

一元线性回归处理逆动态法实验数据

赵郁森, 陈晓亮

(中国原子能科学研究院 快堆工程部, 北京 102413)

摘要: 阐述了一元线性回归处理逆动态法实验数据的原理。采用该方法除能获得反应性外, 还可得到外中子有效源强。根据逆动态法实验原理和一元线性回归方法编写了计算程序, 对俄罗斯动力研究院零功率装置 BFS-1 的实验数据进行处理, 并与俄罗斯的计算结果进行了比较。计算结果表明: 利用一元线性回归方法处理逆动态法实验数据可准确获得反应性和有效源强, 提高了测量结果的精度, 利用计算出的反应性可方便获得中心元件的效率; 在反应堆功率较低、外源较强的情况下, 应考虑外源对反应性测量的影响。

关键词: 反应性测量; 逆动态法; 外中子源

中图分类号: TL326

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)07-0586-04

Treating Experimental Data of Inverse Kinetic Method by Unitary Linear Regression Analysis

ZHAO Yu-sen, CHEN Xiao-liang

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

Abstract: The theory of treating experimental data of inverse kinetic method by unitary linear regression analysis was described. Not only the reactivity, but also the effective neutron source intension could be calculated by this method. Computer code was compiled base on the inverse kinetic method and unitary linear regression analysis. The data of zero power facility BFS-1 in Russia were processed and the results were compared. The results show that the reactivity and the effective neutron source intension can be obtained correctly by treating experimental data of inverse kinetic method using unitary linear regression analysis and the precision of reactivity measurement is improved. The central element efficiency can be calculated by using the reactivity. The result also shows that the effect to reactivity measurement caused by external neutron source should be considered when the reactor power is low and the intension of external neutron source is strong.

Key words: reactivity measurement; inverse kinetic method; external neutron source

在反应堆物理实验中,逆动态方法是测定反应性的重要方法。在空间效应不显著、堆芯有外源(或较强的分布源)和功率较低的情况下,用一元线性回归处理逆动态法实验数据,可同时得到反应性和有效源强,即“两参数”符合。在空间效应显著的情况下,一元线性回归得到的结果可作为计算反应性、有效源强和空间效应,即“三参数”符合的初值,从而缩短计算时间。利用一元线性回归得到有效源强,可逐点计算与每一时刻相对应的瞬时反应性,了解反应性瞬时变化情况。本工作对俄罗斯动力研究院的实验数据进行处理,以验证一元线性回归法处理逆动态实验数据的正确性,为精确得到反应性和有效源强提供一种有效手段。

1 两参数符合原理

在与空间无关的点堆模型出发可得到下式^[1]:

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{\text{eff}}}n(t) = \frac{\Lambda}{\beta_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn(t)}{dt} + n(t) - \sum_{i=1}^m a_i e^{-\lambda_i t} \left[\int_0^t \lambda_i n(t') e^{\lambda_i t'} dt' + n(0) \right] - \frac{\epsilon \gamma_s Q}{\beta_{\text{eff}}} \quad (1)$$

其中: $\rho(t)$ 为 t 时刻反应性; $n(t)$ 为 t 时刻单位时间内全堆中子在测量系统引起的计数; t' 为时间积分变量; β_{eff} 为缓发中子有效份额; Λ 为中子代时间, s^{-1} ; λ_i 为第 i 组缓发中子先驱核衰变常量, s^{-1} ; $a_i = \beta_{i,\text{eff}}/\beta_{\text{eff}}$ 为第 i 组缓发中子相对份额, $\beta_{i,\text{eff}}$ 为第 i 组缓发中子有效份额; Q 为外中子源强度, s^{-1} ; γ_s 为外中子源的相对价值; ϵ 为中子探测器效率; m 为缓发中子先驱核组数。

反应堆的初始条件为:

$$\frac{dn(0)}{dt} = 0, \quad \frac{dc_i(0)}{dt} = 0$$

此时, $c_i(0) = \frac{\beta_{i,\text{eff}}}{\Lambda \lambda_i} n(0)$ 。

在式(1)中,忽略 $\frac{\Lambda}{\beta_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn(t)}{dt}$ 项,可得:

$$n(t) - \sum_{i=1}^m a_i e^{-\lambda_i t} \left[\int_0^t \lambda_i n(t') e^{\lambda_i t'} dt' + n(0) \right] = \frac{\rho(t)}{\beta_{\text{eff}}} n(t) + \frac{\epsilon \gamma_s Q}{\beta_{\text{eff}}} \quad (2)$$

