

基于WEB架构的轻量化核电站严重事故模拟系统实现

侯雪燕¹, 张大志¹, 谢明亮^{1,2}, 刘伟¹, 周庆¹, 李进¹

¹中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉

²海军工程大学核科学技术学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年7月17日; 录用日期: 2023年7月27日; 发布日期: 2023年10月9日

摘要

福岛核事故后, 对严重事故现象的认识及对事故工况预防缓解措施的处理等方面的培训及研究的需求增强, 而传统的核电站严重模拟机规模庞大、造价昂贵、启停繁琐、维护复杂, 对高校、设计院所不适用。基于上述背景, 本文开发了一套基于WEB架构的轻量化核电站严重事故模拟系统, 重点对系统功能、实现方案、技术架构、实施流程等进行研究, 针对特定用户场景, 提升事故模拟性能及部署能力, 扩充传统核电站严重模拟机应用边界, 系统运行稳定, 功能、性能指标满足用户要求, 已应用于多个高校教学培训及科研院所辅助设计验证。

关键词

核电站模拟, 严重事故, 轻量化

Implementation of a Lightweight Nuclear Power Plant Severe Accident Simulation System Based on WEB Architecture

Xueyan Hou¹, Dazhi Zhang¹, Mingliang Xie^{1,2}, Wei Liu¹, Qing Zhou¹, Jin Li¹

¹China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd., Wuhan Hubei

²College of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

Received: Jul. 17th, 2023; accepted: Jul. 27th, 2023; published: Oct. 9th, 2023

文章引用: 侯雪燕, 张大志, 谢明亮, 刘伟, 周庆, 李进. 基于WEB架构的轻量化核电站严重事故模拟系统实现[J]. 核科学与技术, 2023, 11(4): 353-359. DOI: 10.12677/nst.2023.114037

Abstract

After the Fukushima nuclear accident, there has been an increasing demand for training and research on the understanding of severe accident phenomena and the handling of preventive and mitigation measures for accident conditions. However, traditional nuclear power plant severe simulation machines are large in scale, expensive in cost, cumbersome in startup and shutdown, and complex in maintenance, which are not suitable for universities and design institutes. Based on the above background, this paper develops a set of lightweight nuclear power plant severe accident simulation systems based on WEB architecture, focusing on the system function, implementation scheme, technical architecture, implementation process and other research, aiming at specific user scenarios, improve the accident simulation performance and deployment capability, expand the application boundary of traditional nuclear power plant severe simulator. This system runs stably, and its functions and performance indicators meet users' requirements. It has been applied to the teaching and training of many universities and research institutes to assist in design verification.

Keywords

Nuclear Power Plant Simulation, Severe Accident, Lightweight

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

福岛核事故后,对严重事故现象的认识及对事故工况预防缓解措施的处理等方面的培训及研究的需求增强[1]。而传统的核电站严重事故模拟机(SAS),在其机组的全范围模拟机(FSS)的基础上扩充开发,主要应用于操作员培训及考试。整个系统包括工艺系统仿真模型、DCS及第三方仪控系统仿真软件、严重事故仿真软件、数据库、通讯程序、调度控制程序、人机交互软件(教练员站、操作员站)及硬件盘台,部署于多台异构操作系统的主机,规模庞大、造价昂贵[2]、启停繁琐、维护复杂,对高校、设计院所不适用。因此,有必要开发一套基于WEB架构的核设施严重事故模拟系统(LSAS),主要用于高校教学及严重事故缓解措施分析验证[3]。考虑到用户群体的广泛性,一方面以功能需求及使用场景为导向,对不同系统采用不同程度的模拟,另一方面采用轻量化开发及部署技术,以保证LSAS在普通的硬件配置的台式机或笔记本电脑上能安装运行。

2. 实现方案

LSAS一方面要展示先进水冷堆的技术特点,另一方面要重点展示严重事故的发生及演化,能通过3D画面展示安全壳内严重事故的过程。LSAS包含参考电站(RNPP)仿真与严重事故仿真,RNPP仿真用以模拟正常运行工况、设计基准事故工况,严重事故仿真用以模拟严重事故工况。

RNPP系统包括堆芯物理系统、反应堆控制及保护系统、反应堆冷却剂系统、稳压器压力水位控制系统、电站二回路系统、安全壳系统、能动及非能动安全系统。其中,电站二回路系统包括蒸汽给水系统、汽轮发电机系统、凝汽器系统、汽机功率控制系统、汽机旁排控制系统、给水控制系统。RNPP的堆芯及一回路工艺过程详细模拟,二次侧系统、电站控制系统简化模拟。

