

# 基于EPICS架构的熔盐堆实时建模与仿真 平台开发及验证

陈世超<sup>1,2</sup> 李锐<sup>1</sup> 左献迪<sup>1</sup> 刘海军<sup>1,3</sup> 虞凯程<sup>1,2</sup> 程懋松<sup>1,2</sup> 戴志敏<sup>1,2</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)

3(上海科技大学 上海 201210)

**摘要** 核电仿真技术被广泛地应用于反应堆设计、安全分析、独立安全评价、事故缓解措施、控制与保护系统设计与优化、先进主控室设计验证、操作员培训等方面的研究,有效地提高了核电厂的安全性和经济性。为满足液态燃料熔盐堆实时建模与仿真需求,基于实验物理与工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)的开源、开放式架构,集成了具备实时动态交互功能的液态燃料熔盐堆系统分析程序RELAP5-TMSR和图形化人机交互界面模块,扩展了可视化控制与保护系统模块,开发了适用于液态燃料熔盐堆的开放式实时建模与仿真平台ThorTypography。以熔盐实验堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)的启泵、停泵、自然循环和反应性引入实验作为基准题,对ThorTypography平台开展了正确性验证和实时性测试。验证和测试结果表明:ThorTypography实时建模与仿真平台的计算结果和RELAP5-TMSR独立计算结果基本一致,均与MSRE实验数据符合较好;实时性测试数据显示,平台具有良好的实时性能。ThorTypography适用于液态燃料熔盐堆系统实时建模与仿真,能够为熔盐堆设计、运行和安全分析提供有效的支持。

**关键词** 液态燃料熔盐堆, EPICS, 实时仿真, RELAP5, 控制与保护

中图分类号 TL365

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110601

## Development and validation of real-time modeling and simulation platform for molten salt reactor based on EPICS framework

CHEN Shichao<sup>1,2</sup> LI Rui<sup>1</sup> ZUO Xiandi<sup>1</sup> LIU Haijun<sup>1,3</sup> YU Kaicheng<sup>1,2</sup>  
CHENG Maosong<sup>1,2</sup> DAI Zhimin<sup>1,2</sup>

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

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

3(ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

**Abstract** [Background] Nuclear power simulation technology has been widely applied in areas such as reactor design, safety analysis, independent safety evaluation, accident mitigation measures, design and optimization of control and protection system, verification of advanced main control room design, and operator training. This technology has effectively improved the safety and economy of nuclear power plants. [Purpose] This study aims to

中国科学院科技战略先导项目资助

第一作者: 陈世超, 男, 1993年出生, 2015年毕业于南京理工大学, 现为博士研究生, 研究领域为反应堆控制

通信作者: 程懋松, E-mail: mscheng@sinap.ac.cn; 戴志敏, E-mail: daizhimin@sinap.ac.cn

收稿日期: 2023-03-04, 修回日期: 2023-05-01

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences

First author: CHEN Shichao, male, born in 1993, graduated from Nanjing University of Science and Technology in 2015, doctoral student, focusing on the reactor control

Corresponding author: CHENG Maosong, E-mail: mscheng@sinap.ac.cn; DAI Zhimin, E-mail: daizhimin@sinap.ac.cn

Received date: 2023-03-04, revised date: 2023-05-01

develop a real-time modeling and simulation platform for a liquid-fueled molten salt reactor (LF-MSR) based on the open-source and open architecture of the experimental physics and industrial control system (EPICS). **[Methods]** First, the real-time interaction function of the LF-MSR system code, RELAP5-TMSR, was improved, and the control and protection system and human-machine interaction interface were extended. Then, the ThorTypography simulation platform was preliminarily developed for LF-MSR by integrating the above three main functional modules. Finally, ThorTypography was validated using the pump start-up experiment, pump coast-down experiment, natural circulation experiment, and reactivity insertion experiment from the Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) as the benchmark. **[Results]** The test results of ThorTypography are consistent with the calculation results of RELAP5-TMSR and are in good agreement with the MSRE data. Moreover, the total simulation time is consistent with the total physical problem time. **[Conclusions]** ThorTypography is suitable for real-time modeling and simulation of LF-MSR systems and can provide effective support for LF-MSR design, operation, and safety analysis.

**Key words** Liquid-fueled molten salt reactor, EPICS, Real-time simulation, RELAP5, Control and protection

由于熔盐堆在固有安全性、经济性、核燃料资源可持续发展及防核扩散等方面具有显著优势,被第四代核能系统国际论坛(Generation IV International Forum, GIF-IV)列为6种先进候选堆型之一<sup>[1]</sup>。其中液态燃料熔盐堆是目前唯一采用流动的液态燃料盐同时作为燃料和冷却剂的反应堆,不同于传统固态燃料堆,其具有独特的运行原理和系统动态特性。

核电仿真系统的开发和运行过程中,建模与仿真平台发挥关键作用。建模与仿真平台不仅是仿真系统的支持平台,能够保证其正常运行,而且也是开发人员进行仿真系统开发的有效工具。目前国内外已有多家知名仿真公司能够为核电系统的设计和开发提供实时的、高精度的建模与仿真系统和服务。美国GSE(Global Simulation & Engineering System)是全球领先的能源和工业过程仿真公司,主要为核电站、火电站、联合循环电站、生产处理过程等领域提供仿真系统和服务。GSE建模与仿真系统广泛应用于各大核电站全范围模拟机<sup>[2]</sup>,主要包括实时仿真环境支持软件SimExec、辅助系统建模套件(Java Agent Development Framework, JADE)、核反应堆热工水力软件(Reactor Excursion and Leak Analysis Program, RELAP5)和核反应堆堆芯动力学软件REMARK。

美国Western Service Cooperation公司开发的3KEYMASTER建模与仿真平台广泛用于核电厂建模与仿真<sup>[3]</sup>,提供了功能强大的图形工程站和实时仿真支持系统,具有友好便捷的用户操作环境,可实现面向对象建模,并具有便捷的数据记录、图形曲线生成能力。3KEYMASTER平台包含了分布式控制系统仿真工具、配置管理系统和基于Web的教室智能辅导系统,并集成了美国核管会的严重事故分析程序MELCOR和爱达荷国家实验室开发的反应堆事故瞬态分析程序RELAP-3D,提供实时可视化功

