

# 基于统一耦合框架的堆芯物理 热工耦合程序的开发及验证

姜 荣<sup>1</sup>, 冯文培<sup>1</sup>, 陈红丽<sup>1</sup>, 强胜龙<sup>2</sup>, 李治刚<sup>2</sup>, 潘俊杰<sup>2</sup>, 张喜林<sup>2</sup>, 罗 晓<sup>1</sup>  
(1. 中国科学技术大学核科学技术学院, 合肥 230027; 2. 中国核动力研究设计院, 成都 610213)

**摘 要:** 为实现对反应堆多物理多尺度场的综合模拟, 基于统一耦合接口理念 ICoCo 和统一数据传递模型 MED 库, 对中子时空动力学程序 CORCA-K 和子通道程序 CORTH 进行了程序封装, 并采用 supervisor 流程控制方案实现了 CORCA-K 和 CORTH 之间的耦合. 通过三维轻水堆国际基准 NEACRP 弹棒算例进行程序验证, 数值结果表明, 基于统一耦合框架的 CORCA-K 和 CORTH 的耦合程序可以实现 CORCA-K 和 CORTH 之间的场数据传递与耦合计算, 计算结果与 CORCA-K 已开发的耦合接口计算结果符合地很好, 二者与基准结果基本一致.

**关键词:** 扩散程序; 子通道程序; 耦合框架; ICoCo 理念; 弹棒基准

**中图分类号:** TL325      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.044006

## Development and verification of core physical-thermal coupling code based on unified coupling framework

JIANG Rong<sup>1</sup>, FENG Wen-Pei<sup>1</sup>, CHEN Hong-Li<sup>1</sup>, QIANG Sheng-Long<sup>2</sup>,  
LI Zhi-Gang<sup>2</sup>, PAN Jun-Jie<sup>2</sup>, ZHANG Xi-Lin<sup>2</sup>, LUO Xiao<sup>1</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;  
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** In order to realize the comprehensive simulation of the multi-physics and multi-scale field of the reactor, based on the unified coupling interface concept Interface for Code Coupling (ICoCo) and the unified data transfer model MED library, the space-time neutronics simulation code CORCA-K and the sub-channel code CORTH have been packaged. Furthermore, the coupling between CORCA-K and CORTH was realized by using the supervisor method. The code was verified by the rod ejection cases of 3D LWR core transient benchmark NEACRP. The numerical results show that the CORCA-K and CORTH coupling code based on the unified coupling framework can realize the field data transfer and coupling calculation between CORCA-K and CORTH. The calculation results are in good agreement with those of the CORCA-K coupling interface, and the two results are basically consistent with the benchmark ones.

**Keywords:** Diffusion code; Sub-channel code; Coupling framework; ICoCo concept; Rod-ejection benchmark

收稿日期: 2020-12-05  
基金项目: 核反应堆系统设计技术重点实验室基金(HT-KFKT-02-2020006)  
作者简介: 姜荣(1995-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究领域为核反应堆物理分析. E-mail: ctjrong@mail.ustc.edu.cn  
通讯作者: 陈红丽. E-mail: hlchen1@ustc.edu.cn

1 引言

反应堆系统内中子物理、热工水力、燃料力学等多物理过程间存在复杂的耦合关系。为了实现反应堆多物理多尺度耦合,提高模拟计算的精确度,扩大计算规模,减少重复性工作<sup>[1]</sup>,基于统一耦合框架的多物理程序耦合成为研究热点。这些耦合框架或耦合平台包括 ICoCo、MOOSE 平台、OpenPALM、preCICE 等,其中通过 ICoCo 理念封装实现多物理程序的耦合方法在国外已开展较多研究。

