

# 150 MWt 熔盐堆(SM-MSR)反应性引入事故后果的不确定性及参数敏感性分析

王 凯<sup>1,2</sup> 王超群<sup>1,2</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** 熔盐反应堆是第四代核反应堆的6种候选堆型之一,具有良好的安全特性。反应性引入事故是熔盐堆重要的设计基准事故之一,通过对150 MWt模块化熔盐堆(Small Modular Molten Salt Reactors, SM-MSR)反应性引入事故的分析和研究有利于深入了解熔盐堆的安全特性。研究150 MWt熔盐堆反应性引入事故分析结果的不确定性和参数的敏感性,为熔盐堆设计和安全分析提供重要的支持。采用RELAP5-TMSR程序建立瞬态分析模型,并采用基于蒙特卡罗方法的输入不确定性传递方法研究反应性引入事故的不确定性,通过多元线性回归法分析参数的敏感性。分析结果表明:反应性引入事故堆芯出口温度最高值为727.4 °C,低于安全限值(800 °C),燃料盐出口最高温度分布符合正态分布。熔盐堆具有良好的固有安全特性,在反应性引入事故下,影响反应堆安全最敏感的5个因素分别为燃料盐密度、堆芯阻力系数、堆芯功率、一回路阻力系数、停堆深度。

**关键词** 熔盐堆, 反应性引入事故, 安全分析, 不确定性分析, 敏感性分析

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.110602

**CSTR:** 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2024.47.110602

## Uncertainty and sensibility analysis of reactivity insertion transient accident of a 150 MWt molten salt reactor (SM-MSR)

WANG Kai<sup>1,2</sup> WANG Chaoqun<sup>1,2</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] Molten salt reactors have been selected as one of the promising candidate Generation IV reactor technologies, due to the advantages of inherent safety and high economic efficiency. The small modular molten salt reactor (SM-MSR), which utilizes low-enriched uranium and thorium fuels, is regarded as a wise development path to speed deployment time. Uncertainty and sensibility analysis of accidents possess a great guidance in nuclear reactor design and safety analysis that can be performed to obtain the safety boundary and through sensitivity analysis, thereafter to obtain the correlation of the accident consequence and input parameters. Reactivity insertion transient accident represents a type of hypothetical accidents of SM-MSR, and the study of reactivity insertion transient accident can offer useful information to improve physics thermohydraulic and structure

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: 2024-04-19, 修回日期: 2024-05-15

Supported by 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: 2024-04-19, revised date: 2024-05-15

designs. **[Purpose]** This study aims to investigate the uncertainty and sensibility of MSR reactivity insertion accident and provide supports for the design and safety analysis of the small modular molten salt reactor. **[Methods]** RELAP5-TMSR code was employed to establish a transient behavior analysis model for SM-MSR, and the model consisted of four coupled parts, including the primary circuit, 2nd circuit, air cooling system modules and passive residual heat removal system. Then, propagation of input uncertainty approach on the basis of Monte Carlo methods was employed to analyze the uncertainty of reactivity insertion transient accident consequence. Uncertain parameters for the reactivity insertion transient accident were selected by the phenomena identification and ranking table (PIRT). Subsequently, a list of input parameters along with their associated density functions was adopted by using a probabilistic methodology to establish the code run times and sets of uncertain input parameters that was propagated through the RELAP5-TMSR code, and then obtain the upper and lower uncertainty bands of the reactivity insertion transient consequence. Finally, the sensibility of input parameters was analyzed by performing Multiple Linear Regression (MLR) method, and the F-test was used to assess whether the MLR models comply with statistical laws. If the linear model was strong collinear, a significance test of the semi-partial correlation coefficient (SPC) was used for the ranking of input uncertainty parameters, otherwise, the standardized regression coefficient (SRC) would be used for the significance test. **[Results]** The uncertainty analysis results show that the maximum fuel salt temperature of SM-MSR is 727.4 °C which is lower than the acceptance criteria (800 °C). Through statistical analysis, the maximum value of reactor outlet fuel salt temperature is normally distributed. **[Conclusions]** The molten salt reactor has good safety characteristics, and the 5 important parameters are density of fuel salt, local resistance coefficient of reactor core, reactor power, local resistance coefficient of primary circuit and reactor shutdown margin.

**Key words** Molten salt reactor, Reactivity insertion accident, Safety analysis, Uncertainty analysis, Sensibility analysis

熔盐反应堆是第四代核反应堆的6种候选堆型之一<sup>[1-3]</sup>。熔盐堆采用液态燃料,具有利用钍燃料、高出口温度、无水冷却等优点。熔盐堆采用的液态燃料和石墨慢化剂具有较高的比热容<sup>[4-5]</sup>,具有较大的温度负反馈系数<sup>[6-7]</sup>,同时采用非能动余热排除系统,能够有效地缓解事故后果,具有很高的安全性<sup>[8-9]</sup>。同时熔盐堆具有很高的经济价值,除发电以外,熔盐反应堆堆芯出口温度可达700 °C以上,可为高温制氢、二氧化碳加氢制甲醇等化工过程提供工艺热。

反应性引入事故是熔盐堆设计中必须考虑的设计基准事故之一,反应性引入事故会导致反应堆功率迅速升高,进而导致反应堆温度升高,使得反应堆安全受到威胁,严重时会导致反应堆失控。影响反应性引入事故后果的因素很多,本文以150 MWt小型模块化堆(Small Modular Molten Salt Reactor, SM-MSR)为研究对象<sup>[10]</sup>,对熔盐堆反应性引入事故的不确定性及参数的敏感性进行详细分析。

