

EFEN-SP₃ 方法的加速与 并行计算研究

杨文, 郑友琦, 吴宏春, 曹良志, 李云召*

(西安交通大学核科学与技术学院, 陕西 西安 710049)

摘要:针对 EFEN-SP₃ 方法用于全堆芯 pin-by-pin 计算的计算效率仍有待进一步提高的问题, 本文研究了粗网加速方法和空间并行算法。其中, 粗网加速方法以空间、角度和能群在粗网内的中子守恒关系为基础, 通过求解考虑粗网不连续因子的粗网再平衡方程来实现迭代计算的加速; 基于 MPI 的空间并行算法, 通过设计合理的并行方案保证负载均衡和最小化通信量, 以充分发挥并行 CPU 的计算和存储能力, 在保证并行效率的前提下进一步提高程序的计算效率。商用核电站堆芯算例的数值结果表明: 粗网加速的加速比约为 40; 空间并行可在 40 个核的情况下保持 60% 以上的并行效率; 在采用粗网加速的 48 核(主频为 2.40 GHz)并行计算条件下, 4 群、空间网格为 289×289×218 的压水堆全堆芯 pin-by-pin 计算用时约为 100 s。

关键词: EFEN-SP₃ 方法; 全堆芯 pin-by-pin 计算; 粗网加速; 空间并行

中图分类号: TL329

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)S1-0664-04

doi: 10.7538/yzk.2013.47.S1.0664

Acceleration and Parallelization Calculation of EFEN-SP₃ Method

YANG Wen, ZHENG You-qi, WU Hong-chun, CAO Liang-zhi, LI Yun-zhao*

(School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Due to the fact that the exponential function expansion nodal-SP₃ (EFEN-SP₃) method needs further improvement in computational efficiency to routinely carry out PWR whole core pin-by-pin calculation, the coarse mesh acceleration and spatial parallelization were investigated in this paper. The coarse mesh acceleration was built by considering discontinuity factor on each coarse mesh interface and preserving neutron balance within each coarse mesh in space, angle and energy. The spatial parallelization based on MPI was implemented by guaranteeing load balancing and minimizing communications cost to fully take advantage of the modern computing and storage abilities. Numerical results based on a commercial nuclear power reactor demonstrate a speedup ratio of about 40 for the coarse mesh acceleration and a parallel efficiency of

收稿日期: 2013-10-23; 修回日期: 2013-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11105104); 863 计划资助项目(2013AA051402)

作者简介: 杨文(1989—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 核科学与技术专业

*通信作者: 李云召, E-mail: yunzhao@mail.xjtu.edu.cn

higher than 60% with 40 CPUs for the spatial parallelization. With these two improvements, the EFEN code can complete a PWR whole core pin-by-pin calculation with 289×289×218 meshes and 4 energy groups within 100 s by using 48 CPUs (2.40 GHz frequency).

Key words: EFEN-SP₃ method; whole core pin-by-pin calculation; coarse mesh acceleration; spatial parallelization

近年来,基于节块 SP_n 方法的压水堆三维全堆芯 pin-by-pin 输运计算已成为研究热点之一^[1]。西安交通大学成功建立了指数函数展开节块 SP₃ 方法(exponential function expansion nodal-SP₃ method, EFEN-SP₃ method),并开发了 EFEN 程序^[2]。然而,全堆芯 pin-by-pin 计算过程中,空间网格的数目较大,迭代计算收敛速度缓慢,且需要大量的存储空间。为有效解决计算效率和存储空间方面的问题,本工作进行粗网加速和空间并行计算研究。

1 理论模型

1.1 EFEN-SP₃ 方法

针对各向同性 SP₃ 方程组^[1-3],采用指数函数展开节块方法同时求解两个耦合的二阶方程,可得节块边界上的分中子流密度矩更新方程:

$$\mathbf{J}_{u^+,g}^{m+} = \boldsymbol{\mu}_{u,g}^m \mathbf{J}_{u^+,g}^{m-} + \boldsymbol{\eta}_{u,g}^m \boldsymbol{\Psi}_g^m + \boldsymbol{\xi}_{u,g}^m \cdot \left(\mathbf{S}_g^m - \frac{\mathbf{J}_{v^+,g}^m + \mathbf{J}_{v^-,g}^m}{h_v} - \frac{\mathbf{J}_{w^+,g}^m + \mathbf{J}_{w^-,g}^m}{h_w} \right) \quad m = 0, 2 \quad (1)$$