法国 CEA 基于 ICoCo 理念实现了中子学程序 CRONOS2、两相流分析程序 FLICA4、系统分析程序 CATHARE 程序间的耦合<sup>[2]</sup>。德国学者在 NURESAFE 项目框架下实现了子通道程序 CTF 和中子程序 DYN3D 的耦合<sup>[3]</sup>。为了更好地模拟反应堆压力容器中的三维热工水力现象,德国 KIT 使用 ICoCo 接口实现了系统程序 TRACE 和 CFD 程序 TrioCFD 之间的耦合,该耦合系统已集成于 SALOME 平台<sup>[4]</sup>。中国科学技术大学和德国 KIT 合作开发了 CFD 程序 TrioCFD 和子通道程序 SubChanFlow 之间基于 ICoCo 理念和 MED-Coupling 库的统一耦合框架的耦合<sup>[5]</sup>。为了更好地模拟钠冷快堆热工水力现象,CEA 实现了在 A-STRID 项目框架下系统程序 CATHARE、子通道程序 TrioMC 和 CFD 程序 TrioCFD 之间的耦合<sup>[6]</sup>。国内对于 ICoCo 封装理念的研究还较少,因此对其开展更多的研究从而为多物理多尺度耦合提供基础是有必要的。

本文基于 ICoCo 封装理念和 MED 库数据传递模型,对中子时空动力学程序 CORCA-K 和子通道分析程序 CORTH 进行了基于耦合框架的物理-热工耦合程序的开发。采用 NEACRP 国际轻水堆弹棒基准<sup>[7]</sup>进行了程序测试,包括对封装后程序和耦合程序的测试,并与基准结果以及 CORCA-K 原有耦合接口的计算结果进行对比。

2 理论依据

ICoCo 接口是在 NURISP 项目范围内<sup>[8]</sup>开发的面向对象的通用代码耦合接口,首先应用于 CATHARE 和 TrioCFD 的多尺度热工水力耦合<sup>[9]</sup>。ICoCo 接口基于 C++ 开发,通过定义 Problem 通用母类来定义函数,这些函数的功能包括初始化、时间步推进、保存和还原以及场数据传递,

表 1 给出了 ICoCo 定义的重要接口及功能。

表 1 重要的 ICoCo 接口及功能

Tab. 1 Important ICoCo interfaces and their functions

| 类型      | 接口函数                     | 功能        |
|---------|--------------------------|-----------|
| 程序开始和终止 | setDataFile              | 设置数据文件    |
|         | setMPIComm               | 设置 MPI 通信 |
|         | initialize               | 初始化程序     |
|         | terminate                | 中止程序      |
|         | presentTime              | 返回当前时间    |
| 时间步推进   | computeTimeStep          | 计算时间步     |
|         | initTimeStep             | 设置时间步     |
|         | getInputFieldsNames      | 得到输入场名字   |
| 场数据交换   | getInputMEDFieldTemplate | 得到输入场模板   |
|         | getOutputMEDField        | 得到输出场     |
|         | setInputMEDField         | 设置输入场     |
| 数据保存    | save                     | 保存参数状态    |
|         | restore                  | 还原参数状态    |
|         | forget                   | 舍弃参数状态    |

基于 ICoCo 理念对程序进行封装,即对程序开发上述接口。其中,在进行场数据交换时采用功能强大的网格和区域操作库 MEDCoupling 实现场数据的交互和映射。MEDCoupling 场数据结构包含足够多的信息,可以进行各种插值操作,也可以在不同进程间通过并行模式和分布式模式交换数据结构信息。进行 ICoCo 封装时需要对每个程序定义一套或多套 MED 网格,以进行输入场数据和输出场数据的传递和映射。

为了实现基于统一耦合框架的物理-热工程序的耦合,采用 C++ 编写的 supervisor 程序实现对各子程序的调用。图 1 给出了 C++ supervisor 进行程序调用的示意图。

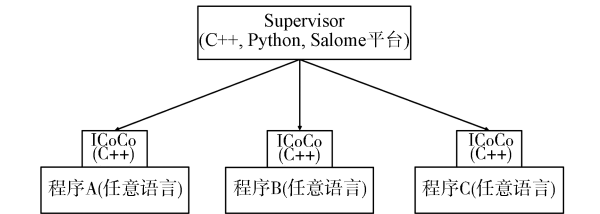


图 1 supervisor 调用程序示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calling program with supervisor

3 程序开发

3.1 CORCA-K 的 ICoCo 封装

CORCA-K 程序是中国核动力研究设计院自

主研发的三维瞬态中子学计算软件,其核心功能是进行三维瞬态中子扩散方程的数值求解计算,空间离散采用第二类边界条件格林函数节块法,时间离散采用二级二阶对角线隐式龙格库塔格式<sup>[10]</sup>. CORTH 程序是中国核动力研究设计院自主研发的子通道分析程序,可以进行反应堆热工水力设计与安全分析,也可以用来进行新型燃料组件的设计与研发<sup>[11]</sup>.

