

# 硝酸盐自然循环回路数值模拟及参数的 敏感性分析

王 凯<sup>1,2</sup> 王超群<sup>1,2</sup> 蔡创雄<sup>1</sup> 杨 群<sup>1,2</sup> 何兆忠<sup>1</sup> 王纳秀<sup>1</sup>

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 硝酸盐自然循环回路(Nitrate Natural Circulation Loop, NNCL)是研究熔盐自然循环特性的重要实验平台,通过 NNCL 数值模拟及参数的敏感性分析,加深对熔盐自然循环的理解,为熔盐堆非能动余热排出系统设计积累经验。通过实验数据,验证数值模拟及不确定性分析的正确性,并基于敏感性分析方法研究输入参数对自然循环流量的影响。采用修改后的 RELAP5/MOD4.0 程序,建立 NNCL 分析模型,采用基于蒙特卡罗的不确定性分析法计算数值分析的不确定性。采用多元线性回归法研究输入参数的敏感性。结果表明数值模拟结果和实验数据符合性较好,同时不确定性分析的上下限值可包络 NNCL 实验结果及其误差。通过敏感性分析,对影响自然循环的输入参数的重要性进行排序。修改后的 RELAP5/MOD4.0 程序结合不确定性分析,适用于硝酸盐自然循环的数值分析。影响自然循环最敏感的 3 个因素分别为回路阻力系数、硝酸盐密度、硝酸盐比热。

**关键词** 熔盐自然循环, RELAP5/MOD4.0, 不确定性分析, 敏感性分析

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.3724/j.0253-3219.2025.hjs.48.240310

**CSTR:** 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240310

## Numerical simulation and sensitivity analysis of the nitrate natural circulation loop

WANG Kai<sup>1,2</sup> WANG Chaoqun<sup>1,2</sup> CAI Chuangxiong<sup>1</sup> YANG Qun<sup>1,2</sup> HE Zhaozhong<sup>1</sup> WANG Naxiu<sup>1</sup>

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** [Background] The nitrate natural circulation loop (NNCL) serves as a crucial experimental platform for studying the natural circulation characteristics of molten salts. Numerical simulation and sensitivity analysis of parameters in the NNCL deepen our understanding of molten salt natural circulation, thereby accumulating experience for the design and validation of passive residual heat removal systems in molten salt reactors. [Purpose] This study aims to validate the accuracy of numerical simulations and analyze uncertainty using experimental data, and explore the impact of input parameters on natural circulation flow rate through sensitivity analysis. [Methods] The modified RELAP5/MOD4.0 code was employed to establish a nitrate natural circulation analysis model. New models related to molten salt such as molten salt fluids (nitrate, FLiNaK, etc.), heat transfer correlations, liquid-fueled reactor models, etc. were added to RELAP5/MOD4.0. The NNCL system model consisted of three coupled parts, i.e.,

中国科学院青年创新促进会(No.E3292901)资助

第一作者: 王凯, 男, 1987 年出生, 2012 年毕业于华北电力大学, 现为博士研究生, 研究领域为反应堆安全分析

通信作者: 王纳秀, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

收稿日期: 2024-07-31, 修回日期: 2025-06-19

Supported by the Youth Innovation Promotion Association (No.E3292901)

First author: WANG Kai, male, born in 1987, graduated from North China Electric Power University in 2012, doctoral student, focusing on nuclear safety analysis

Corresponding author: WANG Naxiu, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

Received date: 2024-07-31, revised date: 2025-06-19

the primary circuit, molten salt pool and air cooling system modules, was validated by experimental data. The propagation of input uncertainty approach on the basis of Monte Carlo methods, was used to calculate uncertainty bounds of numerical analysis, and 14 uncertain parameters for NNCL transient were selected through previous studies, experimental data and expert judgment. Consequently, a list of input parameters along with their associated density functions was adopted by using a probabilistic methodology. Wilks' formula was used to quantify the minimum number of code runs, and the upper tolerance limit's percentile and confidence were set to the standard 95%/95%. Once the code run number and sets of uncertain input parameters were established, input uncertainty was propagated through the modified RELAP5/MOD4.0 code, hence the upper and lower uncertainty bands were obtained. The sensibility of input parameters was analyzed by performing Multiple Linear Regression (MLR) method. Finally, the standardized regression coefficient (SRC) was used to rank the importance of input parameters affecting natural circulation. **[Results]** Numerical analysis results indicate that variations in NNCL cold-end and hot-end temperatures, as well as main loop nitrate flow rates, align with experimental trends, and the maximum error between the upper and lower limits of uncertainty analysis relative to experimental data is -5.7% to 4.2% for the DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) Heat Exchanger (DHX) inlet temperature, -3.5% to 4.0% for the DHX outlet temperature, and -12% to 12% for the NNCL primary loop nitrate flow rate. The uncertainty analysis' s upper and lower bounds effectively encompass experimental data and experimental errors. The calculated F-value is 2 682.0, which is greater than 2.32, this indicates that at the  $\alpha=0.01$  significance level, there is a significant linear relationship between the nitrate flow rate of the NNCL system and the 14 input parameters. **[Conclusion]** The incorporation of uncertainty analysis with the modified RELAP5/MOD4.0 code presented in this study provides a good prediction of NNCL system operational characteristics. Through sensitivity analysis, heat transfer coefficient of air side, local resistance coefficient of primary loop, and density of nitrate are identified as three most sensitive factors affecting natural circulation.

