



清华大学

Tsinghua University

清华高通量堆全堆输运计算 GPU加速研究

左天赢 | zty23@mails.tsinghua.edu.cn

指导教师 | 余顶

核能与新能源技术研究院 | 反应堆物理、热工与系统模拟研究室 (103室)

2026年5月24日



清华大学
Tsinghua University

目录

- 一、THFR介绍
- 二、全堆输运计算方法论
- 三、全堆输运计算的GPU实现
- 四、数值验证
- 五、结论与展望



清華大學

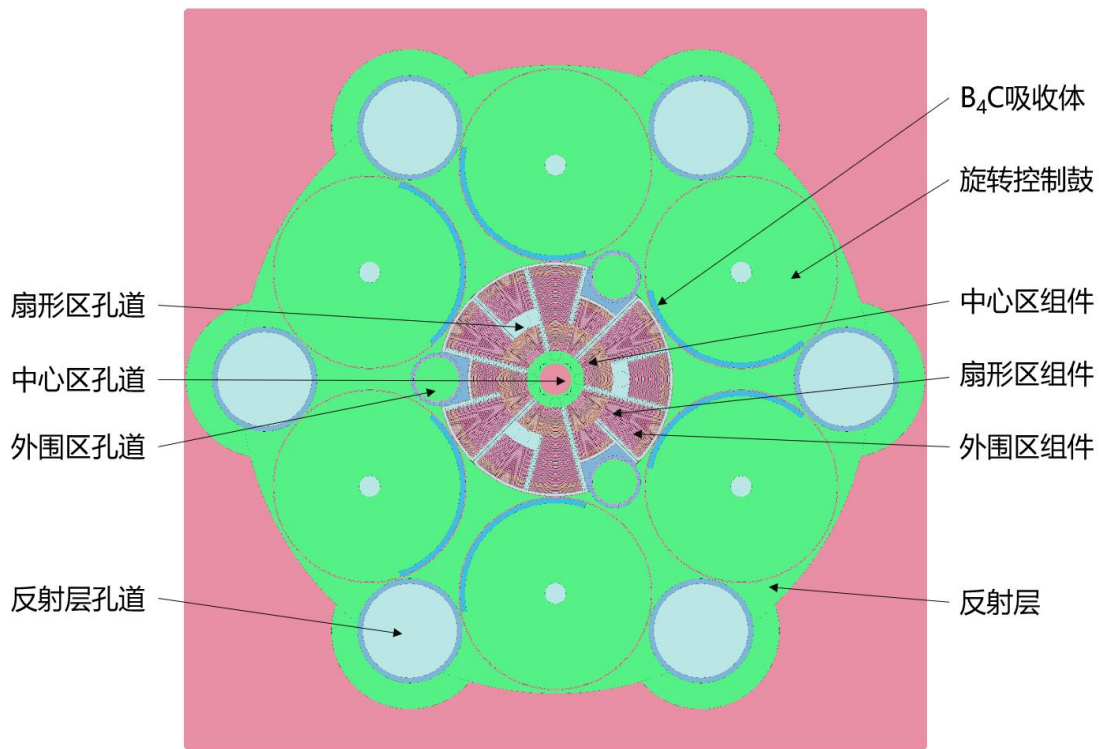
Tsinghua University

一、THFR介绍



一、THFR介绍

1 宽能谱超高通量试验堆（Tsinghua High Flux Reactor, THFR）



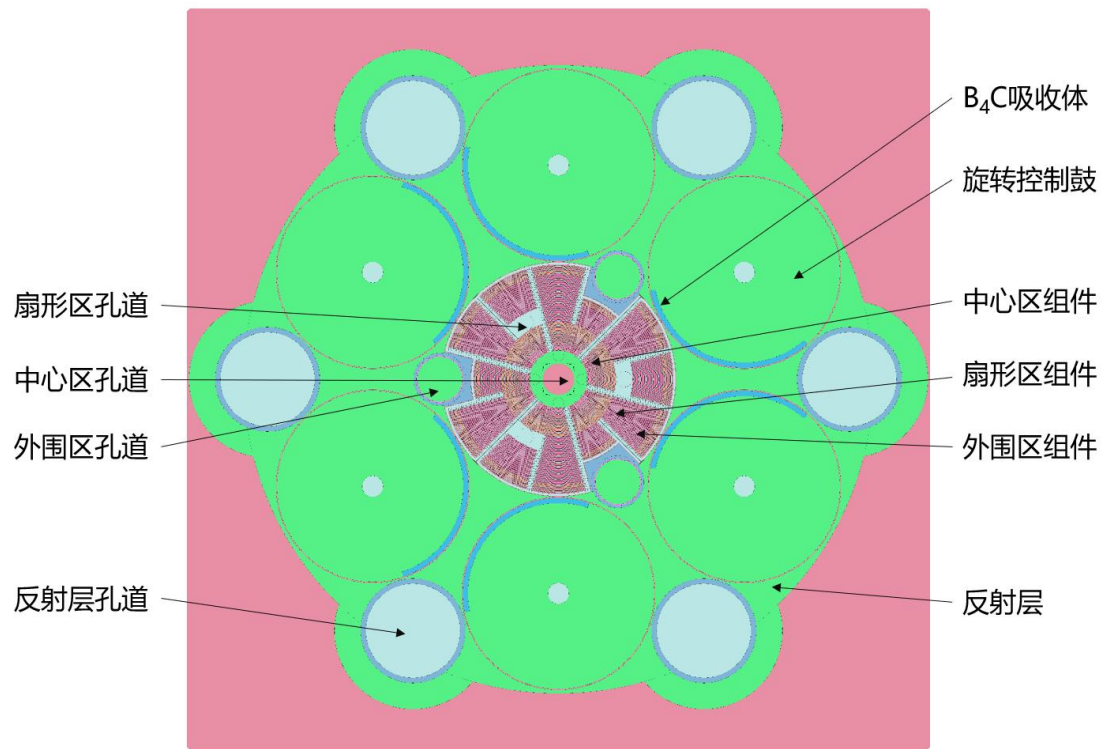
THFR堆芯布置

为了满足国家核科技发展的重大战略需求，清华大学提出建设“**宽能谱超高通量试验堆**”（Tsinghua High Flux Reactor, THFR），并于2021年入选“十四五”国家重大科技基础设施项目。

- 检验核燃料及材料性能
- 规模化生产战略稀缺核素和医用同位素
- 中子科学研究平台



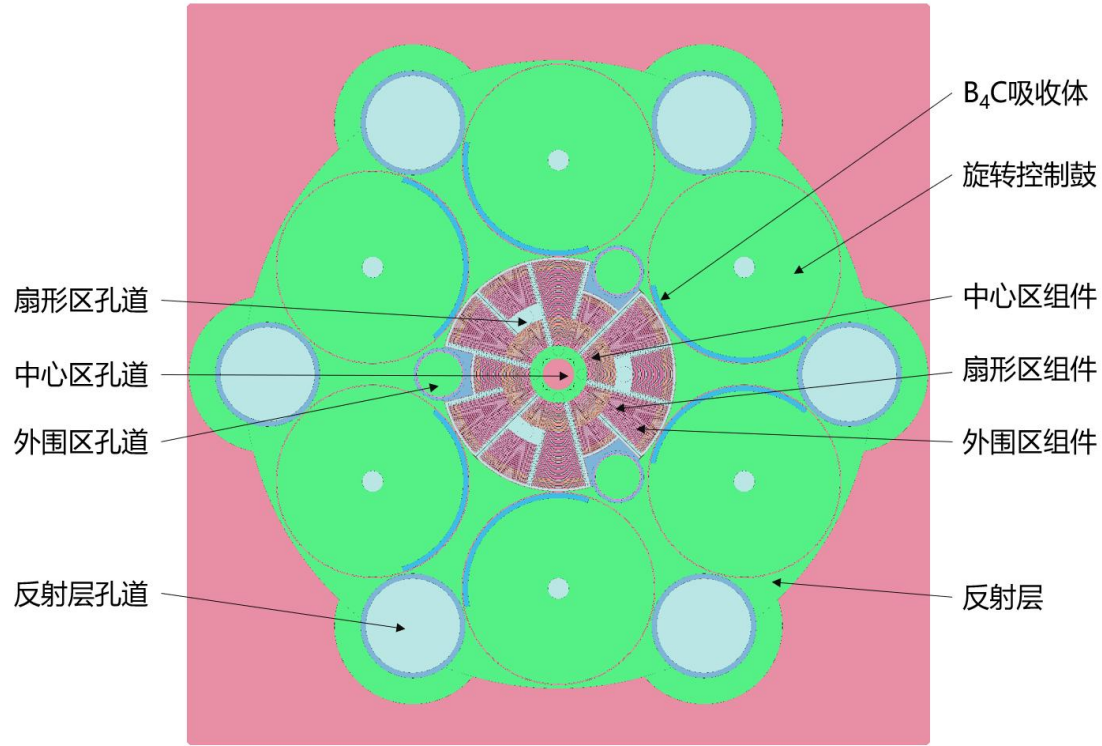
2 THFR设计特点



THFR堆芯布置

- 轻水作为冷却剂和慢化剂
- 铍作为反射层
- 弧板型燃料组件提高燃料装量和通量水平
- 旋转控制鼓调节反应性
- 通量水平高，辐照孔道未扰平均热、快中子通量均大于 $2.0 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，国际先进
- 宽能谱，快热中子分区

3 TFHR物理计算需求



THFR堆芯布置

一、THFR介绍

物理设计计算依赖蒙卡软件

30~40个燃耗步的三维全堆燃耗计算，
需要上万核时的计算资源

研究目的

```
##          ###          #####  ##          ##          #####          ###
##          ##  ##          ##  ##          ##          ##          ##  ##
##          ##          ##          ##          ##          ##          ##          ##
##          ##          #####          ##          ##          ##          ##
##          ##          ##          ##          ##          ##          ##          ##
#####  ##          ##  ##          #####          ##          ##          ##
```