## 1 SM-MSR简介

本文以150 MWt SM-MSR为研究对象,堆本体内直径为354 cm,高度为360 cm,其中堆芯活性区高度为300 cm。堆芯主容器和堆内金属支撑结构件采用哈氏合金材料,慢化剂为石墨。150 MW的

液态熔盐堆系统示意图如图1所示,主要设计参数见表1<sup>[10]</sup>。

SM-MSR采用三回路设计方案,一回路燃料盐采用LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>-ThF<sub>4</sub>,二回路冷却盐采用LiF-NaF-KF,三回路采用基于空气的布雷顿循环。一回路主要设备包括堆本体、燃料盐泵、熔盐-熔盐换热器管侧;二回路主要设备包括冷却盐泵、熔盐-熔盐换热器壳侧、熔盐-空气换热器管侧;三回路主要设备是熔盐-空气换热器壳侧以及发电机组。

一回路燃料盐由燃料盐泵驱动,流经下降环腔进入堆本体,依次经过下腔室、下支撑板、堆芯活性区、上压板、上腔室后,离开堆本体。核燃料在堆芯活性区发生裂变,燃料盐吸收核裂变能,温度升高,流经热管段后进入熔盐-熔盐换热器的管侧,将热量传递给二回路,冷却后的燃料盐流经冷管段后,进入下降环腔,流回至下腔室。二回路冷却盐通过冷却盐泵驱动,将一回路热量通过熔盐-空气换热器传递给三回路,最后经发电设施将热能转化为电能。

SM-MSR设置了非能动余热排出系统,非能动余热排出系统由PRACS(Pool Reactor Auxiliary Cooling System)和DRACS(Direct Reactor Auxiliary Cooling System)及空冷塔组成,事故状态下能够确保导出至少2%额定功率的热量,空冷塔阀门在正常运行时处于关闭状态,紧急停堆信号触发后,连锁

开启。正常运行时,在单向阀作用下,燃料盐不流经 PRACS 系统,事故工况下,熔盐泵停运,在自然循环作用下,堆芯燃料盐经过 PHX(PRACS system heat exchanger)换热器,将热量传递给缓冲盐(LiF-NaF-

KF),缓冲盐作为DRACS系统的一部分参与非能动自然循环,在非能动自然循环的作用下,最终热量经熔盐-空气换热器,被空气带至大气环境。

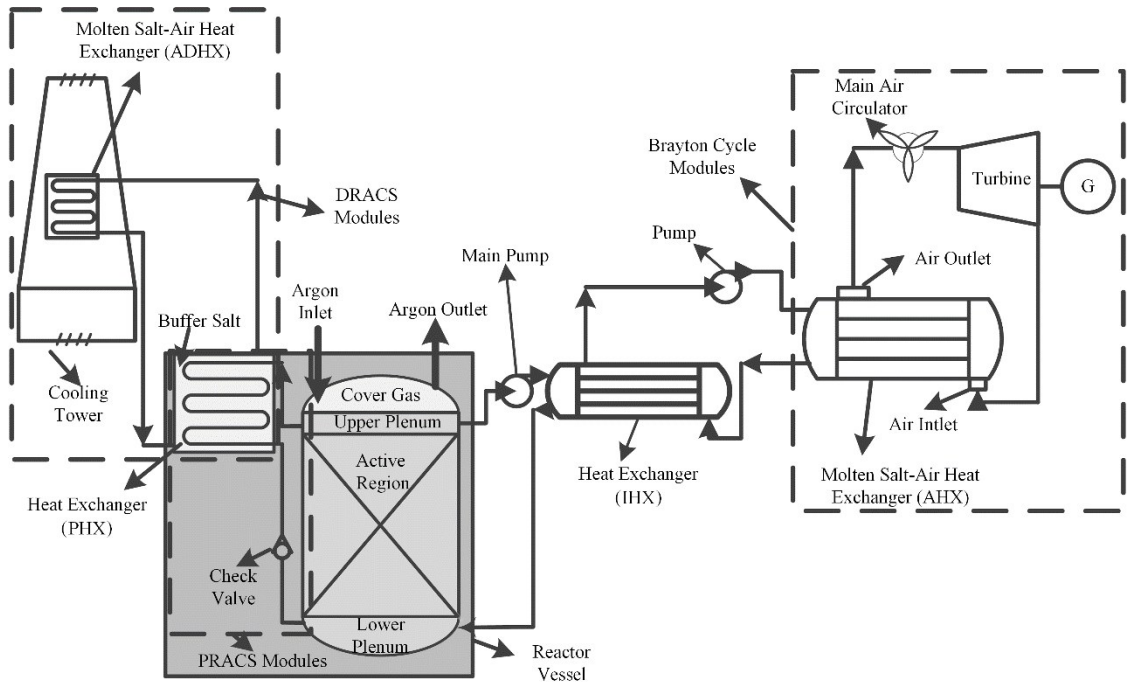


图1 150 MWt熔盐堆总体布局示意图  
Fig.1 Overall layout diagram of the 150 MWt molten salt reactor

