

文章编号: 1007-4627(2017)03-0677-05

## 基于ICEM-CFD的核噪声分析用有限元程序研究

袁宝新, 杨万奎, 曾和荣

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 基于非结构网格的有限元方法具有很好的几何适应性, 目前已用于求解反应堆物理问题, 但当前的有限元程序基于手工描述的几何建模和网格划分非常繁复, 很大程度上制约了该方法在反应堆物理数值计算中的应用。利用商业 CAD 前处置软件 ICEM-CFD 对三维堆芯几何做四面体或六面体网格剖分, 对二维堆芯几何做三角形或四边形网格剖分, 并开发了基于有限元方法的核噪声分析用中子学计算主程序。通过基准例题对程序进行了通量、伴随通量、 $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  等稳态参数计算能力测试, 测试表明该程序稳态参数计算结果是可信的。最后, 对国际原子能机构 (IAEA) 发布的三维压水堆基准例题进行了中子噪声频谱计算, 给出了给定频点下的噪声分布。

**关键词:** ICEM-CFD; 核噪声; 有限元; 程序

**中图分类号:** O571.43      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.677

### 1 引言

有限元方法因具有非结构网格剖分能力可以适应任意几何, 因而从 20 世纪 60 年代起逐渐在中子学计算领域得到应用和推广, 国内已开发了例如 3DFEMJS, TFEM-2D, FEM2D-655 等程序<sup>[1-3]</sup>, 国外则开发了 FEM3DJAR, FENDER, FELICIT, FELTRAN 等程序<sup>[4-7]</sup>。但这些程序大多采用手工方式进行几何剖分, 这就使得这一时代的有限元程序的几何处理模块不可避免地具有网格处理繁复及不具有通用性等劣势。

为开展低功率模拟空泡作用下堆芯核噪声频谱特性研究<sup>[8-11]</sup>, 需要开发一套复杂几何下的中子学瞬态/稳态计算程序, 在这个背景下利用商业 CAD 前处置软件 ICEM-CFD 对三维堆芯几何做四面体或六面体网格剖分, 对二维堆芯几何做三角形或四边形网格剖分, 开发基于 ICEM-CFD 前处理器的核噪声分析用有限元程序, 以便获得复杂堆芯几何内细致的中子噪声频谱。

### 2 基本方程

考虑双群模型的三维瞬态方程为

$$\frac{1}{v_1} \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = \nabla \cdot D_1 \nabla \Phi_1 - \Sigma_{t,1} \Phi_1 + (1 - \beta_{\text{eff}}) \sum_{g=1}^2 (\nu \Sigma_f)_g \Phi_g + \lambda C,$$

$$\frac{1}{v_2} \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = \nabla \cdot D_2 \nabla \Phi_2 + \Sigma_{1-2} \Phi_1 - \Sigma_{a,2} \Phi_2,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \beta_{\text{eff}} \sum_{g=1}^2 (\nu \Sigma_f)_g \Phi_g - \lambda C,$$

式中:  $v_1$  为快群中子速度;  $D_1$  为快群扩散系数;  $\Phi_1$  为快群中子通量;  $\Sigma_{t,1}$  为快群总截面;  $\beta_{\text{eff}}$  为缓发中子有效份额;  $(\nu \Sigma_f)_1$  为快群裂变截面;  $(\nu \Sigma_f)_2$  为热群裂变截面;  $\Phi_2$  为热群中子通量;  $\lambda$  为缓发中子衰减常数;  $C$  为缓发中子先驱核浓度;  $v_2$  为热群中子速度,  $D_2$  为热群扩散系数;  $\Phi_2$  为热群中子通量;  $\Sigma_{1-2}$  为快群的转移截面;  $\Sigma_{a,2}$  为热群吸收截面。

对上述瞬态方程做一阶微扰和傅里叶变换有<sup>[12-15]</sup>:

$$-\nabla \cdot D_1 \nabla \delta \Phi_1 + \left( \Sigma_{t,1} + \frac{i\omega}{v_1} \right) \delta \Phi_1 -$$

$$\left( 1 - \frac{i\omega \beta_{\text{eff}}}{\lambda + i\omega} \right) \frac{1}{k_{\text{eff}}} \sum_{g=1}^2 (\nu \Sigma_f)_g \delta \Phi_g = \delta S_1,$$

$$-\nabla \cdot D_2 \nabla \delta \Phi_2 - \Sigma_{1-2} \delta \Phi_1 + \left( \Sigma_{a,2} + \frac{i\omega}{v_2} \right) \delta \Phi_2 = \delta S_2;$$

