# 基于压力修正的反应堆热工水力耦合分析方法研究

曾友来　苟军利

（西安交通大学 核科学与技术学院　西安 710049）

**摘要**　系统分析程序与计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）程序的耦合模拟是数值反应堆研究中的关键技术，结合两者优势可实现多尺度的高精度、快速仿真，满足全局效应分析和局部细节捕捉的需求。基于系统程序（Nuclear Safety and Operation Laboratory-System，NUSOL-SYS）与CFD程序FLUENT，开发了一种分解域的半隐式压力修正迭代耦合方法。该方法通过在耦合边界上设定相同压力，利用敏感性关系矩阵结合边界质量流量差逐步调整压力，实现收敛。基于单管流动问题和并联流动问题验证收敛性和可靠性后，将该工具应用于ACP100模块化小型压水堆主泵停转事故的堆芯入口流量分布分析，结果表明：事故发生后堆芯入口流量分配未出现不均匀现象，耦合程序计算得到的系统参数与NUSOL-SYS单独计算结果基本一致，且能捕捉局部三维流动特征。该方法为核动力系统热工水力的多尺度模拟提供了参考价值。

**关键词**　多尺度模拟，压力修正迭代，耦合，热工水力，NUSOL-SYS，FLUENT

**中图分类号**　TL99

**DOI:** 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250017

**CSTR:** 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250017

## Development of a system-CFD coupling method based on pressure correction iteration for simulation in reactor thermal-hydraulic analysis

ZENG Youlai　GOU Junli

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

**Abstract**　**[Background]** The coupled simulation of system analysis codes and computational fluid dynamics (CFD) code is a key technical approach in numerical reactor research. This coupling method combines the advantages of both codes to achieve high-precision, rapid multi-scale simulations. It addresses the requirements for global effect analysis while accurately capturing detailed phenomena in critical regions, thus providing precise support for reactor design optimization and safety evaluation. **[Purpose]** This study aims to develop a domain-decomposition-based semi-implicit one-dimensional-three-dimensional pressure correction iterative coupling method, integrating the commercial CFD code FLUENT with the system analysis code Nuclear Safety and Operation Laboratory-System (NUSOL-SYS). **[Methods]** Firstly, the consistent pressure values at the coupling boundary was initialized to establish a sensitivity matrix between pressure and mass flow rate differences by iteratively adjusting the boundary pressure. Then the coupling pressure correction was calculated by incorporating the mass flow rate differences across the boundary at the current iteration step, and the coupling boundary pressure was continuously corrected to ensure mass flow rate consistency on both sides during the iteration process, thereby achieving convergence and advancing

第一作者：曾友来，男，1998年出生，2020年毕业于重庆大学，现为博士研究生，研究领域为反应堆热工水力学研究

通信作者：苟军利，E-mail：junligou@xjtu.edu.cn

收稿日期：2025-01-17，修回日期：2025-05-27

First author: ZENG Youlai, male, born in 1998, graduated from Chongqing University in 2020, doctoral student, focusing on reactor thermal-hydraulics research

Corresponding author: GOU Junli, E-mail: junligou@xjtu.edu.cn

Received date: 2025-01-17, revised date: 2025-05-27

the time step. Subsequently, this coupling method was applied to calculating single-pipe flow problem, and further validated by simulating a parallel flow problem with varying time steps and flow channels. Finally, the coupled code was employed to analyze the core inlet flow distribution during a main coolant pump trip scenario in the ACP100, a modular small pressurized water reactor. **[Results]** The coupling calculation results for the single-pipe flow problem show a high consistency with the results of NUSOL-SYS standalone calculations, and convergence is achieved within two iterations. Validation results demonstrate that the coupling program reduces the mass flow residual by 1 to 3 orders of magnitude in each iteration under different conditions. Analysis results on ACP100 main coolant pump trip scenario indicate that no uneven flow distribution occurs at the core inlet following the accident. Moreover, the system parameters predicted by the coupled code are consistent with those obtained from standalone NUSOL-SYS simulations, while the code also successfully captures localized three-dimensional flow phenomena. **[Conclusions]** The semi-implicit iterative coupling method proposed in this study demonstrates good stability and convergence, providing a scientific approach for optimizing reactor component design and enhancing system accident resistance, while laying an important foundation for the further development of numerical reactors.

**Key words** Multiscale simulation, Pressure correction iteration, Coupling, Thermal-hydraulic, NUSOL-SYS, FLUENT

随着数值反应堆技术的发展以及设计和安全分析需求的提升，精确模拟反应堆的热工水力性能已成为重要研究方向。反应堆系统通常表现出多尺度特性，既涉及全局流动与能量传递，也包括堆芯、换热器等局部区域的复杂效应[1]。传统的一维热工水力程序高效且适用于全局动态模拟，但难以捕捉局部细节；三维计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）模型能准确描述局部流动和传热[2−3]，却因计算成本高而难以应用于全局。一维-三维耦合方法结合两者优势，为反应堆的安全分析和设计优化提供了有效工具。

近年来，热工水力一维系统代码（如RELAP5、TRACE）与三维CFD软件（如FLUENT、OpenFOAM）之间的耦合分析方法在核能领域得到了广泛关注[4−6]。Zhang[7]将耦合方法分为分解域和重叠域两种类型。早期Aumiller等[8]的研究采用显式耦合策略，通过并行虚拟机（Parallel Virtual Machine，PVM）技术传递参数，而Li等[9]则通过动态链接库（Dynamic Link Library，DLL）实现了数据交换，提高了计算的便捷性。然而，显式耦合方式仍然存在数据传递延迟、稳定性较差等问题。为此，许多研究[10−11]探索了基于时间步内迭代的半隐式耦合算法，以提高计算精度。但部分研究[12−13]指出，迭代耦合算法在某些工况下需选用合适的松弛因子以确保稳定性，而松弛因子的计算方法尚无统一标准。此外，针对反应堆系统事故分析的多尺度耦合研究仍较为有限。

针对上述问题，本文提出了一种基于边界压力修正的半隐迭代耦合方法。该方法利用边界质量流量差对耦合边界压力的敏感性矩阵计算压力修正值，使耦合边界两侧质量流量逐步一致，提高了耦合计算的稳定性。经过对并联耦合流动问题的分析验证该方法的适用性后，进一步应用其对ACP100冷却剂泵卡轴事故进行了耦合分析，获得了事故过程中堆芯入口流量分配的瞬态变化情况。

## 1 基于敏感性矩阵的压力修正耦合方法

本研究提出的基于压力修正的耦合方法均采用压力耦合边界条件，通过在单个时间步内的迭代过程中修正耦合边界压力实现多尺度耦合，而无需传递质量流量。如图1所示，对于存在$m$个耦合边界的情况，可以将所有耦合边界的压力和质量流量分别表示为向量形式，$\vec{P}_c=[P_{c1},P_{c2},\cdots,P_{cm}]^{\mathrm{T}}$，$\vec{\dot{m}}_c=[\dot{m}_{c1},\dot{m}_{c2},\cdots,\dot{m}_{cm}]^{\mathrm{T}}$，在每个耦合迭代步开始时，耦合边界两侧被赋予相同的压力值$\vec{P}_c$，通过计算，可以得到两侧的质量流量$\vec{\dot{m}}_{c,\mathrm{SYS}}$和$\vec{\dot{m}}_{c,\mathrm{CFD}}$（其中流入耦合边界的质量流量为正，流出的为负），两侧相加得到耦合边界的质量流量差向量，$\Delta\vec{\dot{m}}_c=\vec{\dot{m}}_{c,\mathrm{SYS}}+\vec{\dot{m}}_{c,\mathrm{CFD}}=[\Delta\dot{m}_{c1},\Delta\dot{m}_{c2},\cdots,\Delta\dot{m}_{cm}]^{\mathrm{T}}$。假设耦合计算能够成功模拟真实的流体流动，那么每个时间步在耦合边界上都存在一组确定的压力$\vec{P}_c^{\mathrm{conv}}$，使得耦合边界质量流量差$\left\|\Delta\vec{\dot{m}}_c\right\|$的范数为零，此时耦合边界两侧的压力和质量流量达到一致，满足质量和动量守恒，实现半隐式收敛，可以推进计算至下一时间步。

