

反应堆达临界稀释阶段外推改进方法

Improved Method for Extrapolation in the Critical Dilution Stage of the Reactor

徐洁皓 张智磊 江亚烈

Jiehao Xu Zhilei Zhang Yalie Jiang

福建宁德核电有限公司 中国·福建 宁德 352000

Fujian Ningde Nuclear Power Co., Ltd., Ningde, Fujian, 352000, China

摘要: 如今中国改进型三环路压水堆 (CPR1000) 在达临界时, 多采用倒数率线性外推的方法, 这种方法是基于点堆模型得出的线性外推临界法。但在实际工程中, 外中子源、稀释滞后效应、缓发中子以及堆芯的空间分布效应等都会对该方法的准确性造成影响。论文考虑在点堆模型的基础之上, 利用中子探测器对中子的响应模型优化, 推导新的理论公式, 探索一套针对稀释阶段的新倒推临界公式。

Abstract: Nowadays, when China's improved three-loop pressurized water reactor (CPR1000) reaches criticality, the method of linear extrapolation of the countdown rate is often used. This method is a linear extrapolation criticality method based on the point reactor model. However, in practical engineering, external neutron sources, dilution lag effects, delayed neutrons, and spatial distribution effects of the core will all affect the accuracy of the method. Based on the point reactor model, this paper considers the optimization of the response model of the neutron detector to neutrons, deduces a new theoretical formula, and explores a new set of backward critical formulas for the dilution stage.

关键词: 反应堆; 稀释; 临界; 线性外推

Keywords: reactor; dilution; criticality; linear extrapolation

DOI: 10.12346/peti.v4i1.6486

1 引言

核电厂在每次换料大修后需要进行达临界操作方能功率运行, 而此时堆芯的各项物理参数还没有得到验证, 故此反应堆大多采取逐步逼近临界的方式来寻找临界状态。当前对于 CPR1000 商用压水堆, 通常采用提棒—稀释—提棒的方式来使反应堆达临界。传统的倒数率线性外推方法由于没有考虑外中子源的影响, 在实际工程应用中预测结果不准确且不保守^[1]。论文在传统的方法之上考虑外中子源的影响并介绍一种新的方法, 来改善传统方式的不足。

2 传统临界外推方法及分析

2.1 原理简介

目前预测反应堆临界状态最常用的方法是倒数率线性外推临界法^[2], 该方法基于点堆模型得出:

$$N = \frac{S}{1 - k_{eff}}$$

式中, n ——对内中子通量密度;

S ——中子源强;

k_{eff} ——反应堆有效增殖系数。

由上式可得:

$$\frac{S}{N} = 1 - k_{eff}$$

2.2 外中子源对倒数率外推准确性的影响

对于一个有外中子源的次临界反应堆, 堆内的中子包含裂变产生的中子和新一代还未与可裂变材料发生反应的源中子:

【作者简介】徐洁皓 (1989-), 男, 中国山东烟台人, 本科, 工程师, 从事核燃料管理研究。

$$N_t = N + N_s = \frac{S}{1 - k_{eff}} + S$$

令 $1 - k_{eff} = -\rho$ 则探测器探测到的中子数^[3]:

$$N_d = \lambda_1 \frac{S}{-\rho} + \lambda_2 S \quad (1)$$

式中, λ_1 ——探测器探测对裂变产生的中子的敏感度系数;

λ_2 ——探测器对源中子的敏感度系数。

$$\frac{S}{N_d} = \frac{-\rho}{\lambda_1 - \lambda_2 \rho} \quad (2)$$

易知, $f(-\rho) = \frac{-\rho}{\lambda_1 - \lambda_2 \rho}$ 在 $-\rho > 0$ 范围内为凸函数。图 1 为某压水堆的实际数据。

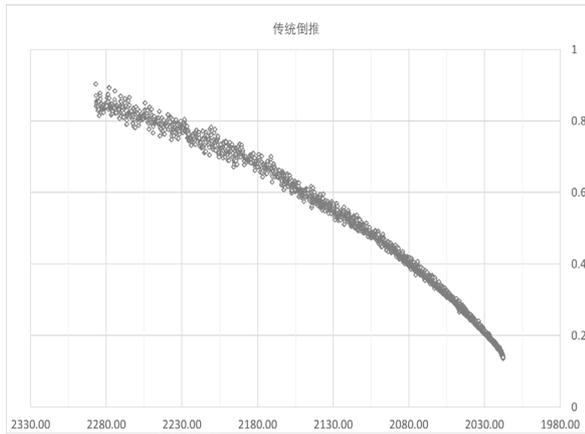


图 1 某压水堆实际达临界倒计数率图形

当反应堆次临界度比较深时, 探测器探测到的中子主要是中子源发出的中子, 裂变中子的占比较少, 此时反应堆引入正反应性时, 探测器计数率增长缓慢, 倒计数率下降缓慢; 当反应堆次临界度逐渐降低, 裂变中子在堆芯内的占比逐渐增加, 此时倒计数率曲线斜率逐渐增大, 这个情况导致倒计数率曲线在实际中呈现一个外凸的形状。