和节块内中子通量密度矩的更新方程:

$$\boldsymbol{\Psi}_g^m = \frac{\mathbf{S}_g^m - \mathbf{h}^T (\mathbf{J}_g^{m+} - \mathbf{J}_g^{m-})}{\boldsymbol{\Sigma}_g^m} \quad m = 0, 2 \quad (2)$$

其中: $\mathbf{J}_{u,g}^{m\pm}$ 为第 g 群、交界面 u 的第 m 阶出射(+)或入射(-)分中子流密度矩, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; $\boldsymbol{\Psi}_g^m$ 为第 g 群、第 m 阶节块中子通量密度矩, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; $\boldsymbol{\mu}_{u,g}^m$ 、 $\boldsymbol{\eta}_{u,g}^m$ 、 $\boldsymbol{\xi}_{u,g}^m$ 、 $\boldsymbol{\Psi}_g^m$ 和 \mathbf{S}_g^m 的计算式参见文献^[1]。

1.2 粗网加速方法

粗网粗群内的所有细网细群平衡方程相加,可得到粗网粗群低阶中子平衡方程^[1]:

$$\sum_{L \in \partial(IJK)} \tilde{J}_{G,IJK}^{L,0} S_{IJK}^L + \tilde{\Sigma}_{r,G,IJK} \tilde{\phi}_{G,IJK} V_{IJK} = \sum_{G' \neq G} \tilde{\Sigma}_{s,G' \rightarrow G,IJK} \tilde{\phi}_{G',IJK} V_{IJK} + \frac{\chi_G}{k_{\text{eff}}} \sum_{G'} \tilde{\phi}_{G',IJK} \nu \Sigma_{f,G',IJK} V_{IJK} \quad (3)$$

其中, $\tilde{\phi}_{G,IJK}$ 、 $\tilde{J}_{G,IJK}^{L,0}$ 、 V_{IJK} 、 S_{IJK}^L 、 χ_G 、 $\nu \Sigma_{f,G,IJK}$ 、 $\tilde{\Sigma}_{s,G' \rightarrow G,IJK}$ 和 $\tilde{\Sigma}_{r,G,IJK}$ 分别为粗网粗群的平均中子通量密度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、边界净中子流密度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、体积 (cm^3)、边界表面积 (cm^2)、裂变谱、中子产生截面 (cm^{-1})、散射截面 (cm^{-1}) 和转移截面 (cm^{-1}),其计算式参见文献^[1]。

在考虑不连续因子的情况下,利用矩形差分方法迭代求解分中子流密度和粗网平均通量密度的计算式如下:

$$\tilde{J}_{G,IJK}^{L,0+} = \mu_{G,IJK}^{df} \tilde{J}_{G,IJK}^{L,0-} + \eta_{G,IJK}^{df} \tilde{\phi}_{G,IJK} \quad (4)$$

$$\tilde{\phi}_{G,IJK} = \frac{S - L^{df}}{\eta^{df}} \quad (5)$$

其中:

$$\mu_{G,IJK}^{df} = \frac{1 - \frac{4}{h_{U,IJK}} \tilde{D}_{G,IJK} f_{G,IJK}^L}{1 + \frac{4}{h_{U,IJK}} \tilde{D}_{G,IJK} f_{G,IJK}^L}$$

$$\eta_{G,IJK}^{df} = \frac{2}{h_{U,IJK}} \tilde{D}_{G,IJK} \left(1 + \frac{4}{h_{U,IJK}} \tilde{D}_{G,IJK} f_{G,IJK}^L \right)$$

$$\eta^{df} = \sum_L \frac{\eta_{G,IJK}^{df}}{h_{U,IJK}} + \tilde{\Sigma}_{r,G,IJK}$$

$$L^{df} = \sum_L \frac{\mu_{G,IJK}^{df} - 1}{h_{U,IJK}} \tilde{J}_{G,IJK}^{L,0-}$$

$$f_{G,IJK}^L = \frac{h_{U,IJK} (\tilde{J}_{G,IJK}^{L,0+} - \tilde{J}_{G,IJK}^{L,0-})}{2 \tilde{D}_{G,IJK} (\tilde{J}_{G,IJK}^{L,0+} + \tilde{J}_{G,IJK}^{L,0-})}$$