RNPP各系统的模型搭建及调试将采用中核武汉核电运行技术股份有限公司(CNPO)自主开发的

RINSIM 仿真平台中的仿真支撑软件(SimBase)和通用图形化模型开发工具(ES)来开发。堆芯物理系统采用三维堆芯实时仿真软件 SimCore 进行开发, 一回路反应堆冷却剂系统采用一回路热工水力实时仿真软件 SimTherm 进行开发, 安全壳系统采用安全壳实时仿真软件 SimCont 进行开发, 工艺及控制系统采用流体及控制计算模型进行开发。

严重事故模块采用 CNPO 的自主化软件严重事故计算程序 NUSSAP 进行建模与计算。该程序能够计算严重事故的整个过程, 可以分析的物理/化学现象包括: 蒸汽产生、堆芯加热和熔化、包壳氧化以及氢气产生、压力容器失效、堆芯熔融物与混凝土反应、可燃气体的燃烧和裂变产物的释放等。NUSSAP 程序的模拟范围包括与严重事故现象直接相关的堆芯、反应堆冷却剂系统、蒸汽发生器以及安全壳。蒸汽/给水系统、专设安全设施、控制逻辑等采用参考电站模块的模型进行模拟。

LSAS 启动后, 自动进入默认的正常运行模式, 在该模式下只有 RNPP 各仿真子系统运行, 可模拟具有非能动安全系统的先进压水堆核电站运行原理、模拟反应堆升降功率、反应堆停堆及重新启动、典型的故障瞬态。通过点击人机界面上启动严重事故模块的按钮, LSAS 进入严重事故运行模式, 并弹出严重事故 3D 展示界面, 该模式下堆芯、反应堆冷却剂及安全壳仿真系统退出运行, 严重事故模块替代这 3 个仿真系统参与运行, 可模拟典型始发事件诱发的严重事故全过程, 如冷段双端大破口、热段双端大破口、全厂断电、丧失给水、主蒸汽管道破裂等。

3. 软件架构

3.1. 技术框架

LSAS 组成结构示意图 1 所示, 采用 B/S 架构, 系统运行于 Windows 系列操作系统, 预期浏览器为谷歌及 IE 10 以上版本。按照单体 WEB 应用方式构建, 系统前端和后台相互分离, 前端请求及后端响应接口均采用轻量级数据交换格式 JSON (JavaScript Object Notation)。

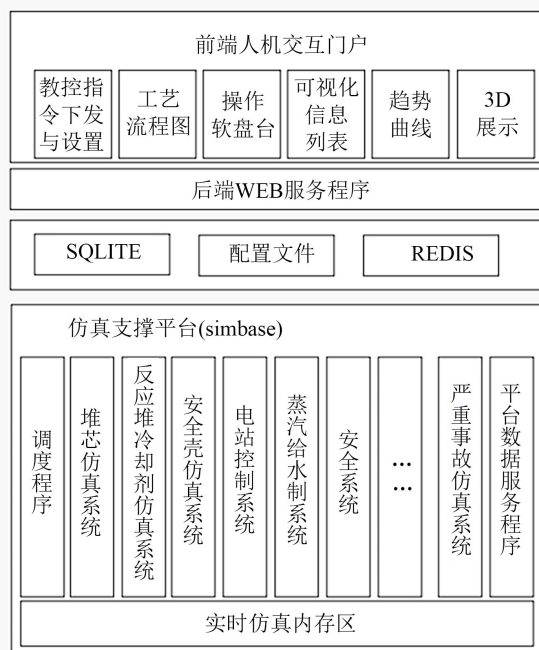


Figure 1. System composition diagram

图 1. 系统组成图

前端框架采用 jQuery + Vue.js + ElementUI。jQuery 是一个轻量级的、兼容多浏览器的 JavaScript 库，支持处理 HTMLDocument、Events、实现动画效果、与后端进行 Ajax 交互。Vue.js 是一个用于构建用户界面的前端框架，支持双向数据绑定。ElementUI 是基于 Vue 2.0 的桌面端组件库。前端服务器采用 Nginx，是一个高性能的 HTTP 和反向代理 WEB 服务器。