表1 150 MWt熔盐堆主要设计参数  
Table 1 Main parameters of the 150 MWt molten salt reactor

| 主要参数 Main parameter                               | 设计值 Design value                                                          |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 功率 Thermal power                                  | 150 MWt                                                                   |
| 燃料盐组成 Fuel salt composition                       | LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> -ThF <sub>4</sub> |
| 堆芯入口/出口燃料盐温度 Fuel salt temperature (inlet/outlet) | 629 °C/700 °C                                                             |
| 堆本体直径×高度 Diameter × height of reactor body        | 3.54 m×3.6 m                                                              |
| 燃料盐功率密度 Fuel salt power density                   | 66 MW·m <sup>-3</sup>                                                     |
| 设计寿命 Lifetime of reactor body                     | 10 a                                                                      |
| 石墨结构 Graphite structure                           | 六棱柱 Hexagonal prisms                                                      |
| 二回路冷却盐 The secondary circuit salt composition     | LiF-NaF-KF                                                                |
| PRACS 系统冷却盐 PRACS molten salt composition         | LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> -ThF <sub>4</sub> |
| DRACS 系统冷却盐 DRACS molten salt composition         | LiF-NaF-KF                                                                |
| PRACS 系统设计功率 Design power of PRACS                | 2% FP                                                                     |
| 结构材料 Structure material                           | Hastelloy-N                                                               |

2 事件情景

反应性引入事件是熔盐堆功率升高最为迅速的一类事件,本文选取满功率下一根控制棒失控提出为分析事件。假设一根控制棒失控误抽出,引入的反应性导致核功率与燃料盐温度迅速上升并相继超过整定值,触发紧急停堆信号,控制棒紧急下落。停

堆触发后,一、二回路熔盐泵及压缩空气风机连锁停运,以防止熔盐过度冷却。DRACS 系统在电伴热作用下,其采用的冷却盐温度大于 500 °C,事故后非能动余热排出系统自动投入,导出堆芯余热,以保证反应堆安全。

本事件属于设计基准事故,触发保护信号为中

子注量率和反应堆出口温度超限值,任一保护信号均可触发反应堆紧急停堆。燃料盐循环系统边界是SM-MSR防止放射性物质泄漏的安全保护屏障,其结构材料采用哈氏合金,最高运行限制温度为800℃<sup>[11]</sup>。堆芯出口燃料盐直接同哈氏合金边界接触,因此本研究评价该事故的安全准则为:堆芯出口燃料盐最高温度应低于800℃。

### 3 分析方法

#### 3.1 不确定性分析方法

不确定性分析方法中,最常用的主要包括两大类:“输入不确定性传递”和“输出不确定性传递”,两种方法的特点如下<sup>[12-13]</sup>:

“输入不确定性传递”方法,此方法建立在输入误差的传播基础之上。该方法需要确定不确定性输入参数和每个参数的变化范围,并根据结果不确定性边界的置信度水平,确定程序计算的数目。

“输出不确定性传递”方法,通过相关变量的测量值和计算值的比较,给出不准确性的特性。计算的不确定性从试验设施传播到参考系统,利用准确性的外插得到不确定性。该方法的主要特点是基于输出不确定性的传播,从先前模拟的相关试验数据进行误差的外插。

“输出不确定性传递”方法对试验设施和试验数据依赖较大,而“输入不确定性传递”方法只需要确定不确定性输入参数及参数的不确定范围,考虑到熔盐堆相关的试验和运行数据较少,本文采用“输入不确定性传递”方法研究,图2为该方法的示意图。首先确定输入参数的不确定性(分布特征和范围),采用系统安全分析程序进行传递计算,最后对输出结果进行评价。在进行输入参数分析时,须确定每个输入参数的取值范围与概率分布,然后对所有输入参数同时进行抽样得到不同参数组合,作为系统程序的输入,最后进行计算与分析。

本文采用RELAP5-TMSR作为系统安全分析程序<sup>[14-16]</sup>。RELAP5-TMSR在RELAP5/MOD4.0的基础上增加了熔盐堆相关的换热关系式和液态点堆模型,RELAP5-TMSR程序中熔盐堆相关的重要模型已经过试验验证<sup>[17]</sup>,同时该程序现已应用于熔盐堆设计。

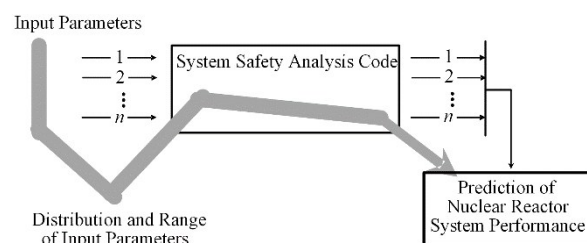


图2 输入不确定性分析方法示意图  
Fig.2 Schematic diagram of propagation of input uncertainty approach

#### 3.2 系统分析模型

本文采用RELAP5-TMSR程序建立SM-MSR系统分析模型,系统节点划分如图3所示,包括以下4个系统:

- 1) 一回路系统:包括堆本体、一回路循环泵、熔盐-熔盐(Intermediate Heat Exchanger, IHX)换热器一次侧、连接管道;
- 2) 二回路系统:IHX换热器二次侧、二回路熔盐泵、熔盐-空气换热器(Air Heat Exchanger, AHX)一次侧、连接管道;
- 3) 空气冷却系统:AHX二次侧、压缩空气入口、压缩空气出口、连接管道;
- 4) 非能动系统余热排出系统:由DRACS系统和PRACS统及空冷塔组成,包括熔盐-熔盐换热器(PRACS System Heat Exchanger, PHX)、熔盐空气换热器(Air Heat Exchanger of DRACS System, ADHX)、连接管道、空冷塔空气进/出口。

