

Application of the virtual density theory in fast reactor analysis based on the neutron transport calculation(基于中子输运计算的虚拟密度法在快堆分析中的应用)

- 出版年份: 2017
- 作者: Youqi Zheng, Yulong Xiao, Hongchun Wu(郑友琦,肖云龙, 吴宏春)
- 机构: 西安交通大学
- 出版期刊: Nuclear Engineering and Design
- 阅读时间: 2019/09/29
- 文献类型: 数值方法+验证
- 评价: 好

The title of this paper(文章标题)

- [Summary\(总结\)](#)
- [Key Citations\(关键点\)](#)
- [Comments\(评价\)](#)
- [Outlines\(大纲\)](#)
 - [1. Research Objective\(研究目标\)](#)
 - [2. Background and Problems\(研究背景和问题\)](#)
 - [3. Methods\(研究方法\)](#)
 - [4. Conclusion\(总结\)](#)
- [Notes\(其它笔记\)](#)

Summary(总结)

本文基于西交开发的快堆分析程序 SARAX (System for Advanced Reactor Analysis at Xi'an Jiao Tong University), 引入虚拟密度法分析快堆中几何变形产生的反应性影响。整个方法基于一阶微扰理论+虚拟密度法+中子输运理论+ S_N 纵标法, 由此推导了新的反应性微扰公式。并将该方法用于均匀轴向膨胀、均匀径向膨胀和非均匀几何畸变(包括非均匀轴向径向膨胀、局部几何畸变如组件位移和弯曲)

三种几何形变。并利用本文方法对以上算例进行计算，与利用SARAX-FR和OpenMC（组件位移和弯曲算例采用MCNP计算）直接计算的结果进行对比，大部分算例结果符合很好。本方法的优越性在于计算高精度、高效率、能灵活应对各种变形。

Key Citations(关键点)

1. 与基于扩散理论不同，在基于中子输运理论的一阶微扰公式中不用考虑泄露项：

$$\Delta\rho = \frac{\left\langle \phi^* \left| \left(\frac{1}{k_{\text{eff}}} \delta F + \delta S - \delta A \right) \phi \right\rangle}{\left\langle \phi^* | F \phi \right\rangle}$$

2. 在考虑几何形变的时候，微观截面的变化可以忽略
3. 微扰公式最终可以写成

$$\Delta\rho = \varepsilon \tilde{P} = \varepsilon \tilde{L} = \varepsilon \frac{\langle \phi^* | L \phi \rangle}{\langle \phi^* | F \phi \rangle}$$

其中 ε 是密度变化率

$$\varepsilon = \frac{\delta N}{N} = \frac{N_2 - N_1}{N_1} = \frac{\kappa_d \kappa_l N_1 - N_1}{N_1} = \kappa_d \kappa_l - 1$$

其中 κ_d 是实际的密度变化系数， κ_l 是线性尺寸变化系数。微扰可以分不同方向，如径向和轴向，分别计算再加起来。

$$\Delta\rho = \varepsilon_r \tilde{L}_r + \varepsilon_z \tilde{L}_z$$

4. 对于非均匀几何变形，本文提出了两种建模方法。
 - 第一种是三角形网格交点固定在燃料组件的中心，如果组件移动，网格也会变形。如果组件位移较小，没有超出网格范围，则只需要网格变形；如果组件位移较大超出了网格范围，则需要将额外被影响的网格囊括进来。