3D 展示系统，采用专业三维软件 Pro/E 或 3DMAX 进行初步建模，将模型进行模块化处理和优化，在不影响数据精度的前提下，大幅减少模型顶点数，清除游离点、法线翻转的面等[4]，使模型可以在开发引擎 Unity 3D 中流畅运行和编辑，并能够高度还原实际场景，最终发布为 WebGL (Web Graphics Library)部署包，通过 HTML 脚本实现 WEB 交互式三维动画，支持在浏览器访问，无需安装插件。

本系统后端采用基于 Java 的 SpringBoot 框架开发。SpringBoot 内置了 Tomcat 容器，使 WEB 服务部署轻量化。后端通过 Redis 数据库与仿真平台进行交互。Redis 是一个高性能的 key-value 内存数据库，是一个非关系型的数据库。前后端程序与仿真支撑平台共用相同的静态配置文件，仿真图画面相关配置存储在 XML 文件中，初始工况、故障等列表配置信息存储在 SQLITE 数据库。SQLite 实现了无服务器的、零配置的、事务性的 SQL 数据库引擎。

RNPP 各系统模块与严重事故模块依托仿真支撑平台(SimBase)运行。SimBase 是支持模拟机开发、调试、运行的工具集合，管理模拟机的模型和变量，控制模拟机运行及仿真各系统模块加载和调度。SimBase 以共享数据库为核心，向仿真各系统程序和平台数据服务程序提供实时运行数据共享和访问接口。根据仿真系统的最大运算周期，SimBase 的调度程序以 20 次/秒(时间步长 0.05 秒)或 10 次/秒(时间步长 0.10 秒)的频率对仿真系统进行调度，保证各系统同步。在每次调度之前，调度程序会处理收到的命令消息，对于冻结命令，本次循环将不调度仿真程序，对于复位命令，将异步从磁盘文件中读入工况数据，初始化实时仿真数据库，系统进入等待运行状态，对于快照命令，将异步保存当前时刻仿真实时数据到磁盘文件。

3.2. 数据流程

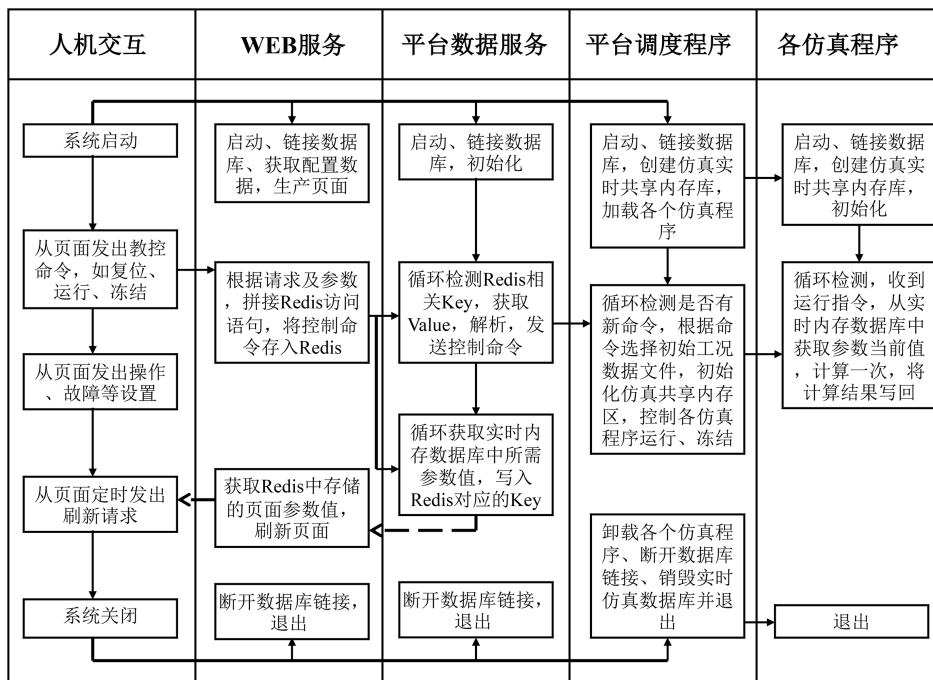


Figure 2. Business process diagram
图 2. 业务流程图

系统在启动时, 各个程序连接 **SQLITE**, 读入配置信息, 进行初始化。平台调度程序根据数据配置, 创建实时仿真数据库, 加载各个仿真程序。

系统业务流程图见图 2。页面与 **WEB** 服务器之间通过 **Ajax** 方式进行请求和响应。模拟系统操作控制指令、用户关注的状态及变量等信息刷新请求, 被前端服务程序转换成约定好的命令字, 生成 **JSON** 数据格式。