**Key words** Molten salt natural circulation, RELAP5/MOD4.0, Uncertainty analysis, Sensitivity analysis

熔盐堆是第四代核反应堆的6种候选堆型之一<sup>[1-3]</sup>。除本身具有良好的固有安全性外,还采用了非能动余热排出系统,能够有效地缓解失去厂外电等事故的后果<sup>[4-7]</sup>。为了研究高温熔盐自然循环回路的排热能力、稳定运行及瞬态响应等特性,中国科学院上海应用物理研究所建造了高温熔盐自然循环回路,采用硝酸盐作为介质,简称硝酸盐自然循环回路(Nitrate Natural Circulation Loop, NNCL)。它是验证熔盐系统分析程序和热工水力计算方法适用性的重要平台,为熔盐堆非能动余热排出系统的设计和建造提供重要的经验。敏感性分析是研究自变量的不同值如何影响特定的因变量。通过敏感性分析可以深入理解各参数(如流体物性、换热模型、回路阻力等)对自然循环的影响。本文建立硝酸盐自然循环分析模型,并采用基于蒙特卡罗的不确定性分析法计算数值分析的不确定性限值。根据实验数据同数值计算和不确定性分析结果的对比,验证数值分析及不确定性分析模型的正确性,在此基础上对输入参数的敏感性进行分析,研究输入参数对自然循环流量影响重要性。

## 1 NNCL简介

NNCL熔盐池和回路内采用硝酸盐( $\text{NaNO}_3 - \text{NaNO}_2 - \text{KNO}_3$ )作为流体介质。硝酸盐稳定性高,安全性好,具有较高的沸点,在工业生产领域应用广泛。模化分析结果显示在一定范围内可以较好模拟氟盐自然循环的特性。故采用硝酸盐替代氟盐,以验证熔盐堆非能动余热排出系统的可行性,解决非能动余热排出系统在待命、启动以及稳定运行时可能遇到的问题<sup>[8]</sup>。NNCL系统由熔盐池、双熔盐换热器(DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) Heat Exchanger, DHX)、空冷塔、空气-硝酸盐换热器(Naturaldraft Air-Cooled Heat Exchanger, NDHX)、膨胀罐、气路系统、熔盐储罐、空冷塔等组成,如图1所示,主要参数如表1所示。空冷塔有两种进风方式,侧面进风(图1黑色箭头所示)和底部进风(图1红色箭头所示),同时NNCL空冷塔底部装风机和风门,可以通过调节风机流量和风门开度调节空气流量。电加热器位于熔盐罐底部,用于加热储罐中的熔盐<sup>[9]</sup>。热量通过电加热器传递给熔盐池,DHX换热器浸没在熔盐池中,将熔盐池中硝酸盐热量传递到DHX换热器管内硝酸盐。DHX管内

硝酸盐吸收热量后温度升高,密度减小,沿管路上升,流入NDHX,热量被空冷塔内空气带走,温度降低,密度增大,沿下降管路重新流回 DHX 管内,再次被加热,从而形成循环。

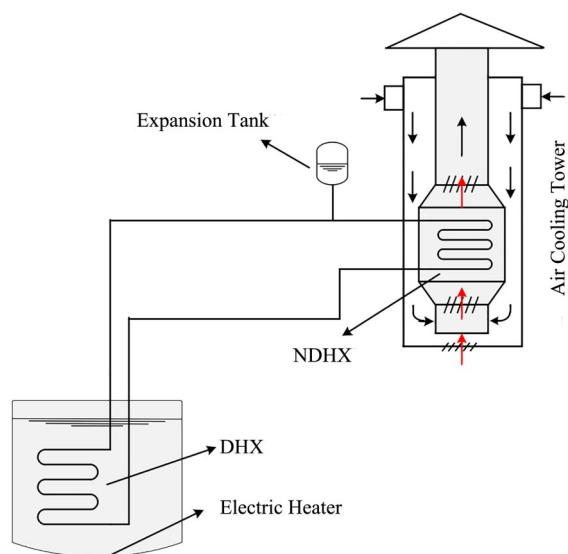


图1 NNCL 总体布局示意图  
Fig.1 Schematic of NNCL

表1 NNCL主要设计参数  
Table 1 Main parameters of the NNCL

| 主要参数<br>Main parameter                        | 设计值<br>Design value                            |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 设计功率<br>Design power / kW                     | 40                                             |
| 熔盐类型<br>Molten Salt type                      | $\text{NaNO}_3 - \text{NaNO}_2 - \text{KNO}_3$ |
| 空冷塔高度<br>Height of air cooling tower          | 3~6 m 可调<br>Adjustable from 3~6 m              |
| DHX 换热器类型<br>The type of DHX heat exchanger   | 蛇形盘管<br>Serpentine coil                        |
| NDHX 换热器类型<br>The type of NDHX heat exchanger | 蛇形盘管<br>Serpentine coil                        |

