

一种快速搜索临界棒位方法的开发与评价

李治刚¹, 安萍¹, 严明宇^{1,2}, 刘东^{1,3,*}, 芦韡¹, 余红星^{1,2}

(1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041; 2. 中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 中核集团核能软件与数字化反应堆工程技术研究中心, 四川 成都 610041)

摘要: 搜索堆芯临界棒位是反应堆堆芯物理设计的重要内容, 传统的线性插值方法在搜索临界棒位时需要多次迭代, 效率低、花费时间长。本文提出了一种基于控制棒价值函数的临界棒位快速搜索方法, 得到了控制棒组价值与棒位的函数关系, 并应用于三维堆芯中子学程序 PBRT。通过与线性插值法对比发现, 控制棒价值函数法搜索的临界棒位满足临界搜索收敛准则, 搜索效率明显提高, 是一种合理可行的快速调棒搜索临界方法。

关键词: 控制棒价值; 临界搜索; 调棒; 高效

中图分类号: TL32

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2019)11-2218-05

doi: 10. 7538/yzk. 2018. youxian. 0802

Development and Evaluation of a Rapid Critical Rod Position Search Method

LI Zhigang¹, AN Ping¹, YAN Mingyu^{1,2}, LIU Dong^{1,3,*}, LU Wei¹, YU Hongxing^{1,2}

(1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China;

2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory,

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China; 3. CNNC Engineering Research Center of Nuclear Energy Software and Digital Reactor, Chengdu 610041, China)

Abstract: The critical rod position search of the core is an important part of the nuclear reactor core physical design. The traditional linear interpolation method needs much iteration when searching the critical rod position, which is inefficient and takes long time. A rapid critical rod position search method based on control rod value function was proposed in the paper. The function relationship between the control rod value and the rod position was obtained and applied to the 3D core physical code PBRT. Compared with the linear interpolation method, it is found that the critical rod position of the control rod value function method meets the critical search convergence criteria, and the search efficiency is improved obviously. It is a reasonable and feasible fast search critical method.

Key words: control rod value; critical search; turn rod; high efficiency

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2019-01-28

作者简介: 李治刚(1989—), 男, 四川南充人, 工程师, 硕士, 从事反应堆系统堆芯软件研究

* 通信作者: 刘东, E-mail: liudong73@yahoo.com

网络出版时间: 2019-04-17; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190416.1432.006.html>

目前,堆芯物理设计与计算通常采用两步法^[1],组件计算程序生成组件库,堆芯程序基于组件库进行全堆芯计算。反应性控制^[2-3]是堆芯核设计的重要内容,硼溶液、控制棒等是控制堆芯反应性的重要手段。以钠冷快堆^[4-5]为代表的金属冷却反应堆主要采用控制棒实现堆芯反应性控制,计算临界棒位是金属冷却快堆物理设计中的必要内容。

在非确定论程序中,传统的临界搜索方法需通过多次临界计算,具有计算量大、临界结果不准确等缺点,一些研究机构提出了基于微扰计算的蒙特卡罗临界搜索方法^[6-7]以克服上述缺点。而在确定论程序中,目前常采用线性插值或线性外推^[8]的方法获得堆芯临界棒位,由于控制棒的价值与控制棒插入堆芯深度并不呈简单的线性关系^[9],通过线性插值方法往往需多次迭代计算控制棒棒位才能使堆芯达到临界,计算效率较低。特别针对金属冷却快堆换料周期较长的特点,要完成整个寿期的调棒临界计算需 3~5 d,不利于堆芯设计方案的设计和优化。

为克服调棒临界线性插值方法迭代次数多的缺点,提高临界搜索效率,本文提出一种基于控制棒价值函数的临界棒位快速搜索方法,并将该方法在堆芯三维中子学物理程序 PBRT^[10]中予以开发。对控制棒价值函数法涉及的理论及计算流程进行描述,并基于一种典型的金属冷却快堆堆芯布置对其进行测试,以验证该方法的可行性和准确性。

1 理论模型

采用控制棒搜索临界的一般计算流程如图 1 所示,线性插值法和控制棒价值函数法在临界棒位搜索环节有所差异。前者采用线性插值获得新的临界棒位,而后者通过内置预先得到的控制棒棒位与有效增殖因数 k_{eff} 的函数关系,直接计算得到新的临界棒位。