其中:

$$\delta S_1 = -\delta \Sigma_{t,1} \bar{\Phi}_1 + \left( 1 - \frac{i\omega \beta_{\text{eff}}}{\lambda + i\omega} \right) \frac{1}{k_{\text{eff}}} \sum_{g=1}^2 \delta (\nu \Sigma_f)_g \bar{\Phi}_g,$$

收稿日期: 2016-12-08; 修改日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11475150)

作者简介: 袁宝新(1988-), 男, 湖北黄冈人, 助研, 硕士, 从事反应堆运行与物理研究; Email: bxyuan@caep.cn.

$$\delta S_2 = \delta \Sigma_{1-2} \overline{\Phi}_1 - \delta \Sigma_{a,2} \overline{\Phi}_2,$$

式中： $\delta \Phi_1$ 为快群中子微扰通量； $\omega$ 为当前求解的频点； $k_{\text{eff}}$ 为堆芯的有效增殖系数； $\delta \Phi_2$ 为热群中子微扰通量； $\delta \Sigma_{t,1}$ 为快群总微扰截面； $\overline{\Phi}_1$ 为快群稳态通量； $\delta(\nu \Sigma_f)_1$ 为快群裂变微扰截面； $\delta(\nu \Sigma_f)_2$ 为热群裂变微扰截面； $\overline{\Phi}_2$ 为热群稳态通量； $\delta \Sigma_{1-2}$ 为快群转移微扰截面； $\delta \Sigma_{a,2}$ 为热群吸收微扰截面。

在瞬态分析中伴随通量有很重要的应用，参数缓发中子有效份额  $\beta_{\text{eff}}$  的计算就需要用到伴随通量。考虑双群模型的三维中子扩散方程的伴随方程形式为

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot D_1 \nabla \Phi_1^* + \Sigma_{t,1} \Phi_1^* \\ & = \Sigma_{1-2} \Phi_2^* + \frac{(\nu \Sigma_f)_1}{k_{\text{eff}}^*} \sum_{g=1}^2 \chi_{g'}^* \Phi_{g'}^*, \\ & -\nabla \cdot D_2 \nabla \Phi_2^* + \Sigma_{t,2} \Phi_2^* = \frac{(\nu \Sigma_f)_2}{k_{\text{eff}}^*} \sum_{g=1}^2 \chi_{g'}^* \Phi_{g'}^*, \end{aligned}$$

式中： $\Phi_1^*$ 为快群中子伴随通量； $\Phi_2^*$ 为热群中子伴随通量； $k_{\text{eff}}^*$ 为堆芯的有效伴随增殖系数； $\chi_{g'}^*$ 为第  $g'$  能群的裂变份额。

### 3 程序结构

图 1 给出了程序结构，程序首先读取前处理软件 ICEM-CFD 的网格输出文件获取所计算问题的几何，根据用户选择做通量计算或伴随通量计算，设置相应的材料、边界条件和外源信息，组装对应的系数矩阵，之后程序对所计算的问题赋初始通量/伴随通量、初始  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$ 。根据系数矩阵程序计算各群下一代通量/伴随通量并判断通量/伴随通量是否收敛，没有收敛则继续进行内迭代。内迭代收敛则程序继续计算下一代  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  并判断  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  是否收敛，没有收敛则程序返回继续新一轮外迭代， $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  收敛则程序进行中子噪声分布计算并打印输出计算结果。

### 4 三维基准例题测试

选取国际原子能机构 (IAEA) 发布的三维压水堆基准例题以进行程序的正确性测试，该堆芯的几何布置及各功能区材料的截面数据可参考文献 [16]。使用本文开发的计算程序对该基准例题进行  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  和功率分布的计算测试， $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  的测试结果如表 1 所列，功率分布的测试结果如图 2 所示。

从表 1 的  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  测试结果来看， $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  的计算值和参考值的偏差基本落在了国际上主流的差分程序对该  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  的计算误差区间之内。从图 2 功率分布的测

