正和动态空间修正,由实测电流直接计算得到反应性,大幅降低了对配套程序和计算工作的要求。

2 实验验证

为了对固定棒位法进行验证,在中国原子能科学研究院某零功率堆上开展了验证实

验。该零功率堆采用高富集度的金属铀燃料,堆内无慢化剂和冷却剂,圆柱形堆芯中心有 1 根安全棒,外层均匀布置 3 个调节鼓和 3 组安全鼓。启动中子源为 Am-Be 源,强度约为 10^6 s^{-1} 。堆芯外围布置多个探测器,其中有两个 γ 补偿电离室和两个功率监测电离室连接反应性仪。

基于零功率堆进行了 ± 20 、 ± 40 和 $\pm 60 \text{ pcm}$ 等恒定反应性下的测量,实验时用于控制反应性的调节鼓和安全鼓处于固定位置。本文采用其中 1 个探测器在 $\pm 60 \text{ pcm}$ 实验的数据对本文方法进行验证。图 1 示出该实验的实测电流,图 2 示出由实测电流经逆动态计算得到的反应性。由于电流本底噪声的影响,实测反应性波动较大,测量值较为分散。

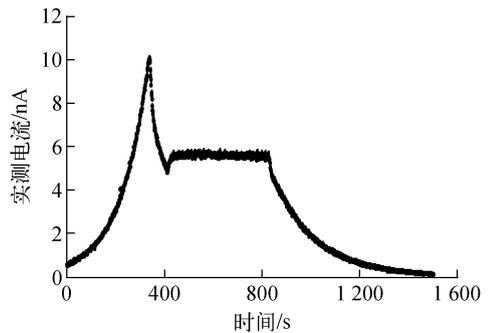


图 1 零功率堆 $\pm 60 \text{ pcm}$ 实验的实测电流
Fig. 1 Measured current in $\pm 60 \text{ pcm}$ test of zero power reactor

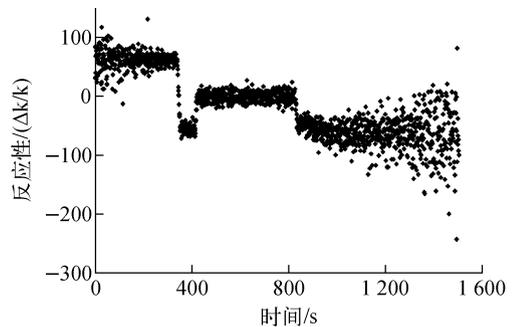


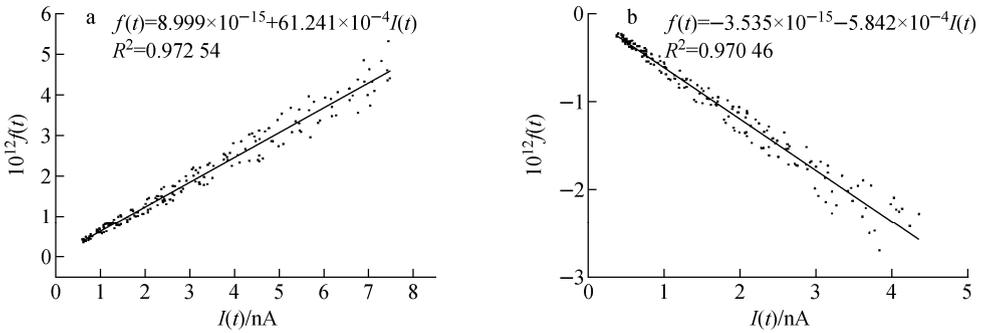
图 2 零功率堆 $\pm 60 \text{ pcm}$ 实验的反应性
Fig. 2 Reactivity in $\pm 60 \text{ pcm}$ test of zero power reactor

编制计算程序对以上实验数据进行分析计算,其中合成项 $f(t)$ 与实测电流 $I(t)$ 的线

性拟合使用数据处理软件 OriginPro 8 处理, 拟合计算得到的斜率即为反应性, 结果如图 3 所示。由图 3 可见, 固定棒位法线性拟合的 R^2 均在 0.97 以上, 证明了 $f(t)$ 与 $I(t)$ 的线性关系的合理性。固定棒位法与周期法计算结果的比较列于表 1。由表 1 可见, 反应性的相

对偏差均在 1% 以内。周期法计算结果按以下方法得到: 在实时测量的通量数据中选取 1 段, 按最小二乘法指数拟合得到以秒为单位的反应堆通量倍增周期(二倍周期), 再按倒时方程计算出反应性。

计算过程中剔除了明显异常的数据点。



零功率堆反应性: a——+60 pcm; b——-60 pcm

图 3 零功率堆 $f(t)$ 与 $I(t)$ 的线性拟合

Fig. 3 Linear fitting between $f(t)$ and $I(t)$ of zero power reactor

表 1 固定棒位法与周期法计算结果对比

Table 1 Comparison of reactivity between static-rod-position method and periodic method

反应性/pcm		相对偏差/%
固定棒位法	周期法	
61.24	61.42	-0.29
-58.42	-58.74	0.54

3 结论

本文基于点堆逆动态方程, 通过对本底与中子源影响的分析, 得出一种不受本底与中子源影响的简便的控制棒总价值测量计算方法。本文方法从根本上克服了本底电流与中子源电流的影响, 并可忽略静态和动态空间效应修正。本文方法可为动态刻棒提供对比验证, 同时也

可作为一种独立简便的方法进行控制棒总价值的测量和计算。

参考文献:

- [1] CHAO Y A, CHAPMAN D M, HILL D J, et al. Dynamic rod worth measurement[J]. Nuclear Technology, 2000, 132: 403-412.
- [2] LEE E K, SHIN H C, BAE S M, et al. New dynamic method to measure rod worths in zero power physics test at PWR startup[J]. Annals of Nuclear Energy, 2005, 32: 1 457-1 475.
- [3] 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 230-232.
- [4] 罗璋琳, 史永谦, 潘泽飞. 实验反应堆物理导论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011: 107-109.