1.1 线性插值法

假设堆芯有 N 组控制棒,控制棒组编号为 $1\sim N$,控制棒组初始棒位 H_0 (本文棒位均指距堆芯底部的高度),第 i 次迭代计算时的控制棒组棒位为 H_i ,堆芯临界有效增殖因数为 $k_{\text{eff,critical}}$,堆芯临界收敛准则 ϵ ,不考虑控制棒组叠步运动。则第 i 次迭代后采用线性插值计算

得到的新棒位 H_{i+1} ^[11] 为:

$$H_{i+1} = H_0 + \frac{k_{\text{eff,critical}} - k_{\text{eff},H_0}}{k_{\text{eff},H_i} - k_{\text{eff},H_0}}(H_i - H_0) \quad (1)$$

式中: k_{eff,H_0} 和 k_{eff,H_i} 分别为控制棒组位于初始棒位 H_0 和 H_i 时的堆芯有效增殖因数。

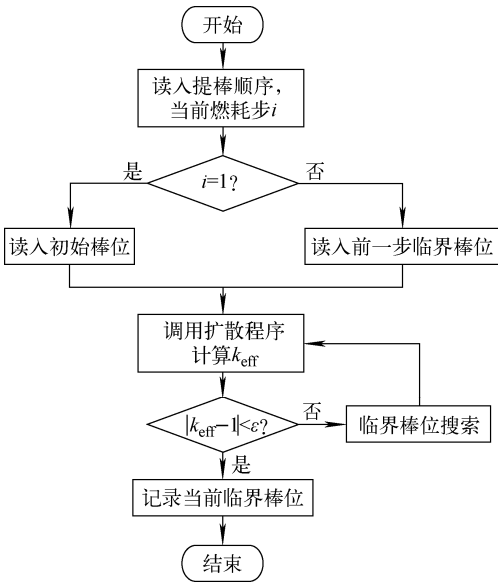


图 1 控制棒搜索临界计算流程
Fig. 1 Control rod critical computing flow

1.2 控制棒价值函数法

由于控制棒价值^[12]与控制棒插入深度不呈线性关系,采用线性插值往往需多次迭代才能搜索到堆芯临界的控制棒棒位。若能较为准确地得到控制棒价值与控制棒组棒位的函数关系,则可直接计算得到满足临界收敛准则的控制棒棒位。控制棒价值函数法的计算流程如图 2 所示。

为便于说明,定义棒组提出微分价值 Δk 和提出积分价值 $\int \Delta k$, Δk 表示控制棒提出单

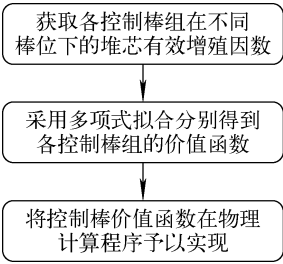


图 2 控制棒价值函数法计算流程
Fig. 2 Calculation flow of control rod value function method

位距离引起的 k_{eff} 变化(式(2))。 $\int \Delta k$ 表示控制棒组提出到棒位 $z(i)$ 时与该组棒全插时的 k_{eff} 变化(式(3))。后文中微分价值及积分价值均指控制棒组提出微分价值和提出积分价值。

$$\Delta k_i = k_{\text{eff}, z(i)} - k_{\text{eff}, z(i-1)} \tag{2}$$

$$\int \Delta k_i = k_{\text{eff}, z(i)} - k_{\text{eff}, \text{bottom}} \tag{3}$$

式中: $k_{\text{eff}, z(i)}$ 和 $k_{\text{eff}, z(i-1)}$ 分别为控制棒组位于 $z(i)$ 和 $z(i-1)$ 处堆芯的有效增殖因数; $k_{\text{eff}, \text{bottom}}$ 为控制棒组位于堆芯底部时堆芯的有效增殖因数。

假设第 i 组控制棒积分价值与控制棒组棒位的关系为 $y(i) = f(z(i))$, 第 i 组控制棒移动 $\Delta z(i)$ 时的 k_{eff} 为:

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{eff}, z(i)} + f_i(z(i) + \Delta z(i)) - f_i(z(i)) \tag{4}$$

考虑 N 组控制棒移动时的 k_{eff} 为:

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{eff}, (z(1), z(2), \dots, z(N))} + \sum_1^N f_i(z(i) + \Delta z(i)) - f_i(z(i)) \tag{5}$$

根据调棒顺序, 逐步提出控制棒组, 直到堆芯 k_{eff} 满足临界收敛准则, 并记录此时各控制棒组的棒位 $z(i) (i=1, \dots, N)$, 即为临界棒位。

采用最小二乘法曲线拟合^[13]或切比雪夫(Chebyshev)^[14-15]曲线拟合多项式拟合的方法获取控制棒组积分价值与控制棒组棒位的函数关系 $f_i(z(i))$ 。

2 测试与验证

将控制棒价值函数法应用到堆芯三维中子学程序 PBRT 的调棒临界搜索模块中, 并以金

属冷却快堆典型六边形堆芯布置来验证该方法在实现快速搜索临界棒位的可行性。在堆芯中布置有 3 种不同价值的控制棒组, 编号为 1、2、3。假设共计算 10 个燃耗步, 每个燃耗步步长为 100 满功率天。

1) 控制棒组价值

采用 PBRT 计算得到寿期初、寿期末 3 组控制棒分别单独提出堆芯的 k_{eff} 。图 3 示出了 3 组控制棒微分价值和积分价值随控制棒组棒位的变化。从图 3 可看出控制棒组提出微分价值随控制棒组的提出呈抛物线趋势变化, 在接近堆芯活性区中部位置时, 引入的 k_{eff} 变化幅度达到最大; 控制棒组提出积分价值随控制棒组的提出呈近似 S 形曲线变化。提出微分价值和提出积分价值在寿期初至寿期末的变化幅度较小, 因此在控制棒价值函数方法实现过程中, 可假定控制棒价值在整个寿期(寿期较短)保持不变。

采用最小二乘法多项式拟合方法和切比雪夫最佳拟合方法获得各组控制棒提出积分价值与控制棒组棒位的函数关系。图 4 示出了两种拟合方法对 1 号棒组的拟合结果, 其他棒组的拟合规律与之基本类似。从图 4 可看出, 拟合阶数越低, 拟合函数与真实结果偏差越大; 5 阶时, 最小二乘法拟合结果优于切比雪夫法; 10 阶时, 两种拟合方法与真实结果完全重合为 S 形曲线。

2) 临界棒位搜索

将最小二乘法拟合的控制棒价值函数应用到堆芯物理设计程序的调棒临界搜索模块中, 临界搜索收敛准则为 $\epsilon = 0.001$ 。图 5 示出了控制棒价值函数法与线性插值法在第 2 个燃耗步时搜索临界过程中 k_{eff} 的变化。控制棒价值

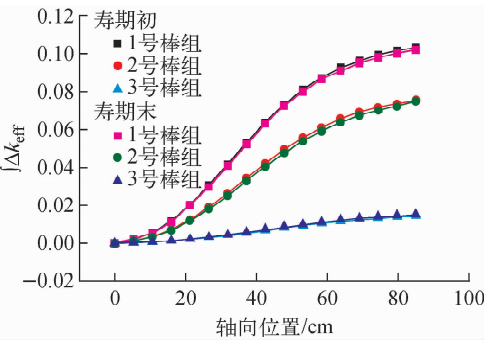
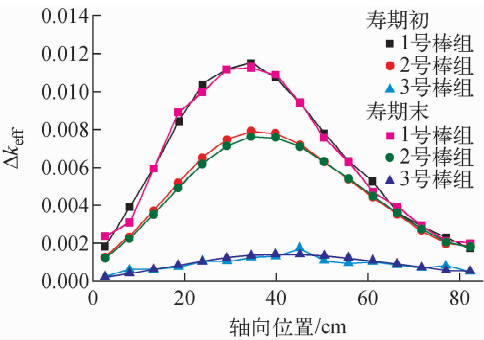


图 3 3 组控制棒微分价值和积分价值随棒位的变化

Fig. 3 Differential value and integral value of three sets of control rods vs. rod position