能、严重事故分析、三维热工水力和三维中子动力学建模功能。国内清华大学在vPower仿真平台的基础上嵌入THERMIX/BLAST程序,开发了模块式高温气冷堆示范电站工程模拟机<sup>[4]</sup>。中核武汉核电运行技术股份有限公司开发了大型建模与仿真平台RINSIM,主要由仿真支撑软件、中控台软件、动态仿真图形及软表盘开发工具软件、图形化建模调试工具软件等组成,能够提供实时仿真/分时开发环境,支持多用户多任务,支持团队并行开发,主要用于模拟机/仿真机的设计开发、调试、运行和维护全寿命支持,已成功应用于多个核电站或核反应堆<sup>[5-7]</sup>。

熔盐堆系统是一个集反应堆物理、热工流体、结构力学、熔盐化学、仪控等学科于一体的大型复杂系统。现有技术成熟的建模与仿真平台不能直接用于液态燃料熔盐堆实时建模与仿真。另外,核电建模与仿真平台开发周期长,研制成本高,且需要长期技术积累。

综合考虑平台研发成本,自主可控,在同步辐射大科学装置<sup>[8-9]</sup>和熔盐堆实验装置<sup>[10-11]</sup>建设与运行过程中的技术积累,选择基于开源的实验物理与工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)架构研发开放式熔盐堆实时建模与仿真平台。本工作以EPICS作为熔盐堆建模与仿真平台的仿真运行支撑环境,扩展和集成具备实时动态交互功能的液态燃料熔盐堆系统分析程序RELAP5-TMSR,集成先进的可视化控制与保护系统和人机交互界面建模与仿真软件,研发液态燃料熔盐堆建模与仿真平台ThorTypography。并采用由美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)建造并运行的熔盐实验堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)实验数据作为基准题,开展ThorTypography平台正确性验证和性能测试。

# 1 建模与仿真平台开发

## 1.1 EPICS 架构简介

EPICS 控制系统架构具有开放式、分布式的特点,EPICS 系统的结构如图 1 所示,由运行在客户端的操作员界面(Operator Interface, OPI)层、运行在服务器端的输入/输出控制器(Input/ Output Controller, IOC)层和网络通信协议模块(Channel Access, CA)组成<sup>[12-13]</sup>。OPI 与 IOC 之间通过局域网连接,采用基于 TCP/IP 传输方式的 CA 协议进行通信。CA 协议采用标准的客户端-服务器模式来管理数据通信, OPI 作为客户端应用程序向 IOC 服务器请求访问数据, IOC 分布式实时数据库服务器负责数据管理,为多个客户端应用程序管理并提供数据。用户可以参考开放式的 CA 协议规范,通过 EPICS CA 的 API (Application Programming Interface) 来实现应用程序的开发和集成。

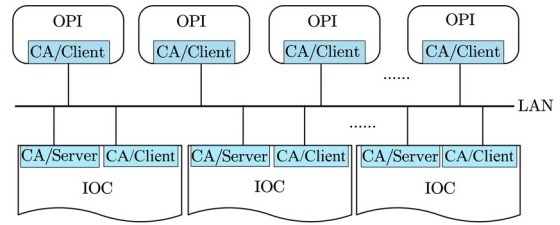


图 1 EPICS 系统结构图  
Fig.1 EPICS architecture diagram

## 1.2 建模与仿真平台系统设计

基于 EPICS 分布式控制系统软件体系结构,建立了液态燃料熔盐堆建模与仿真平台

ThorTypography 的软件架构。ThorTypography 平台的软件系统结构如图 2 所示,主要由基于 EPICS 的建模与仿真支撑环境(主要包括:基于 EPICS base 的分布式实时数据库;基于开源数据库软件 PostgreSQL 的关系型数据库;基于 Qt C++ 开发的数据库管理工具)、热工流体系统分析程序、控制与保护系统、人机界面(监控界面、归档数据显示界面和报警监控界面)、教控制台、报警系统、数据归档和管理配置等子模块组成。OPI 层的各应用程序之间通过 EPICS 通道访问 CA 协议相互连接和通信,使用 IOC 实时数据库进行数据存储和动态交互,实现开放式的 ThorTypography 综合建模与仿真功能。以下将分别重点介绍主要程序和功能模块。

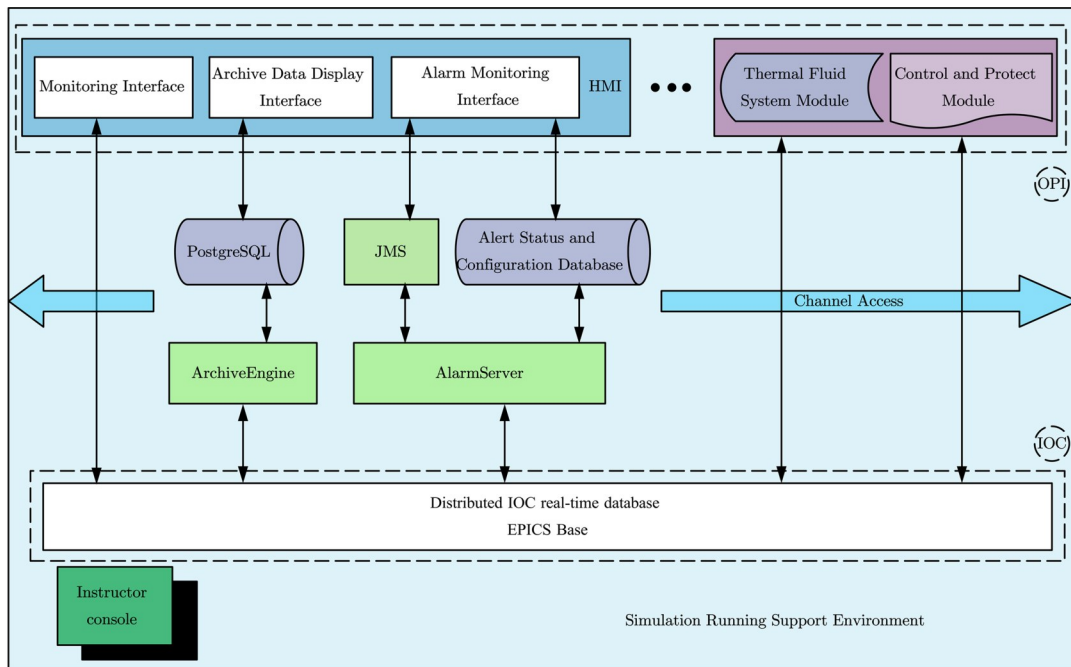


图 2 ThorTypography 软件架构  
Fig.2 Software architecture of ThorTypography

## 1.3 热工流体系统分析程序

RELAP5 系统分析程序的参数输入和输出均使用文本文件形式,不适用于动态实时仿真。核反应堆热工流体系统分析程序模块基于中国科学院上海应用物理研究所<sup>[14-16]</sup>开发的液态燃料熔盐堆系统分

