



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115982509 A

(43) 申请公布日 2023. 04. 18

(21) 申请号 202211544633.X

(22) 申请日 2022.12.02

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72) 发明人 万承辉 郭林 吴宏春

(74) 专利代理机构 西安智大知识产权代理事务所 61215

专利代理师 何会侠

(51) Int. Cl.

G06F 17/10 (2006.01)

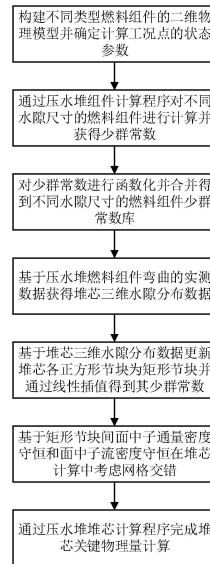
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种压水堆燃料组件弯曲计算方法

(57) 摘要

一种压水堆燃料组件弯曲计算方法,由压水堆组件计算程序对不同水隙尺寸的燃料组件进行计算,获得各类型燃料组件不同水隙尺寸的少群常数;对各类型燃料组件的少群常数进行函数化,合并获得不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库;基于压水堆燃料组件弯曲的实测数据,获得堆芯三维水隙分布数据;基于堆芯三维水隙分布数据更新堆芯各正方形节块为矩形节块,通过对水隙的线性插值得到矩形节块的少群常数;基于矩形节块间面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒,在堆芯计算中考虑由于水隙尺寸差异导致的矩形节块网格交错;通过压水堆堆芯计算程序完成堆芯关键物理量计算。本发明能够为压水堆燃料组件弯曲提供精确的计算方法,充分保障反应堆运行的安全性。



1. 一种压水堆燃料组件弯曲计算方法,其特征在于:根据压水堆燃料组件弯曲的实测数据,基于压水堆采用的组件计算和堆芯计算的两步法计算策略,通过压水堆组件计算程序制作不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库以及在压水堆堆芯计算程序中引入矩形节块间的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒原则,完成燃料组件弯曲条件下的堆芯关键物理量计算,获得堆芯关键物理量的数值模拟结果;包括如下步骤:

步骤1:获取压水堆堆芯的材料及几何信息,构建不同类型燃料组件的二维物理模型,确定计算工况点的状态参数,包括燃料温度、慢化剂温度、硼浓度以及燃耗深度;

步骤2:采用压水堆组件计算程序在标准水隙尺寸 $w_i$ 下对各类型燃料组件的二维物理模型进行计算,获得标准水隙尺寸 $w_i$ 下各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_i)$ ,包括吸收截面和裂变截面;分别改变燃料组件的二维物理模型的水隙尺寸为 $w_j$ 和 $w_k$ ,并计算获得水隙尺寸为 $w_j$ 的各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_j)$ 和水隙尺寸为 $w_k$ 的各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_k)$ ;

步骤3:对步骤2中相同水隙尺寸 $w_x$ 下的少群常数 $\Sigma(w_x)$ 进行函数化,获得水隙尺寸为 $w_x$ 对应的燃料组件少群常数库;对每个燃料组件少群常数库设置对应水隙尺寸 $w_x$ 的标签,合并获得不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库;其中, $x=i, j, k$ ;

步骤4:基于压水堆燃料组件弯曲的实测数据,处理获得包含燃料组件轴向各层四面水隙尺寸的堆芯三维水隙分布数据;处理时将燃料组件间的水隙平均分配给相邻燃料组件,并保证水隙尺寸总和与压水堆燃料组件弯曲前保持一致;

步骤5:基于标准水隙尺寸,压水堆堆芯计算程序将压水堆燃料组件径向上划分为一个燃料组件大小或四分之一燃料组件大小的正方形节块;首先基于步骤4获得的堆芯三维水隙分布数据,更新各正方形节块为矩形节块并获得矩形节块水隙尺寸 $w_{real}$ ;其次基于各矩形节块水隙尺寸 $w_{real}$ 和步骤3获得的不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库,通过对水隙的线性插值确定各矩形节块的少群常数 $\Sigma(w_{real})$ ,线性插值公式如公式(1)所示;

$$\Sigma(w_{real}) = \begin{cases} c_i \Sigma(w_i) + c_j \Sigma(w_j), & w_i \leq w_{real} < w_j \\ c_j \Sigma(w_j) + c_k \Sigma(w_k), & w_j \leq w_{real} \leq w_k \end{cases} \quad \text{公式 (1)}$$

式中:

$c_i$ ——水隙尺寸为 $w_i$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

$c_j$ ——水隙尺寸为 $w_j$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

$c_k$ ——水隙尺寸为 $w_k$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

步骤6:为在压水堆堆芯计算程序中考虑步骤5更新各正方形节块为矩形节块导致的矩形节块网格交错,将矩形节块间的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒作为矩形节块边界耦合条件,并改进压水堆堆芯计算程序中的多群粗网有限差分方程;相邻矩形节块 $k$ 和 $k+1$ 的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒分别如公式(2)和公式(3)所示;

$$f_{gu+}^k \phi_{gu+}^k \cdot S_{u+}^k = f_{gu-}^{k+1} \phi_{gu-}^{k+1} \cdot S_{u-}^{k+1}, u = x, y, z \quad \text{公式 (2)}$$

$$J_{gu+}^k \cdot S_{u+}^k = J_{gu-}^{k+1} \cdot S_{u-}^{k+1}, u = x, y, z \quad \text{公式 (3)}$$

