

处理轴向三维非均匀效应的单组件均匀化模型

吕 栋, 俞陆林, 韩 宇, 王德忠

上海交通大学核科学与工程学院, 上海, 200240

摘要: 传统以两维单组件模型为基础的均匀化理论及后续的改进均匀化理论产生的粗网均匀化参数无法直接体现轻水堆(LWR)堆芯轴向所存在的非均匀性。本文提出了以单组件逐棒模型为基础的三维均匀化方法, 为堆芯计算提供粗网均匀化参数, 在维持堆芯粗网计算模型的前提下实现对三维效应的处理。基准数值实验表明, 本文提出的方法具有较好的精度表现, 适用于堆芯轴向三维非均匀性的处理。

关键词: 三维均匀化方法; 单组件逐棒模型; 轴向不连续因子

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

Single Assembly Pin-by-Pin Homogenization Model for Handling Axial 3D Heterogeneity Effect

Lyu Dong, Yu Lulin, Han Yu, Wang Dezhong

School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China

Abstract: Traditional and advanced homogenization model based on single assembly and color-set/full core transport solution can not represent the axial heterogeneity of Light Water Reactor (LWR). The paper proposed a new 3D homogenization model based on the single assembly pin-by-pin solution to provide the coarse mesh parameters for 3D nodal calculation. Numerical result from BWR mini-core benchmark shows that the 3D effect on core axial power distribution can be reproduced accurately.

Key words: 3D homogenization method, Single assembly pin-by-pin model, Axial discontinuity factor

0 概 述

目前工程应用的堆芯物理分析程序均采用三维粗网模型完成堆芯计算。如何为堆芯模型提供合理的粗网均匀化参数一直是业内研究和开发工作的重点。堆芯非均匀性的加强使得传统的单组件均匀化模型受到挑战; 而非均匀性同时来自于径向和轴向。

本文研究在堆芯粗网框架下通过对均匀化模型的改进实现对轴向三维非均匀效应的有效处理, 提出通过三维单组件逐棒计算模型产生粗网参数的均匀化模型, 并通过基准题的数值检验证明了该模型的有效性。

1 轴向三维非均匀效应研究的必要性

目前改进均匀化模型的研究主要集中于堆芯径向非均匀性的处理, 先后提出了 color-set^[1]和二

维全堆^[2]均匀化模型。然而, 实际堆芯设计中非均匀效应并不仅仅来自于径向堆芯, 显著的非均匀性在轴向同样存在。比如, 燃料组件的轴向分段设计, 先进压水堆(PWR)中控制棒长期插棒运行^[3]以及沸水堆(BWR)中冷却剂沿轴密度的剧烈变化^[4]等都会在轴向引入明显的非均匀性。显然, 只有在粗网均匀化参数中合理考虑上述轴向非均匀性才能够使得堆芯计算获得可靠的精度, 即需要引入合适的三维均匀化模型。

目前非均匀输运计算主要基于两维模型, 直接构造三维非均匀输运模型并不现实。文献[5]的研究经验表明: 栅元多群(7~9群)均匀化参数具有比粗网少群均匀化参数更好的普适性; 因此, 可以将其作为三维均匀化模型的起点, 构造能够反应实际三维效应的数值模型, 并获得相应的粗网均匀化参数用于堆芯计算。

2 三维均匀化模型—理论模型

2.1 三维均匀化模型的构造

用于构造三维均匀化模型的栅元均匀化参数可以由前述二维全堆运输模型产生，无需额外计算。考虑到问题的计算规模，本文提出采用带反照率边界条件的单组件逐棒模型作为三维均匀化的基础，而用作栅元径向边界条件的反照率可从全堆运输计算结果中直接处理获得。反照率边界条件的引入，使得单组件模型能够更真实地体现径向、轴向非均匀性同时存在对均匀化参数的影响。以 BWR 计算中常用的径向取 1 个组件 1 个节块的模型为例，上述的单组件均匀化模型见图 1。