## 2 分析方法

### 2.1 不确定性分析方法

本文采用“输入不确定性传递方法”<sup>[10]</sup>,该方法以蒙特卡罗方法为基础。核心在于确定输入参数的不确定性,并进行传递计算,最后评估参数对所关注输出结果的影响。本方法需要通过大量的随机抽样来模拟输入参数的不确定性。对于每个具有不确定性的输入参数,需要确定其可能的取值范围和概率分布。概率分布通常包括正态分布、均匀分布、梯形

分布等。图2为该方法示意图。

### 2.2 系统分析程序

RELAP5 是 Idaho 国家工程实验室 (Idaho National Laboratory, INL) 为美国核管理委员会 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) 开发的轻水堆瞬态分析程序, NRC 批准的用于工程安全审评<sup>[11]</sup>。其部件模型包括管道、阀、泵、汽轮机、分支和控制系统部件等,同时还包含了截面突变、交叉流、壅塞流等水力学模。它被广泛应用于各类轻水堆的事故分析。RELAP5/MOD4.0 是 RELAP5 系列中最新版,它由 Innovative System Software (ISS) 开发的,再保留了 RELAP5 所有模型的基础上增加更多的流体工质。

RELAP5/MOD4.0 并不能满足本研究的全部需要,因此本研究在 RELAP5/MOD4.0 程序的基础上进行二次开发。增加了硝酸盐流体物性,同时根据相关换热试验结果增加熔盐自然循环相关的换热关系<sup>[9]</sup>,以满足硝酸盐自然循环回路的模拟要求。同时根据本文采用的不确定性分析方法和识别的不确定性输入参数,增加了熔盐不确定性分析包,以满足硝酸盐自然循环回路不确定性分析的要求。

### 2.3 输入不确定性参数

对于不确定参数,本文根据描述自然循环基本方程、专家经验判断及前期研究成果确定<sup>[12]</sup>。目前为止,已在 NNCL 进行了一系列的实验,包括自然循环换热试验、系统阻力试验等<sup>[9,13-15]</sup>,本文在这些试验结果及专家意见的基础上确定了不确定性参数及其不确定性范围。选取的输入不确定性参数见表 2。本文采用 Wilks 公式<sup>[16]</sup>计算样本量,样本数取决于置信度  $\beta$  和置信区间  $\gamma$ , Wilks 公式的数学表达式如式(1)所示:

$$\beta = 1 - \sum_{i=N-m+1}^N \frac{N!}{i!(N-i)!} \gamma^i (1-\gamma)^{N-i} \quad (1)$$

### 2.4 敏感性分析方法

敏感性分析,它是评估输入变量对模型输出影响的重要方法。通过敏感性分析可以从定量分析的角度研究有关因素发生某种变化时对某一个或一组关键指标影响程度。包括局部敏感性分析和全局敏感性分析两种,局部敏感性分析关注在特定点或小范围内输入参数的变化对输出的影响。全局敏感性分析考虑整个参数空间内的变化,评估输入参数对整个输出的总体影响。本研究采用全局敏感性分析,研究选取的所有参数对模型输出的影响。