WEB 后端服务程序接收到请求后, 解析参数, 写入 **Redis** 数据库, 并从 **Redis** 数据库读取指令执行结果和 **LSAS** 运行状态及变量值等实时数据, 传递给前端程序。

平台数据服务程序从 **Redis** 数据库读取控制指令, 调用模拟机实时内存区数据访问 **API**, 传递给平台调度程序。当复位某个初始工况后, 调度程序读取存储在磁盘的数据文件, 对系统状态进行初始化, 当收到运行信号后, 按固定周期调度仿真系统运行。平台数据服务程序从仿真实时内存区获取模拟机相关运行状态及变量值, 写入 **Redis** 数据库, 提供给后端服务程序。

4. 人机界面设计

系统主界面包括控制区、关键参数显示区、报警区、画面展示区、趋势曲线展示区, 见图 3。关键参数、报警参数、曲线展示参数均支持自定义配置, 参数数值在模拟系统运行时, 定时刷新。

控制区显示当前的运行状态, 包括工况号、运行模式、运行状态、运行时间、日期。点击工况号区域, 出现初始工况列表, 供选择进行复位操作。点击运行、冻结等按钮, 向后台发送相应的教员控制指令。点击“故障”按钮, 打开故障列表, 该窗口中显示 **LSAS** 的故障列表。故障列表列出所有支持的特殊故障, 显示对应的故障详细信息, 设置后向后台发送插入故障指令。点击“曲线”按钮, 打开变量趋势曲线窗口。

仿真图画面主要涉及核电机组和各类管道、阀门、热交换器、压力容器、断路器开关、电气设备部件等设备[5]。通过点击部件, 打开操作窗, 见图 4, 可进行设备开、关、手动、自动模式控制。

3D 画面展示核电站主系统相关的厂房结构、环境设施、设备管道等三维模型, 采用了动态粒子扩散等手段, 将模拟系统的安全壳温度场、压力场; 水位、温度、破口等数据进行特效展示, 示例画面见图 5。显示画面包括: 核电厂重要参数(温度、压力、焓值、液位、氢气浓度、放射性等)、反应堆主冷却剂系统、三维堆芯、主要部件与设备(包括压力容器、蒸汽发生器、稳压器、主泵、堆内构件、控制棒、泄压箱)、安全壳、事故、事件、操作动画效果、主要事件进程图。