析程序 RELAP5-TMSR, 依据 ThorTypography 平台实时动态交互要求,在保证原有程序计算精度的前提下,结合 CA 协议规范,对其功能进行了一系列的改进和扩展。

### 1.3.1 软件结构重构

将 RELAP5-TMSR 程序结构进行分解以便于依据建模与仿真平台实时计算要求进行计算流程改进,为后续的实时计算功能、动态交互功能和仿真过程控制功能实施奠定基础。分解后的 RELAP5-TMSR 程序被分为初始化、瞬态计算以及后处理三个模块。其中,初始化模块包含程序的读取、参数初始化以及瞬态计算参数设置;瞬态计算模块包含热工流体、中子动力学以及换热等迭代计算函数;而后处理模块包含数据清理、数据后处理以及程序终止。同时,瞬态计算模块也被拆分为热工流体动力学计算、热构件换热计算、点堆中子动力学计算以及一维缓发中子先驱核(Delayed Neutron Precursors, DNP)输运计算等模块。

### 1.3.2 实时计算功能

ThorTypography 平台要求系统分析程序具备实时计算功能,即计算机实际处理耗用时间与所计算的物理问题时间保持一致。在进行实时计算功能改进之前,须确保 RELAP5-TMSR 程序计算速度达到超实时状态,这是实时计算改进的前提条件。结合重构后的 RELAP5-TMSR,参考林萌等<sup>[17]</sup>给出的实时计算功能实施方法,改进了 RELAP5-TMSR 实时计算流程,实时版本程序 RELAP5-TMSR-RT 计算流程如图 3 所示。其中, $\Delta T$ 表示仿真交互时间步长, $\Delta t$ 表示 RELAP5-TMSR 计算时间步长( $\Delta t < \Delta T$ ), $t$ 表示当前计算的累计 $t = \sum \Delta t_i$ , $T_1$ 和 $T_2$ 表示计算机当前时间。在每个仿真交互时间步开始时,记录当前计算机时间 $T_1$ ,然后进行模型求解计算,判断当前计算的时间点 $t$ 是否达到仿真交互时间步长 $\Delta T$ 。若未达到,则继续推进时间步进行模型求解,当达到 $\Delta T$ 后,记录当前计算机时间 $T_2$ ,判断计算机实际处理耗用时间( $T_2 - T_1$ )是否达到仿真交互时间步长 $\Delta T$ ,若未达到,则程序需进行休眠等待模式,直至计算机处理耗用时间与仿真交互时间步长一致,完成一次实时计算循环。当程序完成全部计算,满足计算结束条件时,则自动退出计算循环,终止运行。

### 1.3.3 动态交互功能

基于 EPICS 的 CA 实时数据传输协议开发了包括数据获取和推送功能的 RELAP5-TMSR 实时数据交互接口模块,实现 RELAP5-TMSR 与 ThorTypography 建模与仿真平台间的实时数据传输。用户只需要按照规定的输入格式编制相应的输入卡,接口模块将根据用户定义的输入卡内容,动态输出和输入参数,实现仿真平台仿真参数的实时采集和输出。

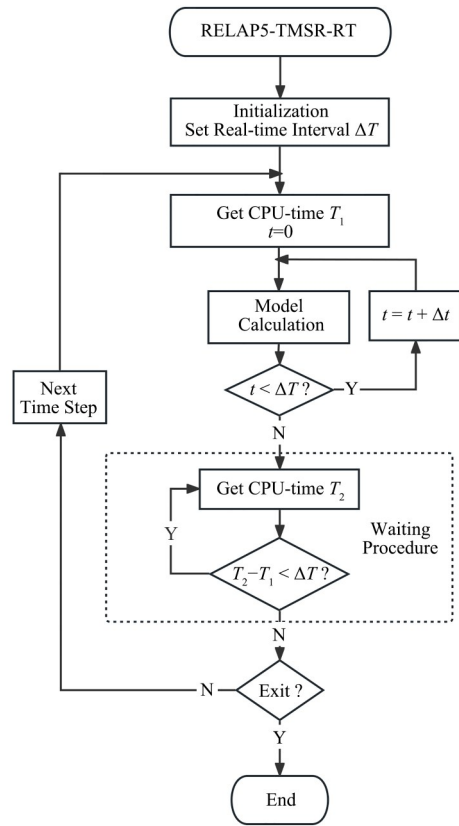


图3 RELAP5-TMSR-RT 实时计算流程  
Fig.3 Flowchart of RELAP5-TMSR-RT real-time calculation

### 1.3.4 仿真过程控制功能

尽管 RELAP5-TMSR 具有重启(RESTART)功能,但是一旦进入计算循环,RELAP5-TMSR 程序并不能灵活地响应控制台发出的运行、冻结、复位、快照和停止功能,用户只能等待计算结束。因此,需要对程序进行仿真控制流程的改进。

对重构后的 RELAP5-TMSR 进行仿真控制流程调整,如图 4 所示。程序启动后在每次循环过程中都将接收来自控制台发出的指令。若控制台发送冻结指令 1(Freeze),则程序冻结在当前位置直至接收下一个指令;若控制台发送运行指令 2(Run),则程序进入下一个计算循环,首先从外部数据库动态获取控制参数进行计算,待计算完成后,再将热工流体参数动态输出给数据库进行更新,最后进入休眠等待程序,完成一次实时循环计算,等待控制台下一个指令;若控制台发送快照指令 3(Snapshot),则程序将生成一个重启文件,并将当前数据存入重启文件中;若控制台发送复位指令 4(Reset),则程序调用重启文件,将程序恢复到之前用快照保存过的状态;若控制台发送停止指令 5(Stop),则程序将停止运行。

