

oi: 10.7690/bgzdh.2025.12.019

核电站一体化培训用装换料模拟仿真平台设计方法

周 文, 李林珊, 王 成, 蒋持节, 屈 驰

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能测控事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对装换料技能培训系统全面化、数字化、真实化的需求, 提出一种一体化培训用装换料模拟仿真平台设计方法。以半实物仿真为基础, 结合虚拟现实技术, 采用多系统结合的方式, 从触觉、视觉、听觉三方位还原真实的操作环境。阐述装换料仿真平台的系统架构及系统布局、各子系统的设计, 并就开发过程中遇到的 2 项关键技术问题及其解决方法进行了探讨。以某核电站为应用对象, 对装换料机模拟仿真平台的使用效果进行了分析。结果表明, 一体化培训用装换料模拟仿真平台具有较好的实用性和体验感。

关键词: 核电站; 装换料; 技能培训; 仿真平台

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Design Method of Integrated Training Simulation Platform for Fuel Loading and Unloading in Nuclear Power Plants

Zhou Wen, Li Linshan, Wang Cheng, Jiang Chijie, Qu Chi

(Department of Intelligent Measurement and Control, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to meet the requirements of comprehensive, digital and realistic training system for reloading and reloading skills, a design method of reloading and reloading simulation platform for integrated training is proposed. Based on the hardware-in-the-loop simulation, combined with virtual reality technology, the real operating environment is restored from the three directions of touch, vision and hearing by using multi-system combination. The system architecture, system layout and subsystem design of the reloading simulation platform are described, and two key technical problems encountered in the development process and their solutions are discussed. Taking a nuclear power plant as the application object, the application effect of the loading and refueling machine simulation platform is summarized. The results show that the simulation platform has good practicability and experience.

Keywords: nuclear power plants; loading and refueling; skill training; simulation platform

0 引言

伴随着核电行业的飞速发展, 核电站对核燃料操作人员的操作技能、工作规范和核安全意识的要求越来越高。为了提高技能熟练度, 应对紧急情况的准确性、及时性, 降低放射性外泄事故发生的几率, 取得更加良好的培训效果, 提出一套全面化、数字化、真实化的装换料技能培训仿真平台。

一体化培训用装换料模拟仿真平台以 1:1 比例的操作台及小车台架为基础, 与实体机保持一致, 从触觉方面仿真真实的操作环境; 以墙面、地面投影等显示设备为基础, 利用虚拟现实技术, 形成立体操作视野, 从视觉感官方面让受训人员身临其境; 以音响设备为基础, 模拟电机运行及发生物理碰撞时产生的声音, 从听觉方面加强操作体验。同时, 仿真平台还具备教学监控台, 能监控和干预受训人员行为; 能够通过软件及投影设备实现各机构部件

3 维模型一键式虚拟拆装展示, 以达到装换料机械结构教学效果; 能够生成并管理教学计划、教学课程、考核试卷; 能对学员进行考评打分、成绩统计、历史回溯学员操作情况。

一体化培训用装换料模拟仿真平台为核燃料操作人员提供了安全、有效、逼真的模拟训练和实操考核环境, 对于培养合格的核燃料操作人员, 降低辐射防护风险, 避免放射性事故都有着重要意义。

1 设计方案

1.1 系统总体架构及布局设计

一体化培训用装换料模拟仿真平台主要由装换料机仿真控制系统、3 维模拟显示系统、辅助教学系统 3 个子系统组成, 系统架构如图 1 所示。子系统之间通过以太网进行通信, 相互交换数据并协同开展工作。