#### 3.3 输入不确定性参数的确定

输入不确定性参数的确定是不确定性分析的重要内容,本研究根据SM-MSR现象识别和排序表(Phenomena Identification and Ranking Table, PIRT),进行输入不确定性输入参数的识别。参数不确定性的量化<sup>[17]</sup>根据相关文献调研、试验和专家经验判断确定,选取的输入不确定性参数见表2。

本文采用Wilks公式<sup>[18-19]</sup>计算程序抽样次数(不确定参数的样本数),Wilks公式的数学表达式如公式(1)所示,样本数取决于不确定性结果中统计容许限 $\gamma$ 与置信水平 $\beta$ 。本文选取 $\gamma$ 为95%, $\beta$ 为95%,阶数 $m$ 为5,对应的最小样本数为181。

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

表2 输入不确定性参数  
Table 2 Input uncertainty parameters

| 序号<br>No. | 参数<br>Parameters                                | 分布<br>Distribution | 范围<br>Range |
|-----------|-------------------------------------------------|--------------------|-------------|
| p-1       | 管内表面换热系数 Heat transfer coefficient of tube side | 均匀分布 Uniform       | 75%~125%    |

续表

| 序号<br>No. | 参数<br>Parameters                                                  |                          | 分布<br>Distribution | 范围<br>Range |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|
| p-2       | 管外表面换热系数 Heat transfer coefficient of shell side                  | h_shell                  | 均匀分布 Uniform       | 75%~125%    |
| p-3       | 空气侧表面换热系数 Heat transfer coefficient of air side                   | h_air                    | 均匀分布 Uniform       | 75%~125%    |
| p-4       | 燃料盐黏度 Viscosity of fuel salt                                      | v_fuel                   | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-5       | 燃料盐导热系数 Heat conductivity of fuel salt                            | k_fuel                   | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-6       | 燃料盐热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion of fuel salt            | b_fuel                   | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-7       | 燃料盐密度 Density of fuel salt                                        | $\rho_{\text{fuel}}$     | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-8       | 燃料盐等温膨胀系数 Isothermal expansion coefficient of fuel salt           | e_fuel                   | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-9       | FLiNaK 黏度 Viscosity of FLiNaK                                     | v_flinak                 | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-10      | FLiNaK 导热系数 Heat conductivity of FLiNaK                           | k_flinak                 | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-11      | FLiNaK 热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion of FLiNaK           | b_flinak                 | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-12      | FLiNaK 密度 Density of FLiNaK                                       | $\rho_{\text{flinak}}$   | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-13      | FLiNaK 等温膨胀系数 Isothermal expansion coefficient of FLiNaK          | e_flinak                 | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |
| p-14      | 石墨导热系数 Thermal conductivity of graphite                           | k_g                      | 正态分布 Normality     | 90%~110%    |
| p-15      | 石墨体积热容 volumetric heat capacity of graphite                       | cpv_g                    | 正态分布 Normality     | 90%~110%    |
| p-16      | 哈氏合金导热系数 Thermal conductivity of Hastelloy-N                      | k_hn                     | 正态分布 Normality     | 90%~110%    |
| p-17      | 哈氏合金体积热容 Volumetric heat capacity of Hastelloy-N                  | cpv_hn                   | 正态分布 Normality     | 90%~110%    |
| p-18      | 堆芯功率 Reactor power                                                | P_reactor                | 均匀分布 Uniform       | 95%~105%    |
| p-19      | 控制棒落棒时间 Control rod dropping time                                 | T_drop                   | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-20      | 紧急停堆深度 Reactor shutdown margin                                    | $\rho_{\text{shutdown}}$ | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-21      | 燃料盐反应性温度系数 Fuel salt temperature coefficient of reactivity        | $\rho_{\text{f}}$        | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-22      | 石墨反应性温度系数 Graphite temperature coefficient of reactivity          | $\rho_{\text{g}}$        | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-23      | 堆芯热点因子 Core Hot Spot Factor                                       | f_hsf                    | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-24      | 大气温度 Atmospheric temperature                                      | T_atmo                   | 均匀分布 Uniform       | 95%~105%    |
| p-25      | 堆芯阻力系数 Local resistance coefficient of reactor core               | f_core                   | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-26      | 一回路阻力系数(不包括堆芯)<br>Local resistance coefficient of primary circuit | f_primary                | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-27      | PRACS 系统阻力系数 Local resistance coefficient of PRACS                | f_PRACS                  | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-28      | 二回路阻力系数 Local resistance coefficient of 2nd circuit               | f_second                 | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-29      | DRAC 回路阻力系数 Local resistance coefficient of DRACS                 | f_DRACS                  | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-30      | 空冷塔阻力系数 Local resistance coefficient of air cooling tower         | f_Airtower               | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-31      | 调节棒价值 Adjuster rod worth                                          | $\rho_{\text{rod}}$      | 均匀分布 Uniform       | 80%~120%    |
| p-32      | 提棒速度 Withdrawal speed                                             | v_speed                  | 均匀分布 Uniform       | 90%~110%    |

### 3.4 敏感性分析方法

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。换言之,敏感性分析研究数学模型中各种不确定性来源变化率对模型整体不确定性的影响。本研究采用多元线性回归法(Multiple Linear Regression, MLR)进行输入参数敏感性分析,MLR采用回归方程定量地刻画一个因变量与多个自变量间的线性依存关系。

MLR的基本思想是:虽然自变量和因变量之间没有严格的、确定性的函数关系,但可以设法找出最能代表它们之间关系的数学表达形式。采用MLR进行因素重要性分析,可在共同影响一个变量的许