- 开发并完善Laputa程序
- 以确定论程序作为补充，提高设计计算效率
- 用于反应堆在线运行支持平台

研究目标

- 研究适用于THFR堆芯物理计算的方法论
- 在CPU-GPU异构单机上完成全堆燃耗计算，<1小时



清华大学

Tsinghua University

二、全堆输运计算方法论



1 2D-MOC/1D-MOC输运计算方法

2D/1D方法是三维物理计算的主流

直接三维物理计算，没有工业应用的可行性 ❌

- 直接求解三维输运方程
- 计算量大
- 内存需求大



$$\vec{\Omega} \cdot \nabla \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = Q(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$$

$$Q(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') + \frac{\chi(\vec{r}, E)}{4\pi k_{\text{eff}}} \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}')$$

2D/1D方法 ✅

- 多数反应堆径向不均匀性强，轴向不均匀性弱
- 方程的轴向变量依赖性可以做适当近似



- 2D径向求解器：MOC输运为主
- 1D轴向求解器：扩散类、输运类



1 2D-MOC/1D-MOC输运计算方法

- 散射各向同性
- 泄漏项各向同性

三维输运方程

$$\vec{\Omega} \cdot \nabla \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = Q(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$$

$$Q(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}')$$

$$+ \frac{\chi(\vec{r}, E)}{4\pi k_{\text{eff}}} \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}')$$

径向二维方程-MOC求解器

$$\sqrt{1 - \mu_m^2} \left(\cos(\alpha_m) \frac{\partial}{\partial x} + \sin(\alpha_m) \frac{\partial}{\partial y} \right) \phi_{g,m}^Z(x, y) + \Sigma_{t,g} \phi_{g,m}^Z(x, y) = \tilde{Q}_{g,m}^Z(x, y)$$

$$\tilde{Q}_{g,m}^Z(x, y) = Q_{g,m}^Z(x, y) - TL_{g,m}^Z(x, y)$$

$$TL_{g,m}^Z(x, y) = \frac{J_{g,z_T}(x, y) - J_{g,z_B}(x, y)}{4\pi h_z}$$

轴向一维方程-MOC求解器

$$\mu_m \frac{d}{dz} \phi_{g,m}^{XY}(z) + \Sigma_{t,g} \phi_{g,m}^{XY}(z) = \tilde{Q}_{g,m}^{XY}(z)$$

$$\tilde{Q}_{g,m}^{XY}(z) = Q_{g,m}^{XY}(z) - TL_{g,m}^{XY}(z)$$

$$TL_{g,m}^{XY}(z) = \frac{J_{g,x_R} - J_{g,x_L}}{4\pi h_y} + \frac{J_{g,y_R} - J_{g,y_L}}{4\pi h_x}$$



2 3D-CMFD加速计算与少群加速

$$-\nabla \cdot D_g(\vec{r})\nabla\phi_g(\vec{r}) + \Sigma_{t,g}(\vec{r})\phi_g(\vec{r}) = \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}(\vec{r}) \phi_{g'}(\vec{r}) + \frac{\chi_g(\vec{r})}{k_{eff}} \sum_{g'} \nu\Sigma_{f,g}(\vec{r}) \phi_{g'}(\vec{r})$$

三维扩散方程

CMFD加速

CMFD方法 净流守恒:

$$J_g^{i+\frac{1}{2},j,k} = -D_g^{i+\frac{1}{2},j,k} (\phi_g^{i+1,j,k} - \phi_g^{i,j,k}) - D_g^{i+\frac{1}{2},j,k} (\phi_g^{i+1,j,k} + \phi_g^{i,j,k})$$

pCMFD方法 偏流守恒:

$$J_g^{i+1/2,j,k,+} = \frac{-D_g^{i+1/2,j,k} (\phi_g^{i+1,j,k} - \phi_g^{i,j,k}) + 2D_g^{i+1/2,j,k,+} \phi_g^{i,j,k}}{2}$$

$$J_g^{i+1/2,j,k,-} = \frac{D_g^{i+1/2,j,k} (\phi_g^{i+1,j,k} - \phi_g^{i,j,k}) + 2D_g^{i+1/2,j,k,-} \phi_g^{i+1,j,k}}{2}$$

$$J_g^{i+1/2,j,k} = -D_g^{i+1/2,j,k} (\phi_g^{i+1,j,k} - \phi_g^{i,j,k}) - \left(D_g^{i+1/2,j,k,-} \phi_g^{i+1,j,k} - D_g^{i+1/2,j,k,+} \phi_g^{i,j,k} \right)$$