式中:

$f_{gu+}^k$ ——矩形节块k第g能群u正方向界面的不连续因子；

$\phi_{gu+}^k$ ——矩形节块k第g能群u正方向界面的平均面中子通量密度；

$S_{u+}^k$ ——矩形节块k在u正方向界面的面积；

$f_{gu-}^{k+1}$ ——矩形节块k+1第g能群u负方向界面的不连续因子；

$\phi_{gu-}^{k+1}$ ——矩形节块k+1第g能群u负方向界面的平均面中子通量密度； $S_{u-}^{k+1}$ ——矩形节块k+1在u负方向界面的面积；

$J_{gu+}^k$ ——矩形节块k第g能群u正方向界面的平均面中子流密度；

$J_{gu-}^{k+1}$ ——矩形节块k+1第g能群u负方向界面的平均面中子流密度；

对于矩形节块k,改进后的多群粗网有限差分方程如公式(4)所示；

$$\sum_{u=x,y,z} \frac{1}{\Delta u_k} \begin{bmatrix} -\left(D_{gu+}^{k,FDM} + D_{gu+}^{k,NOD}\right) \frac{S_{u-}^{k+1}}{S_{u+}^k} f_{gu-}^{k+1} \overline{\phi}_g^{k+1} \\ -\left(D_{gu-}^{k,FDM} - D_{gu-}^{k,NOD}\right) \frac{S_{u+}^{k-1}}{S_{u-}^k} f_{gu+}^{k-1} \overline{\phi}_g^{k-1} \\ -\left(D_{gu+}^{k,NOD} - D_{gu+}^{k,FDM}\right) f_{gu+}^k \overline{\phi}_g^k \\ +\left(D_{gu-}^{k,NOD} + D_{gu-}^{k,FDM}\right) f_{gu-}^k \overline{\phi}_g^k \end{bmatrix} + \sum_{rg} \overline{\phi}_g^k \quad \text{公式(4)}$$

$$= \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \sum_{s,h \rightarrow g}^k \overline{\phi}_h^k + \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{h=1}^G \nu \Sigma_{fh}^k \overline{\phi}_h^k$$

式中：

$\Delta u_k$ ——矩形节块k从u负方向界面到u正方向界面的长度；

$D_{gu+}^{k,FDM}$ ——矩形节块k第g能群u正方向的粗网有限差分耦合因子；

$D_{gu+}^{k,NOD}$ ——矩形节块k第g能群u正方向的耦合修正因子；

$D_{gu-}^{k,FDM}$ ——矩形节块k第g能群u负方向的粗网有限差分耦合因子；

$D_{gu-}^{k,NOD}$ ——矩形节块k第g能群u负方向的耦合修正因子；

$S_{u-}^k$ ——矩形节块k在u负方向界面的面积；

$S_{u+}^{k-1}$ ——矩形节块k-1在u正方向界面的面积；

$f_{gu-}^k$ ——矩形节块k第g能群u负方向界面的不连续因子；

$f_{gu+}^{k-1}$ ——矩形节块k-1第g能群u正方向界面的不连续因子；

$\overline{\phi}_g^{k+1}$ ——矩形节块k+1第g能群的平均中子通量密度；

$\overline{\phi}_g^k$ ——矩形节块k第g能群的平均中子通量密度；

$\overline{\phi}_g^{k-1}$ ——矩形节块k-1第g能群的平均中子通量密度；

$\Sigma_{rg}^k$ ——矩形节块k第g能群的移出截面；

G——总能群数；

$\Sigma_{s,h \rightarrow g}^k$ ——矩形节块k第h能群到第g能群的散射截面；

$\overline{\phi}_h^k$ ——矩形节块k第h能群的平均中子通量密度；

$\nu$ ——每次裂变产生的平均中子数；

$\chi_g$ ——第g能群的裂变能谱；

$k_{\text{eff}}$ ——有效增殖系数；

$\Sigma_{fn}^k$ ——矩形节块k第h能群的裂变截面；

步骤7: 基于步骤6考虑矩形节块网格交错的压水堆堆芯计算程序, 结合步骤5获得的各矩形节块少群常数, 完成压水堆燃料组件弯曲的三维中子扩散计算, 并获得堆芯关键物理量的模拟结果, 关键物理量包括临界硼浓度、温度系数和控制棒组积分价值。

## 一种压水堆燃料组件弯曲计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及压水堆堆芯物理计算领域,具体涉及一种压水堆燃料组件弯曲计算方法。

### 背景技术

[0002] 当压水堆运行时,燃料组件由于辐照生长、水力学等作用偏离正常的竖直状态而发生变形,从而形成不同形状的弯曲形状,如“C”型、“S”型等。当弯曲量过大时,将会影响反应堆的安全运行,出现如堆内装卸料困难、局部功率过高、控制棒下插困难、象限功率倾斜等问题。因此,准确模拟燃料组件弯曲现象对于反应堆的数值模拟及安全运行至关重要。