利用粗网计算结果计算修正因子,修正细网细群物理量。

1.3 空间并行算法

影响并行程序效率的主要因素^[4]有:通信开销;并行计算引起的迭代格式退化;负载平衡度;并行算法引入的冗余计算等。针对 EFEN 程序的并行化^[5]具体包括:增加参数的广播;增加任务分配预处理;修改扫描方式(RBGS 扫描);增加通信及同步操作;增加后处理的通信设计(图 1)。

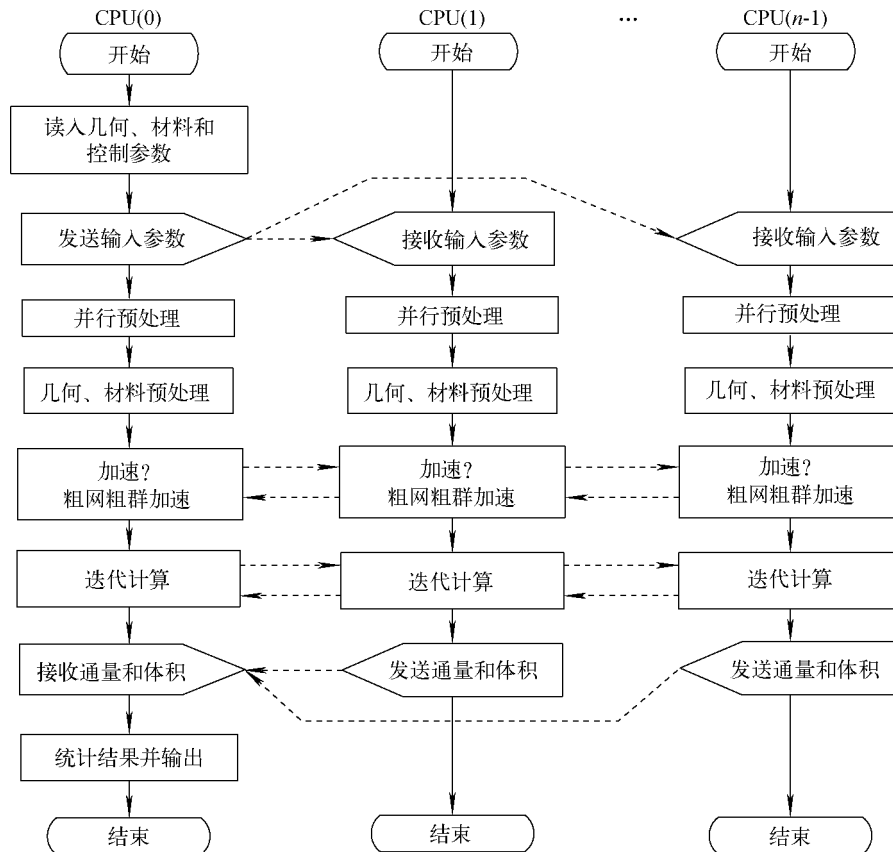


图1 并行EFEN程序的流程图

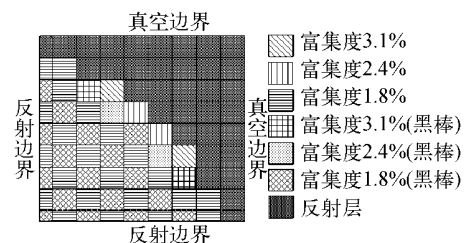
Fig.1 Flow chart of parallelized EFEN code

2 数值验证与分析

依据某商用核反应堆的堆芯,本文设计了压水堆全堆芯 pin-by-pin 输运计算算例。堆芯由6种不同燃料富集度和控制棒布置的矩形燃料组件共计47个构成,径向1/4对称布置如图2所示。每种组件内布置3种栅元,包括264个燃料栅元、24个控制棒栅元和1个导向管栅元;栅元边长为1.2647 cm,高362.6102 cm;反射层外为真空边界条件;轴向下部为对称边界条件,上部为真空边界条件。计算时考虑两种情况:情况1,控制棒插入;情况2,控制棒抽出。各栅元均匀化截面由SRAC程序^[6]计算得到,能群为4群;细网网格划分为 $289 \times 289 \times 218$;参考结果由MCNP程序提供,情况1的 k_{eff} 为0.94183,情况2的 k_{eff} 为1.17924。