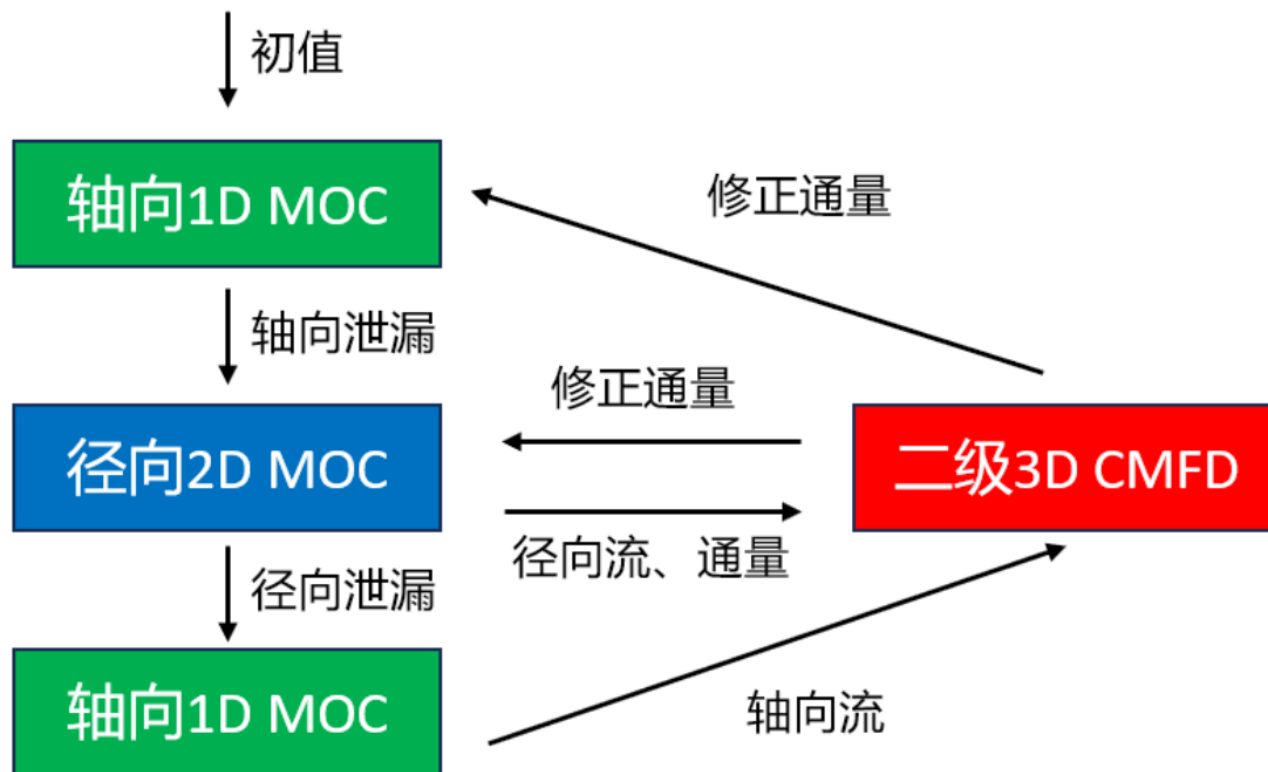
少群CMFD加速

- 自主研发136能群数据库
- 少群划分为7群: 20*6, 16



3 整体迭代方案

- 全计算流程的GPU加速实现
- 完全单精度计算





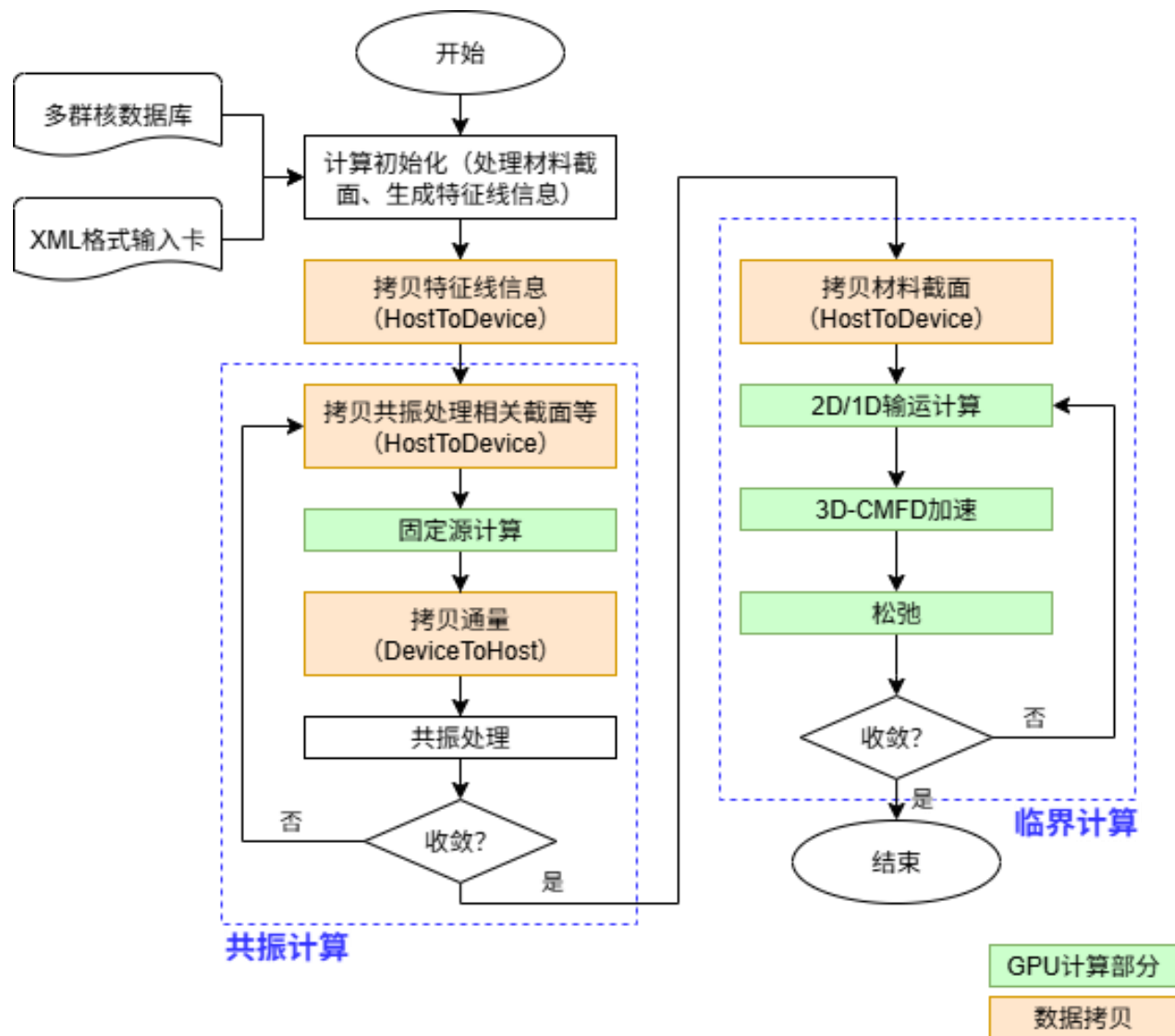
清华大学

Tsinghua University

三、全堆输运计算的GPU实现

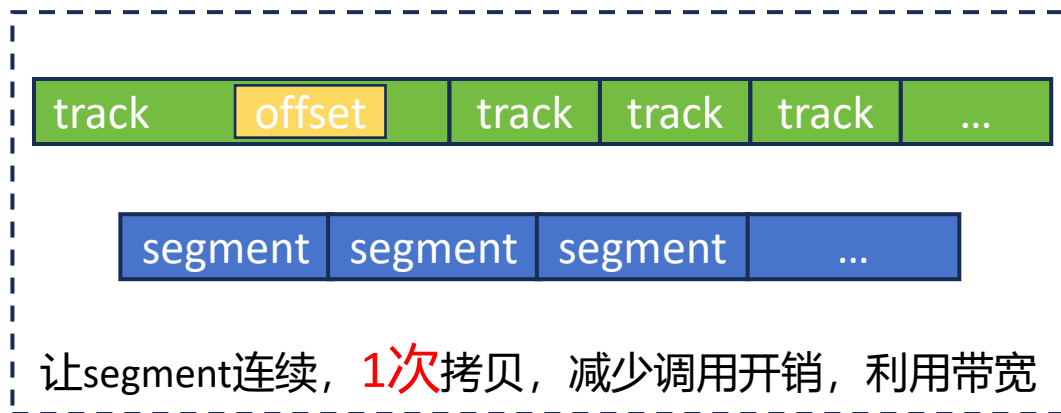
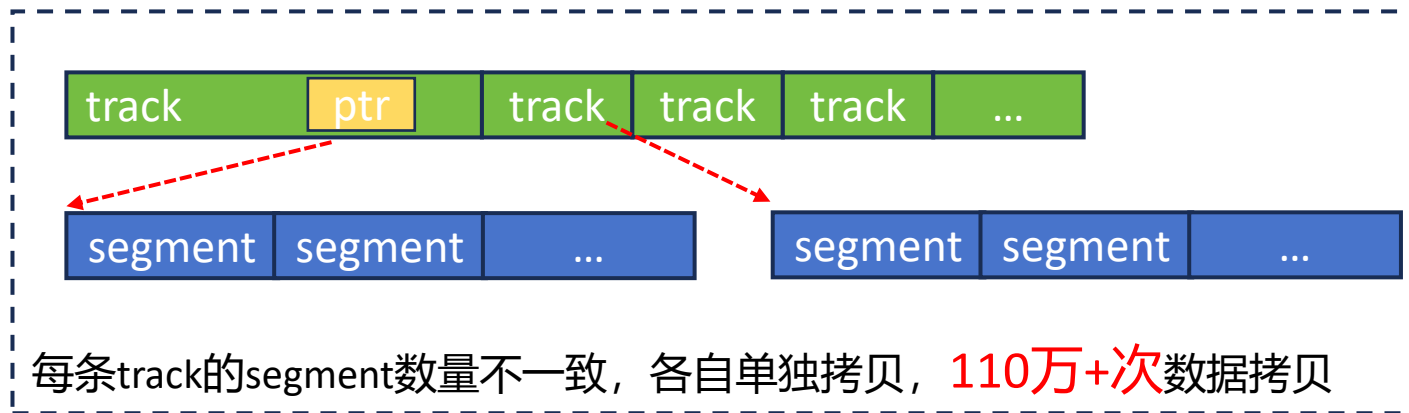


1 全流程GPU加速





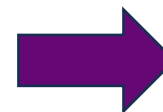
2 特征线 (段) 合并拷贝



C5G7 3D扩展题

- 平源区 **55万+**
- 特征线 **110万+**
- 特征线段 **2亿+**
- 粗网段 **5900万+**

~~1.69 min~~



<2 s



3 kernel函数并行粒度

Kernel函数的功能	并行粒度
径向MOC扫描	特征线-能群
通量操作 (多数, 如计算源项)	平源区/粗网-能群
轴向MOC扫描	轴向单元-能群
粗网系数归并	粗网-能群
CMFD矩阵稀疏填充	粗网-能群
...	...