## 1.4 控制与保护系统

RELAP5 程序自带的控制系统建模与仿真功能

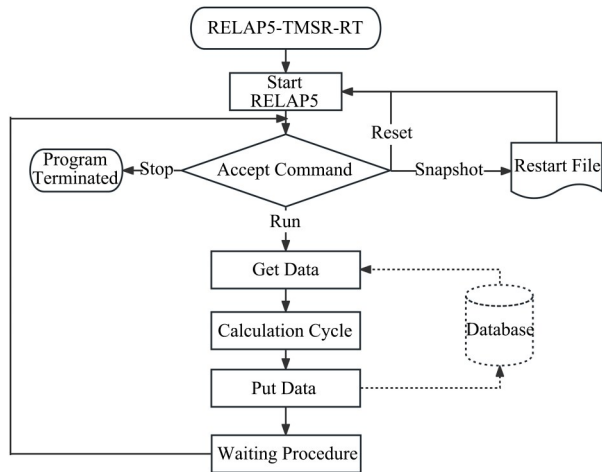


图4 RELAP5-TMSR-RT 仿真控制流程  
Fig.4 Flowchart of RELAP5-TMSR-RT simulation control

简单有限,不适用于大型复杂、先进的控制系统建模与仿真。因此,通过集成技术成熟、功能强大的商业软件 Matlab/Simulink 和开源软件 Scilab/Xcos 软件,扩展 ThorTypography 平台的控制与保护系统建模与仿真能力。Matlab/Simulink 和 Scilab/Xcos 采用图形化建模方式,所建模型逻辑直观,可读性强,同时具有十分丰富的控制功能模块库,可供用户直接使用或者进行二次开发,极大地提升了控制系统建模效率。

同样地基于 CA 协议,通过进一步封装 LabCA 接口,实现 Matlab/Simulink 和 Scilab/Xcos 与 ThorTypography 平台的实时动态交互。在仿真系统运行过程中,Simulink 和 Xcos 通过实时动态交互接口,读取 IOC 实时数据库中的 RELAP5-TMSR 输出,经由内部的控制与保护逻辑计算处理后,再将热工流体系统的控制参量写入 IOC 实时数据库中,以供 RELAP5-TMSR 读取调用。循环上述流程,直到接收到中控台的终止指令,结束实时交互仿真。

### 1.5 人机界面

开源软件 CSS (Control System Studio)<sup>[18]</sup>是由 EPICS 提供的 OPI 工具之一,用于开发人机界面。其主要特点包括:基于 Java 技术的跨平台开发工具;提供丰富的组件可用于动态图形功能的开发,如实时数值显示、图形颜色变化、尺寸和位置变化等;自定义图形符号库的开发,作为人机界面的基本图符,并可反复使用;自我测试功能,以预览图形动态效果;可与过程模型的变量点随时进行通信连接;与实时仿真运行环境保持独立,可在仿真模型运行期间,在线修改人机界面。为满足液态燃料熔盐堆建模与仿真平台需求,对 CSS 源代码进行了重新编译和功能扩展,集成了报警系统与关系型数据库 PostgreSQL,开发了包含数据归档显示、报警监控和控制系统操作界面在内的人机界面模块。

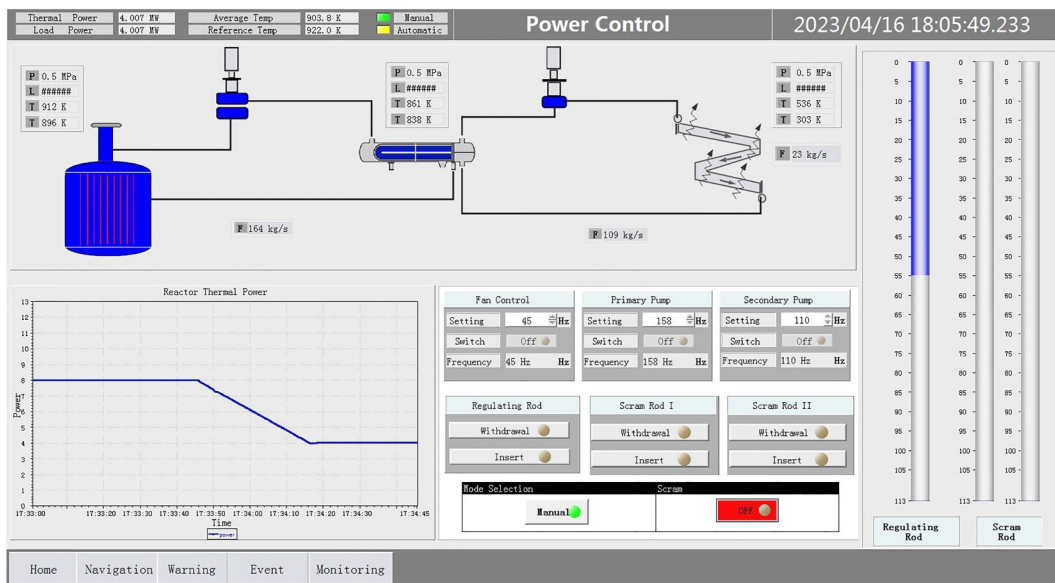


图5 MSRE 功率控制人机界面  
Fig.5 Human-machine interface of MSRE power control

如图5所示,初步设计和开发了 MSRE 功率控制界面,仿真过程中各图形组件可以通过接口程序读取数据库中的过程变量,图形化实时动态显示系统主要运行参数值,如控制棒棒位和堆芯功率的变

化趋势。通过控制组件按钮可以触发操作信号,模拟操作员的行为动作,如功率调节(自动或手动)、紧急停堆等,以实现人机交互控制。此外,设置了跳转按钮,便于在各层级监控界面之间进行切换。

## 2 建模与仿真平台验证

### 2.1 MSRE 建模与仿真

由美国橡树岭国家实验室设计建造的 MSRE 是目前世界上唯一成功运行的熔盐堆,在其运行期间进行了大量实验且保存了详细的实验数据<sup>[19]</sup>,这些实验数据也成为了目前熔盐堆系统分析工具开发和验证的判定依据。

以 MSRE 的启泵、停泵、自然循环和反应性引入实验作为验证基准题,对 ThorTypography 开展了初步验证。验证方案如下:分别单独使用 RELAP5-TMSR 程序和使用仿真平台 ThorTypography 对以上基准题进行建模与仿真,首先使用 RELAP5-TMSR 程序针对以上基准题进行建模和仿真,基准题中所涉及的中子物理-热工-控制均由 RELAP5-TMSR 程序单独完成;然后应用仿真平台 ThorTypography 对