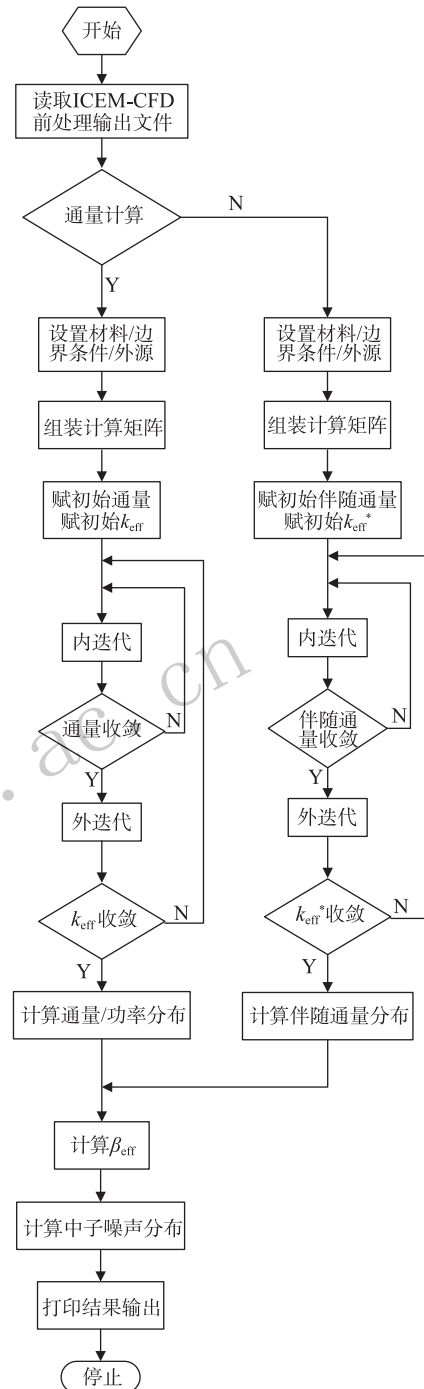


图 1 程序结构

试结果来看，内层燃料组件的功率计算误差较小，外层靠近反射层的燃料组件功率计算值和参考值之间的偏差偏大，分析主要有两个方面的原因：(1) 位于反射层组件的网格在径向外边界使用的是真空边界条件，该条件中使用的外推距离也引入了一定的误差。(2) 有限元程序对机器内存的消耗很大，为简化计算、减轻机器负担，本例题的单元划分比较粗糙，通过进一步缩小单元尺寸可减小该误差，这将在本文第 5 部分二维基准例题

的测试中得以验证。

表 1 程序IAEA-3D PWR  $k_{eff}/k_{eff}^*$ 测试结果

项目	参考值/计算结果(偏差)
$k_{eff}/pcm$	1.029 01/1.029 06(5)
$k_{eff}^*/pcm$	1.029 01/1.030 61(151)

0.726 4					
0.682 3					
6.4%					
1.274 2	1.389 9				
1.169 7	1.282 7				
8.7%	8.2%				
1.415 6	1.424 8	1.362 7			
1.318 2	1.327 4	1.276 1			
7.3%	7.3%	6.7%			
1.188 4	1.285 6	1.306 5	1.175 1		
1.118 9	1.219 2	1.251 1	1.141 2		
6.2%	5.6%	4.6%	3.1%		
0.609 7	1.068 5	1.178 5	0.970 2	0.476 6	
0.609 0	1.042 7	1.163 6	0.962 9	0.496 3	
0.2%	2.7%	1.5%	0.9%	4.3%	
0.952 4	1.054 3	1.088 8	0.923 8	0.701 5	0.601 7
0.964 3	1.070 8	1.112 8	0.952 6	0.733 1	0.667 5
1.2%	1.5%	2.2%	3.2%	4.7%	11.8%
0.960 7	0.976 8	1.001 6	0.869 8	0.615 0	
1.008 4	1.026 5	1.056 5	0.944 0	0.687 1	
5.2%	5.2%	5.7%	9.0%	12.6%	
0.779 8	0.760 0	0.715 2	— 参考值		
0.858 7	0.837 7	0.805 0	— 计算值		
10.5%	10.7%	13.2%	— 误差%		

图 2 程序IAEA-3D PWR堆芯功率分布测试结果

使用本文开发的计算程序对该基准例题进行伴随通量分布的计算测试, 轴向中心平面上的快群和热群伴随通量的分布如图3和图4所示。定性地说, 相对于快群伴随通量热群伴随通量更向中心集中, 这是由于快群的扩散系数较大, 边缘处的快中子更容易回到堆芯中, 这与伴随通量的物理概念是一致的。