但由于边界压力和质量流量的关系是非线性的，因此直接求解这个$\vec{P}_c^{\mathrm{conv}}$可能较为困难。通过对该关系进行线性化处理，构建压力修正值与质量流量差变化量之间的敏感性矩阵，可以在迭代过程中

不断修正$\vec{P}_c$，从而高效且稳定地逼近$\vec{P}_c^{\text{conv}}$。

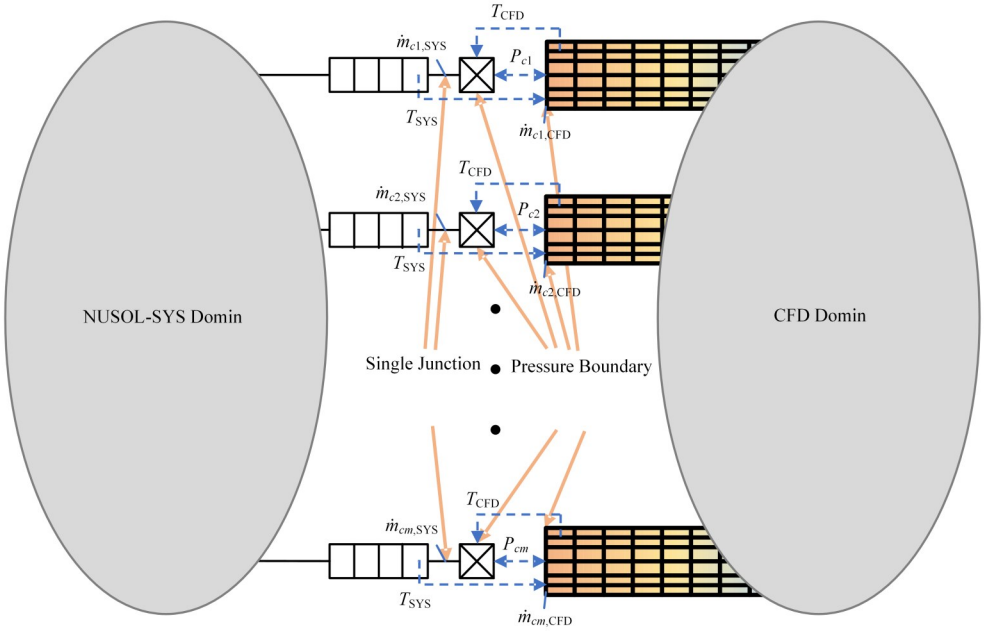



**图1** 一维-三维压力修正耦合方法概念图

**Fig.1** Conceptual diagram of the 1D-3D pressure correction coupling method

### 1.1 边界压力与质量流量差的关系

对于一维和三维网格中的可压缩与不可压缩流体，第$j$个耦合边界的压力$P_{cj}$与第$i$个耦合边界一侧的质量流量$\dot{m}_{ci,j,\text{SYS(CFD)}}$之间的关系可表示为：

$$\dot{m}_{ci,j,\text{SYS(CFD)}} = F_{i,j,\text{SYS(CFD)}}(P_{cj}) \tag{1}$$

式中：$F$为质量流量与压力之间的非线性关系（由动量方程和连续性方程联立给出）。

由于耦合边界的压力会同时影响两侧质量流量，第$j$个耦合边界的压力$P_{cj}$与第$i$个耦合边界的质量流量差$\Delta\dot{m}_{ci,j}$之间的关系可表示为：

$$\Delta\dot{m}_{ci,j} = G_{i,j}(P_{cj}) = F_{i,j,\text{SYS}}(P_{cj}) + F_{i,j,\text{CFD}}(P_{cj}) \tag{2}$$

式中：$\Delta\dot{m}_c = \dot{m}_{c,\text{SYS}} + \dot{m}_{c,\text{CFD}}$为边界两侧的质量流量差；$G$为质量流量差与压力之间的非线性关系。直接求解这个非线性函数$G(P_{cj})$可能非常困难。可通过对当前迭代步压力$P_{cj}^k$展开泰勒级数，并忽略高阶项，得到其线性化形式，从而进行简化：

$$G_{i,j}(P_{cj}^{k+1}) \approx G_{i,j}(P_{cj}^k) + \frac{\partial G_{i,j}}{\partial P_{cj}}\Big|_{P_{cj}^k}\left(P_{cj}^{k+1} + P_{cj}^k\right) \tag{3}$$

式中：$P_{cj}^{k+1}$为第$j$个耦合边界第$k$+1迭代步的压力值；$P_{cj}^k$为第$j$个耦合边界第$k$迭代步的压力值；$\left(P_{cj}^{k+1} - P_{cj}^k\right)$为第$j$个耦合边界的压力修正值；$\dfrac{\partial G_{i,j}}{\partial P_{cj}}\Big|_{P_{cj}^k}$为第$i$个节点质量流量差对$j$边界压力$P_{cj}^k$的偏导数。因此，由于第$j$个耦合边界的压力修正引起的第$i$个耦合边界质量流量差的变化量$\Delta\dot{m}_{ci,j}^{k+1} - \Delta\dot{m}_{ci,j}^k$可以用式(4)来表示：

$$\Delta\dot{m}_{ci,j}^{k+1} - \Delta\dot{m}_{ci,j}^k = \frac{\partial G_{i,j}}{\partial P_{cj}}\Big|_{P_{cj}^k}\left(P_{cj}^{k+1} + P_{cj}^k\right) \tag{4}$$

当存在$m$个耦合边界时，将所有耦合边界压力修正量与第$i$个耦合边界质量流量变化量相加可以得到$\Delta\dot{m}_{ci}^{k+1} - \Delta\dot{m}_{ci}^k$：

$$\begin{aligned}\Delta\dot{m}_{ci}^{k+1} - \Delta\dot{m}_{ci}^k &= \sum_{j=1}^{m}\left(\Delta\dot{m}_{ci,j}^{k+1} - \Delta\dot{m}_{ci,j}^k\right) \\ &= \sum_{j=1}^{m}\left[\frac{\partial G_{i,j}}{\partial P_{cj}}\Big|_{P_{cj}^k}\left(P_{cj}^{k+1} + P_{cj}^k\right)\right]\end{aligned} \tag{5}$$

对每个耦合节点的质量流量变化量进行同样的分析，得到压力修正值和质量流量差改变量之间关系的多维形式：

$$\Delta\vec{\dot{m}}_c^{k+1} - \Delta\vec{\dot{m}}_c^k = \boldsymbol{S}\left(\vec{P}_c^{k+1} - \vec{P}_c^k\right) \tag{6}$$

$$\Delta\vec{\dot{m}}_c^{k+1} - \Delta\vec{\dot{m}}_c^k = \begin{bmatrix}\Delta\vec{\dot{m}}_1^{k+1} - \Delta\vec{\dot{m}}_1^k \\ \Delta\vec{\dot{m}}_2^{k+1} - \Delta\vec{\dot{m}}_2^k \\ \vdots \\ \Delta\vec{\dot{m}}_m^{k+1} - \Delta\vec{\dot{m}}_m^k\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix}S_{11}S_{12}\cdots S_{1m} \\ S_{21}S_{22}\cdots S_{2m} \\ \vdots \\ S_{m1}S_{m2}\cdots S_{mm}\end{bmatrix}, \vec{P}_c^{k+1} - \vec{P}_c^k = \begin{bmatrix}\vec{P}_1^{k+1} - \vec{P}_1^k \\ \vec{P}_2^{k+1} - \vec{P}_2^k \\ \vdots \\ \vec{P}_m^{k+1} - \vec{P}_m^k\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{S}$是一个$m\times m$的敏感性矩阵，表示每个耦合边界的质量流量差对耦合边界压力的线性化响应关系。矩阵中的元素$S_{i,j} = \dfrac{\partial G_{i,j}}{\partial P_{cj}}\Big|_{P_{cj}^k}$表示第$i$个耦合边