相同基准题进行再次仿真计算,其中中子物理-热工部分由改进后的系统分析程序模块 RELAP5-TMSR-RT 建模,而控制与保护逻辑的建模与仿真则由 ThorTypography 的控制与保护模块实现,二者通过 EPICS/IOC 实时数据库完成实时动态交互仿真。仿真完成后,将两次仿真结果与 MSRE 实验值作比较,评估所建仿真模型精确性;同时对比两次仿真结果是否吻合,以验证 ThorTypography 各子程序模块间动态交互仿真计算的正确性;监测记录针对各基准题仿真时, ThorTypography 实际总的仿真计算时间是否与总的物理问题时间保持一致,同时监测 RELAP5-TMSR-RT 程序每个仿真交互时间步长内计算机等待时间是否大于零,以验证 ThorTypography 的实时计算功能。RELAP5-TMSR 的 MSRE 节点图如图 6 所示,主要的建模参数<sup>[20-21]</sup>列于表 1 和表 2。

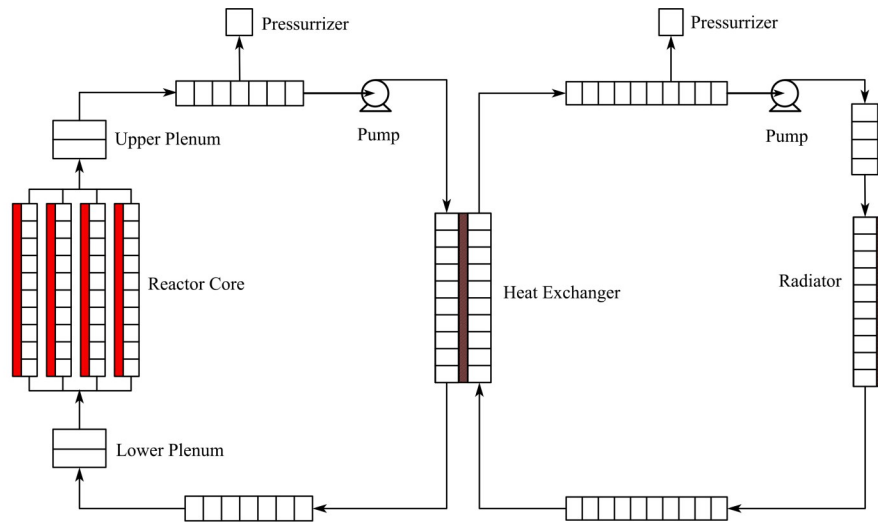


图 6 MSRE 节点图

Fig.6 Node diagram of MSRE

各实验基准题相关的控制与保护有:启泵和停泵过程中,控制调节一回路熔盐泵流量,同时控制控制棒的移动,使反应堆保持临界状态;自然循环期间,自然循环流量边界条件,由控制与保护系统输入;反应性引入实验工况中,通过调节控制棒棒位来引入相应反应性值。以上控制与保护逻辑基于 Matlab/Simulink 实现,其中启泵与停泵的控制与保护逻辑如图 7 所示。Matlab/Simulink 控制系统通过扩展的数据读取模块,从 EPICS/IOC 实时数据库中读取当前仿真时间、堆芯功率以及前一时间步的堆芯功率。其中,熔盐泵流量由仿真时间与熔盐泵流量的函数关系插值获得;为保持启、停泵过程中堆芯功率不变,计算前后时间步的堆芯功率偏差值,经由

比例-饱和-积分控制运算,转化为需要由控制棒引入的反应性值(控制棒棒位也可由控制棒积分价值换算得到)。以上控制与保护逻辑计算结果,最后通过数据写入模块返还给数据库,以供 RELAP5-TMSR 读取。

### 2.2 正确性验证

#### 2.2.1 启泵和停泵实验

启泵和停泵实验是在 MSRE 装载 U-235 燃料运行期间开展的<sup>[22]</sup>,由于实验在反应堆零功率工况下进行,因此模拟计算过程中可以忽略温度反馈效应。启泵实验初始时刻一回路燃料盐处于静止状态,在  $t=0$  时刻,开启一回路燃料盐泵,燃料盐流量加速上升,大约 8 s 达到额定流量,如图 8 所示。由于燃料

表1 U-233和U-235中子学参数  
Table 1 Neutronics parameters for U-233 and U-235

参数 Parameter	群组 Group	U-233	U-235
衰变常数 Decay constant / s <sup>-1</sup>	1	0.012 6	0.012 4
	2	0.033 7	0.030 5
	3	0.139	0.111
	4	0.325	0.301
	5	1.13	1.14
	6	2.50	3.01
缓发中子份额 Delayed-neutron fraction / 10 <sup>-5</sup>	1	22.8	22.3
	2	78.8	145.7
	3	66.4	130.7
	4	73.6	262.8
	5	13.6	76.6
	6	8.8	28.0
平均中子代时间 Mean neutron life time / s		0.000 40	0.000 24
熔盐温度反馈系数 Molten salt reactivity coefficient / 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>		-11.03	-8.71
石墨温度反馈系数 Graphite reactivity coefficient / 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>		-5.814	-6.66

表2 MSRE主要设计参数  
Table 2 Main design parameters of MSRE

	参数 Parameter	值 Value
堆芯 Reactor core	热功率 Thermal power / MW	8
	燃料盐质量流量 Fuel salt mass flow / kg·s <sup>-1</sup>	168
	堆芯高度 Core height / m	1.63
	水力直径 Hydraulic diameter / m	0.015 8
	总流通面积 Total flow area / m <sup>2</sup>	0.036 4
	总换热面积 Total heat transfer area / m <sup>2</sup>	21.55
	进/出口温度 Inlet /Outlet temperature / K	908/936
主换热器 Primary heat exchanger	壳侧 Shell side	
	总流通面积 Total flow area / m <sup>2</sup>	0.09
	水力直径 Hydraulic diameter / m	0.025
	进/出口温度 Inlet /outlet temperature / K	936/908
	管侧 Tube side	
	冷却盐质量流量 Coolant salt mass flow / kg·s <sup>-1</sup>	105
	水力直径 Hydraulic diameter / m	0.015
	总流通面积 Total flow area / m <sup>2</sup>	0.015
	进/出口温度 Inlet /Outlet temperature / K	825/866
空气散热器 Air radiator	总换热面积 Total heat transfer area / m <sup>2</sup>	26
	空气质量流量 Air mass flow rate / kg·s <sup>-1</sup>	75
	总换热面积 Total heat transfer area / m <sup>2</sup>	65.5
	进/出口温度 Inlet /Outlet temperature / K	300/411