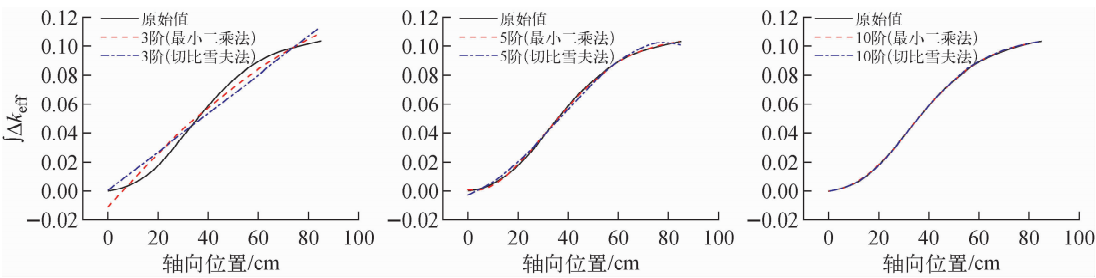


图 4 1 号棒组提出积分价值函数与拟合阶数的关系
Fig. 4 Raising integral value function of No. 1 rod vs. fitting order

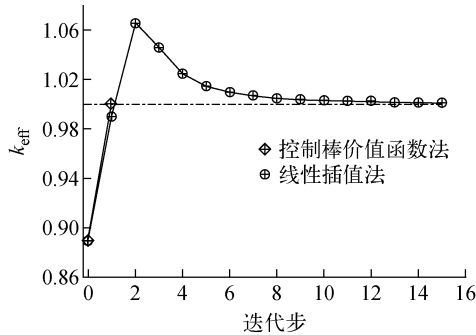


图 5 第 2 个燃耗步调棒临界搜索过程 k_{eff} 变化
Fig. 5 k_{eff} change during process of searching critical rod position in the second burnup step

函数法仅进行了 1 次迭代计算便搜索到了临界棒位；而线性插值法需要 15 次迭代插值计算才满足临界收敛准则。

图 6 示出了两种方法计算的第 2~10 个燃耗步的临界棒位和对应的 k_{eff} 。图 5 中显示的为 2 号棒组的棒位，在第 2 至 10 个燃耗步过程中，1 号棒组已完全提出堆芯，3 号棒组仍全部插入。从图 6 可看出，两种方法计算得到的临界棒位的数值及趋势基本一致，除第 3 个燃耗步时两种方法的计算偏差超过 4%，其他各点偏差均在 2% 范围内。采用线性插值法和控制棒价值函数法计算得到的 k_{eff} 均在临界搜索收敛准则范围内。

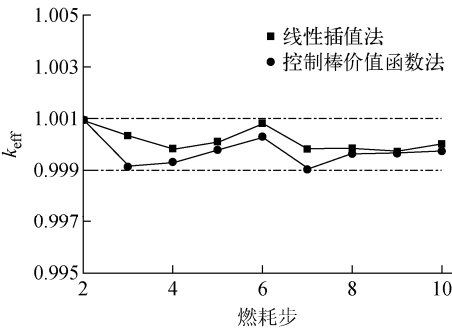
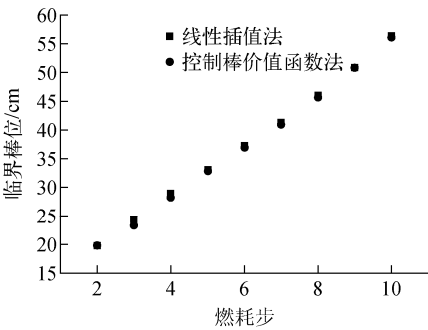


图 6 临界棒位和 k_{eff} 随燃耗步的变化
Fig. 6 Critical rod position and k_{eff} vs. burnup step

3) 计算效率

图 7 示出了单个燃耗步的计算时间以及燃耗步的累计计算时间。采用线性插值法的第 1 次调棒临界搜索计算时间较长，后续燃耗步的计算时间基本维持在约 1 h。而采用控制棒价值函数法后续燃耗步的计算时间基本维持在约 0.5 h。从图 7 可看出，完成 10 个燃耗步计算，采用控制棒价值函数法的累计计算时间较采用线性插值法的缩短了 1 倍，计算效率明显提高。

3 结论

由于采用线性插值法进行调棒搜索临界需要多次迭代计算、效率低，本文提出了一种基于控制棒价值函数的快速调棒搜索临界方法，对该方法的理论及计算流程进行了阐述，并在堆芯物理设计程序中进行了应用和初步验证，得出如下结论。