界的质量流量差对第$j$个耦合边界压力的敏感性。

### 1.2 敏感性矩阵的计算

计算敏感性矩阵$\boldsymbol{S}$的方法主要包括扰动方法[14]和解析方法[15]，两者在适用场景与计算复杂度上有所不同。本文采用的扰动方法基于数值扰动，操作简便，尤其适用于复杂非线性问题。该方法通过在耦合边界压力上施加微小扰动，分析边界质量流量的响应变化，从而计算变量之间的敏感性关系。

扰动法的计算过程如下：首先进行基准状态计算，获取当前压力$\vec{P}_c^{\,k}$对应的质量流量差$\Delta\vec{m}_c^{\,k}$，随后在第$j$个耦合边界上施加一个微小扰动$dP$，形成新的压力值$P_{cj}^{k+1}=P_{cj}^{k}+dP$，重新计算后得到每个耦合边界的质量流量差$\Delta\vec{m}_c^{\,k+1}$。通过比较基准状态和扰动后的质量流量差，敏感性矩阵$\boldsymbol{S}$第$j$列的系数$S_{i,j}$可以表示为：

$$S_{i,j}=\frac{\partial G_{i,j}}{\partial P_{cj}}\Big|_{P_{cj}^{k}}=\frac{\Delta\dot{m}_{ci}^{k+1}-\Delta\dot{m}_{ci}^{k}}{dP} \tag{9}$$

依次改变所有耦合边界的压力值，逐个计算敏感性矩阵$\boldsymbol{S}$的每一列，最终构建出完整的敏感性矩阵。

### 1.3 压力修正值的计算

目标是使得耦合边界质量流量差$\Delta\vec{m}_c^{\,k+1}$为零，结合当前质量流量差为$\Delta\vec{m}_c^{\,k}$，可以利用敏感性矩阵计算压力修正值：

$$\vec{P}_c^{\,k+1}-\vec{P}_c^{\,k}=\boldsymbol{S}^{-1}(\Delta\vec{m}_c^{\,k+1}-\Delta\vec{m}_c^{\,k}) \tag{10}$$

如果直接使用式（10），当敏感性矩阵$\boldsymbol{S}$的条件数较大或误差较大时，容易出现过大的压力修正值，导致迭代发散或振荡。为避免上述问题，引入松弛因子$\omega$（$0<\omega\leqslant1$）对压力修正进行限制后得到：

$$\vec{P}_c^{\,k+1}-\vec{P}_c^{\,k}=\omega\cdot\boldsymbol{S}^{-1}(\Delta\vec{m}_c^{\,k+1}-\Delta\vec{m}_c^{\,k}) \tag{11}$$

松弛因子$\omega$的选择是影响收敛速度和稳定性的重要因素。根据以下经验选取松弛因子：

$$\omega=\begin{cases}1.0 \text{ 对于弱非线性}\\ 0.2\sim0.8 \text{ 对于强非线性、矩阵条件数较大或误差较大}\end{cases} \tag{12}$$

### 1.4 NUSOL-SYS与FLUENT耦合实现

本文将基于敏感性矩阵的压力修正迭代耦合方法应用于一维两流体系统分析程序NUSOL-SYS[16-18]与CFD程序FLUENT[19]之间的耦合计算。数据传递通过FLUENT的用户自定义函数（User-Defined Function，UDF）[20]实现，UDF集成了调用NUSOL-SYS动态链接库、控制时间步长和修改边界参数等功能。由于CFD程序对两相流的计算精度有限，目前耦合程序在耦合交界面和FLUENT中均只模拟单相流体。且由于NUSOL-SYS采用半隐式直接求解法，每个时间步仅需一次计算即可获得下一时间步的物理量。为了实现与FLUENT在单个时间步内的多次边界数据更新与计算，需要把参数恢复到上一个时间步状态并重复计算，用这种伪迭代的方式来实现迭代耦合。在FLUENT修正压力的迭代过程中，每次FLUENT迭代结束后的全局连续性残差$\|{}^{n}R^{k}\|$是控制耦合计算的关键参数：

$$\|{}^{n}R^{k}\|=\frac{\sum_{\text{cells}}|{}^{n}R_{\text{cell}}^{k}|}{\sum_{\text{cells}}|{}^{1}R_{\text{cell}}^{0}|} \tag{13}$$

其中：$\sum_{\text{cells}}|{}^{n}R_{\text{cell}}^{k}|$为当前迭代步整个计算域中所有网格的连续性残差之和；$\sum_{\text{cells}}|{}^{1}R_{\text{cell}}^{0}|$为初始迭代时计算域内的总残差，作为归一化基准，${}^{n}R_{\text{cell}}^{k}$为单个网格的局部连续性残差。

$${}^{n}R_{\text{cell}}^{k}=\sum\nolimits_{\text{faces}}\dot{m}_f \tag{14}$$

具体耦合流程如图2所示，以下为完整步骤：

1）定义初始参数，包括耦合边界压力$P$、扰动压力$dP$、推进残差阈值$\varepsilon_n$和迭代残差阈值$\varepsilon_k$。初始化NUSOL-SYS和FLUENT的计算模型。

2）敏感性矩阵$\boldsymbol{S}$计算阶段

当首次耦合计算、时间步长发生变化或耦合过程中出现收敛性较差的情况下，依次改变每个耦合边界的压力，计算每次质量流量差$\Delta\vec{m}_c$的改变量，并根据式（9）得到敏感性矩阵$\boldsymbol{S}$。

3）压力修正迭代阶段

① 伪迭代一次NUSOL-SYS，获取当前耦合边界质量流量$\vec{m}_{\text{SYS}}^{k}$；

② 在FLUENT中进行迭代计算，当$\|{}^{n}R^{k}\|$小于迭代残差阈值$\varepsilon_k$时，认为FLUENT计算的质量流量误差在可接受范围内，获取耦合边界质量流量$\vec{m}_{\text{CFD}}^{k}$；

③ 计算质量流量差$\Delta\vec{m}_c^{\,k}$，如果$\left\|\Delta\vec{m}_c^{\,k}\right\|_\infty>\varepsilon_k\cdot\left\|\Delta\vec{m}_{\text{CFD}}^{0}\right\|_\infty$，进入步骤④。若$\left\|\Delta\vec{m}_c^{\,k}\right\|_\infty\leqslant\varepsilon_k\cdot\left\|\Delta\vec{m}_{\text{CFD}}^{0}\right\|_\infty$，认为已经达到当前FLUENT计算误差范围内的最小耦合边界质量流量差，跳至步骤⑤；