[0003] 从物理角度分析,燃料组件弯曲直接导致燃料组件之间的水隙尺寸发生变化。从中子学角度分析:燃料组件周围水隙尺寸增大时,中子慢化能力增强;水隙尺寸减小时,中子慢化能力减弱,从而影响堆芯功率分布和功率峰因子等物理参数。在压水堆数值模拟中,常用软件主要包括确定论程序和概率论程序,其中确定论程序又可分为“一步法”程序和“两步法”程序。通过“一步法”程序或者概率论程序对燃料组件弯曲后的堆芯物理模型直接进行模拟是可行的,但建模过程较为复杂且计算代价较高,因此在商用压水堆中并不适用。而在“两步法”程序中,首先需要通过压水堆组件计算程序对二维组件进行非均匀计算并通过等效均匀化产生少群常数,其次通过压水堆堆芯计算程序划分节块并进行三维中子扩散计算;其中通常在标准水隙尺寸下产生少群常数,且堆芯划分的节块排列整齐,径向均为一个燃料组件大小或四分之一燃料组件大小。由此可知,燃料组件弯曲对“两步法”程序的压水堆数值模拟带来两个方面的挑战:组件计算如何考虑燃料组件弯曲对少群常数的影响;堆芯计算如何考虑弯曲对中子扩散计算的影响。

[0004] 基于“两步法”程序对燃料组件弯曲进行模拟计算,国内外已开展了相关研究。国外西屋公司基于ANC程序开发了用于模拟燃料组件弯曲的ANCGAP程序,压水堆组件计算程序PHOENIX-P可产生不同水隙尺寸的少群常数,并在堆芯计算中根据实际体积大小对其进行修正后再进行使用;但并未考虑燃料组件弯曲对于三维中子扩散计算的影响。国内中广核研究院对PCM软件包进行了改进,压水堆组件计算程序PINE可产生不同水隙尺寸下的少群常数,并得到中子截面多参数表;压水堆堆芯计算程序COCO基于水隙分布对节块的少群常数进行插值并重新划分节块,但仅在原有燃料组件几何下划分节块,无法适用于组件弯曲幅度较大的情况,例如两组件弯曲后直接接触的情况。

### 发明内容

[0005] 为了克服上述现有技术存在的问题,本发明的目的在于提供一种压水堆燃料组件弯曲计算方法,由压水堆组件计算程序获得不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库,由燃料组件弯曲的实测数据获得堆芯三维水隙分布数据,基于三维水隙分布数据更新堆芯各正方形节块为矩形节块,通过矩形节块间的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒在堆芯计算中考虑水隙尺寸差异导致的矩形节块网格交错,并基于压水堆堆芯计算程序完成燃料组

件弯曲条件下的堆芯关键物理量计算。

[0006] 为了实现以上目的,本发明采取如下的技术方案予以实施:

[0007] 一种压水堆燃料组件弯曲计算方法,其特征在于:根据压水堆燃料组件弯曲的实测数据,基于压水堆采用的组件计算和堆芯计算的两步法计算策略,通过压水堆组件计算程序制作不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库以及在压水堆堆芯计算程序中引入矩形节块间的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒原则,完成燃料组件弯曲条件下的堆芯关键物理量计算,获得堆芯关键物理量的数值模拟结果;包括如下步骤:

[0008] 步骤1:获取压水堆堆芯的材料及几何信息,构建不同类型燃料组件的二维物理模型,确定计算工况点的状态参数,包括燃料温度、慢化剂温度、硼浓度以及燃耗深度;

[0009] 步骤2:采用压水堆组件计算程序在标准水隙尺寸 $w_i$ 下对各类型燃料组件的二维物理模型进行计算,获得标准水隙尺寸 $w_i$ 下各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_i)$ ,包括吸收截面和裂变截面;分别改变燃料组件的二维物理模型的水隙尺寸为 $w_j$ 和 $w_k$ ,并计算获得水隙尺寸为 $w_j$ 的各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_j)$ 和水隙尺寸为 $w_k$ 的各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_k)$ ;

[0010] 步骤3:对步骤2中相同水隙尺寸 $w_x(x=i, j, k)$ 下的少群常数 $\Sigma(w_x)$ 进行函数化,获得水隙尺寸为 $w_x$ 对应的燃料组件少群常数库;对每个燃料组件少群常数库设置对应水隙尺寸 $w_x$ 的标签,合并获得不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库;

[0011] 步骤4:基于压水堆燃料组件弯曲的实测数据,处理获得包含燃料组件轴向各层四面水隙尺寸的堆芯三维水隙分布数据;处理时将燃料组件间的水隙平均分配给相邻燃料组件,并保证水隙尺寸总和与压水堆燃料组件弯曲前保持一致;

[0012] 步骤5:基于标准水隙尺寸,压水堆堆芯计算程序将压水堆燃料组件径向上划分为一个燃料组件大小或四分之一燃料组件大小的正方形节块;首先基于步骤4获得的堆芯三维水隙分布数据,更新各正方形节块为矩形节块并获得矩形节块水隙尺寸 $w_{real}$ ;其次基于各矩形节块水隙尺寸 $w_{real}$ 和步骤3获得的不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库,通过对水隙的线性插值确定各矩形节块的少群常数 $\Sigma(w_{real})$ ,线性插值公式如公式(1)所示;

$$[0013] \quad \Sigma(w_{real}) = \begin{cases} c_i \Sigma(w_i) + c_j \Sigma(w_j), & w_i \leq w_{real} < w_j \\ c_j \Sigma(w_j) + c_k \Sigma(w_k), & w_j \leq w_{real} \leq w_k \end{cases} \quad \text{公式 (1)}$$