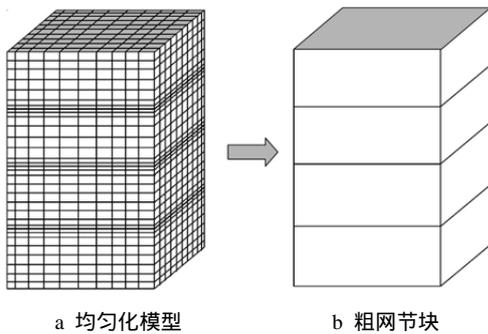


图 1 单组件三维均匀化模型

Fig. 1 Single Assembly 3D Homogenization Model

图 1a 为三维逐棒均匀化模型，图 1b 为实际堆芯计算时沿轴向的粗网节块。需要指出的是，由于三维效应主要来源于轴向分段非均匀性，在相邻轴向粗网之间可能存在着复杂的能谱干涉；因此，从图 1a 可看出，三维均匀化模型沿轴向也需要采取相对较细的网格剖分（2~5 cm），而在不同材料层的交界面附近还需要加细剖分（1 cm）。

如此，在实际应用时相当于将全堆规模的问题分解为一系列的单组件问题，而单组件问题的计算规模是完全可以接受的；同时，对这一系列单组件问题而言，求解获得均匀化参数的过程彼此间相互独立，并不存在耦合迭代，因而所有计算任务可以并发进行，在一般规模的计算机集群上完成全堆所有三维均匀化数值模型的计算所需时间也是工程应用完全可以接受的。

2.2 粗网均匀化参数的产生及应用

在图 1 所示的三维均匀化模型完成计算后，除了可以通过体积通量均匀化的方法得到各粗网节块的宏观截面，还可以对各节块在轴向构造一维边值问题^[1]进而获得节块 2 个轴向端面的不连

续因子(A_{xDF})及沿轴向细网的形状因子(FF)。根据不同三维效应的中子学特性可知，除了轴向接近控制棒插入端面的区域，不同材料层之间的能谱干涉主要发生在偏热能群，而热群通量自由程长较短，据此可以考虑只将上述的 A_{xDF} 用于最终的三维粗网堆芯计算，而宏观截面仍旧从二维全堆运输模型中获得；而对于临近控制棒端面的轴向区域，由于强烈中子吸收体的存在，其必然会对节块宏观截面构成更为重要的影响，因而在该区域需要将宏观截面替换为来自三维均匀化模型的宏观截面参数。

堆芯计算能够得到节块在轴向的横向积分通量分布，但该分布无法直接体现上述的局部能谱干涉效应；因此，在完成堆芯计算后，需要进一步将 FF 作用至各节块轴向横向积分通量分布上以获得最终的轴向细网功率分布。

3 三维均匀化模型—数值结果

3.1 BWR 小堆基准题介绍

为验证三维均匀化模型，构造了 BWR 小堆基准题，图 2 所示为 1/4 堆芯。该小堆轴向高度为 369 cm，其径向布置了 1 个组件宽度的水反射层，轴向顶底两端均布置了厚度为 30 cm 的水反射层；图中所有燃料组件采用相同的径向和轴向设计，其中旧燃料为经过一个循环燃耗的燃料组件；2 组十字形控制棒沿宽水隙从底部插入堆芯至不同的轴向高度，其中中心位置控制棒插入深度为 274 cm，另一束插入深度为 88 cm。可见，该基准题在径向和轴向均具有较强的非均匀性，对于研究三维效应具有较好的针对性。

首先，采用二维非均匀运输程序^[2]计算基准题轴向各材料层的二维全堆非均匀模型，分别得

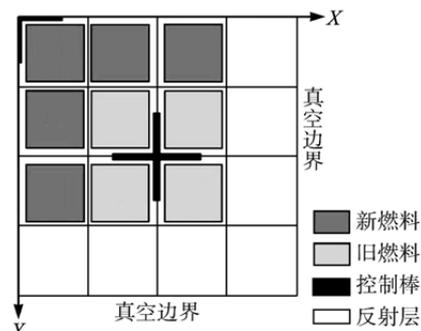


图 2 BWR 小堆基准题堆芯布置

Fig. 2 Radial Configuration of BWR Mini-Core Benchmark

到组件和栅元均匀化参数及各组件边界栅元的径向反照率；以栅元均匀化参数及反照率为基础构造各三维均匀化数值模型，并根据前述理论模型最终完成三维堆芯计算。另外，以上述栅元均匀化参数为基础，也可以直接构造全堆逐棒计算模型，进而获得用于检验单组件均匀化模型的小堆基准题参考解。