④ 根据式（11）使用敏感性矩阵$\boldsymbol{S}$更新耦合边界压力$\vec{P}_c^{\,k+1}$，然后返回步骤①；

⑤ 停止耦合迭代，继续FLUENT迭代计算，直到残差$\|{}^{n}R^{k}\|$小于推进阈值$\varepsilon_n$，进入步骤4）。

4）推进时间步，进入下一时间步的耦合计算。

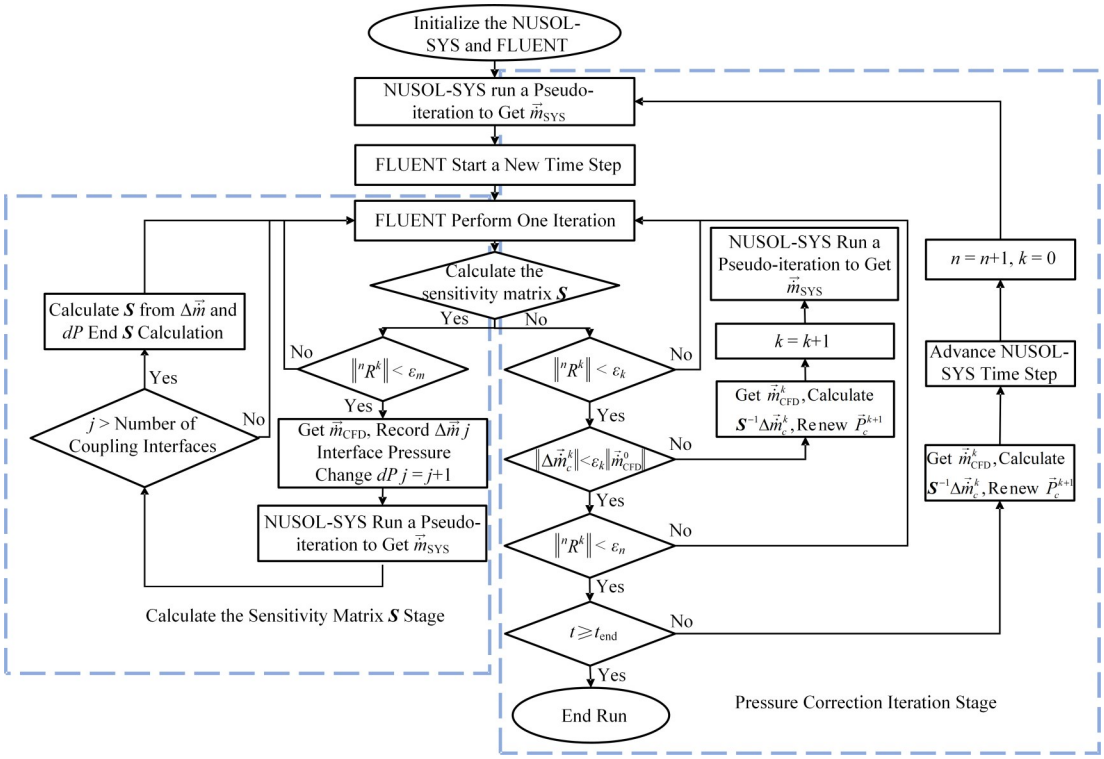



**图2** 基于敏感性矩阵的压力修正耦合方法流程图

**Fig.2** Flowchart of pressure correction coupling method based on sensitivity matrix

为了避免迭代过程中跳过压力修正阶段直接推进时间步，本研究中通常设定$\varepsilon_k$=3×$\varepsilon_n$，并根据计算精度需求，推荐$\varepsilon_k$取3×10$^{-3}$~3×10$^{-6}$。为保持时间步长的一致性，选取两程序库伦特数限值中的最小值作为统一的时间步长。由于FLUENT程序占据了主要的计算时间，为了提高计算效率，对UDF进行了并行化处理。

## 2 验证和应用

### 2.1 单管流动测试

基于单管流动问题，对耦合方法的收敛性进行了测试。如图3所示，构建了一个横截面积为0.000 876 m$^2$的水平无滑移光滑圆管流动模型。在该模型中，流道的中间段使用FLUENT进行模拟，并通过两个耦合边界与两侧的NUSOL-SYS流道进行耦合计算。最右侧为15.0 MPa的压力出口边界，其他边界条件如图4所示。扰动压力$dP$为10$^3$ Pa，FLUENT推进残差阈值$\varepsilon_n$为3×10$^{-4}$，迭代残差阈值$\varepsilon_k$为9×10$^{-4}$，松弛因子$\omega$为1。

如图5所示，模拟结果展示了耦合边界质量流量差范数的收敛情况，耦合计算在两次迭代内均能收敛。图6~8展示了单管流道不同位置的质量流量、压力和温度随时间的变化。耦合分析的计算结

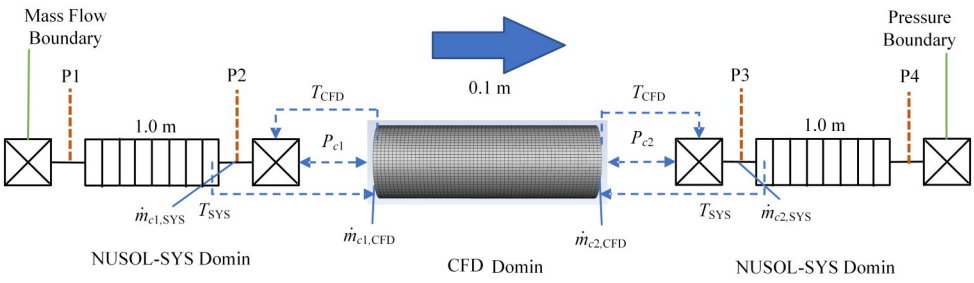



**图3** 单管流动耦合节点模型图

**Fig.3** Node model diagram of single pipe flow coupling

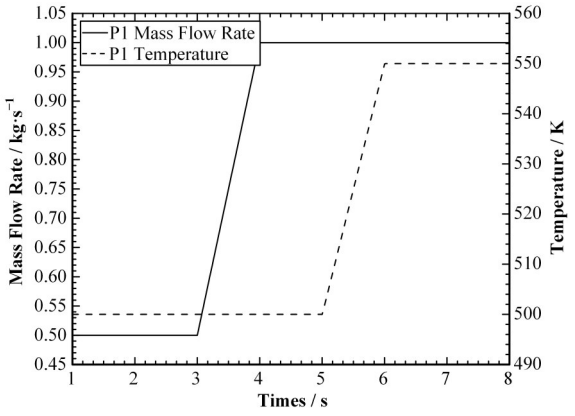



**图4** 单管流动耦合边界条件
**Fig.4** Boundary conditions of single pipe flow coupling

果与SYS（NUSOL-SYS）单独模拟的结果高度一致，仅在压力分布上存在微小差异，这是由于CFD计算中的压降略高于SYS。总体来说，耦合计算结果准确性较高。

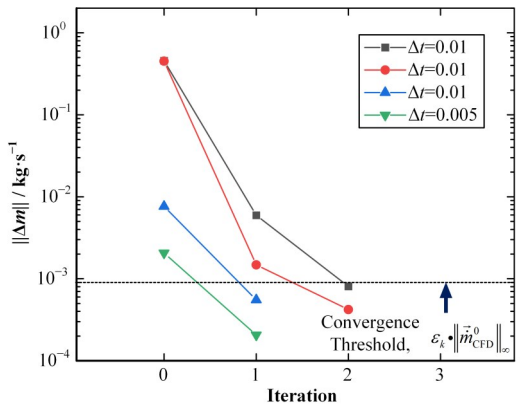



**图5** 质量流量差范数的收敛情况
**Fig.5** Convergence of mass flow rate difference norm

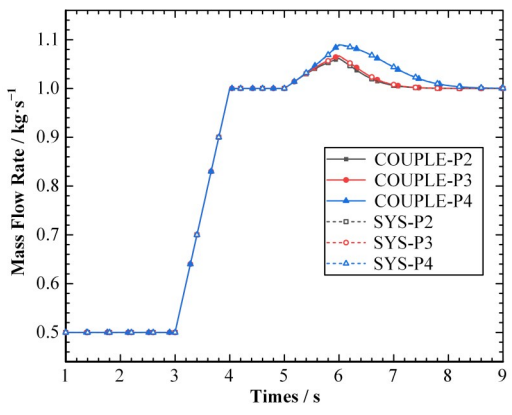



**图6** 不同位置质量流量变化（彩图见网络版）
**Fig.6** Variations of mass flow rate at different locations (color online)

## 2.2 并联流动验证

为了验证压力修正耦合方法在耦合边界逆流、变时间步长及强瞬态变流道工况下的可靠性和稳定

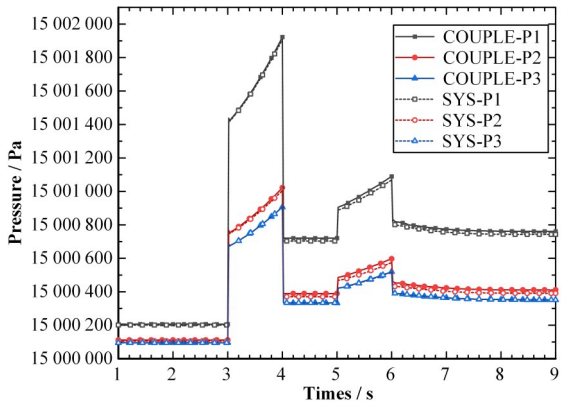



**图7** 不同位置压力变化（彩图见网络版）
**Fig.7** Variations of pressure at different locations (color online)

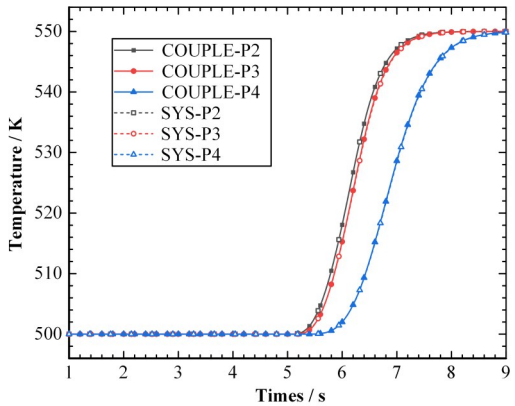



**图8** 不同位置温度变化（彩图见网络版）
**Fig.8** Variations of temperature at different locations (color online)

性，如图9所示构建了一个具有两个耦合边界的水平并联流动问题。所有流道均为横截面积为0.000 876 m²的无滑移、光滑圆管，并联通道的上半部分使用FLUENT模拟，网格为ICEM（Integrated Computer Engineering and Manufacturing）划分的三维结构化网格，下半部分使用NOSOL-SYS模拟，其中右侧流道的中间位置设有一个初始关闭的阀门。边界条件如图10所示，第7.0 s时打开右侧通道的阀门。耦合模拟使用的扰动压力 $dP$ 为 $10^3$ Pa，FLUENT推进残差阈值 $\varepsilon_n$ 为 $3\times10^{-4}$，迭代残差阈值 $\varepsilon_k$ 为 $9\times10^{-4}$，松弛因子 $\omega$ 为1。