[0014] 式中:

[0015]  $c_i$ ——水隙尺寸为 $w_i$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

[0016]  $c_j$ ——水隙尺寸为 $w_j$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

[0017]  $c_k$ ——水隙尺寸为 $w_k$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

[0018] 步骤6:为在压水堆堆芯计算程序中考虑步骤5更新各正方形节块为矩形节块导致的矩形节块网格交错,将矩形节块间的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒作为矩形节块边界耦合条件,并改进压水堆堆芯计算程序中的多群粗网有限差分方程;相邻矩形节块 $k$ 和 $k+1$ 的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒分别如公式(2)和公式(3)所示;

$$[0019] \quad f_{gu+}^k \phi_{gu+}^k \cdot S_{u+}^k = f_{gu-}^{k+1} \phi_{gu-}^{k+1} \cdot S_{u-}^{k+1}, u = x, y, z \quad \text{公式 (2)}$$

$$[0020] \quad J_{gu+}^k \cdot S_{u+}^k = J_{gu-}^{k+1} \cdot S_{u-}^{k+1}, u = x, y, z \quad \text{公式 (3)}$$

[0021] 式中：

[0022]  $f_{gu+}^k$  —— 矩形节块k第g能群u正方向界面的不连续因子；

[0023]  $\phi_{gu+}^k$  —— 矩形节块k第g能群u正方向界面的平均面中子通量密度；

[0024]  $S_{u+}^k$  —— 矩形节块k在u正方向界面的面积；

[0025]  $f_{gu-}^{k+1} f_{gu-}^{k+1}$  —— 矩形节块k+1第g能群u负方向界面的不连续因子；

[0026]  $\phi_{gu-}^{k+1}$  —— 矩形节块k+1第g能群u负方向界面的平均面中子通量密度； $S_{u-}^{k+1}$  —— 矩形节块k+1在u负方向界面的面积；

[0027]  $J_{gu+}^k J_{gu+}^k$  —— 矩形节块k第g能群u正方向界面的平均面中子流密度； $J_{gu-}^{k+1} J_{gu-}^{k+1}$  —— 矩形节块k+1第g能群u负方向界面的平均面中子流密度；

[0028] 对于矩形节块k,改进后的多群粗网有限差分方程如公式(4)所示；

$$\begin{aligned}
 & \sum_{u=x,y,z} \frac{1}{\Delta u_k} \left[ \begin{aligned} & - \left( D_{gu+}^{k,FDM} + D_{gu+}^{k,NOD} \right) \frac{S_{u-}^{k+1}}{S_{u+}^k} f_{gu-}^{k+1} \overline{\phi}_g^{k+1} \\ & - \left( D_{gu-}^{k,FDM} - D_{gu-}^{k,NOD} \right) \frac{S_{u+}^{k-1}}{S_{u-}^k} f_{gu+}^{k-1} \overline{\phi}_g^{k-1} \\ & - \left( D_{gu+}^{k,NOD} - D_{gu+}^{k,FDM} \right) f_{gu+}^k \overline{\phi}_g^k \\ & + \left( D_{gu-}^{k,NOD} + D_{gu-}^{k,FDM} \right) f_{gu-}^k \overline{\phi}_g^k \end{aligned} \right] + \sum_{rg}^k \overline{\phi}_g^k \\
 & = \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \sum_{s,h \rightarrow g}^k \overline{\phi}_h^k + \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{h=1}^G \nu \sum_{fh}^k \overline{\phi}_h^k
 \end{aligned} \tag{4}$$

[0030] 式中：

[0031]  $\Delta u_k$  —— 矩形节块k从u负方向界面到u正方向界面的长度；

[0032]  $D_{gu+}^{k,FDM}$  —— 矩形节块k第g能群u正方向的粗网有限差分耦合因子；

[0033]  $D_{gu+}^{k,NOD}$  —— 矩形节块k第g能群u正方向的耦合修正因子；

[0034]  $D_{gu-}^{k,FDM}$  —— 矩形节块k第g能群u负方向的粗网有限差分耦合因子；

[0035]  $D_{gu-}^{k,NOD}$  —— 矩形节块k第g能群u负方向的耦合修正因子；

[0036]  $S_{u-}^k$  —— 矩形节块k在u负方向界面的面积；

[0037]  $S_{u+}^{k-1}$  —— 矩形节块k-1在u正方向界面的面积；

[0038]  $f_{gu-}^k$  —— 矩形节块k第g能群u负方向界面的不连续因子；

[0039]  $f_{gu+}^{k-1}$  —— 矩形节块k-1第g能群u正方向界面的不连续因子；

[0040]  $\overline{\phi}_g^{k+1}$  —— 矩形节块k+1第g能群的平均中子通量密度；

[0041]  $\overline{\phi}_g^k$  —— 矩形节块k第g能群的平均中子通量密度；

[0042]  $\overline{\phi}_g^{k-1}$ ——矩形节块k-1第g能群的平均中子通量密度；

[0043]  $\Sigma_{rg}^k$ ——矩形节块k第g能群的移出截面；

[0044] G——总能群数；

[0045]  $\Sigma_{s,h \rightarrow g}^k$ ——矩形节块k第h能群到第g能群的散射截面；

[0046]  $\overline{\phi}_h^k$ ——矩形节块k第h能群的平均中子通量密度；

[0047]  $\nu$ ——每次裂变产生的平均中子数；

[0048]  $x_g$ ——第g能群的裂变能谱；

[0049]  $k_{\text{eff}}$ ——有效增殖系数；

[0050]  $\Sigma_{fh}^k$ ——矩形节块k第h能群的裂变截面；

[0051] 步骤7:基于步骤6考虑矩形节块网格交错的压水堆堆芯计算程序,结合步骤5获得的各矩形节块少群常数,完成压水堆燃料组件弯曲的三维中子扩散计算,并获得堆芯关键物理量的模拟结果,关键物理量包括临界硼浓度、温度系数和控制棒组积分价值。