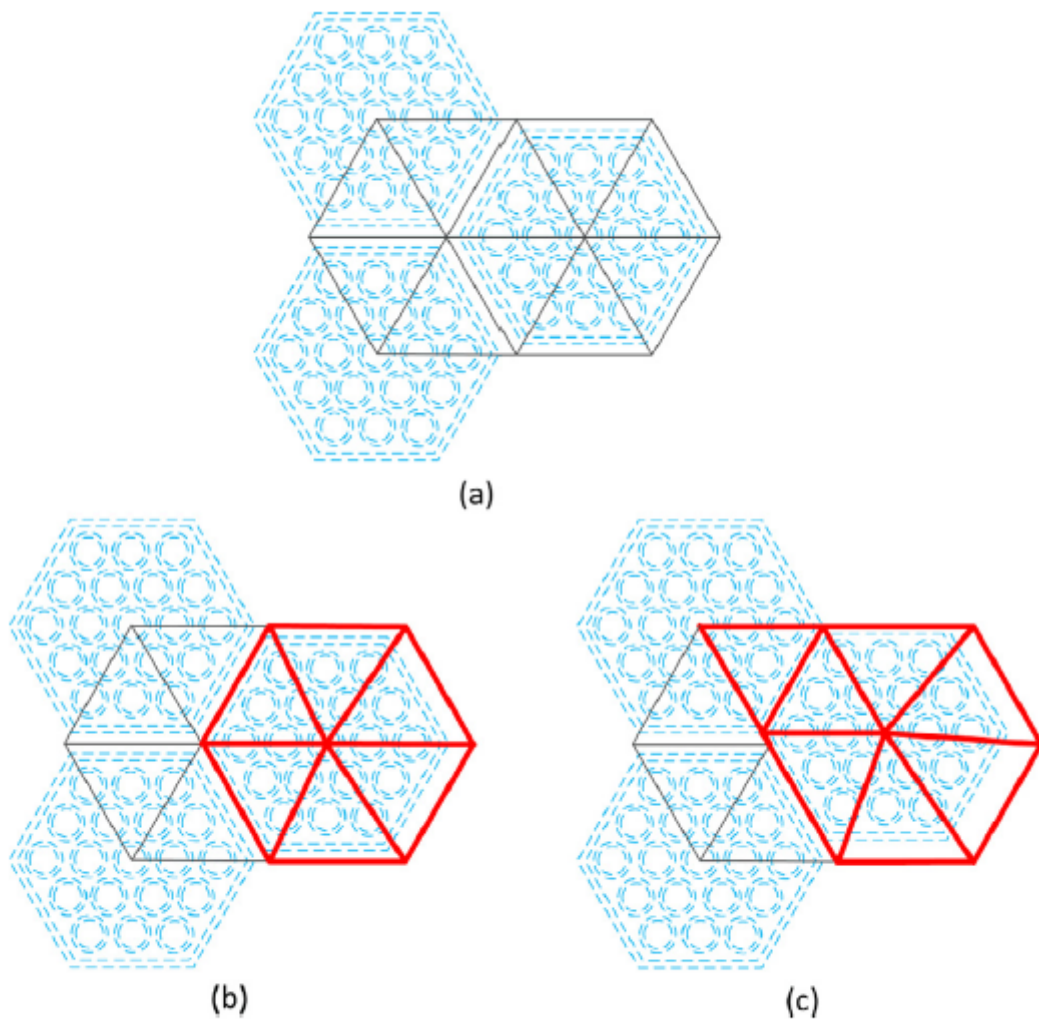


Fig. 1. Illustration of assembly displacement (Method I).

- 第二种是使用固定网格，组件位移导致移出和移进网格的进行混合计算，但是这种的缺点就是位移不能太大，因此不能计算全局形变

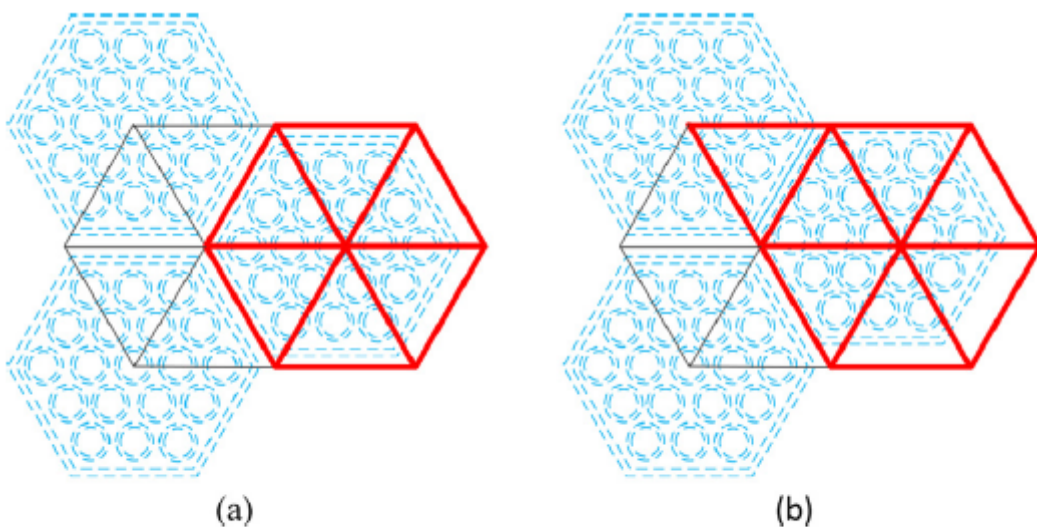
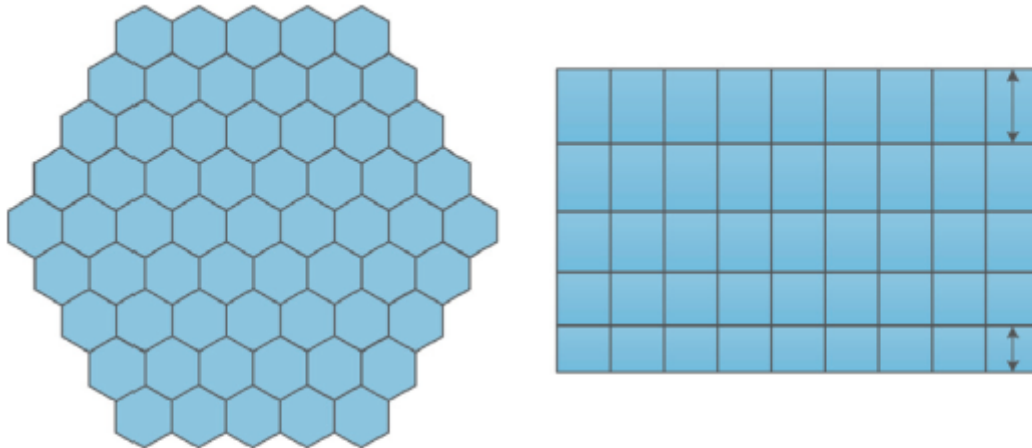