Uncertain Parameters and Probability Distribution

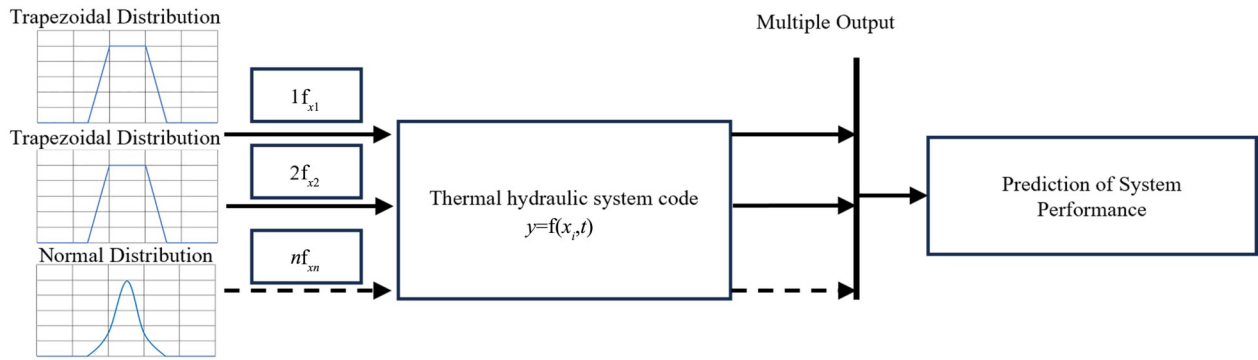


图2 输入参数不确定性传递  
Fig.2 Input parameter uncertainty propagation

表2 影响NNCL性能的关键参数  
Table 2 Key parameters that affect NNCL performance

| 序号<br>No. | 参数<br>Parameter                                           | 符号<br>Symbol            | 分布 Distribution |                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
|           |                                                           |                         | 范围 Area         | 分布 Distribution |
| P-1       | 硝酸盐热膨胀系数<br>Coefficient of thermal expansion of nitrate   | b_nitrate               | 0%~6%           | 均匀分布 Uniform    |
| P-2       | 硝酸盐密度 Density of Nitrate                                  | $\rho_{\text{nitrate}}$ | 0%~6%           | 均匀分布 Uniform    |
| P-3       | 硝酸盐黏度 Viscosity of Nitrate                                | $\nu_{\text{nitrate}}$  | 0%~6%           | 均匀分布 Uniform    |
| P-4       | 硝酸盐比热 Heat capacity of Nitrate                            | $C_{p\_nitrate}$        | 0%~3%           | 均匀分布 Uniform    |
| P-5       | 硝酸盐导热系数 Heat conductivity of Nitrate                      | $k_{\text{nitrate}}$    | 0%~6%           | 均匀分布 Uniform    |
| P-6       | 熔盐-熔盐换热器管内换热系数<br>Heat transfer coefficient of tube side  | $h_{\text{tube}}$       | 0%~10%          | 均匀分布 Uniform    |
| P-7       | 熔盐-熔盐换热器管外换热系数<br>Heat transfer coefficient of shell side | $h_{\text{shell}}$      | 0%~10%          | 均匀分布 Uniform    |
| P-8       | 熔盐-空气换热器空气侧换热系数<br>Heat transfer coefficient of air side  | $h_{\text{air}}$        | 0%~10%          | 均匀分布 Uniform    |
| P-9       | 加热功率 Power                                                | P                       | 0%~3%           | 均匀分布 Uniform    |
| P-10      | 回路阻力系数<br>Local resistance coefficient of primary loop    | $f_{\text{loop}}$       | 0%~15%          | 均匀分布 Uniform    |
| P-11      | 空冷塔入口空气温度<br>Inlet air temperature of cooling tower       | $T_{\text{air}}$        | 0%~3%           | 均匀分布 Uniform    |
| P-12      | 不锈钢体积比热<br>Volumetric heat capacity of stainless steel    | $cpv_{\text{st}}$       | 0%~5%           | 正态分布 Normality  |
| P-13      | 不锈钢导热系数<br>Thermal conductivity of stainless steel        | $k_{\text{st}}$         | 0%~5%           | 正态分布 Normality  |
| P-14      | 空气流量 Air mass flow rate                                   | $m_{\text{air}}$        | 0%~5%           | 均匀分布 Uniform    |

多元线性回归法,是常用的敏感性分析方法,本研究采用多元线性回归法<sup>[17]</sup>进行输入参数敏感性分析。其数学表达式式(2)。本文采用 $F$ 评估模型的显著性,其中 $\alpha$ 取0.01。线性公式拟合的优度评估采用调整后的 $R^2$ ,即 $R^2_{\text{adj}}$ 。 $R^2_{\text{adj}}$ 考虑到了自变量的个数和样本量的影响,相对于 $R^2$ 能够更好地衡量因变量与预测变量之间线性相关性。采用方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)评估参数的共线性,

小于5时认为不存在共线性问题,否则需重新评估选取的输入参数。采用标准回归系数SRC (standardized regression coefficient)作为敏感性分析系数,其绝对值大小表征参数的重要度。敏感性分析具体步骤如图3所示。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2)$$

式中: $\beta_0$ 为回归常数; $\beta_k$ 为回归系数; $\varepsilon$ 为随机误差。

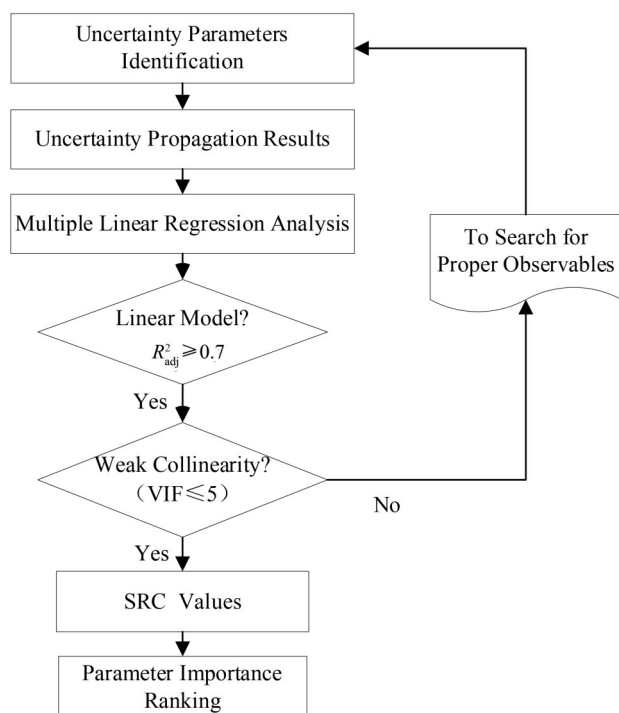


图3 敏感性分析步骤  
Fig.3 Sensitivity analysis steps

### 3 分析结果

#### 3.1 NNCL 实验

实验目的是研究功率变化过程中NNCL系统关键参数(包括热端温度(DHX出口)、冷端温度(DHX入口)及主回路流量)的瞬态响应特性,为系统分析模型的验证提供实验数据。