[0052] 与现有技术相比较,本发明具备如下优点:

[0053] 1.通过压水堆燃料组件弯曲的实测数据,获取堆芯三维水隙分布数据,并更新压水堆堆芯计算程序中划分的正方形节块为矩形节块,从而考虑压水堆燃料组件弯曲对于堆芯中子扩散计算的影响;

[0054] 2.基于压水堆普遍采用的组件计算和堆芯计算的“两步法”计算策略,通过压水堆组件计算程序制作不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库,并在压水堆堆芯计算程序中引入矩形节块间的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒来考虑水隙尺寸差异导致的矩形节块网格交错,实现精确的计算。

## 附图说明

[0055] 图1为压水堆燃料组件弯曲计算流程;

[0056] 图2为压水堆17×17型不含钐棒的燃料组件径向二维物理模型示意图;

[0057] 图3为压水堆17×17型含8个钐棒的燃料组件径向二维物理模型示意图;

[0058] 图4为3×3燃料组件弯曲后更新正方形节块为矩形节块径向示意图;

[0059] 图5为矩形节块k和k+1网格交错时的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒示意图。

## 具体实施方式

[0060] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步详细说明。

[0061] 本发明根据压水堆燃料组件弯曲的实测数据,基于压水堆采用的组件计算和堆芯计算的两步法计算策略,通过压水堆组件计算程序制作不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库以及在压水堆堆芯计算程序中引入矩形节块间的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒原则,完成燃料组件弯曲条件下的堆芯关键物理量计算,获得堆芯关键物理量的数值模拟结果,具体步骤如图1所示。

[0062] 步骤1:获取压水堆堆芯的材料及几何信息,构建不同类型燃料组件的二维物理模



型,类型包括富集度大小和钎棒数量;如图2所示,为压水堆 $17 \times 17$ 型不含钎棒的燃料组件径向二维物理模型示意图,图中燃料组件包含265个燃料棒及24个导向管,且外侧含有一层水隙;如图3所示,为压水堆 $17 \times 17$ 型含8个钎棒的燃料组件二维物理模型示意图,图中燃料组件包含257个燃料棒、8个钎棒及24个导向管,且外侧含有一层水隙;确定计算工况点的状态参数,包括燃料温度、慢化剂温度、硼浓度以及燃耗深度;

[0063] 步骤2:采用压水堆组件计算程序LOCUST在标准水隙尺寸 $w_i$ 下对各类型燃料组件的二维物理模型进行计算,获得标准水隙尺寸 $w_i$ 下各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_i)$ ,包括吸收截面和裂变截面;分别改变燃料组件的二维物理模型的水隙尺寸为 $w_j$ 和 $w_k$ ,并计算获得水隙尺寸为 $w_j$ 的各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_j)$ 和水隙尺寸为 $w_k$ 的各类型燃料组件的少群常数 $\Sigma(w_k)$ ;

[0064] 步骤3:通过函数化程序LtoS对步骤2中相同水隙尺寸 $w_x$  ( $x=i, j, k$ )下的少群常数 $\Sigma(w_x)$ 进行函数化,获得水隙尺寸为 $w_x$ 对应的燃料组件少群常数库;对每个燃料组件少群常数库设置对应水隙尺寸 $w_x$ 的标签,合并获得不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库;

[0065] 步骤4:基于压水堆燃料组件弯曲的实测数据,具体包含燃料组件在格架位置处 $x$ 和 $y$ 方向的弯曲量,处理获得包含燃料组件轴向各层节块四面水隙尺寸的堆芯三维水隙分布数据;处理时将燃料组件间的水隙平均分配给相邻燃料组件,并保证水隙尺寸总和与压水堆燃料组件弯曲前保持一致;

[0066] 步骤5:基于标准水隙尺寸,压水堆堆芯计算程序SPARK将压水堆燃料组件径向上划分为一个燃料组件大小或四分之一燃料组件大小的正方形节块;为考虑压水堆燃料组件弯曲对于少群常数的影响,首先基于步骤4获得的堆芯三维水隙分布数据,更新各正方形节块为矩形节块并获得矩形节块水隙尺寸 $w_{real}$ ,如图4所示,为 $3 \times 3$ 压水堆燃料组件弯曲后更新正方形节块为矩形节块径向示意图,图中节块径向取为一个燃料组件大小,中心燃料组件向上弯曲后,该燃料组件及上下相邻的燃料组件划分的正方形节块更新为矩形节块,与左右相邻的正方形节块由于水隙尺寸的差异形成矩形节块网格交错;其次基于各矩形节块水隙尺寸 $w_{real}$ 和步骤3获得的不同水隙尺寸的燃料组件少群常数库,通过对水隙的线性插值确定各矩形节块的少群常数 $\Sigma(w_{real})$ ,线性插值公式如公式(1)所示;

$$[0067] \quad \Sigma(w_{real}) = \begin{cases} c_i \Sigma(w_i) + c_j \Sigma(w_j), & w_i \leq w_{real} < w_j \\ c_j \Sigma(w_j) + c_k \Sigma(w_k), & w_j \leq w_{real} \leq w_k \end{cases} \quad \text{公式 (1)}$$

