

文章编号:1673-0062(2013)04-0013-06

ILU-GCR 算法用于高温气冷堆中子时空动力学实时仿真

宋英明¹,周志伟²,罗 文¹,朱志超¹

(1. 南华大学 核科学技术学院,湖南 衡阳 421001;2. 清华大学 核能与新能源技术研究院,北京 100084)

摘 要:将带不完全 LU 分解预处理的广义共轭残量(ILU-GCR)算法用于高温气冷堆中子时空动力学程序中形状函数的计算,通过与几种经典迭代方法比较,ILU-GCR 算法的优势比较明显,可以达到实时仿真计算要求.对给定功率的高温气冷堆模型,模拟了“弹棒”事故情况下考虑过功率保护与 ATWS 两个过程中堆芯反应性、堆内各能群中子平均注量率、堆芯相对功率、堆内温度等物理量随时间变化,计算结果与理论分析一致.

关键词:ILU-GCR 算法;高温气冷堆;中子时空动力学;实时仿真

中图分类号:TL365

文献标识码:B

Real-time Simulation of Neutron Space-time Kinetics for High-temperature Gas-cooled Reactor by ILU-GCR Algorithm

SONG Ying-ming¹,ZHOU Zhi-wei²,LUO Wen¹,ZHU Zhi-chao¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. The Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the neutron space-time kinetics computation program for High-Temperature Gas-Cooled Reactor, Generalized Conjugate Residual algorithm pretreated by incomplete LU decomposition (ILU-GCR) is used for dealing with the shape function. Compared with classical methods, ILU-GCR algorithm has obvious advantages. For the supposable HTGR model, the variance of the core reactivity, the average neutron flux of each group, the relative power and the temperature along with time are computed for the dynamic simulation of the control rod ejection accident under conditions of over power protection and ATWS.

key words: ILU-GCR algorithm; HTGR; neutron space-time kinetics; real-time simulation

收稿日期:2013-08-23

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(2008ZX06902-006);南华大学博士启动基金资助项目(2012XQD58)

作者简介:宋英明(1980-),男,山东德州人,南华大学核科学技术学院讲师,博士.主要研究方向:先进核能技术、核反应堆仿真.

作为国家重大科技专项的高温气冷堆是一种安全性好、可用于高效发电和高温供热的先进反应堆,也是公认的具有四代特征的核电技术^[1]. 高温气冷堆示范电站的模拟仿真研究是当前一个重要课题,而堆芯中子时空动力学仿真是核电站全范围仿真实实现的基础^[2]. 对于模块式高温气冷堆,堆芯为球形燃料组件,整个堆芯为圆柱状几何结构,以氦气作冷却剂,石墨作慢化剂,中子慢化过程较压水堆要复杂^[3],其中子注量率通常采用 4 群描述,而压水堆一般采用 2 群^[4]. 用改进准静态方法进行核反应堆堆芯中子学动态模拟,能够避免直接求解三维中子时空动力学方程^[5].

基于改进准静态方法,笔者自主开发了高温气冷堆三维圆柱几何堆芯多群中子时空动力学计算程序系统^[6];利用集总参数法,将全堆划分为燃料颗粒、等效慢化剂和反射层 3 个区域,建立了堆芯温度反馈的热工模型,可模拟高温气冷堆堆芯物理参数瞬态变化过程^[7]. 在自主开发的高温气冷堆中子时空动力学改进准静态方法计算程序中,本文将带不完全 LU 分解预处理的广义共轭残量(ILU-GCR)算法用于求解 7 对角的大型稀疏矩阵,大大提高了形状函数内迭代计算的速度和精度,实现了高温气冷堆三维中子时空动力学的实时仿真计算.

1 高温气冷堆堆芯物理模型

使用 250 MW 核功率的高温气冷堆模型,堆芯(r - z)坐标剖面如图 1 所示,全堆共分 180 个区,各区材料的分群参数通过 VSOP 程序计算给出. 中子注量率分 4 个能群,其能量范围和平均速率见表 1. 取 6 组缓发中子,其所占份额和先驱核衰变常数见表 2.