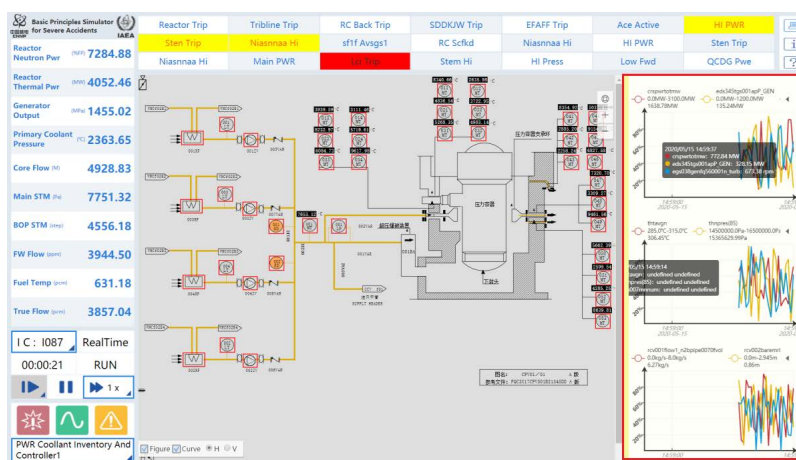


Figure 3. LSAS main window and typical simulation schematic
图 3. LSAS 主窗口及典型仿真画面

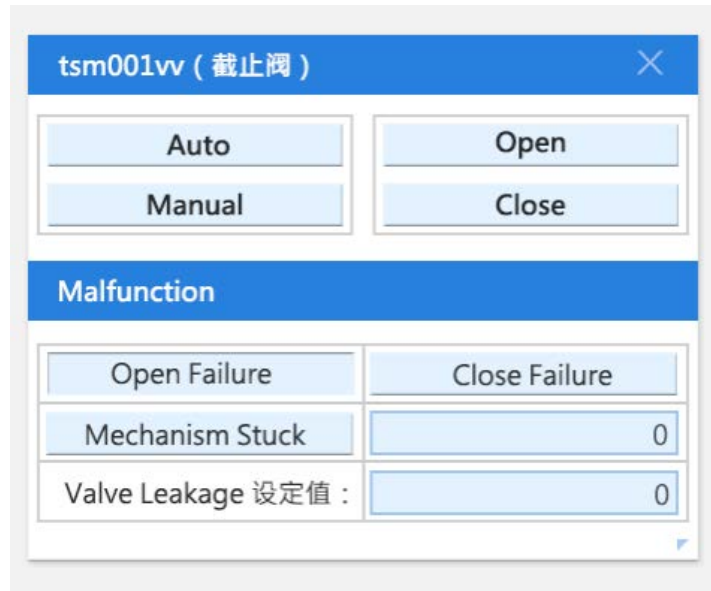


Figure 4. Equipment operation window
图 4. 设备操作窗

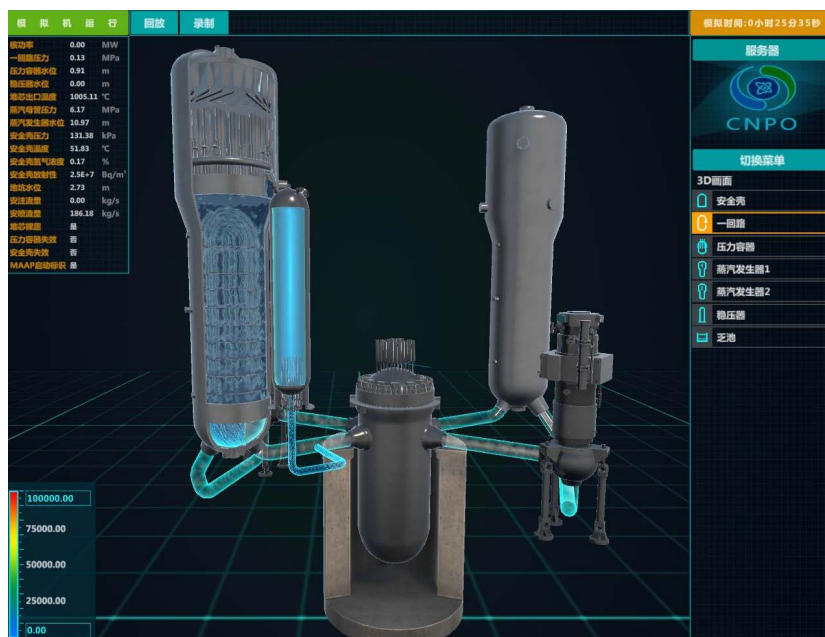


Figure 5. 3D screen of the main coolant system
图 5. 主冷却剂系统 3D 画面

5. 结语

本文从实现方案、软件架构、人机交互设计方面介绍了基于 WEB 架构的轻量化严重事故模拟系统。在满足核电站严重事故教学培训、事故缓解措施研究方面的功能需求的同时，将核电严重事故模拟机从多机异构，需要安装多个第三方工具软件的部署模式转换为单机运行，无需安装其它软件的部署模式，提出轻量化核电站严重事故模拟方法，大幅度减小了软件发布包体量，实现系统安装便捷、运行稳定、可靠，满足用户对系统使用的功能及性能需求，并已应用于多个高校和科研单位，提升严重事故教学、

科研等方面的专业认知与专业素养,也为严重事故预防和缓解措施的设计验证及优化、严重事故规程及导则研究、验证提供了有效手段。

基金项目

本论文/本研究得到国家重点研发计划(编号: 2019YFB1900700)的资助。

参考文献

- [1] 魏巍, 李青, 冉晓隆, 等. 基于 MAAP5 的严重事故模拟机开发[J]. 中国核电, 2019, 12(5): 547-552.
- [2] 蹇剑峰, 杨燕华, 林萌, 等. 核电站紧凑型工程模拟器开发[J]. 核动力工程, 2003, 24(6): 586-588.
- [3] 邓程程, 杨军. 核工程专业虚拟仿真实验教学的探索与实践[J]. 中国现代教育装备, 2020(5): 104-106+113.
- [4] 陈明, 覃坤. 核电厂模拟机的三维可视化设计研究[J]. 仪器仪表用户, 2019, 26(6): 72-75+34.
- [5] 居悦初. 智能化核电机组多功能模拟机系统设计[J]. 电工技术, 2019(20): 131-132+135.