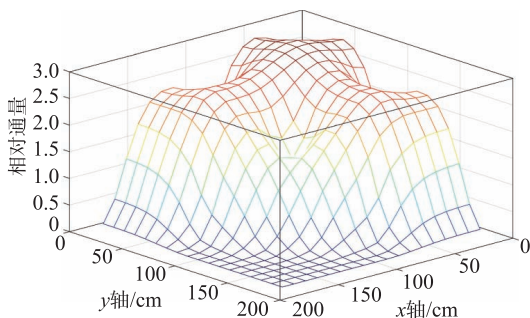


图 3 IAEA-3D 轴向中心平面快群伴随通量分布

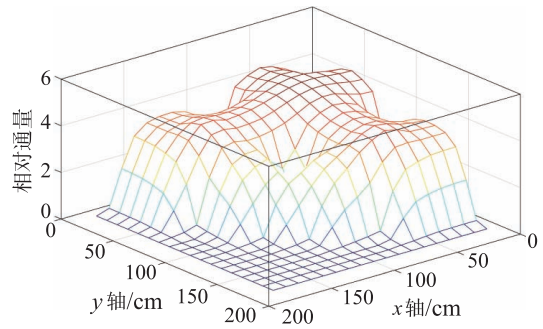


图 4 IAEA-3D 轴向中心平面热群伴随通量分布

### 5 二维基准例题测试

同样选取IAEA发布的二维压水堆基准例题以进行程序的正确性测试, 该堆芯的几何布置及各功能区材料的截面数据可参考文献[16]。使用本文编写的计算程序对该基准例题进行  $k_{eff}/k_{eff}^*$  和功率分布的计算测试,  $k_{eff}/k_{eff}^*$  的测试结果如表2所列, 功率分布的测试结果如图5所示。

表 2 程序IAEA-2D PWR  $k_{eff}/k_{eff}^*$  测试结果

项目	参考值/计算结果(偏差)
$k_{eff}/pcm$	1.029 59/1.029 55(4)
$k_{eff}^*/pcm$	1.029 59/1.031 20/(152)

0.744 9					
0.738 0					
0.93%					
1.310 0	1.435 1				
1.296 7	1.421 8				
1.02%	0.93%				
1.454 0	1.479 8	1.469 3			
1.441 5	1.468 2	1.459 7			
0.86%	0.79%	0.65%			
1.210 9	1.314 9	1.345 2	1.192 8		
1.202 9	1.307 4	1.339 2	1.189 6		
0.66%	0.57%	0.45%	0.27%		
0.609 8	1.069 8	1.179 2	0.967 0	0.470 5	
0.609 3	1.067 6	1.178 1	0.967 0	0.472 3	
0.07%	0.21%	0.10%	0.00%	0.38%	
0.935 3	1.036 1	1.070 5	0.906 6	0.685 5	0.584 9
0.937 9	1.039 2	1.074 0	0.910 2	0.689 5	0.591 1
0.28%	0.30%	0.33%	0.40%	0.59%	1.06%
0.934 5	0.950 3	0.974 9	0.854 9	0.596 9	
0.941 3	0.957 4	0.982 3	0.854 0	0.604 4	
0.73%	0.75%	0.76%	0.10%	1.25%	
0.755 1	0.735 7	0.692 0	— 参考值		
0.765 4	0.745 9	0.702 2	— 计算值		
1.37%	1.38%	1.47%	— 误差%		

图 5 程序IAEA-2D PWR堆芯功率分布测试结果

从表 2 的  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  测试结果来看,  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  的计算值和参考值的偏差分别为 4, 161 pcm, 基本落在了国际上主流的差分程序对该  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  的计算误差区间之内。从图 5 功率分布的测试结果来看, 功率计算误差很小, 其主要原因是二维计算其网格数目远小于三维计算, 在机器内存可支持的范围内可以把网格尺寸划分得很小 (1 cm 量级), 这也侧面验证了三维计算中关于功率分布计算误差的讨论。

同样, 使用本文开发的计算程序对该基准例题进行伴随通量分布的计算测试, 在轴向中心平面上的快群和热群伴随通量的分布如图 6 和图 7 所示, 对其结果的讨论同三维基准例题测试的结果。