注：并行粒度为单个CUDA线程处理的任务量



3 线性方程组求解

- cuDSS——直接法
- AmgX——迭代法：预处理、Krylov方法、代数多重网格



- 封装使用
- 根据矩阵稀疏特性等复用部分计算阶段，减少不必要的调用开销
- 线性方程组求解过程加速比有限，本质为内存带宽受限问题



清華大學

Tsinghua University

四、数值验证



四、数值验证

1 C5G7 3D扩展基准题 | 基准题描述

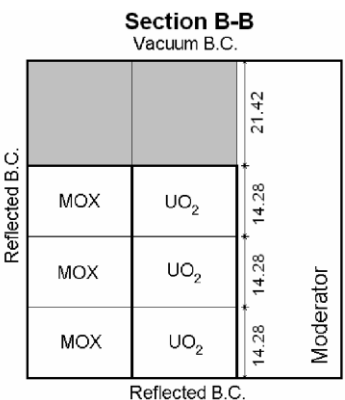
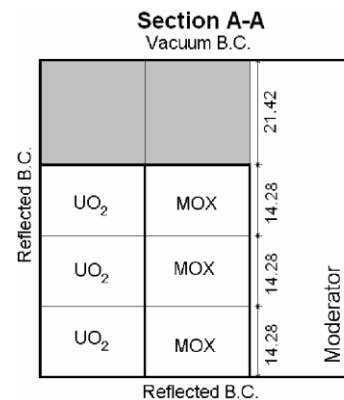
离散设置

- 轴向粗网划分13层
 - 活性区9层
 - 反射层4层
- 轴向粗网内细网划分25层
- 径向粗网划分51×51 (栅元尺寸)
- 方位角32个, 极角3个, 特征线间距0.03cm
- 7群截面
- 收敛准则
 - 通量相对误差小于 10^{-5}
 - K_{eff} 相对误差小于 10^{-6}

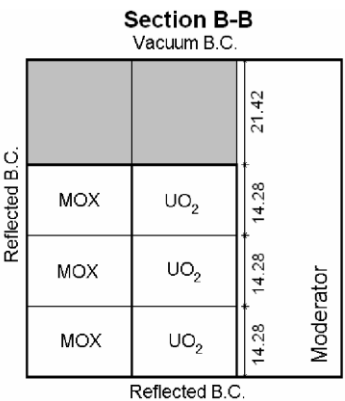
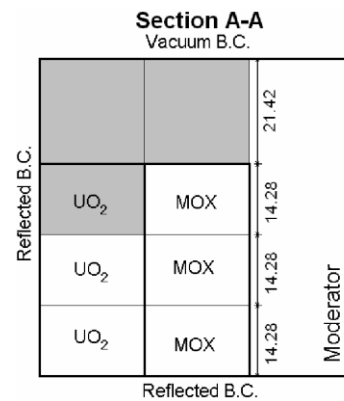
计算规模

- 平源区 **55万+**
- 特征线 **110万+**
- 特征线段 **2亿+**
- 粗网段 **5900万+**

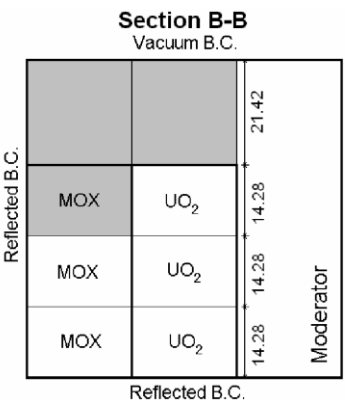
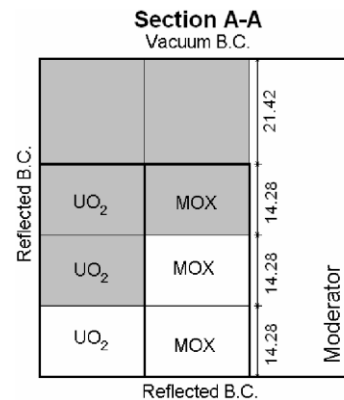
提棒