盐的流动,部分缓发中子先驱核也随之流出堆芯,造成反应性损失。损失的这部分反应性需要通过控制系统提升控制棒进行补偿,以维持堆芯临界。大约16 s后,当一回路中的DNP随着燃料盐再次流回堆芯,需要控制棒引入的反应性降低,经过几次波动后逐渐稳定。

停泵实验初始状态一回路燃料盐流量为额定流量,在 $t=0$ 时刻,关闭一回路燃料盐泵,燃料盐流量大约在20 s后降低为零,如图9所示。堆芯DNP的损失随着燃料盐流量的降低而减少,导致反应性升

高,需要通过控制棒的下插来维持堆芯临界。如图8、9所示,仿真平台ThorTypography实时计算结果和原有RELAP5-TMSR程序的超实时计算结果对比基本一致,并且与ORNL报告中的MSRE实验数据吻合较好。

### 2.2.2 自然循环实验

自然循环实验是在MSRE装载U-233燃料运行期间进行的<sup>[23]</sup>,反应堆初始功率为4.1 kW,控制棒棒位始终保持不变,一回路燃料盐泵处于关闭状态,仅依靠堆芯进出口温度差导致的自然对流来驱使燃料

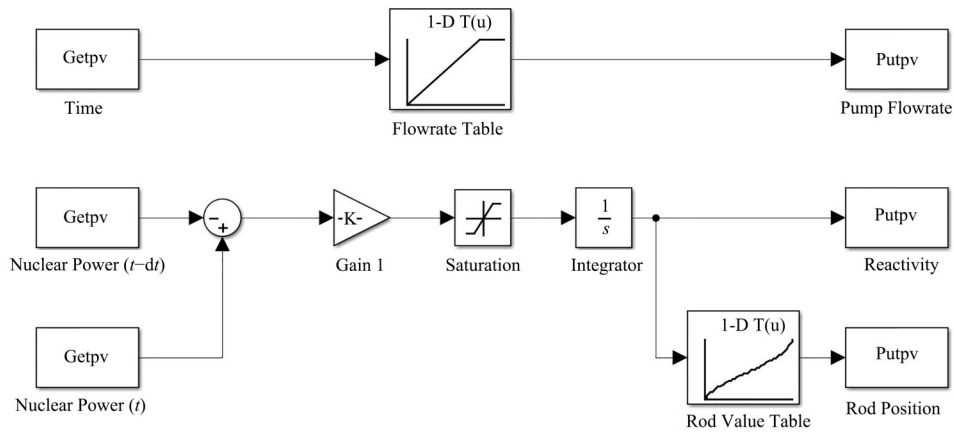
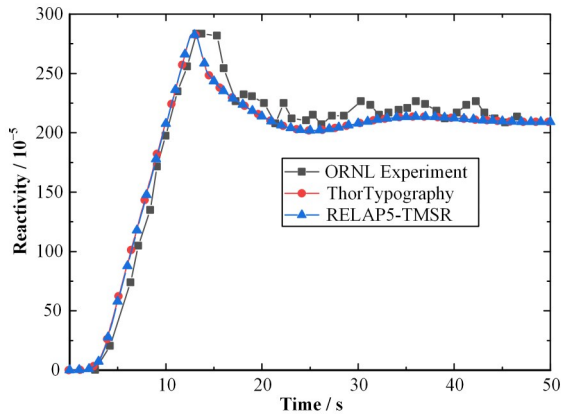
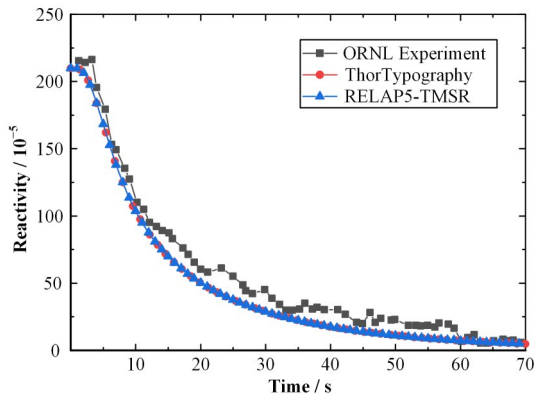


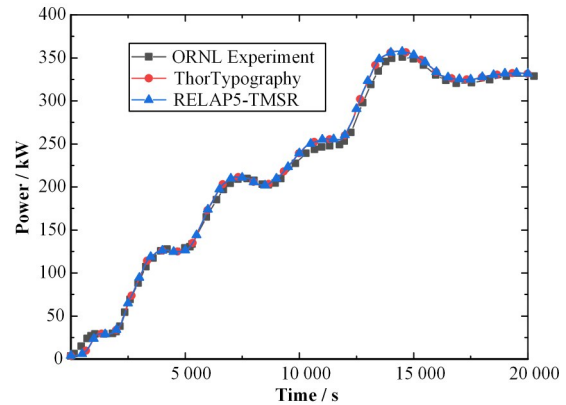
图7 启泵、停泵控制与保护逻辑

Fig.7 Control and protection logic of pump start-up and coast-down

图8 受保护启泵实验过程中控制棒引入的反应性变化  
Fig.8 Variation of reactivity inserted during protected pump start-up experiment图9 受保护停泵实验过程中控制棒引入的反应性变化  
Fig.9 Variation of reactivity inserted during protected pump coast-down experiment

盐的循环流动,燃料盐流量几乎为零,反应堆维持稳态。瞬态实验是通过逐步增加空气散热器的散热量,待反应堆达到新的稳态,再进行下一步的变化。空气散热器散热量的增加导致堆芯入口处燃料盐温度降低,由于燃料盐和石墨的温度负反馈效应,堆芯

功率上升,进而引起堆芯进出口温差增大,一回路自然循环流量上升。自然循环实验过程中,堆芯功率随时间变化如图10所示。仿真平台ThorTypography实时计算结果和原有RELAP5-TMSR程序的超实时计算结果对比基本一致,并且与ORNL报告中的MSRE实验数据吻合良好。

图10 自然循环实验堆芯功率变化  
Fig.10 Variation of core power during the natural circulation experiment