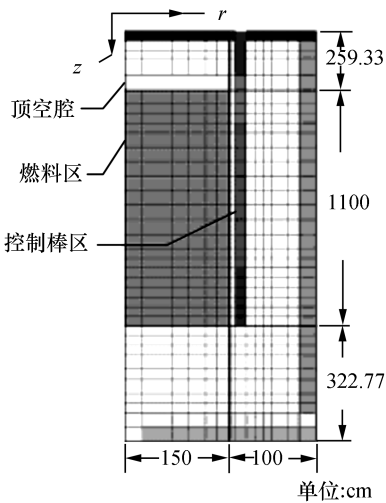


图 1 堆芯(r - z)坐标示意图

Fig.1 Layout of the reactor core for (r - z) coordinates

表 1 各群的能量范围、 χ_g 值及平均速率

Table 1 Energy bounds, χ_g value and average velocities of each group

能群号(g)	能量范围	χ_g 值	平均速率/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	$E \geq 0.111 \text{ MeV}$	$9.843\ 9 \times 10^{-1}$	1.0×10^7
2	$0.111 \text{ MeV} \geq E \geq 130.073 \text{ eV}$	$1.561\ 5 \times 10^{-2}$	5.7×10^5
3	$130.073 \text{ eV} \geq E \geq 1.855 \text{ eV}$	$6.516\ 4 \times 10^{-5}$	4.8×10^4
4	$1.855 \text{ eV} \geq E \geq 0 \text{ eV}$	0.0	4.3×10^3

表 2 缓发中子份额及其先驱核衰变常数

Table 2 Delayed neutrons quotients and the decay constants of their precursors nuclei

组号 (i)	缓发中子份额 (β_i)	先驱核衰变常数 (λ_i)
1	1.97×10^{-4}	0.012 729 43
2	1.97×10^{-4}	0.031 470 82
3	1.04×10^{-3}	0.118 416 8
4	2.18×10^{-3}	0.316 526 8
5	7.16×10^{-4}	1.409 255
6	1.41×10^{-4}	3.767 754

注: $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i = 0.005\ 49$

2 求解形状函数的 ILU-GCR 算法

改进准静态计算过程中,求解中子注量率的计

算量主要在对形状函数进行数值求解,将 r, θ, z 三个方向变量离散,写出差分格式方程,得线性方程组:

$$A\Psi = S$$

(1)

系数矩阵 A 是一个大型非奇异的 7 对角稀疏矩阵,由于实际问题中, r, z 方向网格划分并不均匀,因此矩阵 A 不对称. 根据变分迭代方法,第 i 次迭代的残向量:

$$\boldsymbol{r}^{(i)} = \boldsymbol{S} - \boldsymbol{A} \boldsymbol{\Psi}^{(i)} \tag{2}$$

选取方向向量 $\boldsymbol{q}^{(i)}$,使其在 $\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A}$ -范数的意义下相互正交,即:

$$(\boldsymbol{A} \boldsymbol{q}^{(i)}, \boldsymbol{A} \boldsymbol{q}^{(j)}) = 0, i \neq j \tag{3}$$

利用这种方向向量可以构造广义共轭残量 (GCR) 法^[8],其迭代过程如下:

第一步,计算 $\boldsymbol{r}^{(0)} = \boldsymbol{S} - \boldsymbol{A} \boldsymbol{\Psi}^{(0)}$,置 $\boldsymbol{p}^{(0)} = \boldsymbol{r}^{(0)}, j = 0$;

第二步,计算参数 $\alpha_j = (\boldsymbol{r}^{(j)}, \boldsymbol{A} \boldsymbol{p}^{(j)}) / (\boldsymbol{A} \boldsymbol{p}^{(j)}, \boldsymbol{A} \boldsymbol{p}^{(j)})$,更新向量 $\boldsymbol{x}^{(j+1)} = \boldsymbol{x}^{(j)} + \alpha_j \boldsymbol{p}^{(j)}$ 与 $\boldsymbol{r}^{(j+1)} = \boldsymbol{r}^{(j)} - \alpha_j \boldsymbol{A} \boldsymbol{p}^{(j)}$,如果 $\boldsymbol{x}^{(j+1)}$ 达到精度要求,则停止;