粗网加速计算的空间上每个方向的粗网包含4个细网,能群上粗网与细网重合;并行计算的任务分配方式为一维轴向划分。表1、2分别列出了情况1和情况2的计算偏差和计算时间

及粗网加速比和空间并行效率。可看出,粗网加速和空间并行对计算精度的影响不大;粗网加速比约为40;由于通信开销、进程空闲等待时间随着核数的增多而增大,因此空间并行效率必将有下降的趋势,但在40个核时,并行效率仍可保持在60%以上。

图2 压水堆1/4堆芯的pin-by-pin布置结构
Fig.2 Pin-by-pin layout of PWR quarter core

3 结论

通过对压水堆全堆芯 pin-by-pin 算例的计算和分析,验证了三维几何下通过粗网加速方

表1 压水堆 pin-by-pin 算例情况 1 的并行加速效果

Table 1 Parallelization and acceleration results of PWR pin-by-pin problem in case 1

核数(主频为 2.40 GHz)	未加速			加速			
	k_{eff} 相对误差/pcm	计算时间/s	并行效率/%	k_{eff} 相对误差/pcm	计算时间/s	并行效率/%	加速比
1	25	100 167.5	100.0	59	2 286.5	100.0	43.8
8	25	12 918.4	96.9	59	319.2	89.5	40.5
16	25	6 602.1	94.8	59	157.2	90.9	42.0
24	25	4 759.6	87.7	59	119.9	79.4	39.7
32	25	3 856.5	81.2	59	107.8	66.3	35.8
40	25	3 747.7	66.8	59	93.7	61.0	40.0
48	25	3 415.8	60.9	59	84.0	56.7	40.7

表2 压水堆 pin-by-pin 算例情况 2 的并行加速效果

Table 2 Parallelization and acceleration results of PWR pin-by-pin problem in case 2

核数(主频为 2.40 GHz)	未加速			加速			
	k_{eff} 相对误差/pcm	计算时间/s	并行效率/%	k_{eff} 相对误差/pcm	计算时间/s	并行效率/%	加速比
1	180	102 759.8	100.0	136	2 233.7	100.0	46.0
8	180	13 916.2	92.3	138	268.2	104.1	51.9
16	180	7 123.5	90.2	138	150.8	92.6	47.2
24	180	546 703	78.3	138	109.4	85.1	50.0
32	180	4 364.0	73.6	139	85.2	81.9	51.2
40	180	3 821.2	67.2	138	81.5	68.5	46.9
48	180	3 512.2	61.0	138	74.9	62.9	47.4

法和空间并行算法加速求解中子输运方程的能力。粗网加速比约为 40;空间并行在 40 个核时可保持 60%以上的并行效率;在此基础上,EFEN 程序可利用 48 个核(主频为 2.40 GHz)在 100 s 内完成 1 次空间网格为 $289 \times 289 \times 218$ 、能群为 4 群的全堆芯 pin-by-pin 中子输运计算。

参考文献:

- [1] 李云召. 基于变分节块法和节块 SP₃ 方法的先进堆芯中子学计算方法研究[D]. 西安:西安交通大学,2012.
- [2] LI Y Z, WU H C, CAO L Z. A polygonal nodal-SP₃ method for whole core pin-by-pin calculation [C] // M&C2011. Rio de Janeiro, Brazil; [s.

n.], 2011.

- [3] MASAHIRO T, AKIO Y. Advanced PWR core calculation based on multi-group nodal-transport method in three-dimensional pin-by-pin geometry [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2003, 40(6): 376-387.
- [4] 张林波. 并行计算导论[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [5] 都志辉. 高性能计算之并行编程技术:MPI 并行程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [6] OKUMURA K, KUGO T, KANEKO K, et al. SRAC2006; A comprehensive neutronics calculation code system[R]. Japan: Japan Atomic Energy Research Institute, 2007.