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2024-11-20

第一作者: 周 文(1989—), 男, 四川人。

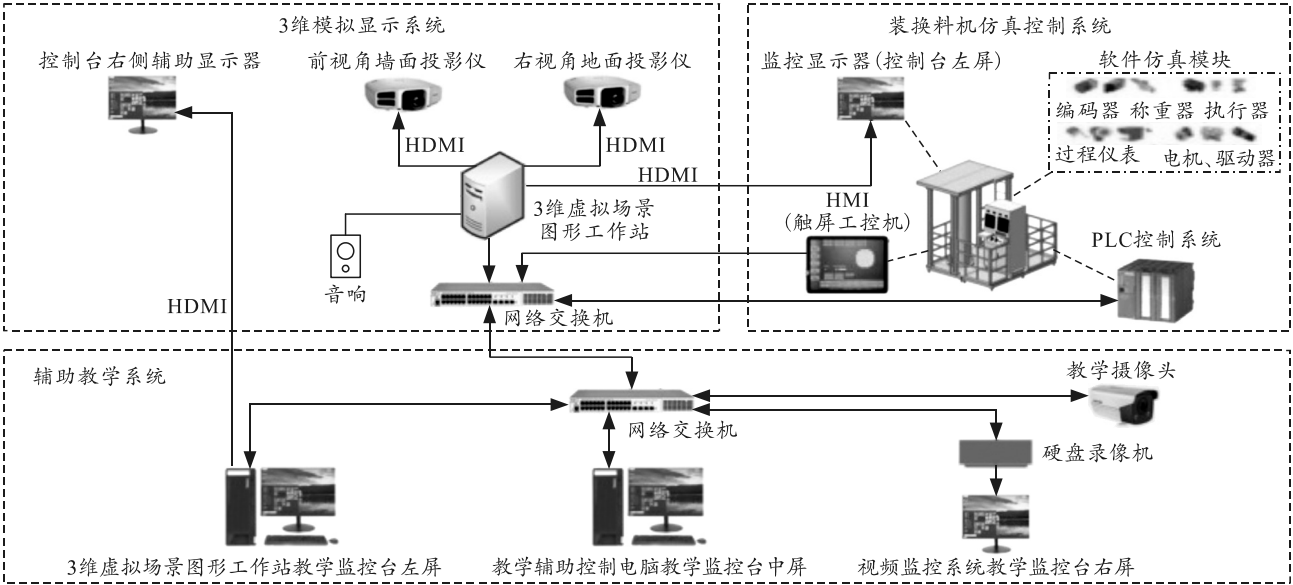


图 1 仿真平台系统架构

仿真平台整体布局在一个长 8 m×宽 6 m×高 6 m 的房间，设备布局如图 2 所示。

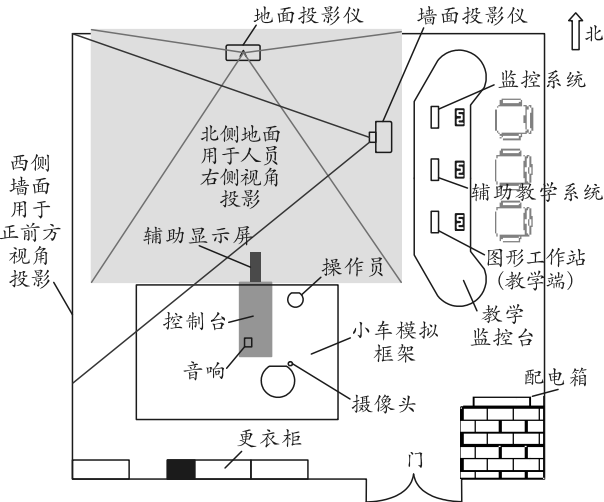


图 2 仿真平台布局俯视效果

1.2 装换料仿真控制系统设计

装换料机仿真控制系统采用半实物仿真，人员在实体控制台上进行装换料操作，经 PLC 控制模块和算法模块处理后，生成运行轨迹和运动结果信息，实现操控闭环。同时系统将指令传达给 3 维模拟显示系统进行显示，并控制装换料 3 维控件动作，实现实体控制台操作与 3 维虚拟换卸料机响应的人机交互^[1]。另外，装换料机仿真控制系统还可接收来自辅助教学系统的运行或者故障指令，控制生成相应的工作状态，以供学员进行操控练习和考核评比。

装换料仿真控制系统由 1:1 比例的控制台和简化小车台架组成，控制台作为人机交互和系统主控终端，安装于简化小车台架上。控制台电气系统主

要由上位机触摸屏、下位机 PLC 控制器、显控开关、配电设备、通信设备、摄像机显示屏等组成^[2]。

为了保证装换料仿真系统操作的真实感，控制台元器件型号(特别是操纵杆)及其布局与核电站实体机保持一致，这样在触感上保持了真实感。控制系统的 PLC 主控逻辑、触摸屏显示界面及操作也与核电站实体机保持一致。PLC 和触摸屏软件在原程序上定制开发，增加虚拟信号接口(包括大小车及提升机构运行给定速度、加减速时间、抓具操作指令、燃料模式、堆芯工位状态、转运装置运行指令等发送给 3 维模拟显示系统的输出接口，包括整机运行状态等发送给辅助教学系统的输出接口，包括各机构电机运行速度、编码器位置、抓具状态、重量状态、转运机构状态、堆芯工位状态等来自 3 维模拟显示系统的输入接口，包括整机故障指令、堆芯工位状态、鞋帮指令、转运机构操作指令等来自辅助教学系统的输入接口)，这样在操作流程上保持了一致。

1.3 3 维模拟显示系统设计

3 维模拟显示系统采用 3 维虚拟现实技术，结合实物控制系统来实现装换料机的设备和场景建模，模拟装换料机的操作过程、工作原理和视景显示，实现装换料机的半实物仿真。