第三步,计算 $\beta_{i,j+1} = -(\boldsymbol{A} \boldsymbol{r}^{(j+1)}, \boldsymbol{A} \boldsymbol{p}^{(i)}) / (\boldsymbol{A} \boldsymbol{p}^{(i)}, \boldsymbol{A} \boldsymbol{p}^{(i)})$, $i = 0, 1, \dots, j$;

第四步,计算 $\boldsymbol{p}^{(j+1)} = \boldsymbol{r}^{(j+1)} + \beta_{0,j+1} \boldsymbol{p}^{(0)} + \beta_{1,j+1} \boldsymbol{p}^{(1)} + \dots + \beta_{j,j+1} \boldsymbol{p}^{(j)}$;

第五步,置 $j = j + 1$,转第二步.

采用不完全 LU 分解处理系数矩阵,把 A 分解成 $\tilde{L}$ 和 $\tilde{U}$,它们和 L, U 具有相同的形状,但是,两个因子分别与 A 的上、下三角部分有完全相同的非零结构,这种分解记为 ILU(0). 这里的“0”代表因子分解时产生新的非零元素的个数为零,即不增加新的“0”元素,仍保持矩阵原有的稀疏状态. 预处理后再使用 GCR 算法对线性方程组进行迭代求解,可大幅度提高计算速度,该方法即为 ILU-GCR 算法.

r, θ, z 三个方向离散点数分别取 16、24、35,对几种迭代方法求解线性方程组进行比较,如表 3 所示.

表 3 几种迭代方法比较

Table 3 Comparison of the iterative methods		
迭代方法	迭代次数	所需时间/s
ILU-GCR	5	0.062 5
Jacobi	289	1.963 6
Gauss-Seidel	203	1.379 2
SOR($\omega = 1.10$)	159	1.080 3
SOR($\omega = 1.15$)	138	0.937 6
SOR($\omega = 1.25$)	123	0.835 7
SOR($\omega = 1.30$)	145	0.985 2
SOR($\omega = 1.35$)	—	—

可见, Jacobi 方法为简单迭代法,所需迭代次数最多,迭代时间最长; Gauss-Seidel 方法在其基

础上有所改进,但收效不大; SOR 比前两种方法都要好一些,但是它的迭代时间和迭代次数取决于超松弛因子 ω 的选取,如果 ω 选得不好,则可能会使该方法失效. ILU-GCR 算法具有明显的优势,同样精度下,该方法比其它几种迭代法在计算速度上要快 1~2 个数量级.

3 计算过程的实时性分析

仿真计算过程中,前一时刻的计算值作为当前时刻的初值,而当前时刻的计算值作为下一时刻的初值,依次递推. 每一时间步的迭代初值都使用上一时刻计算出的形状函数,因此每一步的形状函数迭代次数可以取 1^[9].

定义实时富余度的概念:

$$\delta = \frac{\Delta t_s - \Delta t}{\Delta t_s} \times 100\% \tag{4}$$

式中, Δt_s 为仿真计算时间步长, Δt 为每步实际计算所用时间.

内迭代取不同精度的情况下,使用 Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU@ 3.2 GHz, 4.00 GB 内存的计算机在 Compaq Visual Fortran 6 环境下运行本程序,取动态计算的时间步长 $\Delta t_s = 0.25$ s,模拟计算 10 s 内的动态过程,实时仿真计算情况见表 4 所示. 从所花费的计算机时间上来看,已经达到实时仿真计算的要求.

表 4 实时仿真计算情况

Table 4 Cases of the real-time simulation			
内迭代精度	单步所用时间/s	总共所用时间/s	实时富余度
1×10^{-3}	0.069 5	2.78	72.2%
1×10^{-4}	0.094 3	3.77	62.3%
1×10^{-5}	0.117 5	4.70	52.3%
1×10^{-6}	0.145 7	5.83	41.7%

4 “弹棒”事故仿真计算结果

“弹棒”事故是压水堆安全分析中要考虑的严重事故,对于模块式高温气冷堆来说,这一事故情况也是存在的. 高温气冷堆使用的是 B4C 控制棒,主要吸收热中子,是假设在 0.5 s 内,某根控制棒由于压力作用或其它原因从侧反射层弹出,模型中侧反射层作了均匀化处理, θ 方向分 24 个网格,通过改变 θ 方向 1 个网格($0 \leq \theta < \pi/12$)控制棒区的第 4 群宏观吸收截面来模拟单根控制棒弹出这一过程,即在 0.5 s 内令该网格第 4 群宏观吸收截面降为 0.