多变量(因素)之间,找出哪些是重要因素,哪些是次要因素。

本研究采用的统计学诊断包括<sup>[20-21]</sup>:采用调整后的 $R^2$ (即 $R^2_{\text{adj}}$ )判断多元线性回归模型是否具有统计学意义。共线性是多元线性回归分析中一个值得关注的重要现象,它是指自变量之间的相关性,它会影响回归模型的稳定性和可靠性。本文采用VIF(Variance Inflation Factor)进行共线性判断,VIF是一种基于方差膨胀的因素,用于评估每个自变量的方差是否由于与其他自变量高度相关而膨胀。VIF数学计算式见式(2),其中, $R_j^2$ 表示是自变量与其他自变量的线性相关系数的平方和,即模型中除了当前自变量外所有其他自变量之间的相关系数加权之

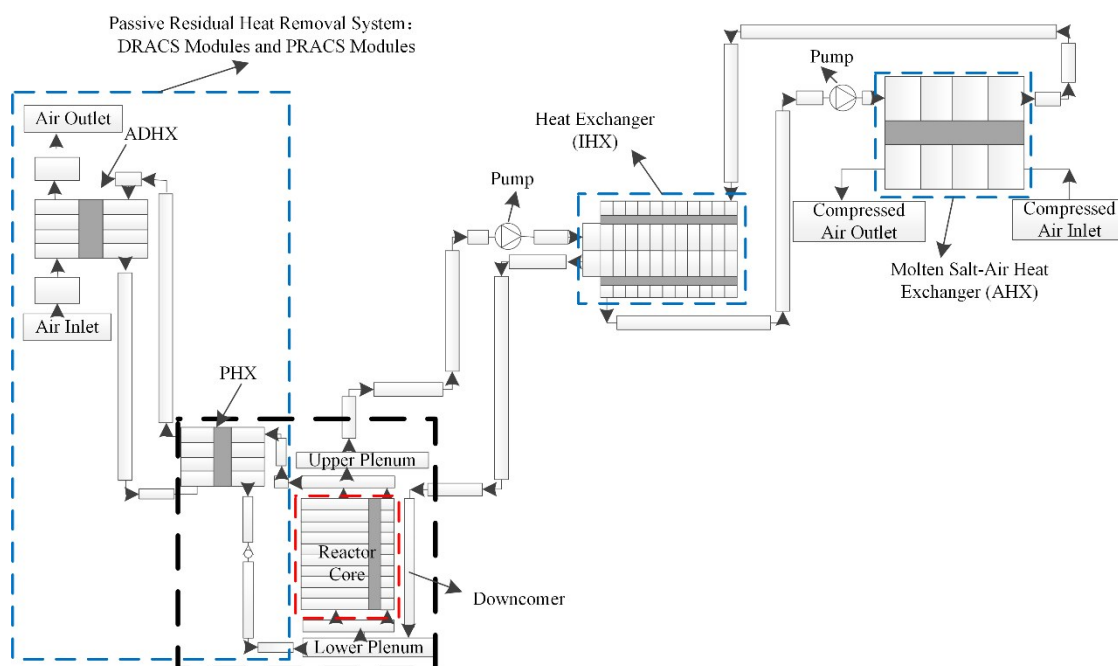


图3 SM-MSR系统节点示意图  
Fig.3 Nodalization diagram of the SM-MSR system

和,  $N$  为自变量总数。若存在共线性则采用 SPC (Significance Test of Semi-partial Correlation Coefficient) 进行参数重要度识别, 若不存在共线性则采用 SRC (Standardized Regression Coefficient) 进

行参数重要度识别, 敏感性分析主要步骤如图 4 所示。

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}, \quad j=1,2,3,\dots,N \quad (2)$$