自然循环回路可用于调节工况的参数较少,本实验主要通过改变电加热器加热功率和空冷塔风门开度达到调节NNCL系统热端温度、冷端温度以及主回路流量的目的。

实验过程:实验初始时刻电加热器功率7.5 kW,实验开始后,电加热器功率提高至27 kW,NNCL主系统温度升高,同时不断调节阀门开度控制空冷塔空气流量,从而控制主回路温度的变化,整个实验持续约340 min。实验结果如图4和图5所示。图4为DHX进出口温度,0时刻电加热器功率设为27 kW,同时开启风门,NDHX换热器空气侧带走热量增加,NDHX出口硝酸盐温度降低,故开始时DHX入口温度开始降低,随后由于加热功率升高温度开始升高。115 min时开大风门增加空气流量,增大NDHX换热器换热能力,DHX入口温度迅速降低,随后逐渐升高。275 min时,再次开大风门增大空气流量,DHX换热器入口温度变化重复上述过程。随着风门开度增大,空气流量升高,DHX入口温度升高趋势逐渐

变缓。电加热器功率升高后,DHX换热器出口温度,逐渐升高,其温度变化率随风门开大而降低。图5为主回路硝酸盐流量的变化趋势,0时刻电加热器功率升高及风门开度变大后,流量迅速升高,并保持相对稳定值,其后每次增大风门后,流量均快速升高,并在约5 min内达到相对稳定值。

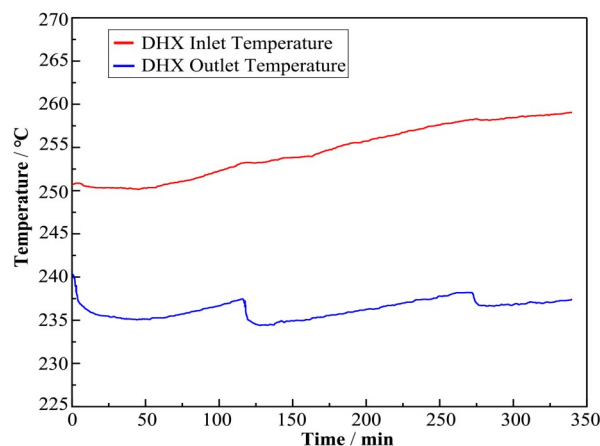


图4 DHX进出口温度变化曲线(彩图见网络版)  
Fig.4 Variation curves of DHX inlet and outlet temperature (color online)

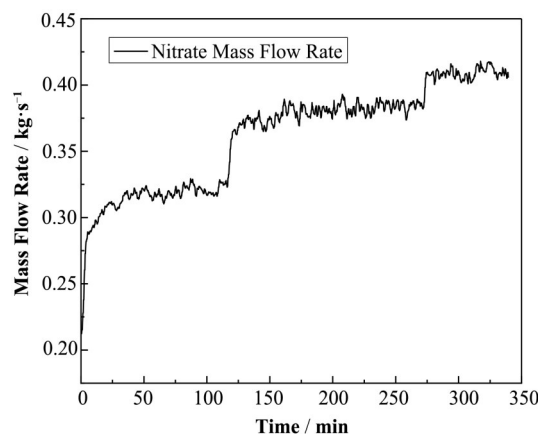


图5 NNCL主回路硝酸盐流量变化曲线  
Fig.5 Nitrate flow rate variation curve of NNCL

#### 3.2 数值模拟及不确定性分析结果

##### 3.2.1 不确定性样本

本研究选取 $\gamma$ 为95%, $\beta$ 为95%,阶数 $m$ 为1,根据Wilks公式(详见式(1))对应的最小样本数为59,选取的不确定性输入参数及概率分布见表2。

##### 3.2.2 分析模型

本文采用修改后的RELAP5/MOD4.0程序建立NNCL系统分析模型,系统节点划分如图6所示,包括以下三个系统:

1) 熔盐池, 由控制体 1XX 表示。控制体 100 为熔盐池底部, 与电加热器相连接。控制体 106 为熔盐池上部室; 控制体 114 和 104 分别表示假定的熔盐池自然循环上升和下降通道, 熔盐池中并不存在真实的上升或下降通道, 模型采用“多接管”横向连接控制体 114 和 104 以模拟横向流动;

2) 主回路, 由控制体 2XX 表示。控制体 202 和 224 分别表示 DHX 换热器管道和 NDHX 换热器管

道。控制体 252 和时间控制体 254 表示膨胀罐, 用于主回路压力调节。通过热构件控制体 202 与 104 进行热交换;

3) 空冷塔, 由控制体 3XX 表示。控制体 306 为 NDHX 换热器空气侧, 通过热构件与主回路控制体 224 进行热交换, 时间控制体 352 和时间控制体 350 分别表示空气入口和出口边界。