4.1 考虑过功率保护的情况

考虑 120% 的过功率保护情况,即堆功率上升到 120% 时,触发过功率保护信号,使控制棒下插,引入负反应性,假定动作时间为 30 s. 同时,氦气风机立刻关闭,假定关闭时间为 50 s. 通过改变整个控制棒区第 4 群宏观吸收截面模拟控制棒下插过程. 使用高温气冷堆中子时空动力学仿真程序对这一过程进行模拟计算. 图 2a、b 和 c 分别给出了 0 ~ 500 s 内,反应性 ρ 、相对功率 P 和各能群中子平均注量率的模拟曲线. 图 3a、b 和 c 分别给出了 0 ~ 500 s 内,堆内燃料区、慢化剂区和反射层区平均温度的模拟曲线.

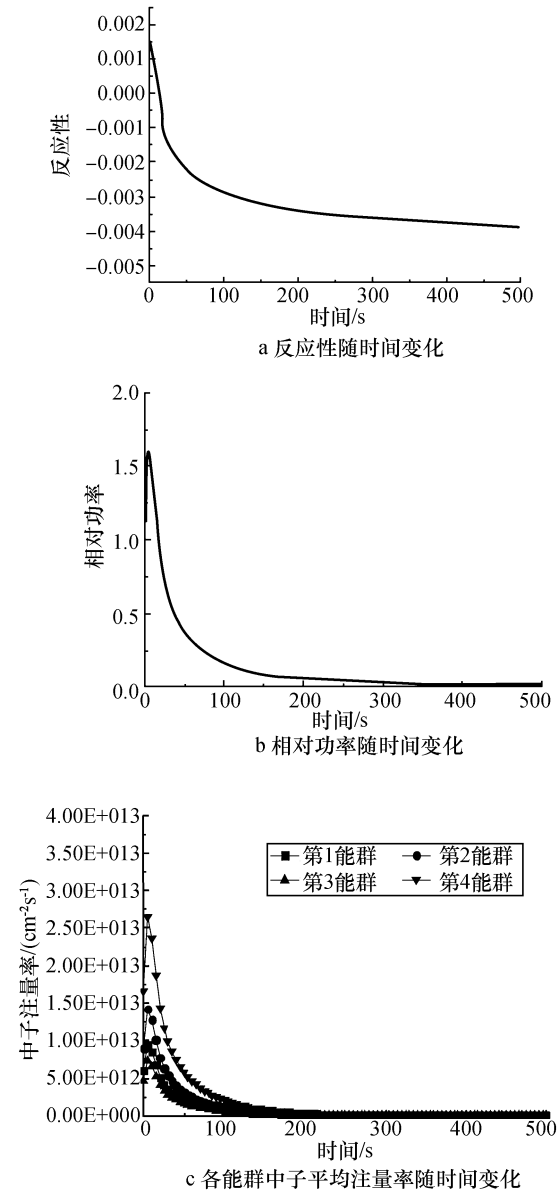


图 2 考虑过功率保护下的堆内各物理量变化曲线
Fig.2 Physical quantity varying for HTGR under the condition of over power protection