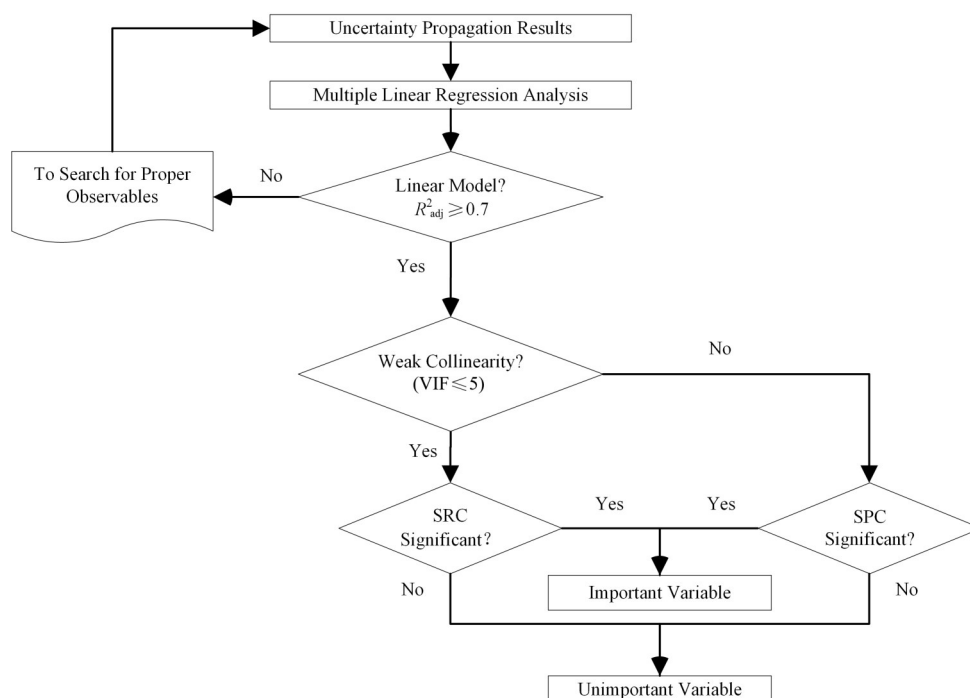


图4 敏感性分析流程图  
Fig.4 Sensitivity analysis steps

## 4 分析结果

### 4.1 不确定性分析结果

控制棒失控抽出后,中子注量率迅速升高,反应堆功率增大,堆内燃料盐温度升高。当中子注量率或燃料盐温度超过整定值后,触发紧急停堆,控制棒下落,反应堆紧急停堆,反应堆功率迅速下降。停堆信号同时触发一、二回路泵及空压机停运,防止一、二回路熔盐过度冷却导致熔盐凝固。

堆芯功率升高,进而导致堆芯温度升高,在事件发生后约 20 s 时堆芯出口燃料盐温度达到第一个峰值。紧急停堆后,堆芯功率骤降,会导致堆芯温度降低。停堆信号连锁引起一、二回路泵及空压机停运,导致一、二回路及空冷回路流量降低,会使堆芯温度再次升高,堆芯出口温度在 200 s 时达到第二个峰值,也是事件发生后堆芯出口燃料盐温度达到的最高温度。最终在非能动余热排出系统的作用下,反应堆处于长期稳定状态。图 5 为反应堆堆芯出口燃料盐温度,图 6 给出了反应堆出口燃料盐温度分析的上下限及两者之间的差值,可以看出,堆芯出口燃料盐温度( $T_{out\_max}$ )最高为 727.4 °C,最低为 716.3 °C,最高温度低于安全限值(800 °C),SM-MSR 具有良好的安全特性。

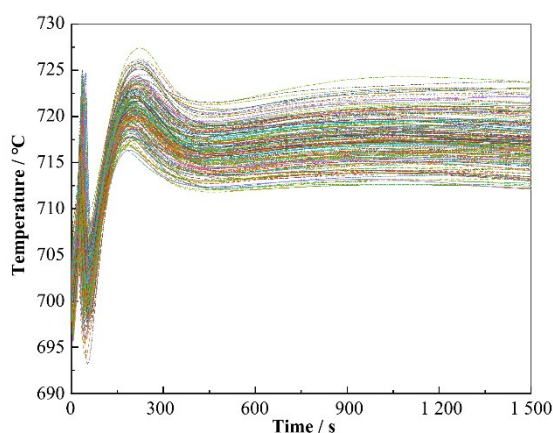


图 5 堆芯出口燃料盐温度传播结果

Fig.5 Uncertainty propagation results of reactor outlet fuel temperature ( $T_{out}$ )

堆芯出口最高温度( $T_{out\_max}$ )概率分布函数确定后,可以根据概率分布函数的特点快速估算不同置信区间下燃料盐出口最高温度,大幅度降低计算量。图 7 为 181 个样本的堆芯出口最高温度( $T_{out\_max}$ )的概

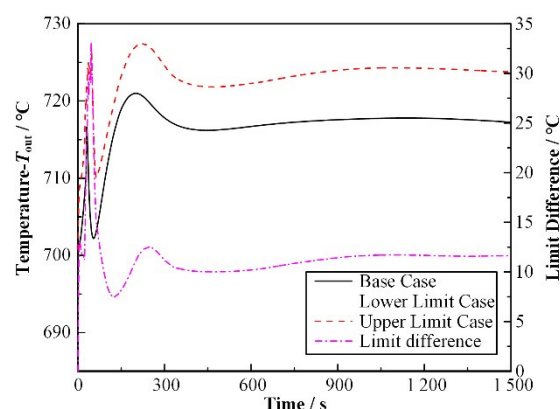


图 6 堆芯出口燃料盐温度不确定分析上下限值

Fig.6 Uncertainty analysis bound results for the reactor outlet fuel temperature ( $T_{out}$ )

率分布直方图,可以看出,其分布类似正态分布,为了进一步论证  $T_{out\_max}$  是否服从正态分布,本文采用 Shapiro-Wilk (S-W) 显著性假设检验方法,从统计学意义上将样本分布与正态分布进行比较,以确定数据是否与正态分布符合。S-W 检验基本假设:

H0: 样本所来自的总体分布服从正态分布;

H1: 样本所来自的总体分布不服从正态分布。

两个假设互斥,当  $p > 0.05$  时,没有理由拒绝 H0,认为样本来自的总体分布服从正态分布。经统计计算,  $p = 0.298$ , 大于 0.05, 接受 H0 假设,故  $T_{out\_max}$  服从正态分布。表 3 给出了正态分布函数的主要参数及百分位值。