流道中流速增加会导致时间步长变化，图11展示了不同时间步长下耦合程序迭代过程中质量流量差的收敛情况，其中实线为阀门闭合时的收敛情况，虚线为阀门打开后的。结果表明，在不同时间步长和流道的情况下，耦合方法通常在一次迭代内即可收敛，且每次迭代后质量流量差减小10~1 000，体现出该方法良好的稳定性和收敛性。

如图12和图13所示，模拟得到了不同位置的质量流量和压力的变化情况，并对比了耦合程序与

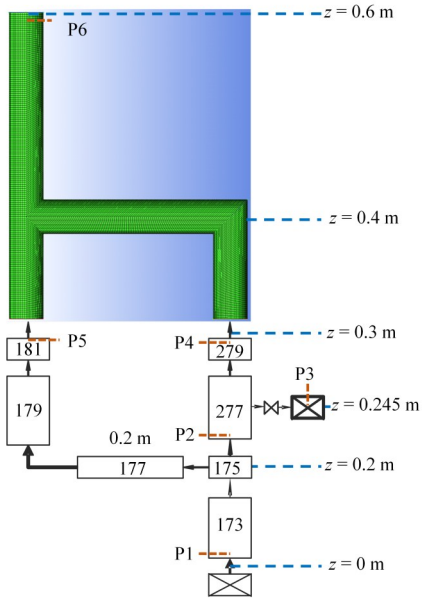



**图9** 并联通道耦合节点模型图
**Fig.9** Node model diagram of parallel channel coupling

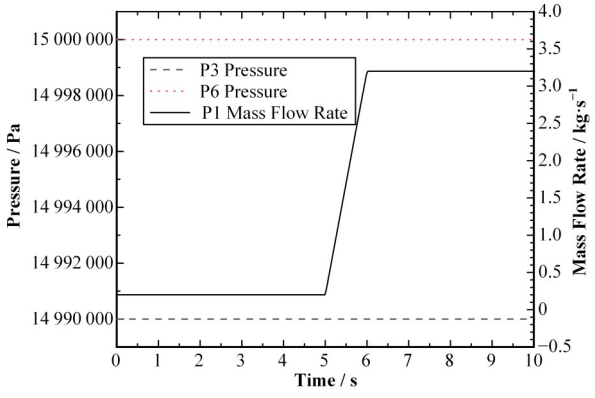



**图10** 并联流动耦合问题边界条件
**Fig.10** Boundary conditions for parallel coupled flow problem

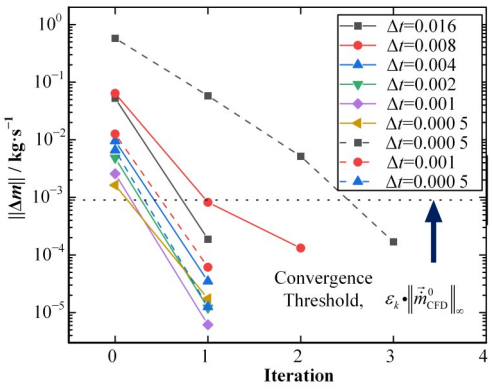



**图11** 不同时间步长下质量流量差的收敛情况（彩图见网络版）
**Fig.11** Convergence of mass flow rate difference at different time steps (color online)

SYS单独模拟的结果。结果显示，两者的流量变化趋势基本一致，但SYS程序中右侧流道的流量偏大。这是由于SYS无法准确模拟三通中的三维流动混合现象，低估了合流情况下的支流型阻系数，导致右侧流道流量偏大。在压力分布中，观察到了6.3~7.0 s之间出现了压力波动。为分析原因，基于同一CFD模型进行了单独模拟，边界条件与耦合分析6.0~7.0 s时一致，具体边界条件和模拟结果如图14所示。结果表明，在1.0 s后出现了压力波动，这可能是由于高雷诺数流动下流道的不规则性引起的流动周期性变化，并最终导致耦合计算结果出现类似的波动。

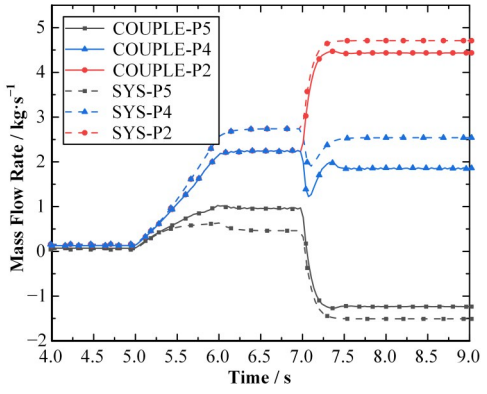



**图12** 不同位置质量流量对比（彩图见网络版）
**Fig.12** Mass flow rate comparison at different locations (color online)

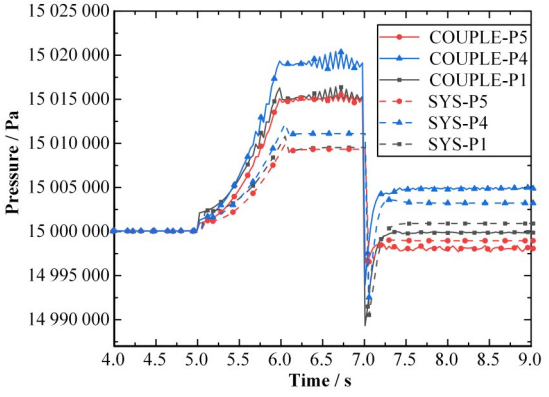



**图13** 不同位置压力对比（彩图见网络版）
**Fig.13** Pressure comparison at different locations (color online)

## 2.3 ACP100冷却剂泵卡轴事故分析

基于该压力修正耦合方法对ACP100反应堆的冷却剂泵卡轴事故进行分析，ACP100是中国自主研发的模块化小型反应堆[21-22]，满足多种规模的电力需求。其核心参数如表1所示。冷却剂系统中冷却剂从泵出口流经下降段、下腔室和流量分配罩，冷却

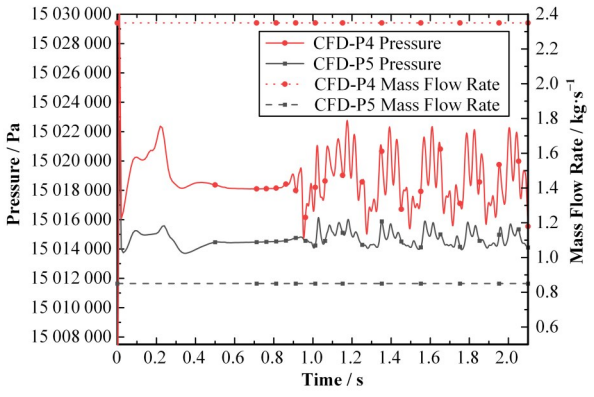



**图14** CFD单独模拟的边界条件和压力（彩图见网络版）
**Fig.14** Boundary conditions and pressure distribution in standalone CFD simulation (color online)