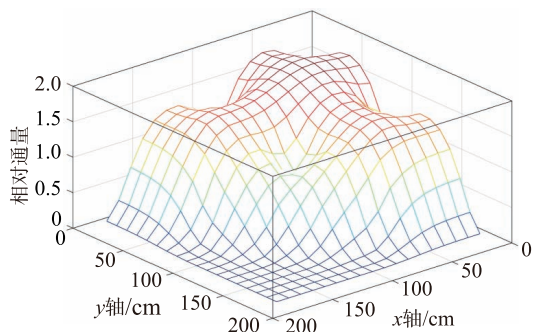


图 6 IAEA-2D 快群伴随通量分布

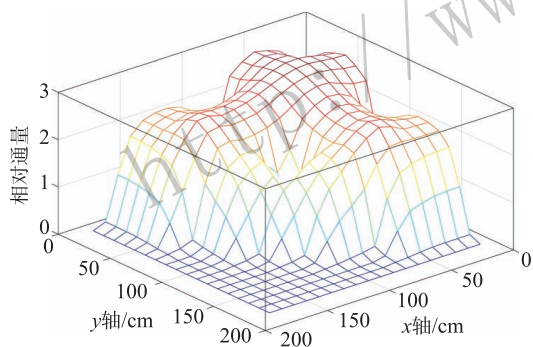


图 7 IAEA-2D 热群伴随通量分布

### 6 反应堆中子噪声频谱初步计算

采用第二节介绍的计算方法, 对 IAEA 发布的三维压水堆基准例题进行中子噪声频谱计算, 表 3 给出了在轴向高度 360 至 380 cm 位置的材料 (反射层+控制棒) 扰动截面数据, 该扰动为阶跃扰动。对其进行中子噪声频谱计算, 给定频点值为 0.1 Hz, 图 8 和图 9 分别为轴向 370 cm 处  $xy$  平面该频点的快群中子噪声分布实部和虚部计算结果, 图 10 和图 11 分别为轴向 370 cm 处  $xy$  平面该频点的热群中子噪声分布实部和虚部计算结果。改变给定频点的频率, 重复这一过程, 即可计算扫描得到用户关心的特定频段的中子噪声频谱。

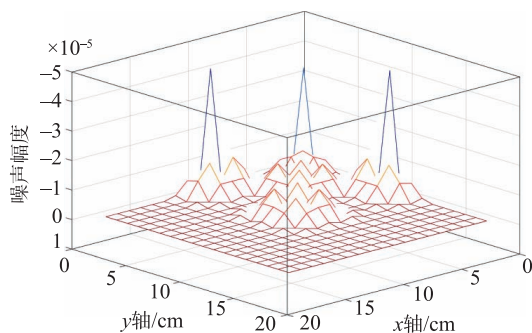


图 8 快群中子噪声实部

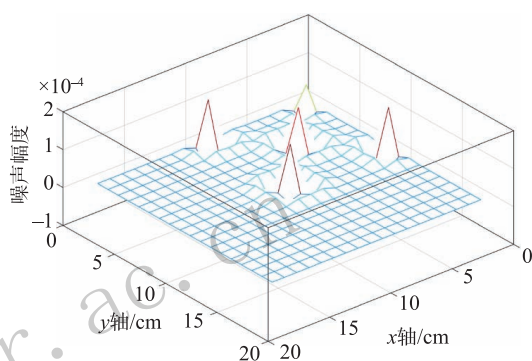


图 9 快群中子噪声虚部

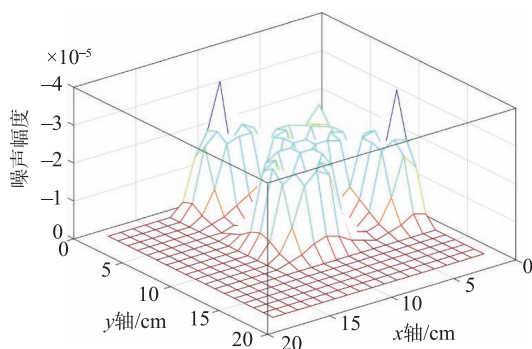


图 10 热群中子噪声实部

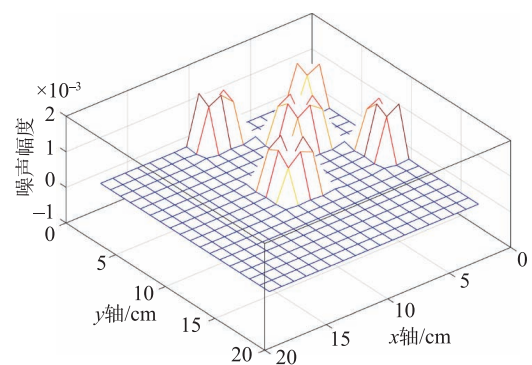


图 11 热群中子噪声虚部

表3 两群微扰截面

材料	能群	$D_g$	$\Sigma_{ag}$	$\nu\Sigma_{fg}$	$\Sigma_{s1-2}$
反射层+控制棒	1	0.000	0.000 05	0.000 04	0.000 02
	2	0.000	0.000 06	0.000 03	—