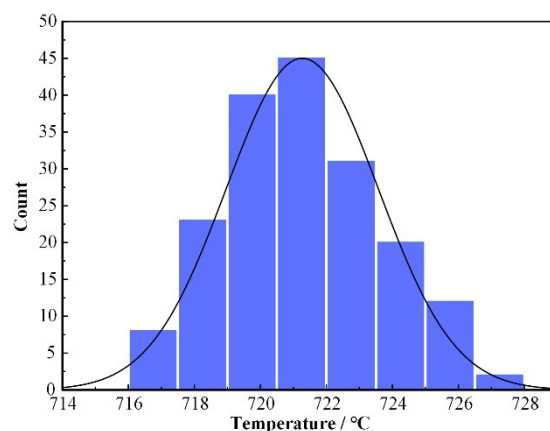


图 7  $T_{out\_max}$  概率密度函数分布直方图

Fig.7 Histogram of probability density function distribution for  $T_{out\_max}$

表 3  $T_{out\_max}$  正态分布函数的主要参数及百分位值  
Table 3 Statistical analysis results and percentile valve

| 变量<br>Variable | 平均值<br>Mean | 标准差<br>Standard deviation | 最小值<br>Minimum | 最大值<br>Maximum | 百分位 Percentile / % |       |       |       |       |
|----------------|-------------|---------------------------|----------------|----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| 值 Value / °C   | 721.3       | 2.3                       | 716.4          | 727.4          | 95                 | 96    | 97    | 98    | 99    |
|                |             |                           |                |                | 725.4              | 725.7 | 725.9 | 726.1 | 727.1 |

## 4.2 敏感性分析

本研究采用多元线性回归法分析参数的敏感性,同时采用F检验对拟合模型线性假设进行显著性检验,取显著性水平 $\alpha=0.01$ , $F_{0.01(32,148)}=1.80$ 。计算得到的F值为562.0、 $R^2_{adj}$ 为0.991。拟合模型的F值大于1.80,即在显著性水平 $\alpha=0.01$ 时堆芯燃料盐出口最高温度( $T_{out\_max}$ )对32个输入参数均有显著的线性关系。 $R^2_{adj}=0.991$ ,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8,均小于5,参数的共线性弱,故采用SRC作为敏感性重要度的判断。SRC绝对值大小表征各参数敏感性的强弱<sup>[21]</sup>,32个参数的SRC绝对值见图9,本文选取SRC绝对值大于0.1的参数为有重要影响的参数,根据分析结果,影响熔盐堆反应性引入事故后果最为严重的5个参数依次为:燃料盐密度、堆芯阻力系数、堆芯功率、一回路阻力系数、停堆深度,5个参数的SRC值如表4所示。

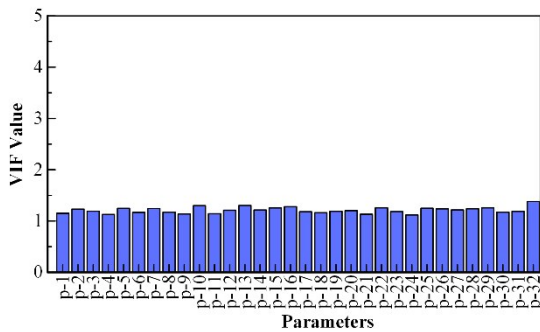


图8 32个输入参数的VIF值  
Fig.8 VIF values of 32 input parameters

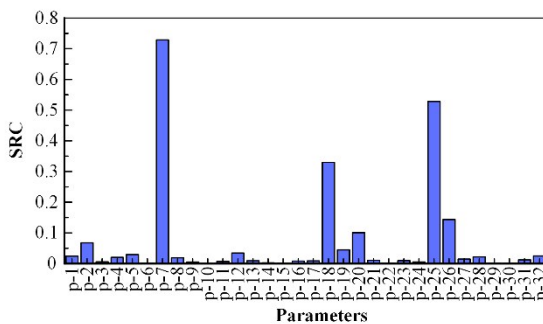


图9 SRC(绝对值)计算值  
Fig.9 SRC (absolute value) final achieved by calculation

对于熔盐堆,易裂变核素溶于高温熔融氟化盐形成燃料盐,燃料盐既为燃料也是冷却剂。熔盐堆易裂变核素产生的裂变能直接传递给燃料盐,因此燃料盐本身的吸热量相关物性、堆芯燃料盐流动特性及核功率等对事故后果具有较大影响。

燃料盐密度影响燃料盐热量吸收,密度越大吸收热量能力越强,同时堆芯燃料盐密度影响堆芯燃

表4 影响反应性引入事故后果最为严重的5个参数对应的SRC值

Table 4 SRC of the 5 most important parameters to LOFC consequence

| 序号<br>No. | 参数<br>Parameters                                           |                   | SRC    |
|-----------|------------------------------------------------------------|-------------------|--------|
| 1         | 燃料盐密度<br>Density of fuel salt                              | $\rho_{fuel}$     | -0.729 |
| 2         | 堆芯阻力系数<br>Local resistance coefficient of reactor core     | $f_{core}$        | 0.528  |
| 3         | 堆芯功率<br>Reactor power                                      | $P_{reactor}$     | 0.330  |
| 4         | 一回路阻力系数<br>Local resistance coefficient of primary circuit | $f_{primary}$     | 0.144  |
| 5         | 停堆深度<br>Reactor shutdown margin                            | $\rho_{shutdown}$ | -0.101 |

料盐的流动阻力,密度越大流动阻力越大,进而影响事故初期堆芯燃料盐的流动,因此对事故后果具有较大影响。燃料盐的吸热能力对事故后果影响很大,表征燃料盐吸热能力的参数是燃料盐体积比热容(密度和比热乘积),虽然本文未选择燃料盐比热作为输入不确定性参数,但燃料盐密度采用 $\pm 10\%$ 的误差可以涵盖体积比热容的误差范围,本文中燃料盐密度的敏感性表征了燃料盐体积比热容的敏感性。分析结果显示,燃料盐密度与堆芯出口燃料盐最高温度具有负相关性。