堆芯内的57个燃料组件后进入上腔室，再经直流蒸发器流回至冷却剂泵，形成闭合回路。

在ACP100冷却剂泵卡轴事故分析中，采用本研究开发的一维-三维耦合方法，结合一维程序的全局流量动态模拟和三维CFD的局部精细分析，能够准确揭示堆芯入口流量分配的变化。针对ACP压力容器中冷却剂泵出口至上腔室入口部分，使用FLUENT进行仿真，其余部分则由NUSOL-SYS进行模拟。耦合模型节点图如图15所示。为了精细模拟冷却剂的搅混过程，CFD几何模型中设置了均匀开孔的流量分配罩和4个支撑肋板（实际设计为非均匀开孔），并如图16所示对其进行三维多面体网格划分。

**表1** ACP100热工设计参数
**Table 1** Thermal design parameters of ACP100

| 参数 Parameter | 值 Value |
|---|---|
| 反应堆热功率 Reactor thermal power / MW | 385 |
| 主泵数量 Number of primary pumps | 4 |
| 燃料组件数量 Number of fuel assemblies | 57 |
| 系统压力 System pressure / MPa | 15 |
| 热工设计流量 Thermal design flow rate / $m^3 \cdot h^{-1}$ | 9 550 |
| 堆芯入口温度 Core inlet temperature / K | 558.95 |
| 堆芯出口温度 Core outlet temperature / K | 594.35 |
| 堆芯横截面积 Core flow area / $m^2$ | 1.4 |
| 堆芯活性段高度 Height of active core region / m | 2.15 |

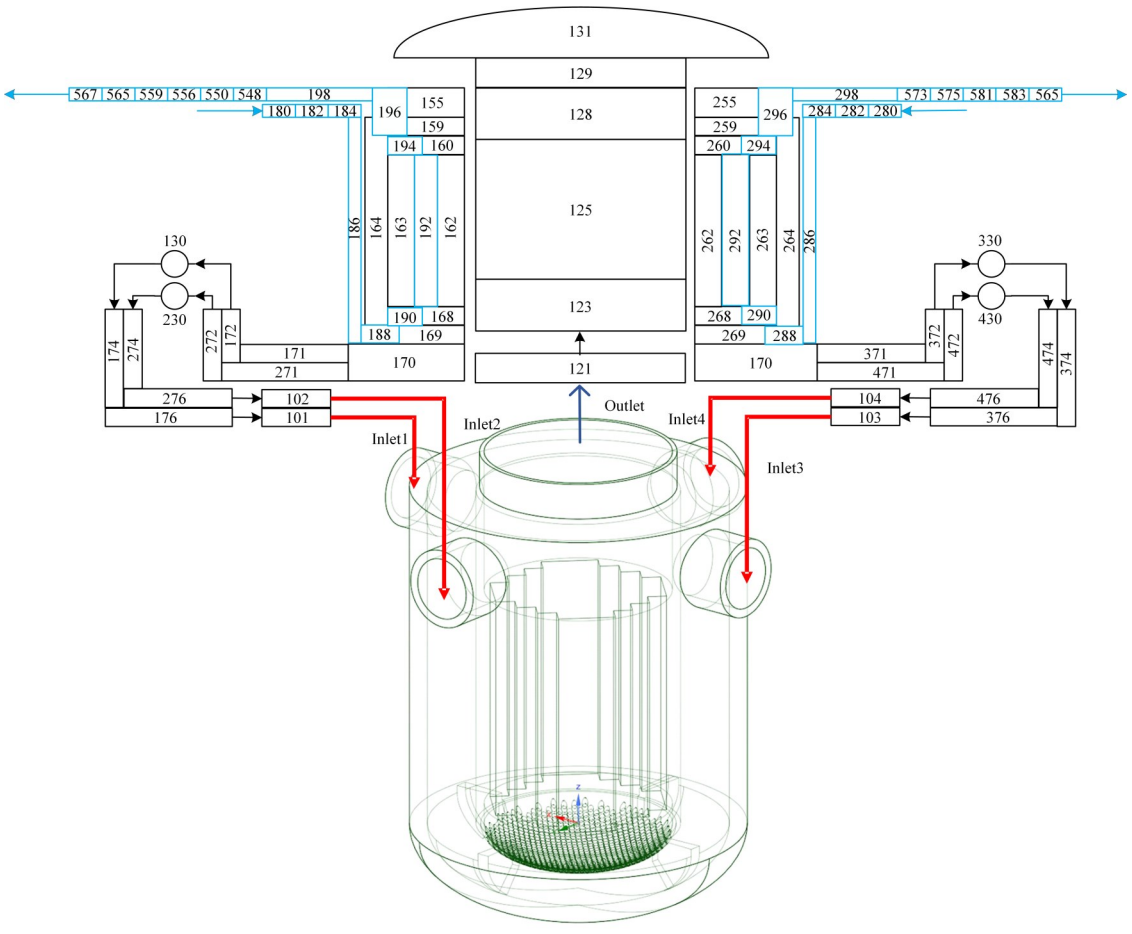



**图15** ACP100耦合计算模型节点（彩图见网络版）
**Fig.15** Model node diagram of ACP100 coupled calculation (color online)

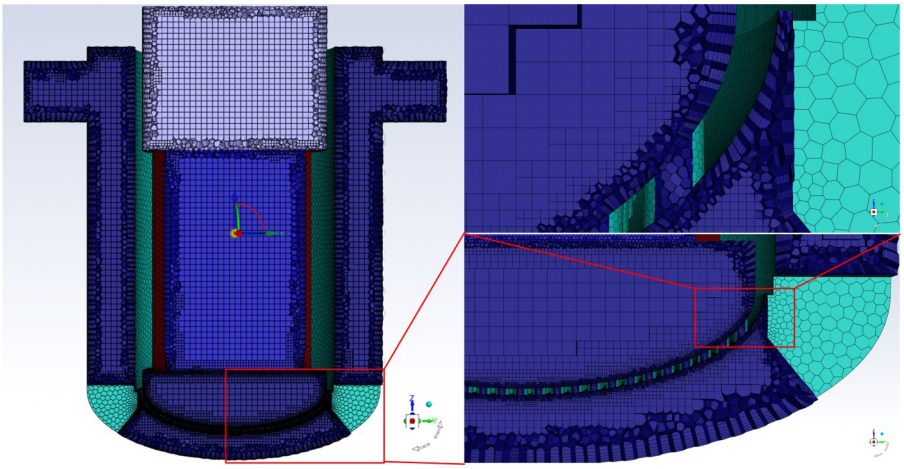


**图16** CFD网格示意图(彩图见网络版)
**Fig.16** Schematic diagram of CFD grid (color online)

通过使用用户自定义函数(UDF),FLUENT使用与SYS程序一致的IAPWS-IF97水物性,并选用兼具精度和通用性的$k$-$\omega$ SST湍流模型。同时,使用平衡循环下的堆芯功率分布,对多孔介质堆芯赋予体积功率密度。网格敏感性分析结果如图17所示,出口温度和进出口压降在网格数量超过173万时趋于稳定。最终选用173万网格进行计算。

对于4个冷却剂入口和一个出口的耦合边界,采用压力修正耦合方法进行数据传递,使用的扰动压力$dP$为$10^5$ Pa,FLUENT推进残差阈值$\varepsilon_n$为$10^{-4}$,迭代残差阈值$\varepsilon_k$为$3\times10^{-4}$,松弛因子$\omega$为1。仿真开始时,当耦合计算达到稳态后,触发一台冷却剂泵卡轴事故,事故进程如表2所示。

模拟得到了如图18所示的事故中的CFD速度分布图,其中下降段和下腔室接触面的高度设置为基准高度0 m,事故发生后,泵故障的冷却剂流道入口发生逆流,下降段各位置的流场变化较为明显,下腔室和堆芯的流动不均匀现象不显著。