## 7 结论和展望

开发了基于ICEM-CFD的核噪声分析用有限元程序,使用国际上通用的压水堆基准例题进行了 $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$ 、功率分布和伴随通量的数值校验。计算结果表明,本文采用的计算方法以及程序的稳态计算结果是可信的。通过给定频点值,实现了该频点下的反应堆中子噪声空间分布计算。通过计算扫描,可以得到用户关心的特定频段的中子噪声频谱,从而为反应堆的运行监测和故障诊断提供理论输入。下一步将在频谱分析以及JAUMIN框架下并行扩展等方面进一步开展工作。

### 参考文献:

- [1] TU Zhuguo, TANG Yuren, HUANG Aixiang, *et al.* Chin J Nuc Sci Eng, 1983, **3**(2): 115.
- [2] GU Lizhen, WANG Yongqing, YU Suhua, *et al.* J Tsinghua Univ Sci Technol, 1980, **20**(4): 97.
- [3] XUE Youyi. Nucl Power Eng, 1981, **2**(2): 10.
- [4] YOSHITAKA N, RYUJI K, YUKIO T, *et al.* Prog Nucl Eng, 1986, **18**(1-2): 207.
- [5] FENDER SHUTTLEWORTH E. Ann Nuc Energ, 1981, **8**(11-12): 597.
- [6] WOOD J, WILLIAMS M M R. Prog Nucl Eng, 1984, **14**(1): 21.
- [7] ISSA J G, RIYAIT N S, GODDARD A J H, *et al.* Prog Nucl Eng, 1986, **18**(1-2): 251.
- [8] KEIICHI S. Prog Nucl Eng, 1979, **3**: 157.
- [9] MULLENS J A, THIE J A. Prog Nucl Eng, 1985, **15**: 217-224.
- [10] ZENG Herong, DUAN Shilin, WANG Guanbo, *et al.* Atom Ener Sci Tech, 2013, **47**(1): 97.
- [11] ZENG Herong, PENG Dingming, DUAN Shilin. Ordn Ind Autom, 2006, **25**: 71.
- [12] DEMAZIÈRE C. Ann Nuc Energ, 2011, **38**: 2698.
- [13] VIKTOR L, DEMAZIÈRE C. Ann Nuc Energ, 2012, **43**: 68.
- [14] DEMAZIÈRE C, ANDHILL G. Ann Nuc Energ, 2005, **32**: 812.
- [15] DEMAZIÈRE C, PÁZSIT I. Prog Nucl Eng, 2009, **51**: 67.
- [16] KORDS S. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Applied Nuclear Sciences Engineering, 1979(3): 228.

## Research of Finite Element Code for Nuclear Noise Analysis Based on ICEM-CFD

YUAN Baoxin<sup>1)</sup>, YANG Wankui, ZENG Herong

(China Academy of Engineering Physics, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang, 621900 Sichuan, China)

**Abstract:** The finite element method based on unstructured mesh has good geometry adaptability. It has been used to solve reactor physics problems, manual description of geometric modeling and meshing makes the current finite element code very complicated. It greatly restricts the application of this method in the numerical calculation of reactor physics. Using the CAD pre-processing software ICEM-CFD, tetrahedral or hexahedral mesh subdivision of 3D core geometry is performed, triangular or quadrilateral mesh subdivision of 2D core geometry is performed, the main code of neutron calculation for nuclear noise analysis based on finite element method is developed. The steady state parameters such as flux, adjoint flux and  $k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}^*$  are calculated and tested through benchmark problem, the test results show that the calculation results of the steady state parameters of this code are credible. Finally, the neutron noise spectrum is calculated for the 3D PWR benchmark problem published by IAEA, and the noise distribution under given frequency is given.

**Key words:** ICEM-CFD; nuclear noise; finite element; code

Received date: 8 Dec. 2016; Revised date: 6 Jun. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11475150)

1) E-mail: bxyuan@caep.cn.