1) 与线性插值法相比，采用控制棒价值函数法仅进行 1 次迭代计算即可搜索到临界棒位，

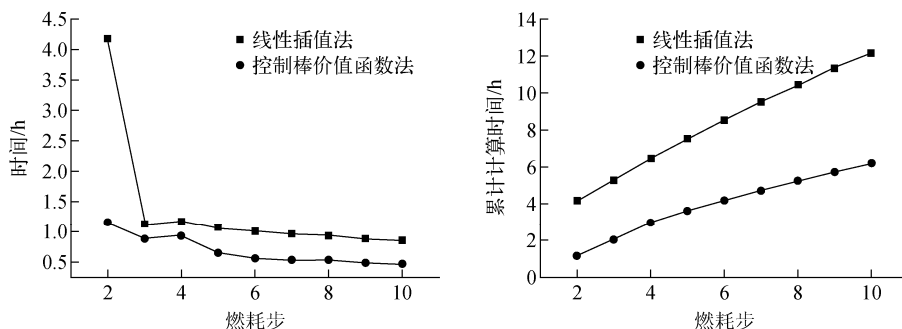


图7 单个燃耗步的计算时间以及燃耗步的累计计算时间

Fig. 7 Computation time of single burnup step and cumulative computation time of all burnup steps

满足临界搜索收敛准则,搜索效率明显提高。

2) 采用控制棒价值函数法,燃耗计算时间缩短了约1倍,有助于提高堆芯物理设计的效率。

3) 通过增加计算控制棒价值的数据点和提高多项式拟合的阶数,可提高控制棒价值函数法的准确度。

本文提出的控制棒价值函数法为堆芯物理设计和优化降低了计算时间,是一种合理可行的快速搜索临界棒位方法,有效克服了传统线性插值方法中的不足。

参考文献:

- [1] 阎昌琪,曹欣荣. 核反应堆工程[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2004.
- [2] 谢仲生,吴宏春,张少泓. 核反应堆物理分析(修订本)[M]. 西安:西安交通大学出版社,原子能出版社,2011.
- [3] 谢仲生,张育曼,张建民,等. 核反应堆物理数值计算[M]. 北京:原子能出版社,1997.
- [4] 成松柏,王丽,张婷. 第四代核能系统与钠冷快堆概论[M]. 北京:国防工业出版社,2017.
- [5] 许铄,张东辉,任丽霞. 快堆安全分析[M]. 北京:中国原子能出版传媒有限公司,2011.
- [6] 李泽光,王侃,邓景康,等. 基于微扰计算的蒙特卡罗临界搜索方法研究[J]. 核动力工程,2014, 35(3):117-120.
LI Zeguang, WANG Kan, DENG Jingkan, et al. Research on perturbation based Monte Carlo criticality search method[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(3): 117-120(in Chinese).
- [7] LI Zeguang, WANG Kan, DENG Jingkan. Perturbation based Monte Carlo criticality search in density enrichment and concentration[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 76: 350-356.
- [8] 代前进,詹勇杰,叶国栋,等. 压水反应堆达临界的外推修正[J]. 核动力工程,2010,31(6):93-95.
DAI Qianjin, ZHAN Yongjie, YE Guodong, et al. Extrapolation modification of physical start-up of reactors[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(6): 93-95(in Chinese).
- [9] 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,2014, 47(1):101-104.
GUO Haibing, LI Rundong, NIU Weili. Non-linearity correction of control rods worth for critical extrapolation during start-up[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 47(1): 101-104(in Chinese).
- [10] YAN Mingyu. Study on small long life CANDLES fast reactor[D]. Tokyo: Research Laboratory for Nuclear Reactor, Tokyo Institute of Technology, 2007.
- [11] JOHN R L, ANTHONY J B. Introduction to nuclear engineering[M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [12] 谢明亮,于雷,陈玉清. AP1000 核反应堆控制棒价值特性的 MC 模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2016,37(3):121-125.
XIE Mingliang, YU Lei, CHEN Yuqing. Analysis of control rod worth features of MC simulation in AP1000 reactor[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(3): 121-125 (in Chinese).
- [13] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2014.
- [14] 胡兵,李清朗. 现代科学与工程计算基础[M]. 成都:四川大学出版社,2003.
- [15] 李庆扬. 数值分析[M]. 5版. 北京:清华大学出版社,2008.