令

$$R(t) = \sum_{i=1}^m a_i e^{-\lambda_i t} \left[\int_0^t \lambda_i n(t') e^{\lambda_i t'} dt' + n(0) \right] \quad (3)$$

式(3)的积分可用求和代替。设道宽为 ΔT ,道与道间 $n(t)$ 的变化按折线近似。计算式(3)中的积分,并用 $R_{i,j}$ 表示:

$$R_{i,j} = a_i e^{-\lambda_i t} \left[\sum_{j=1}^j \int_{(j-1)\Delta T}^{j\Delta T} \lambda_i n(t') e^{\lambda_i t'} dt' + n(0) \right] \quad (4)$$

$$\text{令 } E_i = e^{-\lambda_i \Delta T}, F_i = \lambda_i \Delta T, G_i = a_i \left(1 - \frac{1 - E_i}{F_i} \right), H_i = a_i \left(E_i - \frac{1 - E_i}{F_i} \right)。$$

由式(4)可得到递推关系式^[2]:

$$R_{i,j} = R_{i,j-1} E_i + G_i n_j - H_i n_{j-1} \quad (5)$$

其中: $R_{i,0} = a_i n_0$ 。

引入的反应性变化结束后, $\rho(t)$ 为常数,令

$$R_j = \sum_{i=1}^m R_{i,j}, X = n_j, Y = n_j - R_j, A = \frac{\epsilon \gamma_s Q}{\beta_{\text{eff}}},$$

$B = \frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}}$,则式(2)可写为:

$$Y = A + BX \quad (6)$$

用式(6)进行线性最小二乘拟合,可得到系数 A 和 B ,由 A 可得到有效中子源强 $Q' = \epsilon \gamma_s Q$, B 是以 β_{eff} 为单位的反应性。

由式(6)可得:

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{\text{eff}}} = 1 - \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^m R_{i,j} - \frac{1}{n(t)} A \quad (7)$$

用式(7)可逐点计算与每一时刻相对应的瞬时反应性,了解反应性瞬时变化情况,并在最小二乘拟合使用的数据范围内求解出反应性的平均值。

2 程序编写

用FORTRAN语言编写了计算程序。 λ_i 、 $\beta_{i,\text{eff}}$ 、 Λ 作为常数写入程序; β_{eff} 、 a_i 可在程序中计算;道宽 ΔT 为可变参数,由程序提示,从键盘上输入; t_s 为最小二乘法符合的开始时间,一般选择在反应性引入变化结束后的时刻, t_e 为符合的结束时间,选择在中子计数不再变化的时刻。在脉冲输入计数和指定道宽下测得的 n_j 还需对测量系统的死时间进行校正。最后根据需求,确定输出参数。

3 计算实例

利用编写的程序对俄罗斯动力研究院零功率装置BFS-1 Pu堆芯上逆动态法的测量数据

进行处理,得到反应性和中子源强,计算中心元件效率。

3.1 反应性和外中子源强的符合

试验时,首先调整反应堆的状态,引入 6~10 ρ 的反应性,待测量系统的计数达到一定水平后,引入待测量的负反应性,记录中子计数率随时间的变化。

挑选了无空间效应的测量数据进行一元线性回归处理。

图 1a 示出编号为 st110001 试验数据的中子计数率随时间变化的曲线。

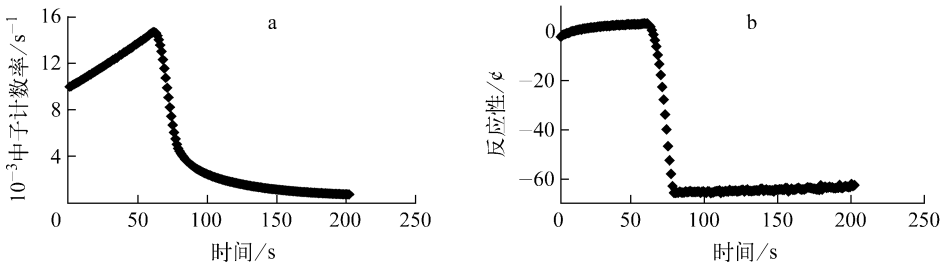


图 1 中子计数率(a)、反应性(b)随时间的变化

Fig. 1 Neutron count rate (a) and reactivity (b) vs. time

表 1 一元线性回归处理结果

Table 1 Calculation results of unitary linear regression analysis

有效源强		相对偏差/%	反应性/ ρ		相对偏差/%	在线平均反应性/ ρ		相对偏差/%
两参数符合	俄方计算结果		两参数符合	俄方计算结果		两参数符合	俄方计算结果	
289.15	275.76 ¹⁾	4.86	-65.77	-61.68 ¹⁾	6.63	-65.21	-62.57 ²⁾	4.22