基于统一耦合框架的堆芯物理程序与热工程程序的耦合,需要对 CORCA-K 和 CORTH 进行 ICoCo 封装. 首先,对 CORCA-K 的源程序进行功能模块划分,如划分为启动模块、初始化模块、时间步计算模块、中止模块等. 然后根据功能模块开发表 1 所示的 ICoCo 接口.

在编写场数据交换与映射相关接口时,根据 CORCA-K 程序的网格特征,建立三维结构化 MEDCoupling 网格来进行数据交换. 同时,设置 CORCA-K 的输入物理场为有效燃料温度、慢化剂温度、冷却剂密度和燃料芯块温度, CORCA-K 的输出物理场为功率分布.

完成 CORCA-K 的 ICoCo 封装后,编译得到 CORCA-K 的动态链接库,编写 supervisor 调用动态链接库,即可实现 CORCA-K 的计算功能. 按照同样的方法对 CORTH 进行封装并编译得到 CORTH 的动态链接库.

3.2 耦合实现

在得到封装后 CORCA-K 和 CORTH 的动态链接库后,编写 supervisor 程序,编译得到基于统一耦合框架的 CORCA-K 和 CORTH 的耦合程序,图 2 为该耦合程序进行计算的流程图.

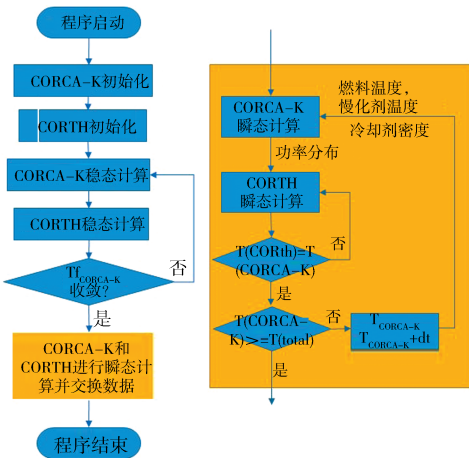


图 2 CORCA-K 与 CORTH 耦合计算流程图  
Fig. 2 The coupling calculation flowchart of CORCA-K and CORTH

图 3 表示的是 CORCA-K 和 CORTH 的 MED 网格. CORCA-K 创建的是三维结构化网格, CORTH 创建的是三维非结构化网格. 在进行数据传递时, CORCA-K 计算得到堆芯三维功率分布, 通过 MED 网格映射传给 CORTH, CORTH 将新的功率分布作为输入, 重新计算得到平均多普勒燃料温度、慢化剂平均温度、最高燃料温度和冷却剂密度, 再通过 MED 网格映射传给 CORCA-K, CORCA-K 重新计算得到功率分布, 这样循环下去, 实现二者的耦合.

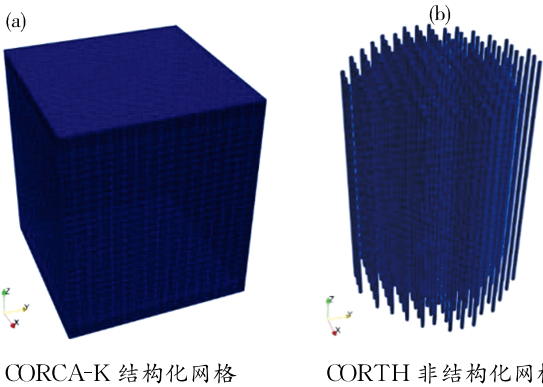


图 3 CORCA-K 和 CORTH 创建的 MEDCoupling 网格  
Fig. 3 MEDCoupling meshes created by CORCA-K and CORTH

4 数值验证

4.1 测试算例

选择 NEACRP 轻水堆弹棒基准中的 C1 和 C2 为测试算例, 对封装后的 CORCA-K 和基于耦合框架的耦合程序进行测试. 由 OECD/NEA 发布的轻水堆弹棒基准, 即在热态零功率和热态满功率下, 堆芯中一组控制棒快速弹出造成正反应性引入. NEACRP 基准中堆芯由 157 组燃料组件和 64 组反射组件组成, 其中 49 组燃料组件中布置有控制棒, 各组件的径向尺寸是 21.606 cm×21.606 cm, 轴向总长度为 427.3 cm, 如图 4 所示. 瞬态分析计算 5 s, 0.1 s 时发生弹棒事故, 0~1 s 内, 时间步长为 0.005 s, 1~5 s 内, 时间步长为 0.05 s. 表 2 给出了 NEACRP 弹棒基准中 C1 和 C2 运行数据的描述.