### 2.2.3 反应性引入实验

反应性引入实验是在MSRE装载在U-233燃料运行期间开展的<sup>[24]</sup>,在1 MW、5 MW和8 MW三种不同功率水平工况下,分别阶跃引入 $2.48 \times 10^{-4}$ 、 $1.9 \times 10^{-4}$ 和 $1.39 \times 10^{-4}$ 反应性,导致堆芯功率急剧上升,进而堆芯温度升高。过程中由于燃料盐和石墨的温度负反馈效应,减缓了堆芯功率达到峰值前的上升速度,在达到峰值以后功率开始逐渐下降至初始功率水平。反应性引入实验的功率响应结果如图11~13所示,仿真平台ThorTypography实时计算结果和原有RELAP5-TMSR程序的超实时计算结果对比基本一致,与ORNL报告中的MSRE实验数据在整体趋势上较为符合。



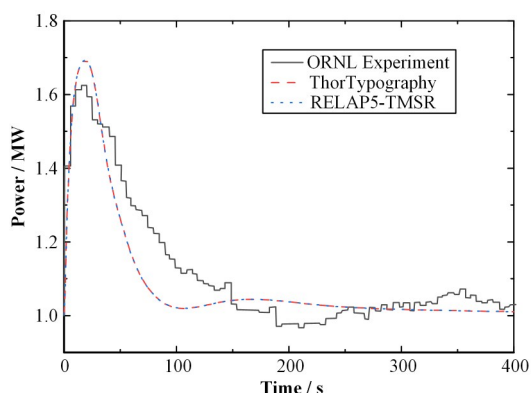


图11 1 MW条件下阶跃引入 $2.48 \times 10^{-4}$ 反应性后功率响应  
Fig.11 Power response after a  $2.48 \times 10^{-4}$  step insertion of reactivity at 1 MW

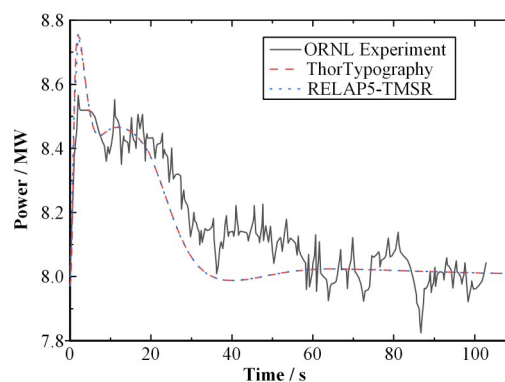


图13 8 MW条件下阶跃引入 $1.39 \times 10^{-4}$ 反应性后功率响应  
Fig.13 Power response after a  $1.39 \times 10^{-4}$  step insertion of reactivity at 8 MW

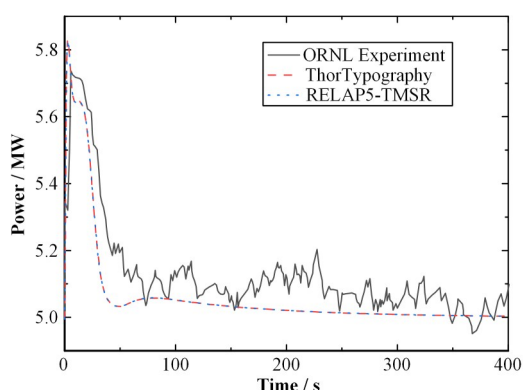


图12 5 MW条件下阶跃引入 $1.9 \times 10^{-4}$ 反应性后功率响应  
Fig.12 Power response after a  $1.9 \times 10^{-4}$  step insertion of reactivity at 5 MW

### 2.3 实时性验证

监测记录仿真平台在针对不同实验基准题进行仿真测试时所耗用的总的实际仿真时间,同时记录 RELAP5-TMSR-RT 程序在每个交互时间步长 (0.1 s) 内的等待时间,与总的物理问题时间共同列于表3。仿真平台的实时计算功能改造要求原有程序需具备超实时计算能力。从表3中可以看出,在 0.1 s 的仿真交互时间步长内,各基准题的最小和最大等待时间大于 0 s 且小于 0.1 s,满足实时计算功能改造的前提要求。同时,监测得到的总的实际仿真时间与总的物理时间同步一致,表明仿真平台的实时计算功能得以实现。

表3 实时仿真测试结果  
Table 3 Test results of real-time simulation

实验基准题 Experiment benchmark	总的物理问题时间 Total physical problem time / s	总的实际仿真时间 Total actual simulation time / s	最小等待时间 Minimum waiting time / s	最大等待时间 Maximum waiting time / s
启泵瞬态工况 Pump start-up transient	50	50	0.031 2	0.093 7
停泵瞬态工况 Pump coast-down transient	70	70	0.078 1	0.093 6
自然循环瞬态工况 Natural circulation transient	20 000	20 000	0.015 6	0.093 8
1 MW时反应性引入瞬态工况 Reactivity introduced transient at 1 MW	400	400	0.015 7	0.093 7
5 MW时反应性引入瞬态工况 Reactivity introduced transient at 5 MW	400	400	0.015 6	0.093 7
8 MW时反应性引入瞬态工况 Reactivity introduced transient at 8 MW	110	110	0.015 6	0.093 8

### 3 结语

为满足液态燃料熔盐堆实时建模与仿真需求,改进了 RELAP5-TMSR 程序实时动态交互功能,扩展了可视化控制与保护系统模块。基于 EPICS 架构,配置了仿真运行支撑环境,通过 EPICS CA 的

API,将 RELAP5-TMSR-RT 系统程序、可视化控制与保护系统以及图形化人机交互界面模块进行集成,开发了适用于液态燃料熔盐堆的开放式实时建模与仿真平台 ThorTypography。并以 MSRE 实验为基准题,对仿真平台 ThorTypography 进行了正确性验证和实时性计算功能测试。建模与仿真平台计算

结果与原版的RELAP5-TMSR程序计算结果一致并与MSRE实验数据吻合良好,验证了建模与仿真平台的正确性;实时性测试数据显示,建模与仿真平台满足实时仿真计算要求。建模与仿真平台ThorTypography适用于液态燃料熔盐堆实时动态交互仿真,为液态燃料熔盐堆设计优化,运行控制,操作培训等提供了有效的支撑工具,具有重要的工程参考价值。

**作者贡献声明** 陈世超负责实时建模与仿真平台开发及验证,数据处理、分析及文章撰写;李锐负责软件技术支持;左献迪负责研究辅助指导;刘海军负责可视化呈现;虞凯程负责提出文章修改建议;程懋松负责提出研究思路,文章审阅与修订;戴志敏负责研究方案指导、研究进度监督以及研究项目资金支持。