在稀释达临界的过程中, 外凸的曲线会使外推计算得出的临界硼浓度偏小, 这对于反应堆来说是不保守的。

3 新倒推方法

在反应堆稀释达临界阶段, 硼浓度外推曲线的线性度直接影响外推结果的准确性。综上所述, 外推曲线的线性度受到了外中子源的影响呈现外凸的形状。按照理论推导公式, 若扣除外中子源的影响部分之后再计算倒计数率可以有效降低线性度对外推计算结果的影响, 但对于新换料的反应堆, 无法通过测量手段得到中子源强的大小。因此论文考虑采用的方法如下述。

对于 (1) 式:

$$N_d = \lambda_1 \frac{S}{-\rho} + \lambda_2 S$$

在临界前任意时刻, 我们可以通过源量程中子探测器得

到一个初始计数率 $Nd1$, 于是有:

$$N_{d1} = \lambda_1 \frac{S}{-\rho_1} + \lambda_2 S \quad (3)$$

在整个稀释过程中的任意时刻, 可通过源量程中子探测器测量得到 $Nd2$, 有:

$$N_{d2} = \lambda_1 \frac{S}{-\rho_2} + \lambda_2 S \quad (4)$$

令

$$N_{d2} - N_{d1} = \Delta N$$

$$\rho_2 - \rho_1 = \Delta \rho$$

代入并化简, 得:

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta N} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\lambda_1 S} \quad (5)$$

易知, 当 ρ_2 趋近于 0 时, 反应堆临界, 此时 ΔN 趋近于无限大。

由 (5) 式易知, 当 $|\rho_2|$ 趋近于 0 时, 反应堆临界, 此时 ΔN 趋近于无限大。(5) 式中 $|\rho_1|$ 为反应堆初始状态的次临界度, 是一个定值, 易知:

$$|\Delta \rho| = \alpha_{CB}(C_{B1} - C_{B2})$$

$$|\rho_n| = \alpha_{CB}(C_{BC} - C_{Bn})$$

其中 C_{B1} 为反应堆初始状态的硼浓度, 因此 (5) 式可化为:

$$\frac{C_{B1} - C_{B2}}{\Delta N} = \frac{\alpha_{CB} C_{B2}(C_{B1} - C_{BC}) + \alpha_{CB}(C_{BC}^2 - C_{BC} C_{B1})}{\epsilon \eta m_1 S l} \quad (6)$$

令 $\frac{\alpha_{CB}(C_{B1} - C_{BC})}{\epsilon \eta m_1 S l} = A$, $\frac{\alpha_{CB}(C_{BC}^2 - C_{BC} C_{B1})}{\epsilon \eta m_1 S l} = B$, 则有:

$$\frac{C_{B1} - C_{B2}}{\Delta N} = A C_{B2} + B \quad (7)$$

等式 (7) 即为论文所述新倒推方法的理论公式。

4 历史数据验证

为了验证新倒推方法, 论文对某电厂 7 个循环达临界稀释阶段的数据进行处理。

4.1 倒推图线性度验证

图 2 为某堆芯某循环新传统倒推方法的图形对比。

从整体数据图形上看出, 新倒推方法可在一定程度上减轻传统倒推方法线性度较差的问题。由于新方法在绘图中 y 轴确定为 $\frac{C_{B1} - C_{B2}}{\Delta N}$, 所以在稀释开始前期, ΔN 的值与 N 本身波动幅值相近, 导致数据点比较发散。随着稀释的进行 ΔN 不断增大, 数据点聚拢。