插棒A



插棒B





1 C5G7 3D扩展基准题 | 计算结果与讨论

计算设备

➤ CPU×1

- Intel Xeon Platinum 8375C
- 核数32
- 频率2.9Hz



OpenMP (多线程并行)
+
SIMD (向量化并行)
单精度计算

➤ GPU×1

- NVIDIA GeForce RTX 3090
- CUDA核数10496
- 显存容量24GB



SIMT
完全单精度计算



1 C5G7 3D扩展基准题 | 计算结果与讨论

精度验证: Laputa-GPU vs 参考解

C5G7 3D 扩展基准题keff结果

	提棒	插棒 A	插棒 B
参考解	1.14308 (± 0.00003)	1.12806 (± 0.00003)	1.07777 (± 0.00003)
GPU	1.142688	1.127871	1.077488
偏差/pcm	-39.2	-18.9	-28.2

提棒布置的功率分布结果

	#1	#2	#3	整体
最大棒功率	1.10	0.87	0.48	2.46
内侧 UO2 组件功率	218.03	173.25	96.84	488.11
MOX 组件功率	95.17	75.67	42.95	213.79
外侧 UO2 组件功率	62.66	49.82	27.83	140.30
最大棒功率相对偏差/%	-0.64	-0.84	-1.29	-0.84
内侧 UO2 组件功率相对偏差/%	-0.46	-0.57	-1.12	-0.63
MOX 组件功率相对偏差/%	0.68	0.56	0.06	0.51
外侧 UO2 组件功率相对偏差/%	0.87	0.74	0.04	0.66
MAX/%	3.84	3.45	2.92	3.35
AVG/%	0.82	0.79	0.76	0.75
RMS/%	1.08	1.03	0.92	0.97
MRE/%	0.28	0.22	0.16	0.62



1 C5G7 3D扩展基准题 | 计算结果与讨论

精度验证: Laputa-GPU vs 参考解

插棒A布置的功率分布结果

	#1	#2	#3	整体
最大棒功率	1.19	0.83	0.30	2.23
内侧 UO2 组件功率	236.22	166.82	55.36	458.39
MOX 组件功率	105.18	78.42	39.11	222.71
外侧 UO2 组件功率	70.34	53.72	28.12	152.18
最大棒功率相对偏差/%	-0.88	-0.57	-1.49	-0.86
内侧 UO2 组件功率相对偏差/%	-0.50	-0.42	-1.59	-0.60
MOX 组件功率相对偏差/%	0.67	0.53	-0.29	0.45
外侧 UO2 组件功率相对偏差/%	0.78	0.62	-0.30	0.52
MAX/%	3.27	3.30	2.34	3.01
AVG/%	0.80	0.71	0.86	0.70
RMS/%	1.03	0.94	1.05	0.89
MRE/%	0.31	0.20	0.15	0.59

插棒B布置的功率分布结果

	#1	#2	#3	整体
最大棒功率	1.19	0.55	0.21	1.82
内侧 UO2 组件功率	246.94	105.53	40.32	392.79
MOX 组件功率	126.56	81.67	29.34	237.57
外侧 UO2 组件功率	92.27	65.26	30.54	188.07
最大棒功率相对偏差/%	-0.56	-1.07	-2.79	-0.82
内侧 UO2 组件功率相对偏差/%	-0.33	-0.96	-1.95	-0.67
MOX 组件功率相对偏差/%	0.61	0.32	-0.28	0.40
外侧 UO2 组件功率相对偏差/%	0.69	0.36	-0.44	0.39
MAX/%	3.63	2.93	2.79	3.09
AVG/%	0.72	0.75	0.98	0.68
RMS/%	0.98	0.92	1.22	0.86
MRE/%	0.31	0.22	0.13	0.60