4.2 封装后 CORCA-K 测试

通过编写 supervisor 程序检验每个 ICoCo 接口是否可以正常调用和实现其功能, 从而对封装后的 CORCA-K 进行测试. 以 C1 和 C2 为研究对象, 分别采用不同的计算模式如临界计算、弹棒计

算等进行计算,全面验证封装后 CORCA-K 的功能. 经过多次验证计算,对于相同的算例和相同的计算模式,封装后 CORCA-K 与封装前 CORCA-K 计算得到的输出卡内容完全一致. 由此可见, CORCA-K 的封装是正确的. 由于封装前后输出卡完全一致,因此这里不列出具体的数据.

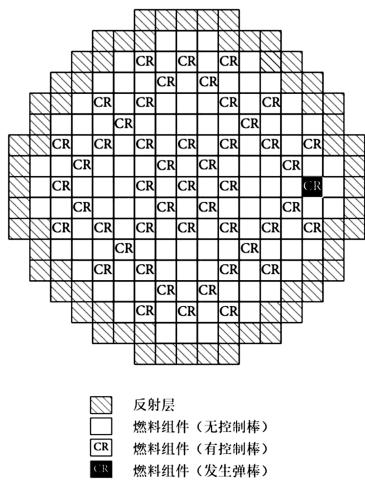


图 4 轻水堆基准 C1 和 C2 径向堆芯布置图  
Fig. 4 Radial core layout of PWR benchmarks C1 and C2

表 2 C1 和 C2 的堆芯运行数据

Tab. 2 Core operating data of C1 and C2

| 算例 | 堆芯条件  | 功率/W              | 弹棒数目  | 控制棒初始位置<br>(位置/数目) |                 |
|----|-------|-------------------|-------|--------------------|-----------------|
|    |       |                   |       | 弹棒组                | 非弹棒组            |
| C1 | 热态零功率 | 2 775             | 1(边缘) | 0/1                | 0/16<br>228/32  |
| C2 | 热态满功率 | $2.775\times10^9$ | 1(边缘) | 100/1              | 100/4<br>200/44 |

4.3 耦合程序测试

使用基于耦合框架的 CORCA-K 和 CORTH 耦合程序计算 C1 和 C2,并使用 CORCA-K 已开发的与 CORTH 直接耦合的接口 CORTHV2 计算相同的算例作为对比. 由于 CORTHV2 耦合接口计算的结果与基准参考解已经存在偏差,基于耦合框架的 CORCA-K 与 CORTH 的耦合程序是在 CORCA-K 和 CORTH 两程序的基础上开发,因此为验证耦合框架的耦合方式的准确性,同时排除 CORCA-K 和 CORTH 本身的计算误差,主要对比基于耦合框架的 CORCA-K 与 CORTH 的耦合程序与 CORTHV2 的计算结果. NEACRP 基准的 PANTHER 修正后的计算结果<sup>[12]</sup>作为参考.

表 3、表 4 给出了使用两种耦合方式计算 C1 和 C2 得到的稳态和瞬态计算结果,下文以“ICo-

Co”代表基于耦合框架的耦合程序,“CORTHV2”代表 CORCA-K 原来的耦合接口. 从表 3 中可知, C1 使用两种方式进行稳态计算得到的临界硼浓度均为 1 128. 79 ppm,与基准结果仅差 0. 49 ppm, C2 使用两种方式计算得到的临界硼浓度均为 1 154. 73 pcm,与基准结果仅差 1. 87 pcm. 一方面可以验证 ICoCo 和 CORTHV2 两种耦合方式进行稳态计算的准确性,另一方面也可以验证封装后 CORCA-K 进行临界计算的准确性.