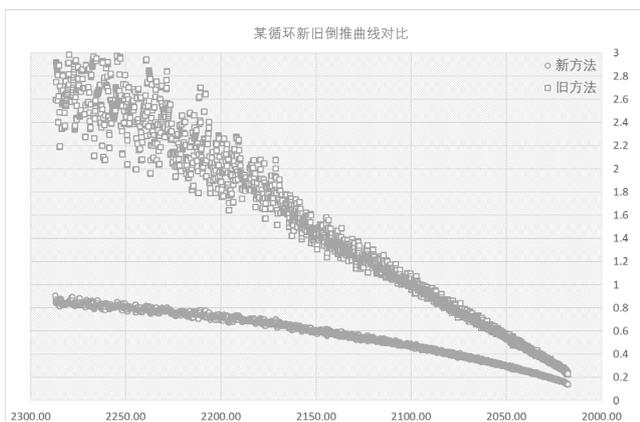


图2 某循环采用新方法与传统倒推数率外推的对比

4.2 实际达临界应用可行性分析

4.2.1 达临界情景模拟计算

为了分析新倒推方法在实际倒推中运用的效果，结合现场情况，根据以历史数据为基础，结合现场达临界实际随着稀释进程推进，不断获得新数据的情况，假想两种倒推情景：

- ①采用新方法对已经获得的全部数据作线性外推计算；
- ②采用旧方法对已经获得的1000s数据作线性外推计算。

通过计算处理，以时间为x轴，不同时间点倒推计算得到的临界硼浓度为y轴作出以下对比图3。

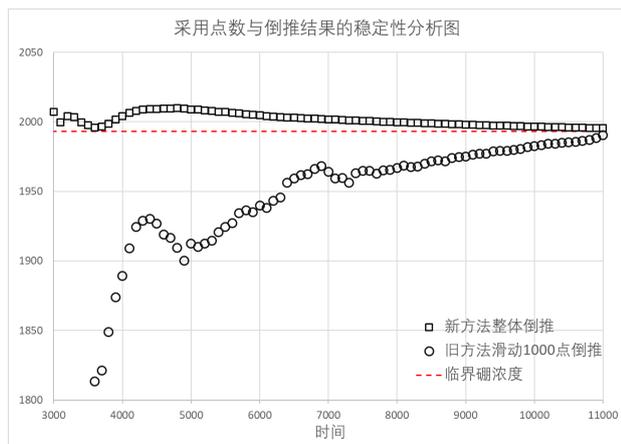


图3 某机组某循环倒推稳定性对比

传统倒推方法能在接近临界时倒推计算出临界硼浓度，但距离临界越远，倒推计算的结果偏差也越大。而采用新倒推方法，在停止稀释前4000s内（对应图中时间点7000s）就可以得到较为准确的结果，其偏差能控制在10ppm以内。

4.3.2 不同倒推计算准确度分析

通过历史数据，取停稀释前1000s的数据，分别计算倒推临界硼浓度，最终通过修正与实际临界硼浓度对比，对比结果如表1所示。

从表中可以看出，同样是取停稀释前1000s的数据作倒推计算时，新旧方法计算值与实际值的偏差绝对值相差不大，新方法在最终的倒推计算结果的准确度方面不具备绝对的优势。

表1 停稀释前1000s新传统倒推方法结果对比表

循环	新方法	旧方法	实际临界硼浓度	新方法偏差绝对值	旧方法偏差绝对值
1	2022.2	2016.1	2015	7.2	1.1
2	2152.9	2147.0	2160	7.1	13
3	2061.1	2044.4	2065	3.9	20.6
4	2032.3	2026.8	2019	13.3	7.8
5	2099.1	2094.2	2097	2.1	2.8
6	2079.1	2073.6	2072	7.1	1.6
7	2068.4	2059.3	2065	3.4	5.7
平均	—	—	—	6.3	7.5

4.2.3 数据点密度对倒推结果的影响分析

以上验证工作均在每秒1个数据点的基础上进行。在现场工作中，数据采集方式可能会对相关工程师获取数据的密度造成一定制约。考虑到新倒推方法在理论公式的推导过程中引入了部分误差，数据点的密度可能会对计算结果造成影响，因此本节在原方法的基础上，减少稀释数据点的密度后再进行数据处理。以每秒1个、每1分钟1个、每5分钟1个和每10分钟1个数据点作图并用线性回归方法处理，结果如图4所示。

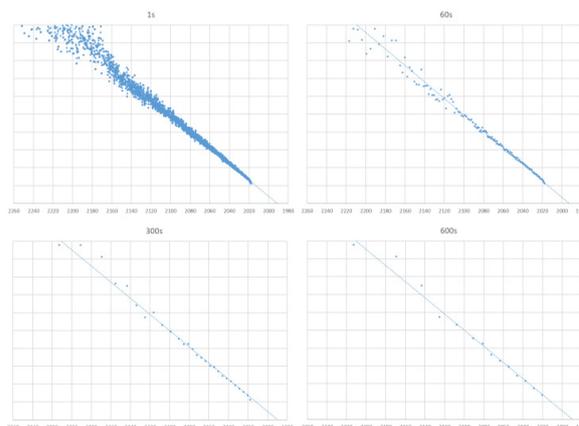


图4 不同数据点密度倒推结果比较

从图中可以看出，不同数据密度下倒推计算结果的偏差较小，在5ppm以内。

5 结语

综合上述，新倒推方法相对于传统方法，整体硼浓度外推曲线线性度得到较大提高，按照现行的稀释速率条件下可以提前1小时左右由曲线得出较为准确的临界硼浓度；同时，新方法现场适用性良好。

参考文献

- [1] 周磊,周忠政,许进,等.压水堆机组稀释临界外推曲线弯曲分析[J].科技视界,2018(8):2.
- [2] 李国仁.反应堆达临界外推方法研究与优化[J].大亚湾核电生产论坛,2020(1):1-4.
- [3] 郭海兵,李润东,牛伟力.临界外推中对控制棒价值非线性的修正[J].原子能科学技术,2013(1):4.