[0068] 式中:

[0069]  $c_i$ ——水隙尺寸为 $w_i$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

[0070]  $c_j$ ——水隙尺寸为 $w_j$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

[0071]  $c_k$ ——水隙尺寸为 $w_k$ 对应的燃料组件少群常数库的插值系数;

[0072] 步骤6:为在压水堆堆芯计算程序SPARK中考虑步骤5更新各正方形节块为矩形节块导致的矩形节块网格交错,将矩形节块间的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒作为节块边界耦合条件,如图5所示,网格交错的矩形节块 $k$ 和 $k+1$ 在相邻面上的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒,图中矩形节块 $k$ 和 $k+1$ 在 $u$ 正方向的相邻面网格交错,相邻面上节块 $k$ 在 $u$ 正方向的面中子通量密度和面中子流密度等于节块 $k+1$ 在 $u$ 负方向的面中子通量密度和面中子流密度;并改进压水堆堆芯计算程序SPARK中的多群粗网有限差分方程;相邻矩

形节块k和k+1的面中子通量密度守恒和面中子流密度守恒分别如公式(2)和公式(3)所示;

$$[0073] \quad f_{gu+}^k \phi_{gu+}^k \cdot S_{u+}^k = f_{gu-}^{k+1} \phi_{gu-}^{k+1} \cdot S_{u-}^{k+1}, u = x, y, z \quad \text{公式 (2)}$$

$$[0074] \quad J_{gu+}^k \cdot S_{u+}^k = J_{gu-}^{k+1} \cdot S_{u-}^{k+1}, u = x, y, z \quad \text{公式 (3)}$$

[0075] 式中:

[0076]  $f_{gu+}^k$  ——矩形节块k第g能群u正方向界面的不连续因子;

[0077]  $\phi_{gu+}^k$  ——矩形节块k第g能群u正方向界面的平均面中子通量密度;

[0078]  $S_{u+}^k$  ——矩形节块k在u正方向界面的面积;

[0079]  $f_{gu-}^{k+1}$  ——矩形节块k+1第g能群u负方向界面的不连续因子;

[0080]  $\phi_{gu-}^{k+1}$  ——矩形节块k+1第g能群u负方向界面的平均面中子通量密度;  $S_{u-}^{k+1}$  ——矩形节块k+1在u负方向界面的面积;

[0081]  $J_{gu+}^k$  ——矩形节块k第g能群u正方向界面的平均面中子流密度;

[0082]  $J_{gu-}^{k+1}$  ——矩形节块k+1第g能群u正方向界面的平均面中子流密度;

[0083] 对于矩形节块k,改进后的多群粗网有限差分方程如公式(4)所示;

$$[0084] \quad \sum_{u=x,y,z} \frac{1}{\Delta u_k} \begin{bmatrix} -\left(D_{gu+}^{k,FDM} + D_{gu+}^{k,NOD}\right) \frac{S_{u-}^{k+1}}{S_{u+}^k} f_{gu-}^{k+1} \overline{\phi}_g^{k+1} \\ -\left(D_{gu-}^{k,FDM} - D_{gu-}^{k,NOD}\right) \frac{S_{u+}^{k-1}}{S_{u-}^k} f_{gu+}^{k-1} \overline{\phi}_g^{k-1} \\ -\left(D_{gu+}^{k,NOD} - D_{gu+}^{k,FDM}\right) f_{gu+}^k \overline{\phi}_g^k \\ +\left(D_{gu-}^{k,NOD} + D_{gu-}^{k,FDM}\right) f_{gu-}^k \overline{\phi}_g^k \end{bmatrix} + \sum_{rg}^k \overline{\phi}_g^k \quad \text{公式 (4)}$$

$$= \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \sum_{s,h \rightarrow g}^k \overline{\phi}_h^k + \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{h=1}^G \nu \Sigma_{fh}^k \overline{\phi}_h^k$$

[0085] 式中:

[0086]  $\Delta u_k$  ——矩形节块k从u负方向到u正方向界面的长度;

[0087]  $D_{gu+}^{k,FDM}$  ——矩形节块k第g能群u正方向的粗网有限差分耦合因子;

[0088]  $D_{gu+}^{k,NOD}$  ——矩形节块k第g能群u正方向的耦合修正因子;

[0089]  $D_{gu-}^{k,FDM}$  ——矩形节块k第g能群u负方向的粗网有限差分耦合因子;

[0090]  $D_{gu-}^{k,NOD}$  ——矩形节块k第g能群u负方向的耦合修正因子;

[0091]  $S_{u-}^k$  ——矩形节块k在u负方向界面的面积;

[0092]  $S_{u+}^{k-1}$  ——矩形节块k-1在u正方向界面的面积;

[0093]  $f_{gu-}^k$  ——矩形节块k第g能群u负方向界面的不连续因子;