C1 中,两种耦合方式最大功率出现的时间仅差 0. 002 5 s,最大功率和 5 s 时的功率相差 0. 228 9,最大功率相差 0. 23. 考虑到 CORCA-K 与 CORTH 之间的数据传递需要经过 MED 网格的交互与映射,因此可能会造成一定误差,之后可以进行网格敏感性研究,进一步确定误差范围. 对于 5 s 时的功率,两种耦合方式计算的结果相同,均为 0. 16. 对于 5 s 时的平均多普勒燃料温度,二者的计算结果也非常接近,最大不超过 0. 5 ℃,燃料最高温度相差不超过 3 ℃. 同时,两种耦合方式的结果与基准结果也基本符合. C2 中,两种耦合方式的计算结果更加一致. 二者最大功率到达时间仅差 0. 002 5 s,最大功率及 5 s 时的功率完全一致(1. 07 和 1. 03),5 s 时的平均多普勒燃料温度和燃料最高温度相差均不超过 1 ℃.

表 3 不同耦合方式计算得到的 C1 弹棒基准的稳态和瞬态结果

Tab. 3 The steady and transient results of the C1 rod ejection case calculated by different methods

| 计算方式          | ICoCo     | CORTHV2   | PANTHER<br>(1997) |
|---------------|-----------|-----------|-------------------|
| 临界硼浓度/ppm     | 1 128. 79 | 1 128. 79 | 1 128. 30         |
| 最大功率到达时间/s    | 0. 247 5  | 0. 245 0  | 0. 271 0          |
| 最大功率          | 5. 74     | 5. 97     | 4. 41             |
| 5 s 时功率       | 0. 16     | 0. 16     | 0. 146            |
| 5 s 时平均燃料温度/℃ | 318. 85   | 319. 10   | 315. 91           |
| 5 s 时燃料最高温度/℃ | 727. 01   | 729. 84   | 674. 2            |

图 5~图 10 分别给出了使用两种耦合方式计算得到的相对功率变化、平均多普勒燃料温度、最高燃料温度的变化趋势. 由图中可见,最大功率、最大功率出现的时间、5 s 时的功率、平均多普勒燃料温度和燃料最高温度的变化趋势二者皆吻合得很好,与 PANTHER 的结果略有差距,但相差很小. 结合以上图表和分析可知,基于统一耦合框架的堆芯物理-热工耦合程序的计算结果是准确的.

表 4 不同耦合方式计算得到的 C2 弹棒基准的稳态和瞬态结果

Tab. 4 The steady and transient results of the C2 rod ejection case calculated by different methods

| 计算方式          | ICoCo     | CORTHV2   | PANTHER (1997) |
|---------------|-----------|-----------|----------------|
| 临界硼浓度/ppm     | 1 154. 73 | 1 154. 73 | 1 156. 60      |
| 最大功率到达时间/s    | 0. 095 0  | 0. 097 5  | 0. 095 0       |
| 最大功率          | 1. 07     | 1. 07     | 1. 073         |
| 5 s 时功率       | 1. 03     | 1. 03     | 1. 031         |
| 5 s 时平均燃料温度/℃ | 556. 82   | 556. 85   | 553. 90        |
| 5 s 时燃料最高温度/℃ | 1 786. 81 | 1 786. 84 | 1 723. 8       |

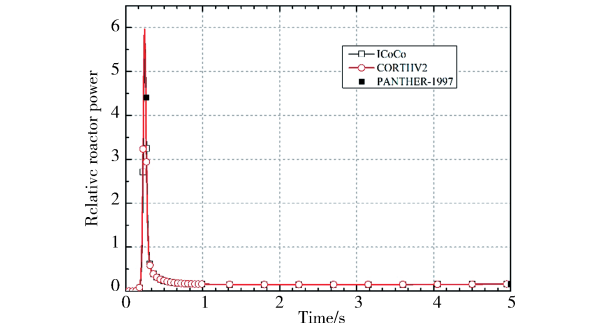


图 5 ICoCo 和 CORTHV2 耦合模式计算得到的 C1 功率变化对比

Fig. 5 Comparison of C1 power changes calculated by ICoCo and CORTHV2 coupling modes