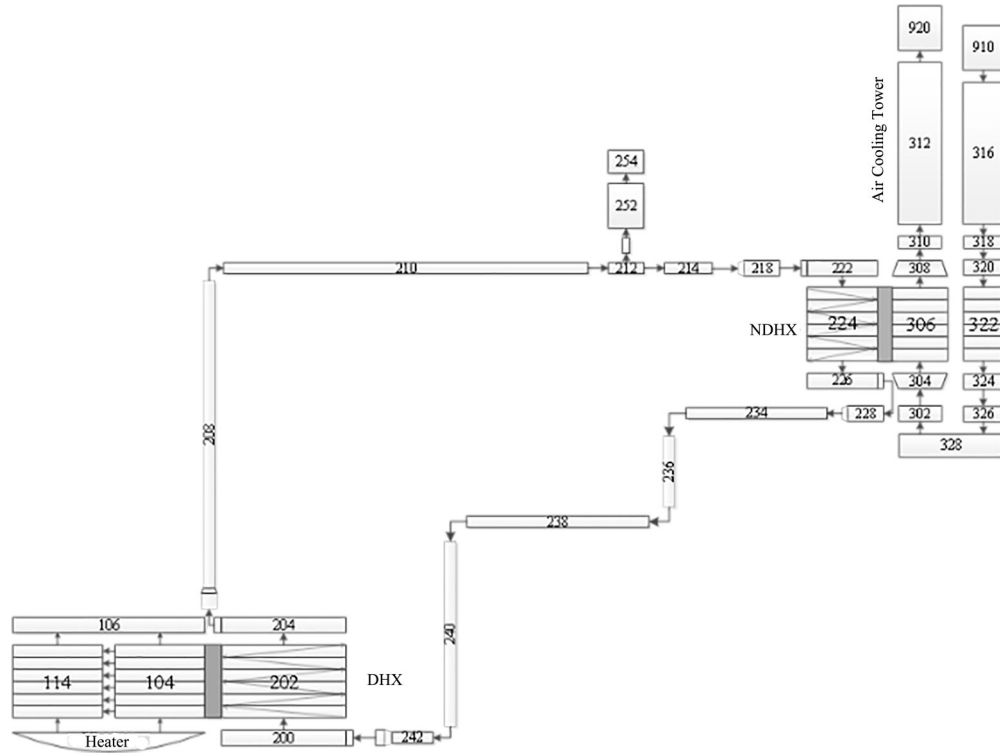


图 6 NNCL 系统节点示意图  
Fig.6 Nodalization diagram of the NNCL system

### 3.2.3 分析结果

图 7~9 为数值模拟的计算结果与实验数据对比。从模拟曲线可以看出空冷塔风门开大后, DHX 入口温度先骤降, 后逐渐升高。DHX 出口温升速率随风门的开大不断降低。NNCL 主回路硝酸盐流量随风门开大而增大, 模拟的温度和流量变化趋势同实验趋势一致。

图 7~9 同时也给出了不确定分析的结果, 其中 Lower limit case 为不确定性分析的下限, Upper limit case 为不确定性分析的上限。相对于实验数据, DHX 入口温度不确定性分析上下限差值的最大百分比为 -5.7%~4.2%, DHX 出口温度不确定性分析上下限差值的百分比范围为 -3.5%~4.0%, NNCL 主回路硝酸盐流量不确定性分析上下限差值的变化百分比区间为 -12%~12%。同时, 从图中可以看出, 不

确定性分析的上下限可以较好地包容实验数据及实验误差, 修改后的 RELAP5/MOD4.0 程序可以较好的预测 NNCL 系统的运行特性。

### 3.3 敏感性分析

自然循环流量是自然循环非常重要的参数, 能否建立稳定的流量及流量的大小直接影响自然循环的传热能力, 本文针对 NNCL 系统不确定性输入参数对主回路流量的敏感性开展分析和研究。§3.2 模拟和实验结果对比, 证明了基于修改后 RELAP5/MOD4.0 的数值分析模型适用于 NNCL 系统特性分析。在此基础上, 本研究采用多元线性回归法分析参数的敏感性, 详见 §3.3。本研究取加热功率 40 kW, 选取的不确定性的输入参数见表 2, 样本数为 93, 93 个输入样本的计算结果如图 10 所示。

本文采用  $F$  检验评估模型的显著性, 取显著性

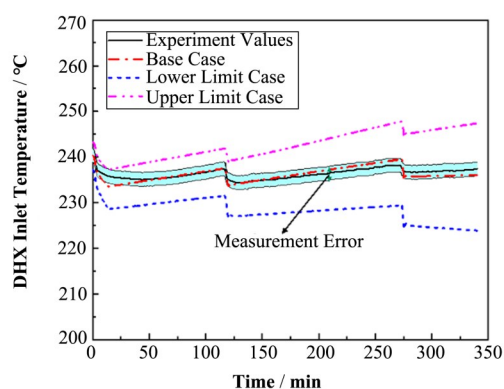


图7 DHX入口温度数值模拟值同实验值对比  
(彩图见网络版)

Fig.7 Comparison between numerical simulation values and experimental values of DHX inlet temperature (color online)

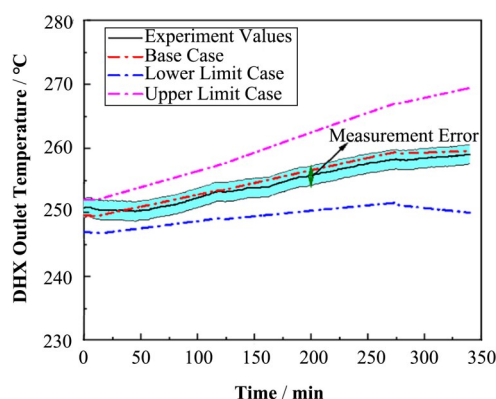


图8 DHX出口温度数值模拟值同实验值对比  
(彩图见网络版)

Fig.8 Comparison between numerical simulation values and experimental values of DHX outlet temperature (color online)