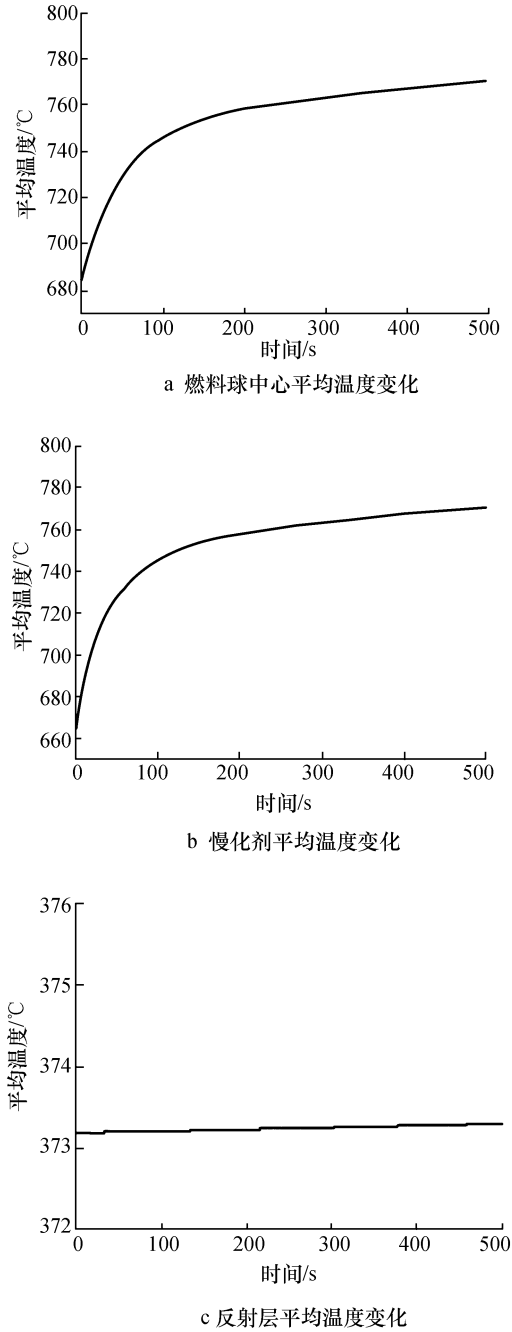


图 3 考虑过功率保护下的堆内各区
平均温度变化曲线
Fig.3 Temperature varying for HTGR under the condition of over power protection

“弹棒”过程中,堆芯在极短的时间内引入一个正反应性,致使反应堆功率快速上升,触发过功率保护信号,控制棒下落,反应性迅速下降. 同时,氦气风机关闭,堆内温度上升,引入负的温度反馈. 堆功率逐渐下降,反应堆停闭.

4.2 ATWS 情况

若不考虑过功率保护动作,“弹棒”情况下出

现了没有紧急停堆的预期过渡过程,即 ATWS (Anticipated Transients Without Scram)事故情况,使用仿真程序模拟计算这一过程.图 4a、b 和 c 分别给出了 0 ~ 500 s 内,反应性 ρ 、相对功率 P 和各能群中子平均注量率的模拟曲线.