仿真支持平台是模拟显示系统的核心部分，采用 C/S 架构，确保软件充分使用计算机性能。系统的 3 维场景浏览、交互及功能发布采用全球领先的开源引擎 Unreal Engine(虚幻 4)进行开发。采用 3ds Max 建立等比例的模型，采用材质和贴图等技

术对 3 维模型进行美化^[3], 在 3 维场景中采用实时灯光、阴影、反射、烘焙等特效技术, 营造更为真实的环境气氛。建模对象包括: 大小车及轨道、提升机构(包括内外套筒、抓具等)、燃料运输设备动画(运输小车、燃料篮及相关部件)、反应堆及下部堆内构件、正常燃料组件、变形组件、装换料辅助设备(小鞋帮、换料水池辅助操作平台、水下照明

等)、换料水池结构及池内相关设备、水池上方的环境(周边视野)^[4]。在虚拟仿真建模中, 主要部件具有一定的物理特性, 如重量、水介质等, 并能够实现操作过程的加速度效应、事故工况下的物理碰撞等。

3 维模拟显示系统采用 2 台高性能图形工作站, 图形工作站 1(控制台端)和图形工作站 2(辅助教学端), 系统架构如图 3 所示。

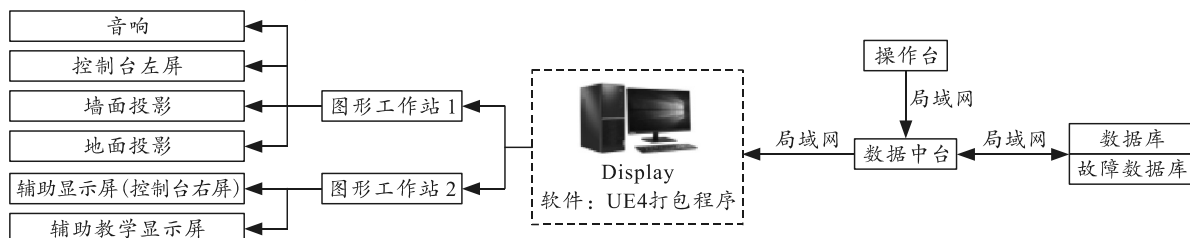


图 3 3 维模拟显示系统架构

图形工作站 1 部署在控制台内部, 安装 3 维模拟仿真软件, 为控制台左屏(摄像机显示屏)、墙面投影仪、地面投影仪、音响提供输出环境。其中, 摄像机显示屏显示画面由程序切分为“田”字形 4 格, 分别为: 抓具内摄像头画面、小车台架底部摄像头 1 画面、大车标尺画面、小车标尺画面。墙面投影模拟显示操作人员看到的控制台正前方厂房实时 3 维场景。地面投影模拟显示操作人员看到的控制台右下方换料水池实时场景。墙面及地面投影营造出一个立体的工作环境, 从视觉上给受训人员一种身临其境的真实感。当机构运行或发生物理碰撞时, 仿真软件模拟输出电机运行或碰撞的声音, 增强受训人员操作真实感。

图形工作站 2 部署在教学监控台左侧, 安装 3 维模拟仿真软件, 为控制台右侧辅助显示屏、教学监控台左屏提供输出环境。其中, 控制台右侧辅助显示屏从 4 个视角模拟水下闭路电视(燃料上下管座各 2 个视角), 由程序切分为“田”字形 4 格, 实现多角度观察燃料组件进入堆芯动作的过程, 当大小车处于倾翻架位置时, 还能观察燃料运输装置的运送过程动画。教学监控台左屏 4 个显示画面分别为: 抓具内摄像头画面、小车台架底部摄像头 1 画面、1 个燃料上管座视角、上帝视角, 让教员实时

掌控装换料机所处状态, 便于教员在关键时刻进行人为故障干预, 提升培训效果。同时, 该工作站还具备爆炸图教学模式, 进入该模式后, 能够通过软件实现 3 维模型部件虚拟拆装并通过墙面投影仪投影至墙面, 可进行批量受训人员培训, 达到装换料机械结构教学效果。3 维可拆装零部件应包含: 大小车机构、提升机构、内外套筒、抓具、转运小车、倾翻架、燃料组件等。