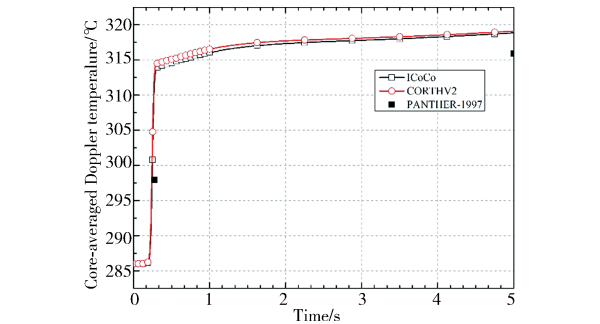


图 6 ICoCo 和 CORTHV2 耦合模式计算得到的 C1 平均多普勒燃料温度对比

Fig. 6 Comparison of C1 core-averaged Doppler temperatures calculated by ICoCo and CORTHV2 coupling modes

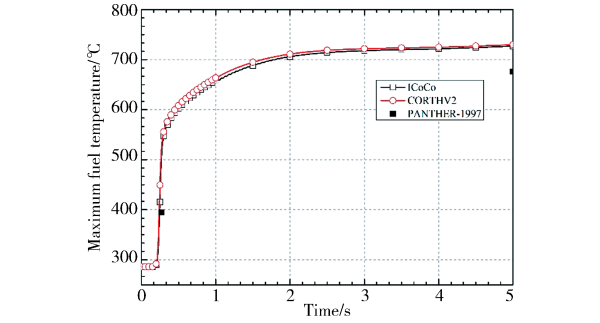


图 7 ICoCo 和 CORTHV2 耦合模式计算得到的 C1 最高燃料温度对比

Fig. 7 Comparison of C1 maximum fuel temperatures calculated by ICoCo and CORTHV2 coupling modes

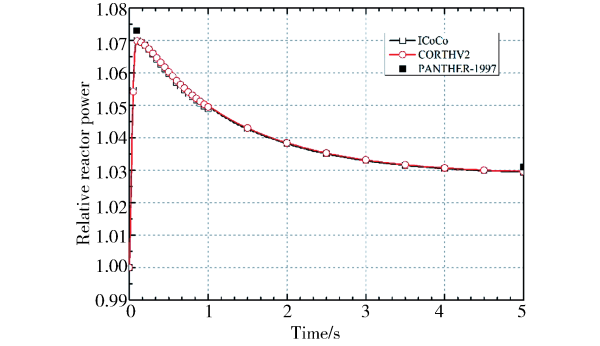


图 8 ICoCo 和 CORTHV2 耦合模式计算得到的 C2 功率分布对比

Fig. 8 Comparison of C2 power changes calculated by ICoCo and CORTHV2 coupling modes

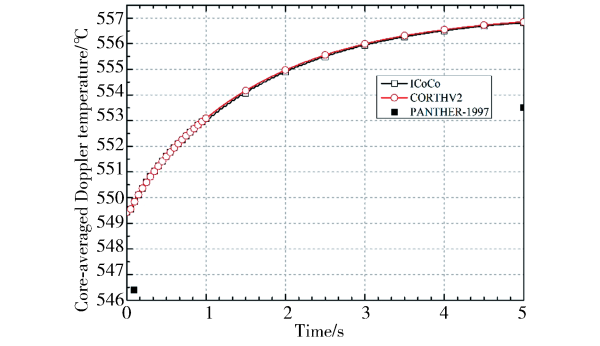


图 9 ICoCo 和 CORTHV2 耦合模式计算得到的 C2 平均多普勒燃料温度对比

Fig. 9 Comparison of C2 core-averaged Doppler temperatures calculated by ICoCo and CORTHV2 coupling modes

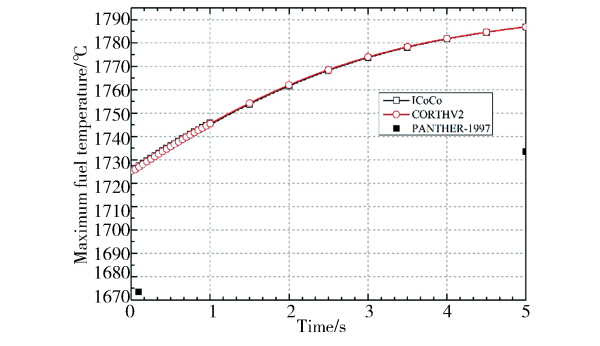


图 10 ICoCo 和 CORTHV2 耦合模式计算得到的 C2 最高燃料温度对比

Fig. 10 Comparison of C2 maximum fuel temperatures calculated by ICoCo and CORTHV2 coupling modes