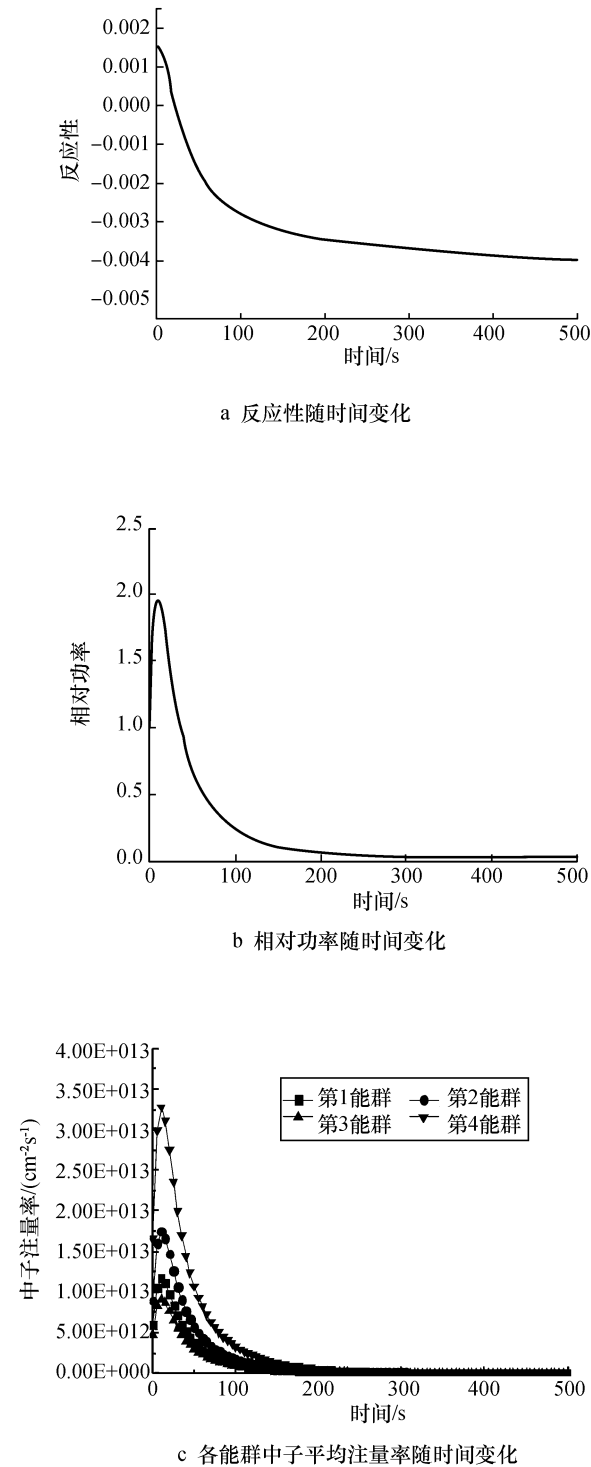


图 4 ATWS 事故下的堆内各物理量变化曲线
Fig. 4 Physical quantity varying for HTGR under the condition of ATWS

图 5a、b 和 c 分别给出了 0 ~ 500 s 内,堆内燃料区、慢化剂区和反射层区平均温度的模拟曲线.