1.4 辅助教学系统设计

辅助教学系统主要由教学监控台、教学辅助控制电脑、图形工作站 2、教学摄像头、硬盘录像机、监控台显示屏、网络交换机等部分组成。

教学辅助控制电脑中部署辅助教学系统软件, 采用先进的信息与通信技术(ICT), 是基于 Java EE 技术和 B/S 架构开发的 WEB 类应用, 具有良好的可移植性, 能够在不修改源代码的情况下在不同的操作系统或终端平台上运行, 系统采用“浏览器+应用服务器+数据库服务器”的多层架构设计, 能够将表现逻辑、业务处理逻辑和数据访问逻辑分离开来。软件功能包括系统管理模块、教学演示模块、考核管理模块、视频采集及回放模块, 软件功能分解如图 4 所示。

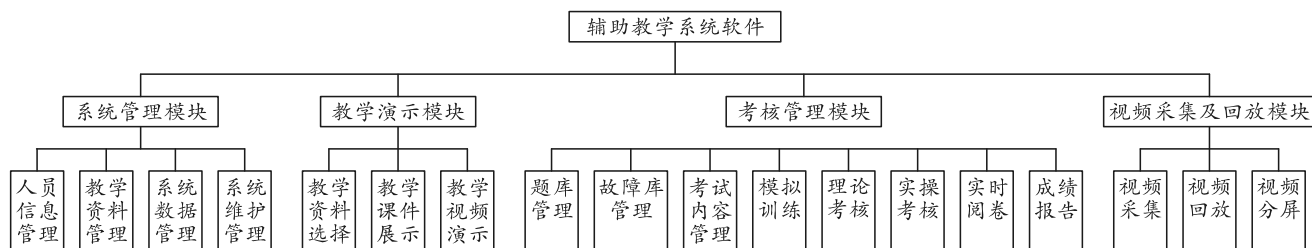


图 4 辅助教学系统软件功能

系统管理模块负责整个系统的运行、调度、资源存储、数据调用、维护等；教学演示模块可对学员进行装换料全流程操作教学；实操考核模块可作为课程结课及技能鉴定考核平台,通过故障勾选(包括燃料组件的变形及典型的电气故障、机械故障、

超失重等突发事件)及堆芯地图维护等操作对学员进行操作理论知识考核及实装操作考核^[5]；视频采集与回放模块通过网络通信接收来自教学摄像头的视频数据,按约定的管理策略命名并存储到硬盘录像机中。设计效果如图 5 所示。



图 5 辅助教学系统设计效果

2 关键技术

2.1 变形组件装卸过程实现

为了实现变形燃料组件的装卸过程模拟,解决因燃料组件变形导致的超重故障(提升机构上升时因组件间摩擦力增大引起)和失重故障(提升机构下降时因燃料组件下管座与堆内下部构件定位销不对应,出现顶销状态导致),在建模过程中,技术处理建立燃料组件上管座向不同方向偏移 5 mm 偏移量的变形组件。通过 3 维模拟显示系统软件设计各燃料组件上下管座与抓具插销和堆内下部构件定位销的碰撞面,碰撞发生时,模拟显示系统自处理燃料组件重量(既定高度内按比例减轻),并通过非正位提升机构上升燃料组件在设定位置到达超重重量或以上并在回到正位时取消增加重量操作的方法来实现变形燃料组件装卸过程模拟。

2.2 多软件架构分布式数据共享

一体化装换料模拟仿真平台各子系统间数据交换并协同工作交错复杂,通过在不同的软件架构和部署计算机上建立相同的数据库架构,并执行专用的数据共享和校验脚本以及纠错机制,解决了多种软件架构模式下的分布式数据共享问题。

3 结论

笔者通过多系统结合的方式,介绍一体化培训用装换料模拟仿真平台系统集成设计过程,通过触觉、视觉、听觉 3 方面还原了装换料机操作的真实感,是一套集核工业测控、VR 虚拟场景仿真、教学考核 MIS 为一体的跨专业综合演练平台。

根据以上设计方案与关键技术解决方法,已将该仿真平台应用于某核电站装换料机操作技能培训,实现了寻常操作和应急处置的多场景训练。结果表明:该平台运行状态稳定、真实度高并能完全响应培训需求,为培养合格的核燃料操作人员提供了有力保障,具有实用性强、体验感佳的特点。

参考文献:

- [1] 张凯峰,徐进津,文忠,等. 压水堆核电厂装卸料仿真系统设计与开发[J]. 信息系统工程, 2016(9): 30-32.
- [2] 陈济东. 大亚湾核电站系统及运行[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [3] 秦政,袁珩,吴勤勤,等. 基于虚拟现实技术的核电站三维视景仿真系统研究[J]. 中国西部科技, 2011, 10(26): 39-41, 70.
- [4] 阎光伟,王瑞华. 核电站三维动态仿真系统[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 107-111.
- [5] 赵鹏程,张皓,陈明,等. 核电站装卸料模拟机的设计与开发[J]. 中国高新技术企业, 2015, (10): 11-13.