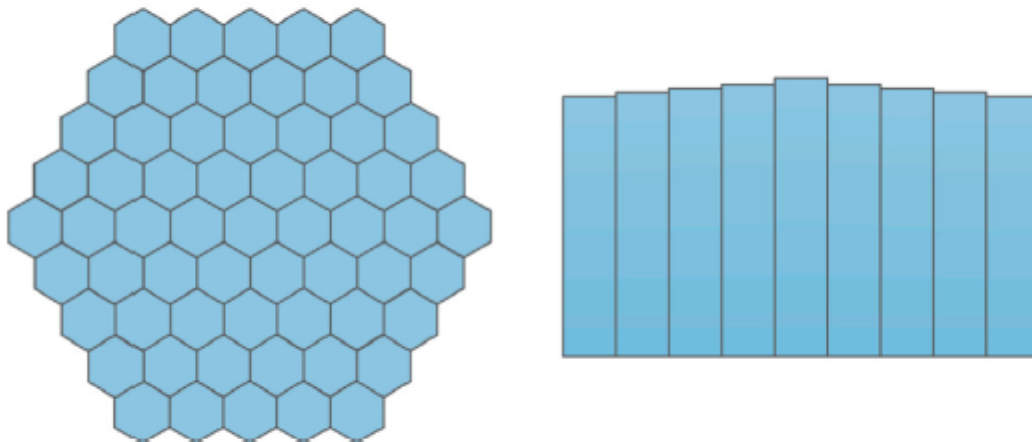
Fig. 2. Illustration of assembly displacement (Method II).

- 本文的非均匀轴向膨胀和轴向非均匀径向膨胀是基于方法一，局部组件位移和弯曲是基于方法二

5. 在均匀轴向膨胀计算中，OpenMC用了 240 CPU hours直接计算，而SARAX-FR用了0.11 CPU hour 在直接计算，而用了0.055 CPU hour 在虚拟密度计算，不过怎么这么快？
6. 直接计算的时间随着 number of cases to evaluate 线性增加，但是虚拟密度计算的时间不会改变，所以在多case的计算中虚拟密度法的优势将会非常突出
7. 非均匀轴向膨胀有两种：轴向不均匀轴向膨胀、径向不均匀轴向膨胀；非均匀径向膨胀也有两种：轴向不均匀径向膨胀、径向不均匀径向膨胀



(a) Radially non-uniform case



(b) Axially non-uniform case

Fig. 5. Non-uniform axial expansion.

8. 组件弯曲可以看作是随高度连续变化的组件位移，确定一端位移，一段固定，中间位移线性变化
9. 最终计算结果精度：均匀膨胀误差不超过3%，大多数不均匀膨胀误差不超过7%，组件弯曲误差不超过10%

Comments(评价)

1. 感觉对虚拟密度法还不太懂，文中没有太讲明白基本原理，还需要看看虚拟密度创始者Reed的文章
2. 虚拟密度法和李昊等人研究的栅元约束条件微扰的区别？栅元约束条件微扰是改变几何？虚拟密度法是改变核密度？
3. 虚拟密度和栅元约束微扰两者孰优孰劣？计算速度如何？

Outlines(大纲)

1. Research Objective(研究目标)

- 计算燃料组件几何形变对快堆反应性的影响

2. Background and Problems(研究背景和问题)

- 快堆中燃料组件几何形变导致的反应性反馈是实现固有安全性的重要部分，因此计算几何形变对反应性的影响十分重要。但是局部几何畸变计算很困难，因为局部形变往往伴随着不规则几何形状的产生，用蒙卡方法计算是可以，但是现在的计算能力还不能建立堆芯级别的高保真模型。而确定论方法基于空间均匀化，使得对局部几何及不规则几何形变建模很困难。
- 为了解决这个问题，很多方法被提出。包括综合考虑燃料移动和钠回填(sodium backfill)、引入（组件）位移反应性价值等等，需要大量的预处理很耗时间，计算精度也很差。2014年，Reed提出虚拟密度法，利用等价的物质密度变化替代几何变化，但是是此时是基于中子扩散理论的，但也大大提高了计算效率。如今中子输运理论已经大大发展成为主流，因此有必要将输运理论引入虚拟密度法进行几何微扰计算。

3. Methods(研究方法)

- 基于中子输运理论的虚拟密度法
- 离散纵标法推导新公式
- 一阶微扰近似

4. Conclusion(总结)

- 见前面文章总结

Notes(其它笔记)

- 西交的**SARAX**是快堆稳态设计和中子计算程序，其下的**SARAX-FR**是堆芯分析计算程序，**SARAX-FXS**是截面生成程序
- 这项目是国家自然科学基金