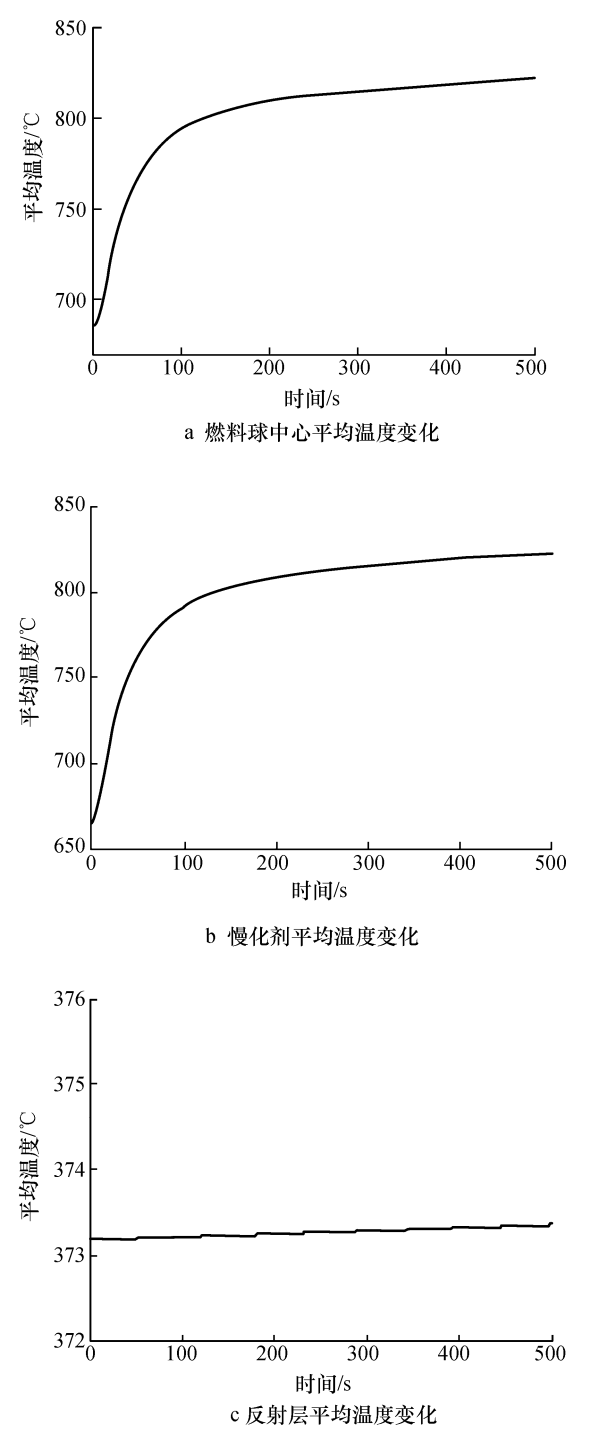


图 5 ATWS 事故下的堆内各区平均温度变化曲线
Fig. 5 Temperature varying for HTGR under the condition of ATWS

ATWS 事故情况下,没有控制棒下插的过功率保护动作,仅靠关闭氦气风机使堆内温度升高提供负反应性来达到停堆的目的.这一过程中,由于没

有直接插棒引入的负反应性,堆内功率的瞬态最大值要高于有保护动作的情况,堆内温度也升得较高.由图可见,仿真结果反映了实际物理过程.

5 结 论

本文通过将计算大型稀疏矩阵的带不完全 LU 分解预处理的广义共轭残量 (ILU-GCR) 算法应用到中子注量率形状函数的求解中,在满足一定的精度要求下,可以实现高温气冷堆中子时空动力学的实时仿真.利用该程序对高温气冷堆的“弹棒”事故下的考虑过功率保护与 ATWS 两个过程分别进行了实时仿真计算,模拟结果与理论分析一致.

参考文献:

[1] 吴宗鑫,张作义.先进核能系统和高温气冷堆[M].北京:清华大学出版社,2004.

[2] Chen Y, You J H, Shao Z J, et al. Simultaneous approach for simulation of a high-temperature gas-cooled reactor [J]. Journal of Zhejiang University Science A: Applied Physics & Engineering, 2011, 12 (7) : 567-574.

[3] 赵木,马波,董玉杰.球床模块式高温气冷堆核电站特点及推广前景研究[J].能源环境保护,2011,25(5):1-4.

[4] 吴帆,邹沫元,单业余,等.核电厂全范围模拟机测试管理方法及其应用[J].计算机仿真,2012,29(8):305-308.

[5] Ott K O, Meneley D A. Accuracy of quasistatic treatment of spatial reactor kinetics[J]. Nuclear Science and Engineering, 1969, 36(3) : 402-411.

[6] 宋英明,马远乐,单文志,等.高温气冷堆堆芯中子时空动力学模拟计算[J].计算物理,2009,26(6):911-916.

[7] 宋英明,周志伟,马远乐.高温气冷堆温度反馈的集总参数法模拟[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(9):1538-1541.

[8] Sogabe T, Sugihara M, Zhang S-L. An extension of the conjugate residual method to nonsymmetric linear systems [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2009, 226(1) : 103-113.

[9] 宋英明,马远乐,周志伟.高温气冷堆中子时空动力学实时仿真计算[J].原子能科学技术,2010,44(2):188-192.

《南华大学学报(自然科学版)》征稿公告

《南华大学学报(自然科学版)》(ISSN1673-0062, CN43-1442/N)是南华大学主办的综合性学术期刊,国内外公开发行人,主要刊登核工程与核技术、土木工程、机械工程、艺术设计、计算机科学与技术、建筑环境与设备、电气工程、化学工程与工艺、矿物资源工程、生物医学工程、数学、物理学等学科(或专业)的基础研究和应用研究方面的学术论文,不接受教学教改类论文.

本刊不接受代理采编稿件,未在外设立任何采编组稿中心或外联部,作者投稿请参看本刊征稿启事,在本网站投稿系统注册投稿(<http://nhqks.cnjournals.com/zr/ch/index.aspx>).请广大作者勿相信代理游说,不要受骗上当.

本刊为季刊,出版和审稿周期较长,投稿后请作者及时与编辑部保持联系,以免耽误稿件发表.

本刊欢迎校内外专家学者赐稿,尤其欢迎内容新、质量高、有国家和省部级课题资助的论文稿件.

《南华大学学报·自然科学版》编辑部