注:1) 带空间效应修正的三参数符合

2) 普通逆动态方法

3.2 中心元件效率计算

利用一元线性回归计算出反应性还可得到中心元件效率。试验时,先引入一微小正反应性,当计数率合适时,将中心元件移出堆外,此时测得的反应性与初始反应性之差即为中心元件的效率。

分两种情况测量了中心元件效率:中心元件周围均匀分布 4 根聚乙烯条,聚乙烯条长度与元件的活性段相同(st10014 和 st110016 数据);中心元件周围不插入聚乙烯条(st10015 和 st110017 数据)。

中心元件测量的数据处理结果列于表 2。由表 2 可见,由一元线性回归法计算得到的中

表 1 列出编号为 st110001 数据一元线性回归处理的结果,并与俄方带空间效应修正的三参数符合的计算结果进行比较。用一元线性回归计算的有效源强对反应性进行逐点计算,逐点反应性的计算结果示于图 1b。计算结果表明:一元线性回归得到的反应性和有效源强与俄罗斯计算的结果基本一致,相对偏差在 7% 以内。利用计算出的有效源强可得到反应性随时间的变化曲线,从而得到任意时刻反应性的瞬时值。

心元件效率与俄罗斯的计算结果基本一致,相对偏差在 6% 以内。

3.3 外源的影响

使用式(7)计算 st110001 数据在不考虑外源影响时反应性随时间的变化,计算结果示于图 2。在引入负反应性前,考虑外源影响时,反应堆的正反应性为 2.99 ρ (10 点平均),未考虑外源影响时,反应堆的正反应性为 4.88 ρ (10 点平均),两者相差 1.89 ρ 。在负反应性引入完成时,考虑外源影响时,反应堆的负反应性为 65.51 ρ ,未考虑外源影响时,反应堆的负反应性为 59.68 ρ ,两者相差 5.83 ρ ;负反应性引入完成后,差值随时间增加越来越大,计算的反应

表 2 中心元件效率的计算结果
Table 2 Calculation results of central element efficiency

数据编号	有效源强		相对偏差/%	中心元件效率/ β		相对偏差/%	中心元件效率在线平均值/ β		相对偏差/%
	两参数符合	俄方计算结果 ¹⁾		两参数符合	俄方计算结果 ¹⁾		两参数符合	俄方计算结果 ²⁾	
st110014	274.81	267.76	2.64	36.05	37.07	-2.75	36.10	36.56	-1.26
st110016	277.99	265.87	0.39	31.12	31.27	-0.48	31.54	31.55	0.003
st110015	256.08	270.80	-5.44	36.35	38.10	-4.59	36.90	36.52	1.04
st110017	255.47	256.47	-0.004	36.03	37.42	-3.78	35.51	36.78	-3.45

注:1) 带空间效应修正的三参数符合
2) 普通逆动态方法

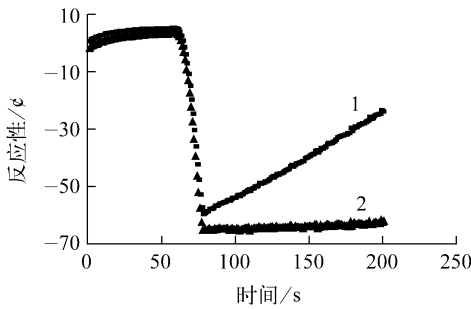


图 2 考虑和未考虑外源影响时反应性的变化
Fig. 2 Reactivity change considered and
unconsidered external neutron source with time
1——未考虑外源影响;2——考虑外源影响

性不能趋于稳定值。可见,在反应堆功率较低、外源较强的情况下,应考虑外源的影响。

4 结论

利用一元线性回归处理俄罗斯动力研究院

零功率装置 BFS-1 上的逆动态法实验数据的结果,即“两参数”符合,与俄罗斯利用“三参数”符合计算结果的比较表明,利用一元线性回归处理逆动态实验数据可正确得到反应性和有效源强。利用计算出的反应性可方便地得到中心元件的效率。通过计算还表明,在反应堆功率较低、外源较强的情况下,应考虑外源对反应性测量的影响

参考文献:

[1] 张法邦. 核反应堆运行物理[M]. 北京:原子能出版社,2002:222-225.
[2] МОГИЛЪНЕР А. Н. Применение малых ЗВМ для измерения реактивности [J]. Атомная Энергия, 1974, 36(5): 358-362.