5 结 论

(1) 本文基于 ICoCo 统一封装理念和 MED 库统一数据传递模型, 分别对中子时空动力学程序 CORCA-K 和子通道分析程序 CORTH 进行了 ICoCo 封装, 然后基于统一耦合框架实现了 CORCA-K 和 CORTH 的耦合。

(2) 以 NEACRP 轻水堆弹棒基准中 C1 和 C2

为研究对象进行耦合程序的测试,并与 CORCA-K 原有的耦合接口 CORTHV2 计算的结果进行对比,以基准结果作为参照. 经过对比分析可知,基于统一耦合框架的物理热工耦合程序计算的结果与 CORTHV2 计算的结果符合地很好,各参数的变化趋势完全一致,由此证明基于统一耦合框架的物理—热工耦合程序的计算是正确的.

(3) 下一步可以进行耦合程序的敏感性测试,进一步确定其误差范围.

参考文献:

[1] 邓力,史敦福,李刚. 数值反应堆多物理耦合关键技术[J]. 计算物理, 2016, 33: 631.

[2] Le Pallec J C, Mer-Nkongka K, Crouzet N. Neutronics / fuel thermomechanics coupling in the framework of a REA (Rod Ejection Accident) transient scenario calculation [C]//PHYSOR 2016-Unifying Theory and Experiments in the 21st Century. Sun Valley, Idaho, USA: [s. n. ], 2016.

[3] Périn Y, Velkov K. CTF/DYN3D multi-scale coupled simulation of a rod ejection transient on the NURESIM platform [J]. Nucl Eng Technol, 2017, 49: 1339.

[4] Zhang K L, Zhang X, Sanchez-Espinoza V, *et al.* Multi-scale coupling of TRACE and TrioCFD based on ICoCo [C]//18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. Portland (OR), USA: [s. n. ], 2019.

[5] Zhang X, Zhang K, Sanchez-Espinoza V H, *et al.* Multi-scale coupling of CFD code and sub-channel

code based on a generic coupling architecture [J]. Ann Nucl Energy, 2020, 141: 107353.

[6] Gerschenfeld A, Li S, Gorsse Y, *et al.* Development and validation of multi-scale thermal-hydraulics Calculation schemes for SFR applications at CEA [C]// International conference on fast reactors and related fuel cycles next generation nuclear systems for sustainable development. [S. l. : s. n. ], 2017.

[7] Finnemann H, Galati A. NEACRP 3-D LWR core transient benchmark. Final specifications [R]. [S. l. ]: OECD Nuclear Energy Agency, 1992.

[8] Deville E, Perdu F. Documentation of the interface for code coupling: ICoCo [R]. France: The French Atomic Energy Commission, 2012.

[9] Baviere R, Tauveron N, Perdu F, *et al.* A first system/CFD coupled simulation of a complete nuclear reactor transient using CATHARE2 and TRIO\_U preliminary validation on the phenix reactor natural circulation test [J]. Nucl Eng Des, 2014, 277: 124.

[10] 蒋朱敏, 赵文博, 王金雨, 等. 中子时空动力学计算程序 CORCA-K 的进展[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 066003.

[11] 刘余, 谭长禄, 潘俊杰, 等. 子通道分析软件 CORTH 的研发[J]. 核动力工程, 2017, 38: 157.

[12] Grundmann U, Rohde U. Verification of the code DYN3D/R with the help of international benchmarks [R]. Dresden: Research Center Rossendorf, 1997.

引用本文格式:

中 文: 姜荣, 冯文培, 陈红丽, 等. 基于统一耦合框架的堆芯物理热工耦合程序的开发及验证[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 044006.

英 文: Jiang R, Feng W P, Chen H L, *et al.* Development and verification of core physical-thermal coupling code based on unified coupling framework [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 044006.