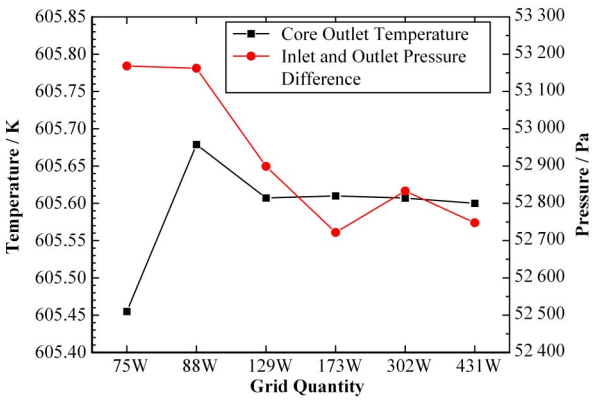



**图17** 网格无关性验证结果
**Fig.17** Verification results of grid independence

**表2** 反应堆事故进程
**Table 2** Reactor accident process

| 事件描述 Event description | 时间 Time / s |
|---|---|
| 一台泵卡轴 One pump shaft seized | 0 |
| 达到冷却剂泵转速低停堆信号整定值 Cooling pump low speed trip setpoint reached | 0.3 |
| 控制棒开始下插 Control rod starts insertion | 1.1 |
| 所有冷却剂泵和汽轮机关闭 All cooling pumps shut down, turbine shutdown | 6.1 |

如图19所示,模拟得到了事故进程中的堆芯入口流量分配,事故发生后在堆芯入口处没有观察到明显的流量分配不均匀现象,这可能得益于流量分配罩的作用。

同时得到了系统流量和温度的瞬态响应,如图20和图21所示,将其与NUSOL-SYS单独模拟进行对比分析,质量流量的变化趋势和数值上基本一致,耦合程序相比SYS单独模拟堆芯出口温度下降得更快,这可能是由于CFD程序中使用有热源的平衡的多孔介质模拟堆芯燃料区域,未能考虑传热系数和燃料热容的影响。