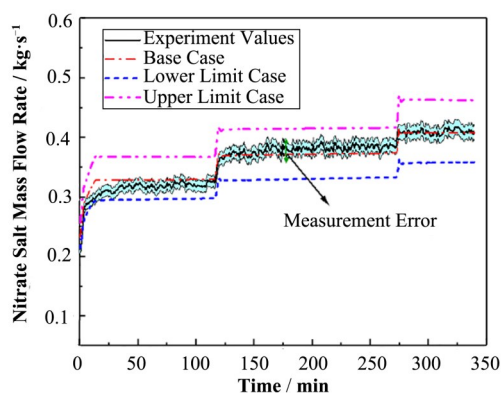


图9 NNCL主回路硝酸盐流量模拟值同实验值对比  
(彩图见网络版)

Fig.9 Comparison between numerical simulation values and experimental values of nitrate salt mass flow (color online)

水平  $\alpha=0.01$ ,  $F_{0.01(14,78)}=2.32$ 。计算得到的  $F$  值为 2 682.0, 大于 2.32, 即在显著性水平  $\alpha=0.01$  时 NNCL 系统硝酸盐流量同 14 个输入参数有显著的线性关

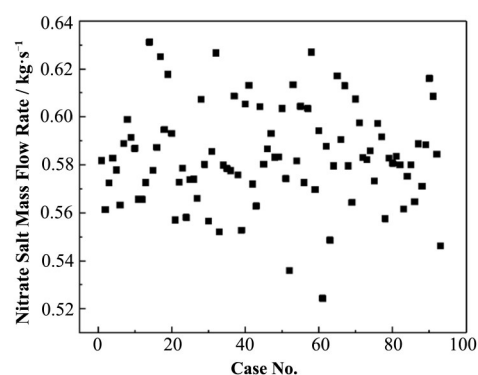


图10 93样本计算结果  
Fig.10 Calculation results of 93 samples

系。经统计学分析  $R_{adj}^2=0.998$ , 大于 0.7, 多元线性回归模型具有统计学意义。

VIF 计算值见图 11, 均小于 5, 故输入参数之间不存在共线性, 采用 SRC 进行参数重要度识别。各参数对应的 SRC 绝对值大小表征各参数敏感性的强弱, 14 个参数的 SRC 绝对值见图 12, 其中影响 NNCL 主回路流量最重要的 3 个参数依次为空气侧

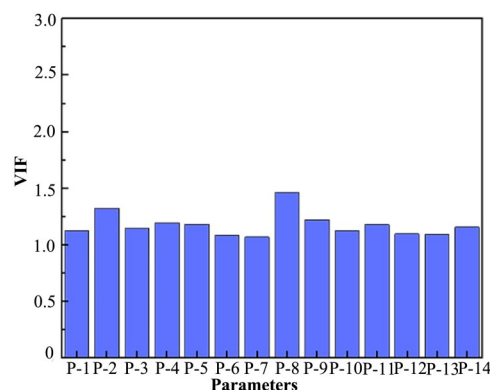


图11 14个输入参数的VIF值  
Fig.11 VIF values of 14 Parameter

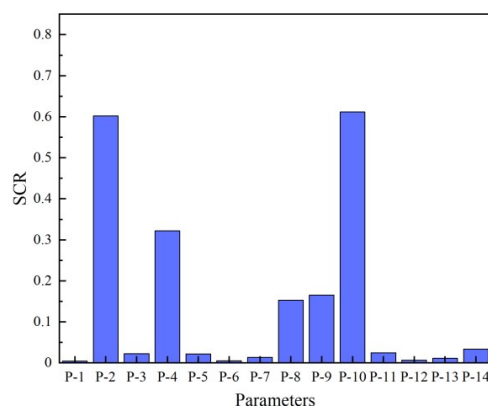


图12 SRC(绝对值)计算值  
Fig.12 SRCs (absolute value) final achieved

对流换热系数、回路阻力系数、硝酸盐密度。

自然循环依靠热段和冷段中的流体密度差所产生的驱动压头来实现流动循环。回路阻力系数是影响自然循环的重要参数之一,自然循环流量本质上是由驱动力和阻力决定的,阻力越大流量越小,反之流量越大,阻力系数是反应回路阻力的最直接的参数,阻力系数越大表示系统的阻力越大,反之越小。对于密度本身,其还会影响到回路的阻力、吸热和散热后温度的变化率等,硝酸盐比热会影响熔盐吸热能力,进而影响硝酸盐温度,因此硝酸盐的密度和比热也是影响自然循环流量的重要参数之一。

## 4 结语

本文针对 NNCL 进行数值模拟和不确定性分析,并研究输入参数对自然循环流量的敏感性。数值分析结果显示 NNCL 冷热端温度和主回路硝酸盐流量的变化趋势同试验趋势一致,同时不确定性分析的上下限可以较好的包容试验数据及试验误差,修改后的 RELAP5/MOD4.0 程序叠加不确定性分析可以较好的预测 NNCL 系统的运行特性。通过多元线性回归法,对输入参数的敏感性进行分析,分析结果表明对自然循环流量影响最大的 3 个参数分别为回路阻力系数、硝酸盐密度、硝酸盐比热。为降低高温熔盐自然循环系统设计及计算分析的误差,后续研究中应重点关注上述参数。