- [0094]  $f_{gu+}^{k-1}$ ——矩形节块k-1第g能群u正方向界面的不连续因子；
- [0095]  $\overline{\phi}_g^{k+1}$ ——矩形节块k+1第g能群的平均中子通量密度；
- [0096]  $\overline{\phi}_g^k$ ——矩形节块k第g能群的平均中子通量密度；
- [0097]  $\overline{\phi}_g^{k-1}$ ——矩形节块k-1第g能群的平均中子通量密度；
- [0098]  $\Sigma_{rg}^k$ ——矩形节块k第g能群的移出截面；
- [0099] G——总能群数；
- [0100]  $\Sigma_{s,h \rightarrow g}^k$ ——矩形节块k第h能群到第g能群的散射截面；
- [0101]  $\overline{\phi}_h^k$ ——矩形节块k第h能群的平均中子通量密度；
- [0102]  $\nu$ ——每次裂变产生的平均中子数；
- [0103]  $\chi_g$ ——第g能群的裂变能谱；
- [0104]  $k_{\text{eff}}$ ——有效增殖系数；
- [0105]  $\Sigma_{fh}^k$ ——矩形节块k第h能群的裂变截面；

[0106] 步骤7:基于步骤6考虑矩形节块网格交错的压水堆堆芯计算程序SPARK,结合步骤5获得的各矩形节块少群常数,完成压水堆燃料组件弯曲的三维中子扩散计算,并获得堆芯关键物理量的模拟结果,关键物理量包括临界硼浓度、温度系数和控制棒组积分价值。使用压水堆组件计算程序LOCUST和压水堆堆芯计算程序SPARK对台山核电厂采用以上步骤计算后,台山核电厂某机组某循环启动物理试验临界硼浓度及温度系数的计算结果及误差如表1所示,台山核电厂某机组某循环启动物理试验控制棒组积分价值及相对误差如表2所示。

[0107] 表1

[0108]

试验内容	计算值	误差	误差限值要求
临界硼浓度	958.7ppm	31.5ppm	±50ppm
等温温度系数	-33.1pcm/K	-1.1pcm/K	±3.6pcm/K
慢化剂温度系数	-29.9pcm/K	-1.1pcm/K	±3.6pcm/K

[0109] 表2

[0110]

控制棒组积分价值	计算值 (pcm)	相对误差/%	相对误差限值要求/%
X1	939.5	2.7	±10
X2	1291.9	-0.1	
X3	1108.7	0.5	
X4	764.8	-0.7	
X5	477.2	-2.8	
X6	769.5	1.4	
X7	759.3	0.2	
X8	314.6	-0.4	

[0111] 数值结果表明,临界硼浓度误差低于限值要求±50ppm,等温温度系数及慢化剂温度系数误差均小于限值要求±3.6pcm/K,控制棒组积分价值的相对误差均远低于限值要求±10%。因此,本发明提出的方法可以实现准确的压水堆燃料组件弯曲计算,具备工业应用