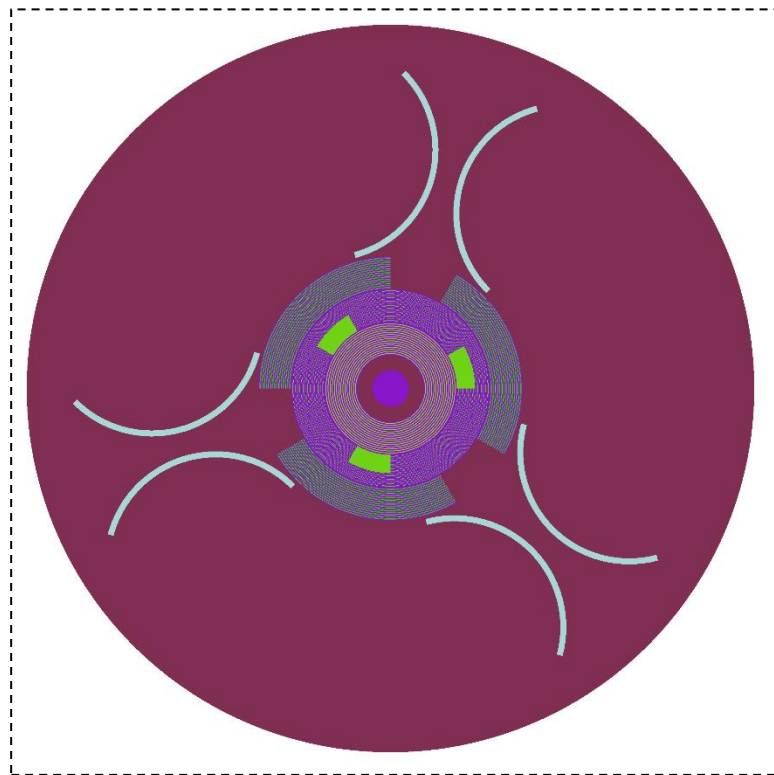


1 C5G7 3D扩展基准题 | 计算结果与讨论

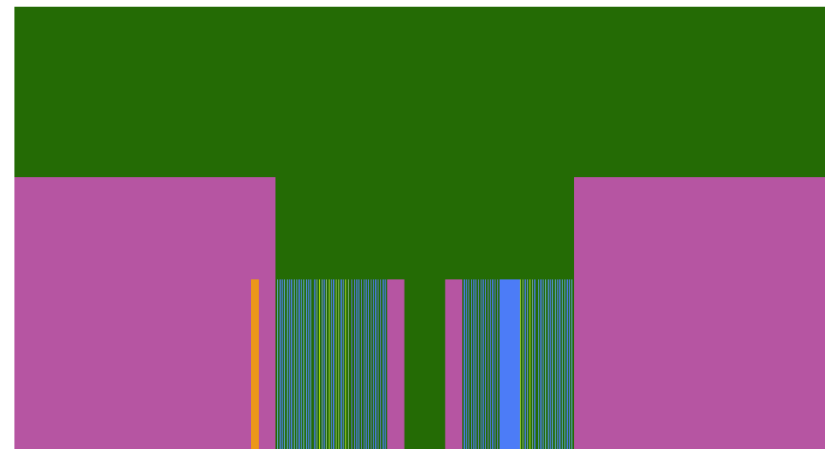
效率提升: Laputa-GPU vs Laputa-CPU

		提棒		插棒 A		插棒 B	
		CPU	GPU	CPU	GPU	CPU	GPU
迭代次数	运输迭代次数	37	36	34	34	40	37
	多群 CMFD 迭代次数	84	81	82	81	93	90
	少群 CMFD 迭代次数	248	253	258	266	291	295
时间分布	计算前准备时间/s	21.070	25.970	20.920	27.020	20.910	25.630
	径向二维 MOC 求解时间/s	269.20	4.95	243.10	4.74	307.70	5.56
	轴向一维 MOC 求解时间/s	47.65	0.17	42.46	0.16	51.73	0.17
	CMFD 求解时间/s	13.76	2.37	13.26	2.51	15.23	2.65
	求解总时间/s	330.61	7.49	298.82	7.41	374.66	8.38
	总时间/s	358.20	35.58	325.60	36.72	402.60	35.55
	求解总加速比		54.4		51.3		55.3
加速比	轴向一维 MOC 求解加速比		287.0		270.4		300.8
	CMFD 求解加速比		5.8		5.3		5.7
	求解总加速比		44.2		40.4		44.7
	整体加速比		10.1		8.9		11.3

2 THFR 3D简化模型 | 模型描述



THFR 3D简化模型径向横截面示意图



THFR 3D简化模型轴向横截面示意图

精度验证: Laputa-GPU vs OpenMC

keff	
OpenMC 参考解	1.183522 (±0.00007)
GPU	1.183030
偏差/pcm	-49.2

2 THFR 3D简化模型 | 计算结果与讨论

效率提升: Laputa-GPU vs Laputa-CPU

		CPU	GPU
迭代次数	运输迭代次数	69	69
	多群 CMFD 迭代次数	158	156
	少群 CMFD 迭代次数	525	500
时间分布	计算前准备时间/s	29.010	31.320
	共振求解时间/s	5.143	5.342
	径向二维 MOC 求解时间/s	519.50	42.02
	轴向一维 MOC 求解时间/s	154.80	12.58
	CMFD 求解时间/s	268.32	109.30
	求解总时间/s	947.76	169.24
	总时间/s	1021.00	204.50
加速比	径向二维 MOC 求解加速比	12.4	
	轴向一维 MOC 求解加速比	12.3	
	CMFD 求解加速比	2.5	
	求解总加速比	5.6	
	整体加速比	5.0	

GPU并行后
0.3s

136群, SIMD
作用明显



清華大學

Tsinghua University

五、结论与展望



结论

- GPU端使用完全单精度适用于全堆输运计算，精度良好
- 计算效率大幅提升，在C5G7 3D扩展基准题和THFR 3D简化模型的整体加速比（3090 GPU vs CPU 32核+SIMD）分别约为10倍和5倍

未来工作

- 实现基于2D/1D输运方法的全堆燃耗计算
- 进一步分析评估各向同性泄漏项等假设对高通量堆物理计算的适用性
- 分析CMFD加速的2D/1D输运方法的稳定性，以及给出提高稳定性的措施
- 提高线性方程组求解效率，考虑自主开发线性方程组求解器
- 进一步性能优化
- ...



清华大学
Tsinghua University

欢迎提出宝贵建议!

左天赢 | zty23@mails.tsinghua.edu.cn

指导教师 | 余顶

核能与新能源技术研究院 | 反应堆物理、热工与系统模拟研究室 (103室)