**作者贡献声明** 王凯负责实施研究、采集数据及分析及解释数据,起草文章及获取研究经费;王超群对文章的知识性内容作批评性审阅;蔡创雄对文章的知识性内容作批评性审阅;杨群对文章的知识性内容作批评性审阅;何兆忠提供技术支持,对文章的知识性内容作批评性审阅;王纳秀负责指导。

## 参考文献

- 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能: TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 366 - 374.  
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 366 - 374.
- 徐洪杰, 戴志敏, 蔡翔舟, 等. 钍基熔盐堆和核能综合利用[J]. 现代物理知识, 2018, **30**(4): 25 - 34. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.007.  
XU Hongjie, DAI Zhimin, CAI Xiangzhou, *et al.* Thorium-based molten salt reactor and comprehensive utilization of nuclear energy[J]. Modern Physics, 2018, **30**(4): 25 - 34. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.007.
- 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, **45**(9): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904.  
CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, **45**(9): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904.
- 焦小伟, 王凯, 王超群, 等. 熔盐堆低功率工况下反应性引入事故初始条件敏感性探讨[J]. 核技术, 2021, **44**(6): 060602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.060602.  
JIAO Xiaowei, WANG Kai, WANG Chaoqun, *et al.* Study on sensitivity of initial conditions of reactivity initiated accident under low power conditions of molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(6): 060602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.060602.
- 薛帅钰, 周翀, 邹杨, 等. 液态燃料熔盐堆停堆后主回路自然循环特性研究[J]. 核技术, 2024, **47**(7): 070604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.070604.  
XUE Shuaiyu, ZHOU Chong, ZOU Yang, *et al.* Natural circulation characteristics of main loop after shutdown of liquid-fuel molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(7): 070604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.070604.
- Zhang D L, Qiu S Z, Liu C L, *et al.* Steady thermal hydraulic analysis for a molten salt reactor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, **19**(3): 187 - 192. DOI: 10.1016/S1001-8042(08)60048-2.
- Huang J L, Jia G B, Han L F, *et al.* Dynamic simulation analysis of molten salt reactor-coupled air - steam combined cycle power generation system[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, **35**(2): 30. DOI: 10.1007/s41365-024-01394-5.
- 王凯, 蔡创雄, 何兆忠, 等. 硝酸盐自然循环回路系统特性分析[J]. 核技术, 2015, **38**(4): 040602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.040602.  
WANG Kai, CAI Chuangxiong, HE Zhaozhong, *et al.* Characteristics analysis of nitrate salt natural circulation loop[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(4): 040602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.040602.
- 张博, 徐博, 周翀, 等. 硝酸盐自然循环试验回路实验研究[J]. 核技术, 2020, **43**(9): 090603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090603.  
ZHANG Bo, XU Bo, ZHOU Chong, *et al.* Experimental study on nitrate natural circulation loop[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(9): 090603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090603.
- 冉旭, 张晓华, 李捷, 等. 核电厂最佳估算加不确定性分

- 析方法研究综述[J]. 科技视界, 2015(24): 11 - 13, 16. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2015.24.003.
- RAN Xu, ZHANG Xiaohua, LI Jie, *et al.* Overview in the development of best estimate plus uncertainty safety analysis[J]. Science & Technology Vision, 2015(24): 11 - 13, 16. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2015.24.003.
- 11 Wang C Q, Yang Q, Wang K, *et al.* Sensitivity analysis of power related parameters in a reactivity-initiated accident of a molten salt reactor[C]//Volume 1: Operating Plant Challenges, Successes, and Lessons Learned; Nuclear Plant Engineering; Advanced Reactors and Fusion; Small Modular and Micro-Reactors Technologies and Applications. August 4-6, 2021. Virtual, Online. American Society of Mechanical Engineers, 2021. DOI: 10.1115/icone28-64430.
  - 12 Jiao X, Shao S, Wang K, *et al.* Functional reliability analysis of a molten salt natural circulation system[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, **332**: 127 - 136. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.03.024.
  - 13 Wu Y H, Cai C X, Wang K, *et al.* Experimental and numerical studies on natural circulation behavior of heat exchanger for molten salt loop[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2020, **57**(3): 236 - 242. DOI: 10.1080/00223131.2019.1667924.
  - 14 侯祯, 蔡创雄, 张亚朋, 等. 硝酸盐自然循环回路熔盐空气热交换器风冷通道内流场特性分析[J]. 核技术, 2018, **41**(10): 100603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100603.
  - HOU Zhen, CAI Chuangxiong, ZHANG Yapeng, *et al.* Analysis of natural circulation flow field inside the air-cooled channel of molten salt-air heat exchanger in the nitrate natural circulation loop[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(10): 100603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100603.
  - 15 Zhang S, Lin H C, Sun X D. Thermal-hydraulic system-level analysis of a molten salt natural circulation loop[J]. Nuclear Science and Engineering, 2023, **197**(5): 920 - 946. DOI: 10.1080/00295639.2022.2102389.
  - 16 Wilks S S. Determination of sample sizes for setting tolerance limits[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1941, **12**(1): 91 - 96. DOI: 10.1214/aoms/1177731788.
  - 17 Manache G, Melching C S. Identification of reliable regression- and correlation-based sensitivity measures for importance ranking of water-quality model parameters[J]. Environmental Modelling & Software, 2008, **23**(5): 549 - 562. DOI: 10.1016/j.envsoft.2007.08.001.