的价值。

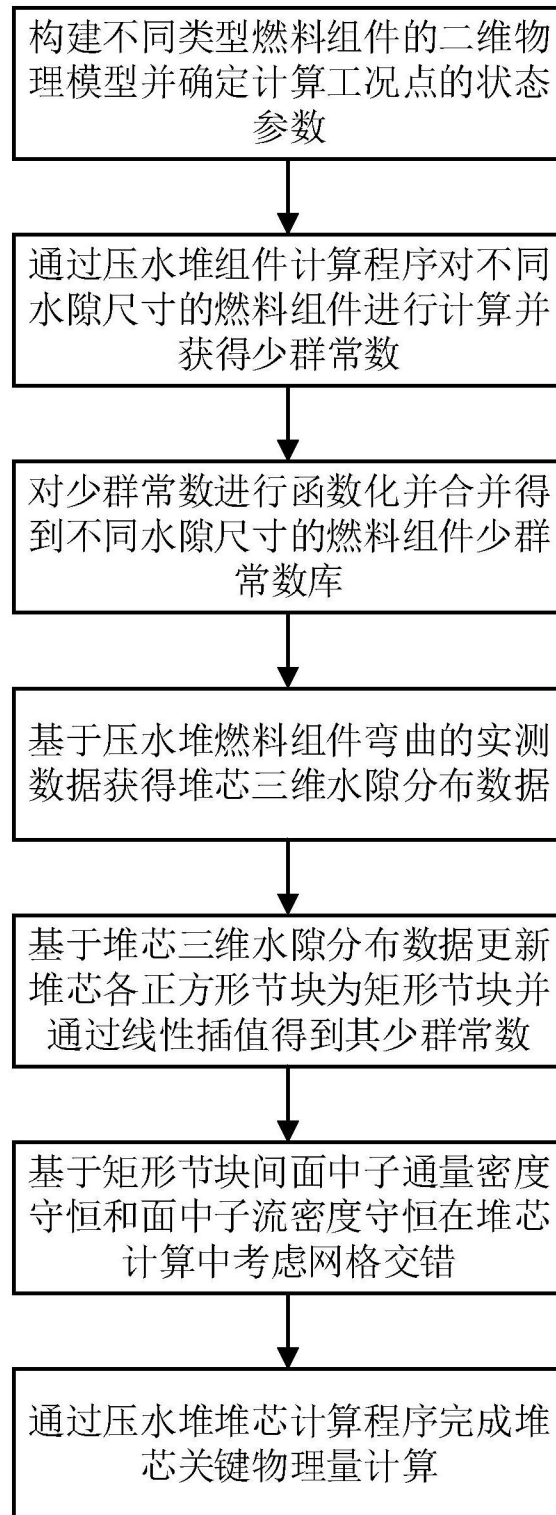


图1

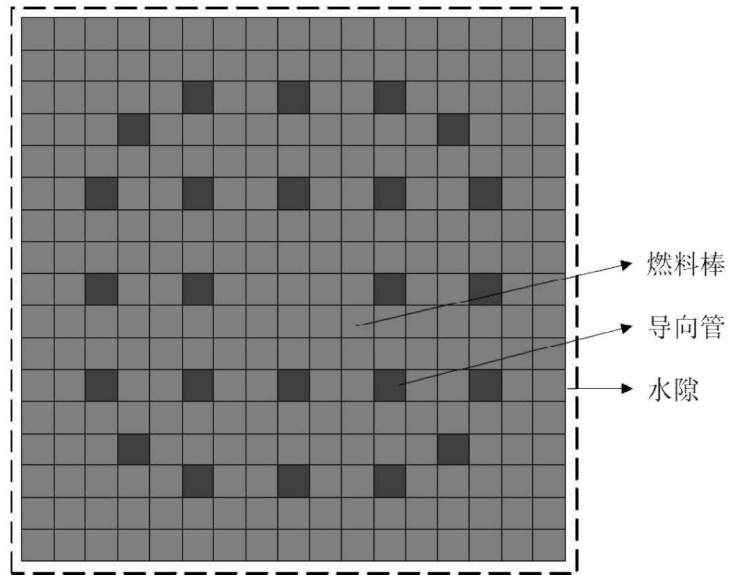


图2

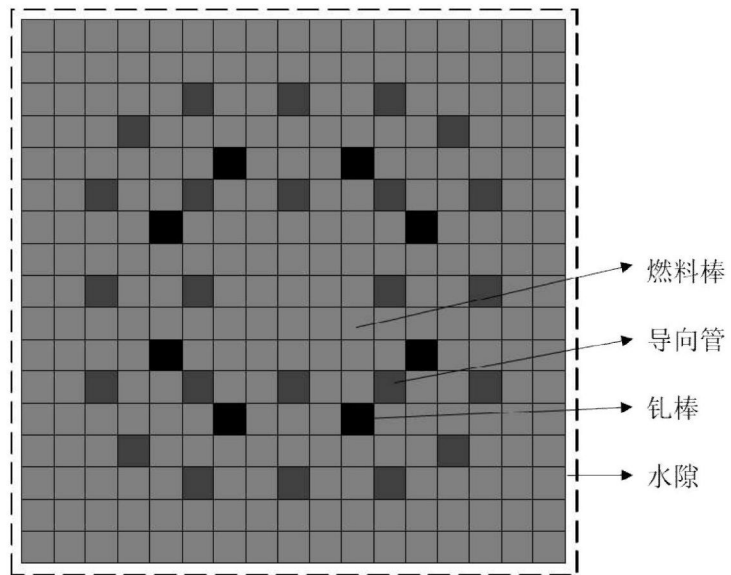


图3

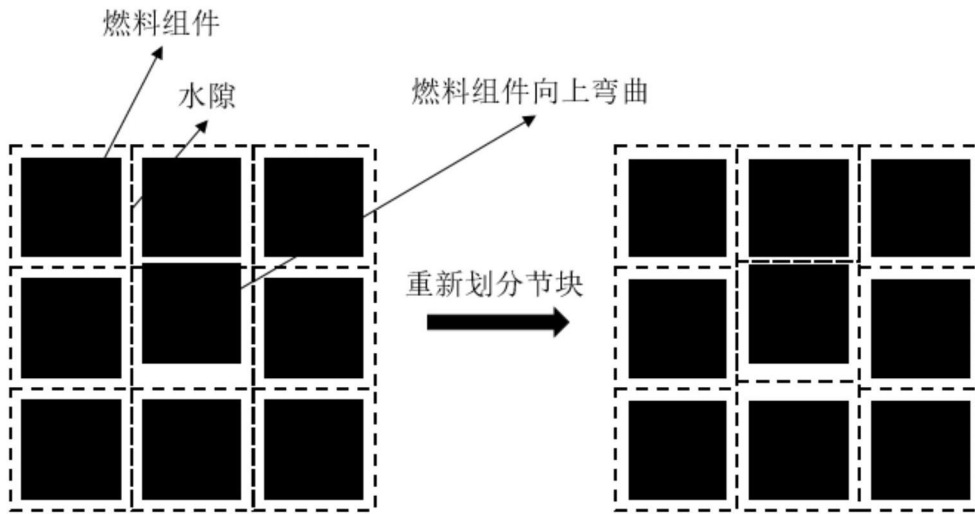


图4

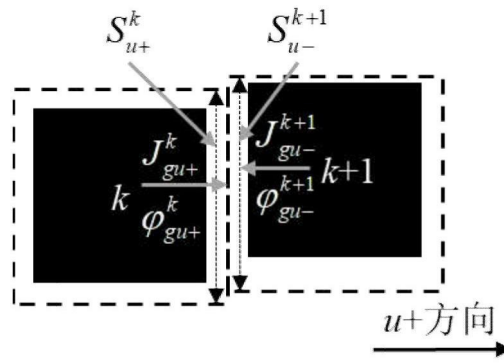


图5