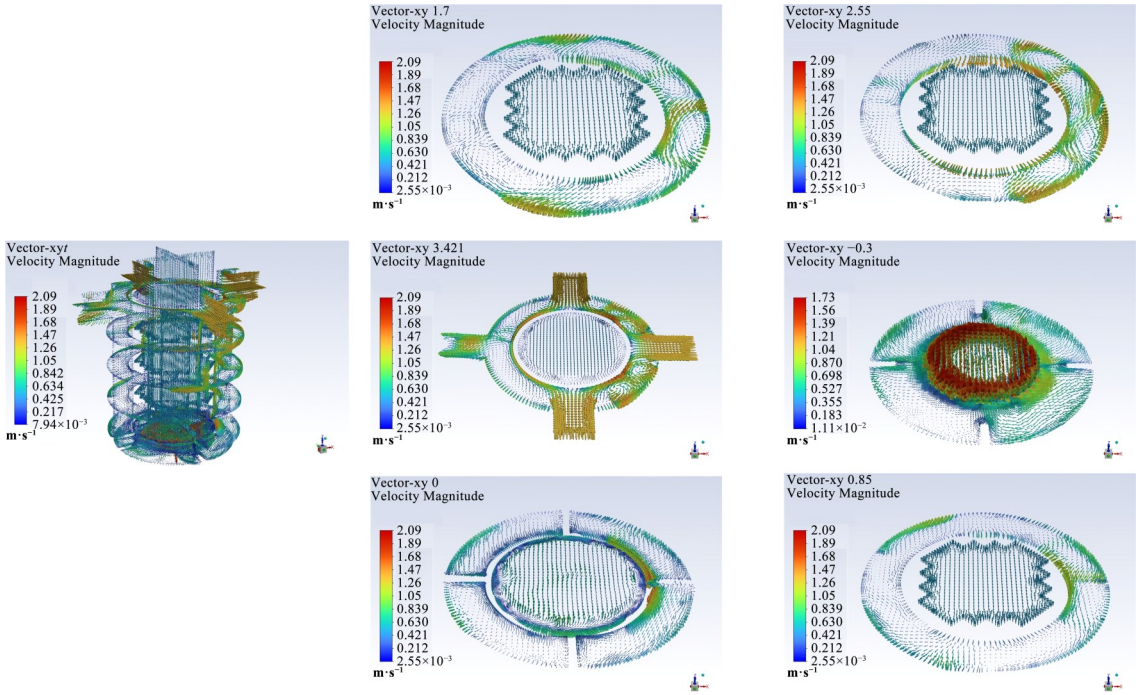



**图18**　$t$=5.75 s时不同高度的速度场分布
**Fig.18**　Velocity field distribution at different heights at $t$=5.75 s

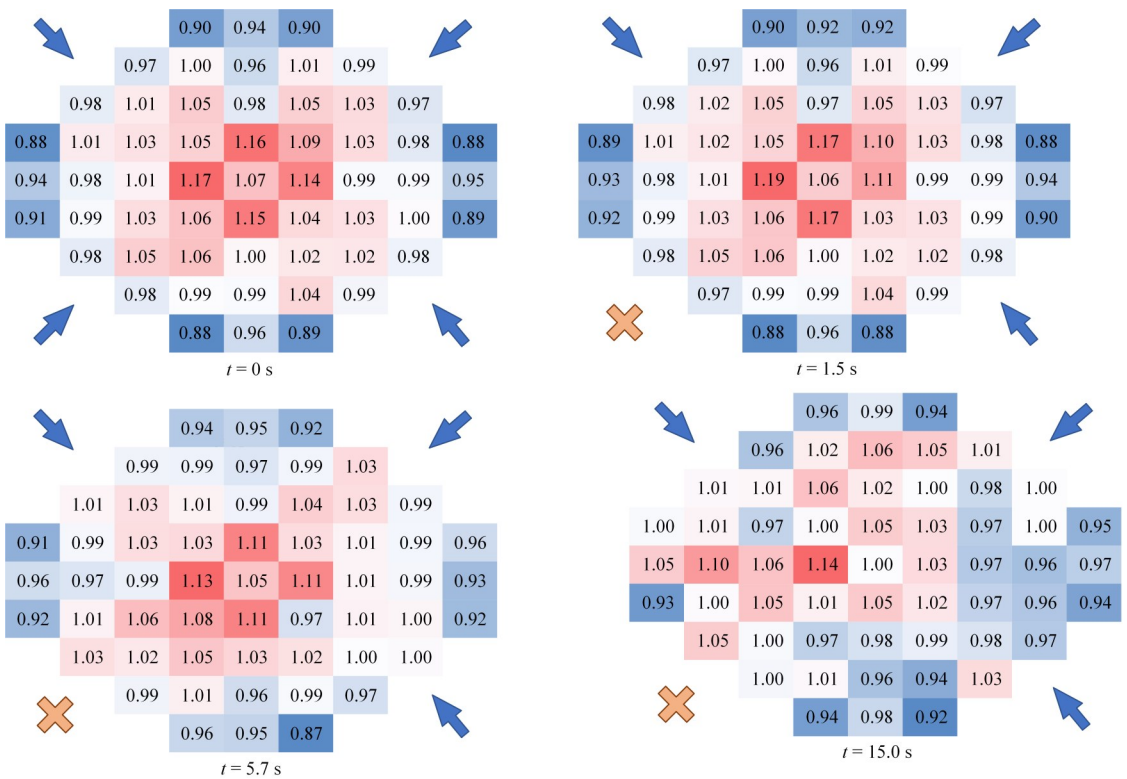



**图19**　不同时间的堆芯入口流量分配情况（彩图见网络版）
**Fig.19**　Core inlet flow distribution at different times (color online)

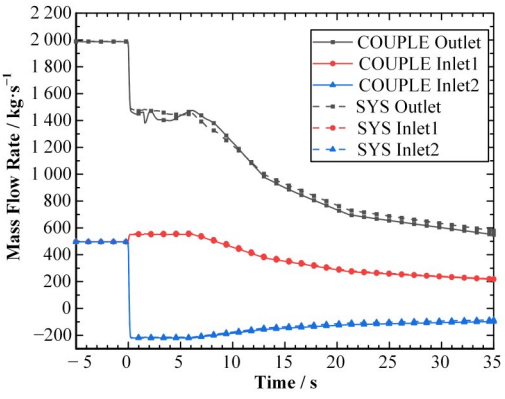



**图20** 质量流量变化情况对比(彩图见网络版)
**Fig.20** Comparison chart of mass flow rate variations (color online)

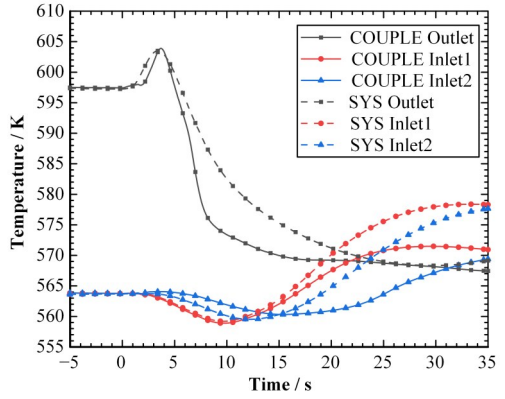



**图21** 温度变化情况对比(彩图见网络版)
**Fig.21** Comparison chart of temperature variations (color online)

## 3 结语

本研究开发了一种基于压力修正迭代的半隐式耦合方法,通过扰动法得到边界质量流量差对耦合边界的压力敏感性矩阵,结合当前的质量流量差得到压力修正值,并在迭代中不断修正压力使得当前时间步收敛。将该方法应用于CFD程序FLUENT和系统程序NUSOL-SYS之间的耦合上,通过在FLUENT的UDF中调用NUSOL-SYS的DLL的方式实现了数据传递和耦合计算。

基于单管流动问题的耦合计算结果显示,与NUSOL-SYS单独计算结果具有较高的一致性,并且能在两次迭代内实现收敛。通过模拟一个变时间步长和变流道的并联流动问题对耦合方法进行了验证计算,结果表明耦合程序在不同情况下每次迭代质量流量残差能减少1~3个数量级,具有良好的稳定性和收敛性。随后,针对ACP100一台主泵卡轴事故进行耦合计算与SYS单独计算的对比分析,结果表明,一台主泵卡轴事故没有造成显著的堆芯入口流量分配不均匀性现象。该耦合方法不仅能够全面评估卡轴事故对流量分配的影响,还为优化流量分配罩设计和增强系统抗事故能力提供了科学方法。未来计划将其应用范围扩展到两相流,并在更多有价值的耦合工况中进行应用。

**作者贡献声明** 曾友来负责论文构思、方法论、软件开发、验证研究、分析、解释数据、起草文章;荀军利负责对文章的知识性内容作批评性审阅、指导、支持性贡献等。

## 参考文献

1 Smith B L. Assessment of CFD codes used in nuclear reactor safety simulations[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2010, **42**(4): 339 – 364. DOI: 10.5516/net.2010.42.4.339.

2 董化平, 樊文远, 郭赟. 板状燃料组件流量分配CFD研究与优化[J]. 核技术, 2016, **39**(8): 080603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.080603.
DONG Huaping, FAN Wenyuan, GUO Yun. CFD investigation and optimization on flow distribution of plate-type assembly[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(8): 080603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.080603.

3 梅牡丹, 周翀, 邹杨, 等. 熔盐堆仿真试验装置的堆舱传热三维数值模拟及试验验证[J]. 核技术, 2025, **48**(7): 070031. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240424. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240424.
MEI Mudan, ZHOU Chong, ZOU Yang, *et al*. Numerical simulation analysis and experimental validation for the reactor cavity of molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(7): 070031. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025. hjs. 48.240424. CSTR: 32193.14. hjs. CN31-1342/TL.2025.48.240424.

4 张银星, 高璞珍, 何晓强, 等. STAR-CCM+与一维用户程序耦合方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, **41**(11): 1669 – 1674. DOI: 10.11990/jheu.201906045.
ZHANG Yinxing, GAO Puzhen, HE Xiaoqiang, *et al*. Coupled method of STAR-CCM+ and one-dimensional user code[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, **41**(11): 1669 – 1674. DOI: 10.11990/jheu.201906045.

5 何帆, 蔡翔舟, 郭威, 等. RELAP5/FLUENT耦合程序的开发[J]. 原子能科学技术, 2021, **55**(4): 693 – 703. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0325.
HE Fan, CAI Xiangzhou, GUO Wei, *et al*. Development of coupled program based on RELAP5/FLUENT[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, **55**(4): 693

－703. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0325.

6 陆道纲, 宋海洁, 郭劲松, 等. 基于“一维系统+三维CFD”耦合方法的快堆非能动余热排出系统自然循环特性的数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2024, **58**(9): 1833－1843. DOI: 10.7538/yzk.2024.youxian.0324
LU Daogang, SONG Haijie, GUO Jinsong, *et al*. Numerical simulation of natural circulation characteristic of fast reactor passive decay heat removal system based on "1-D System+3-D CFD" coupled method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, **58**(9): 1833－1843. DOI: 10.7538/yzk.2024.youxian.0324.

7 Zhang K L. The multiscale thermal-hydraulic simulation for nuclear reactors: a classification of the coupling approaches and a review of the coupled codes[J]. International Journal of Energy Research, 2020, **44**(5): 3295－3315. DOI: 10.1002/er.5111.

8 Aumiller D L, Tomlinson E T, Bauer R C. A coupled RELAP5-3D/CFD methodology with a proof-of-principle calculation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, **205**(1－2): 83－90. DOI: 10.1016/S0029-5493(00)00370-8.

9 Li W, Wu X L, Zhang D L, *et al*. Preliminary study of coupling CFD code FLUENT and system code RELAP5 [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, **73**: 96－107. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.06.042.

10 Martelli D, Forgione N, Barone G, *et al*. Validation of the coupled calculation between RELAP5 STH code and Ansys FLUENT CFD code[R]. Centro Ricerche Brasimone, 2014.

11 Toti A, Vierendeels J, Belloni F. Improved numerical algorithm and experimental validation of a system thermal-hydraulic/CFD coupling method for multi-scale transient simulations of pool-type reactors[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, **103**: 36－48. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.01.002.

12 Andrea P, Francesco G, Marigrazia M, *et al*. STH/CFD coupled simulation of the protected loss of flow accident in the CIRCE-HERO facility[J]. Applied Sciences, 2020, **10**(20): 7032. DOI: 10.3390/app10207032.

13 Bertolotto D. Coupling a system code with computational fluid dynamics for the simulation of complex coolant reactivity effects[D]. Lausanne: EPFL, 2011.

14 Peter J E V, Dwight R P. Numerical sensitivity analysis for aerodynamic optimization: a survey of approaches[J]. Computers & Fluids, 2010, **39**(3): 373－391. DOI: 10.1016/j.compfluid.2009.09.013.

15 Di Q Y, Wang M Y. 3-D resistivity tomography using the integral method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, **44**(6): 831－839. DOI: 10.1002/cjg2.205.

16 Chao F, Shan J Q, Gou J L, *et al*. Study on the algorithm for solving two-fluid seven-equation two-pressure model [J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, **111**: 379－390. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.09.021.

17 Fan J, Gou J L, Shan J Q, *et al*. Development and validation of a two-fluid three-field model for the vertical upward flow[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, **141**: 103953. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103953.

18 Fan J, Gou J L, Huang J, *et al*. A fully-implicit numerical algorithm of two-fluid two-phase flow model using Jacobian-free Newton－Krylov method[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2023, **95**(3): 361－390. DOI: 10.1002/fld.5155.

19 ANSYS Inc. ANSYS FLUENT theory guide[M]. Release 2024 R2. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2024: 1-1057.

20 ANSYS Inc. ANSYS FLUENT customization manual [M]. Release 2024 R2. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2024: 1-739.

21 宋丹戎, 李庆, 秦冬, 等. “玲龙一号”反应堆研发关键技术: 堆芯设计与安全设计[J]. 核动力工程, 2021, **42**(4): 1－5. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.04.0001.
SONG Danrong, LI Qing, QIN Dong, *et al*. Key technology of ACP100: reactor core and safety design[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, **42**(4): 1－5. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.04.0001.

22 丁雷, 陈星, 王典乐, 等. ACP100反应堆整体水力模拟试验研究[J]. 核动力工程, 2023, **44**(S1): 29－34. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.S1.0029.
DING Lei, CHEN Xing, WANG Dianle, *et al*. Experiment research on integral hydraulic simulation of ACP100 reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2023, **44**(S1): 29－34. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.S1.0029.