3.2 三维均匀化模型在基准问题上的应用效果

图 3 给出了 AxDF 及 FF 应用于堆芯计算后轴向功率分布（归一化）相对于参考解的绝对误差，图 3 中标识 2D 表示完全不考虑三维效应的数值结果。可见，若完全不考虑轴向非均匀性带来的三维效应，该基准题的轴向功率分布最大偏差接近 8% 的水平，这显然是不可接受的；同时在不同材料层的交界面区域，出现了明显的偏差跳跃的现象；而应用了 AxDF 及 FF 的数值结果使整个轴向区域误差水平都得到了较好的控制，最大偏差不超过 2%。这说明主要的轴向三维效应可以通过 AxDF 及 FF 得到体现，而多数粗网节块的宏观截面受三维效应的影响相对较小。

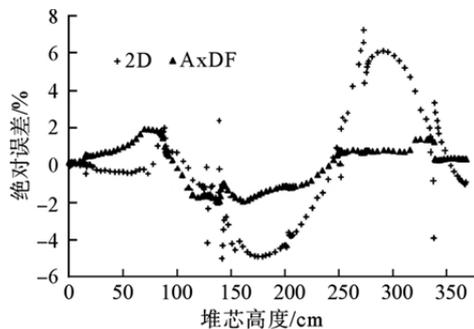


图 3 AxDF 及 FF 对于轴向功率绝对偏差分布的改善

Fig. 3 Improvement of Absolute Error Distribution of Normalized Axial Power with AxDF and FF Implementation

图 4 则为在应用了 AxDF 及 FF 基础上，进一步将堆芯中轴向靠近两束控制棒端面的粗网节块宏观截面也替换为三维均匀化模型产生的宏观截面后轴向功率分布的绝对偏差（即图中 3DXS 所示）。图 4 中 2 条灰色条带分别标识了两束控制棒插入堆芯的具体轴向位置。可见，在上述局部节块位置采用三维均匀化模型得到的截面后，功率分布有了进一步的改善，而在存在截面替换的轴向区域改善尤为明显；这充分说明相对其他位置，临近控制棒端面的粗网节块具有更加剧烈的轴向三维效应，需要作相应的截面替换处理。

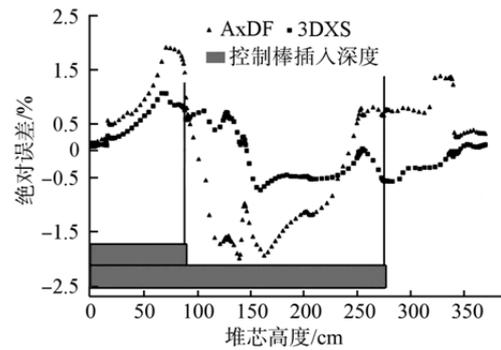


图 4 局部节块宏观截面替换对于轴向功率绝对偏差分布的改善

Fig. 4 Improvement of Absolute Error Distribution of Normalized Axial Power with 3DXS Replacement near Control Rod Tip

4 结束语

针对 LWR 堆芯实际存在的轴向三维非均匀效应，本文提出了在堆芯粗网计算中引入基于单组件三维逐棒数值模型产生的粗网均匀化参数，以改善现有均匀化模型无法考虑轴向三维非均匀效应的缺陷。数值检验表明，该三维均匀化模型的引入能够显著改善堆芯轴向功率分布，获得理想的数值结果。后续需进一步研究在单组件模型上产生包含三维效应的棒通量/功率形状因子，并最终计算获得棒栅层面精确可靠的功率/能耗分布结果。

致谢：

感谢赵荣安教授、张少泓副教授、汤春桃博士对研究工作所给予的帮助和支持。

参考文献：

- [1] 黄灏. 非全反射条件下粗网格等效均匀化参数的计算及应用[D]. 上海, 上海交通大学博士学位论文, 2009.
- [2] 汤春桃. 中子输运方程特征线解法及嵌入式组件均匀化方法的研究[D]. 上海, 上海交通大学博士学位论文, 2009.
- [3] Wang P F, Wan J S, Chen Z, et al. Dynamic simulation and study of Mechanical Shim(MSHIM) Core Control Strategy for AP1000 Reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2009, 36: 1013-1020.
- [4] Han Yu, Tang Chuntao, Zhang Shaohong, et al. Effect of void dependent reactivity modeling bias on BWR axial power tilt [A]. Proceeding of PHYSOR2010 [C]. Pittsburgh, USA, 2010.
- [5] Tatsumi M. SCOPE2: Object-Oriented parallel code for multi-group diffusion/transport calculations in three-dimensional fine-mesh reactor core geometry [A]. Proceeding of PHYSOR2002 [C]. Seoul, Korea, 2002.

(责任编辑：刘 君)