堆芯阻力和一回路阻力系数影响燃料盐流量,二者对事故后果有较大影响。阻力系数越大,堆芯燃料盐流量越小,堆芯出口温度越大,即二者与堆芯出口最高温度呈正相关性。

堆芯功率和停堆深度影响反应堆产生的热量,堆芯功率影响初始功率大小,停堆深度影响紧急停堆后堆芯功率的变化率,停堆深度越大,停堆后堆芯功率降低越快。二者直接影响事故后果,其中堆芯功率与堆芯出口燃料盐最高温度且具有正相关性,停堆深度与堆芯出口燃料盐最高温度且具有负相关性。

## 5 结语

本文针对熔盐堆反应性引入事件,对其结果的不确定性进行分析,并研究了输入参数对安全分析下限值的敏感性,经分析表明:

1) 本研究选取了32个重要的输入参数,对其进行随机抽样,产生181个样本,对181个样本进行不确定性传递计算, $T_{out\_max}$ 最高为727.4℃,最低为716.3℃,满足安全准则,熔盐堆(SM\_MSR)具有较大的安全余量;

2) 针对 181 个样本, 采用统计学分析方法, 对  $T_{out\_max}$  分布进行研究, 分析结果显示其服从正态分布, 根据正态分布函数的特点可以快速估算不同置信区间下燃料盐出口最高温度, 大幅度降低计算量;

3) 通过敏感性分析, 确定了对熔盐堆反应性引入事故影响最大的 5 个参数, 分别是燃料盐密度、堆芯阻力系数、堆芯功率、一回路阻力系数、停堆深度。150 MWt 熔盐堆工程设计及安全分析过程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/解释数据, 起草文章及获取研究经费; 王超群、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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.  
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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
- 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.
- 王凯, 焦小伟, 杨群, 等. 紧急停堆棒落棒时间对熔盐堆反应性引入瞬态的影响[J]. 核技术, 2020, 43(9): 090606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090606.  
WANG Kai, JIAO Xiaowei, YANG Qun, *et al.* The effect of scram rod drop time on the consequences of molten salt reactor reactivity insertion transient[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(9): 090606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090606.
- Zhu L, Pu P, Du S, *et al.* Simulation of neutron diffusion and transient analysis of MSR[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25(2): 020601. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.020601.
- Zhang Y P, Ma Y W, Wu J H, *et al.* Preliminary analysis of fuel cycle performance for a small modular heavy water-moderated thorium molten salt reactor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, 31(11): 108. DOI: 10.1007/s41365-020-00823-5.
- 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.
- 秋穗正, 张大林, 苏光辉, 等. 新概念熔盐堆的固有安全性及相关关键问题研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(z1): 64-75. DOI: 10.7538/yzk.2009.43.suppl.0064.  
QIU Suizheng, ZHANG Dalin, SU Guanghui, *et al.* Research on inherent safety and relative key issues of a molten salt reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(z1): 64 - 75. DOI: 10.7538/yzk.2009.43.suppl.0064.
- Zhu G F, Guo W, Kang X Z, *et al.* Neutronic effect of graphite dimensional change in a small modular molten salt reactor[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(8): 11976 - 11991. DOI: 10.1002/er.5964.
- 许田贵, 邹杨, 徐博, 等. 小型模块化熔盐堆误提棒 ATWS 事故分析[J]. 核技术, 2022, 45(5): 050603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.050603.  
XU Tianguai, ZOU Yang, XU Bo, *et al.* ATWS accident analysis of rod withdrawal in small modular molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(5): 050603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.050603.
- 倪超. AP1000 核电厂大破口失水事故最佳估算分析建模与不确定性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.  
NI Chao. Modeling of AP1000 nuclear power plant Lb-Loca best estimate analysis and uncertainty study[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- 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.
- 14 周天泽, 虞凯程, 程懋松, 等. 基于KNN方法的熔盐堆系统瞬态识别模型开发及分析[J]. *核技术*, 2023, **46**(11): 110604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110604. ZHOU Tianze, YU Kaicheng, CHENG Maosong, *et al.* Development and analysis of a K-nearest-neighbor-based transient identification model for molten salt reactor systems[J]. *Nuclear Techniques*, 2023, **46**(11): 110604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110604.
  - 15 宋诗阳, 程懋松, 林铭, 等. 基于RELAP5和子通道程序的熔盐冷却快堆多尺度热工流体耦合程序开发及应用[J]. *核技术*, 2022, **45**(7): 070602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070602. SONG Shiyang, CHENG Maosong, LIN Ming, *et al.* Development and application of multi-scale thermal fluid coupling program for molten salt cooled fast reactor based on RELAP5 and sub-channel program[J]. *Nuclear Techniques*, 2022, **45**(7): 070602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070602.
  - 16 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]//2021 28th International Conference on Nuclear Engineering. August 4 - 6, 2021. DOI: 10.1115/ICONE28-64430.
  - 17 陈玉爽. 高温熔盐及熔盐换热器传热特性的实验和模拟研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2021. DOI: 10.27585/d.cnki.gkshs.2021.000009. CHEN Yushuang. Experimental and simulation research on heat transfer characteristic of high temperature molten salt and molten salt heat exchanger[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. DOI: 10.27585/d.cnki.gkshs.2021.000009.
  - 18 Marina Pérez Ferragut. Integration of a quantitative-based selection procedure in an uncertainty analysis methodology for NPP safety analysis[D]. Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
  - 19 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.
  - 20 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.
  - 21 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.