### 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 the Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366 - 374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
- Farber J A, Cole D G. Using multiple-model adaptive estimation and system identification for fault detection in nuclear power plants[C]//Volume 4A: Dynamics, Vibration, and Control. November 9-15, 2018. Pittsburgh, Pennsylvania, USA. American Society of Mechanical Engineers, 2018. DOI: 10.1115/imece2018-87616.
- Wei H M, Zhang X A, Liu T L. AP1000 nuclear reactor and primary loop modeling based on Relap5-3D and 3Keymaster simulation platform[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 214: 510 - 514. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.214.510.
- 高强, 周杨平, 周志伟, 等. 基于THERMIX/BLAST和vPower平台的HTR-PM工程模拟机开发[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(2): 206 - 211.  
GAO Qiang, ZHOU Yangping, ZHOU Zhiwei, *et al.* Modeling and analysis of engineering simulator for HTR-PM based on THERMIX/BLAST code and vPower simulation platform[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(2): 206 - 211.
- 杨宵, 张海. 华龙一号K2K3机组全范围模拟机DCS仿真系统的接口设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(S1): 138 - 144. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.2021.S1.026.  
YANG Xiao, ZHANG Hai. Interface design of DCS simulation system of HPR1000 K2K3 unit full scope simulator[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(S1): 138 - 144. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.2021.S1.026.
- 聂晓强. 钠冷快堆汽水分离再热器系统建模及仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.000748.  
NIE Xiaoqiang. Modeling and simulation of the moisture separator and reheater system in soda-cooled fast reactor [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.000748.
- Tan C, Quiroga V M, Fu Z, *et al.* A new method of integrating the RELAP5 to the RINSIM simulation platform[C]. International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51432: V001T01A014. DOI: 10.1115/ICONE26-82016.
- 刘泓舟, 李季, 顾颂琦, 等. 上海光源BL14W1线站透射XAFS数据采集系统升级[J]. 核技术, 2022, 45(7): 070103. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070103.  
LIU Hongzhou, LI Ji, GU Songqi, *et al.* Upgrade of transmission XAFS data acquisition system upgrade of Shanghai Synchrotron Radiation Facility BL14W1 beamline station[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(7): 070103. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070103.
- 张光雨, 宋勇, 徐鹏, 等. 基于RELAP5-HD的中国铅基研究实验堆模拟机热工水力模型开发与分析[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(S1): 153 - 160. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.S0.0153.  
ZHANG Guangyu, SONG Yong, XU Peng, *et al.* Development and analysis of thermal-hydraulic model of China lead-based research reactor simulator based on RELAP5-HD[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(S1): 153 - 160. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.S0.0153.
- 刘文倩, 韩利峰, 黄丽, 等. 基于数字孪生的TMSR-SF0数据监控与可视化方案[J]. 核技术, 2022, 45(2): 020604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020604.  
LIU Wenqian, HAN Lifeng, HUANG Li, *et al.* TMSR-SF0 data monitoring and visualization scheme based on digital twin[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(2): 020604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020604.
- 余嘉莉, 陈永忠, 韩利峰. 基于Qt的TMSR熔盐泵试验台架控制系统[J]. 核技术, 2022, 45(6): 060603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060603.

- YU Jiali, CHEN Yongzhong, HAN Lifeng. The control system for TMSR molten salt pump experimental platform based on Qt[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(6): 060603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060603).
- 12 White G, Shankar M, Johnson A N, *et al.* The EPICS software framework moves from controls to physics[C]. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC2019). 2019. DOI: [10.18429/JACoW-IPAC2019-TUZZPLM3](https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-TUZZPLM3).
- 13 朱晨晨, 韩立欣, 后接. TMSR-SF0 控制系统与保护系统通讯方案的设计与实现[J]. 核技术, 2021, **44**(2): 020601. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020601](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020601).  
ZHU Chenchen, HAN Lixin, HOU Jie. Design and implementation of communication scheme between TMSR-SF0 control system and protection system[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(2): 020601. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020601](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020601).
- 14 Shi C B, Cheng M S, Liu G M. Development and application of a system analysis code for liquid fueled molten salt reactors based on RELAP5 code[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, **305**: 378 - 388. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2016.05.034](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.05.034).
- 15 Li R, Cheng M S, Dai Z M. Improvement of the delayed neutron precursor transport model in RELAP5 for liquid-fueled molten salt reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, **394**: 111817. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2022.111817](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111817).
- 16 李锐, 程懋松, 戴志敏. RELAP5 缓发中子先驱核输运模型扩展及验证[J]. 核技术, 2021, **44**(6): 060603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.060603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.060603).  
LI Rui, CHENG Maosong, DAI Zhimin. Improvement and validation of the delayed neutron precursor transport model in RELAP5 code for liquid fuel molten salt reactor [J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(6): 060603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.060603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.060603).
- 17 Lin M, Yang Y H, Zhang R H, *et al.* Development of nuclear power plant real-time engineering simulator[J]. Nuclear Science and Techniques, 2005, **16**(3): 177-180.
- 18 Rosati C, Weiss G, Lund S K K, *et al.* New Java frameworks for building next generation EPICS applications[C]. ICALEPCS 2019, New York, USA: JACoW, 2019: 1497-1499.
- 19 Haubenreich P N, Engel J R. Experience with the molten-salt reactor experiment[J]. Nuclear Applications and Technology, 1970, **8**(2): 118 - 136. DOI: [10.13182/nt8-2-118](https://doi.org/10.13182/nt8-2-118).
- 20 Steffy R C, Wood P J. Theoretical dynamic analysis of the MSRE with <sup>233</sup>U fuel[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1969.
- 21 Guymon R H. MSRE systems and components performance[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1973. DOI: [10.2172/4462915](https://doi.org/10.2172/4462915).
- 22 Prince B E, Ball S J, Engel J R, *et al.* Zero-power physics experiments on the molten-salt reactor experiment, ORNL-TM-4233[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1968. DOI: [10.2172/4558029](https://doi.org/10.2172/4558029).
- 23 Rosenthal M, Briggs R, Kasten P. Molten-salt reactor program semiannual progress report for period ending February 28, 1969[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1969.
- 24 Steffy R C. Experimental dynamic analysis of the MSRE with U-233 fuel, ORNL-2997[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1970.