

核电系统综合换热虚拟仿真实验的建设与实施

周帼彦, 邢改兰, 曹 军, 曾力丁

(华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

[摘要]随着科学技术的发展,核动力技术正日趋成熟,但由于核电站装机容量大、结构系统复杂,运行于高温高压的极端工况,反应堆芯积累着大量放射性物质并且有迅速释放的可能,特殊的核安全问题仍然存在。为使学生掌握核电系统综合换热原理,建立核电系统安全运行观念,文章在分析传统核电系统综合换热实验特点及局限性的基础上,介绍了基于三维虚拟仿真技术建设的压水堆核电站系统综合换热虚拟仿真实验,并从实验设计原则、教学目的、实验原理、考核要求、实施效果等方面对该实验的实施进行了详细的介绍。

[关键词]核电系统; 换热; 高温高压; 虚拟仿真; 实验平台

Construction and Implementation of Virtual Simulation Experiment for Comprehensive Heat Transfer of Nuclear Power System

Zhou Guoyan, Xing Gailan, Cao Jun, Zeng Liding

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: With the development of science and technology, nuclear power technology is becoming more and more mature. However, due to the large installed capacity, complex structure system, extreme conditions of high temperature and high pressure, the accumulation of a large number of radioactive materials in the reactor core and the possibility of rapid release, there are still special nuclear safety issues in nuclear power plants. In this paper, the characteristics and limitations of conventional nuclear power experimental system are first analyzed, then a virtual simulation experiment platform for comprehensive heat transfer of pressurized water reactor (PWR) nuclear power plant system developed by using 3D virtual simulation technology is introduced. The implement of the experiment is discussed in detail from the aspects of experimental design fundamentals, teaching purpose, experimental principles,

[作者简介] 周帼彦(1977-),女,教授,博士。

[通信作者] 周帼彦, E-mail: zhougy@ecust.edu.cn。

assessment requirements and implementation effects, so as to help students master the principle of comprehensive heat transfer and establish the concept of safe operation.

Key words: Nuclear power system; Heat transfer; High temperature and high pressure; Virtual simulation; Experimental platform

核能是一种典型的低碳能源品种,其生产过程中不排放温室气体,全寿期碳排放量小,同时具有能量密度高、无间歇性、占地面积小、受自然条件约束少等优点^[1]。随着系统技术的发展,核能的应用领域逐渐拓宽,其不仅能提供电力,还在制氢、供热、海水淡化等高新领域中帮助减排降碳,起到保障能源安全的作用^[2]。目前,核能已成为我国积极应对气候变化、兑现减排承诺、坚持清洁低碳发展、实现“碳达峰”“碳中和”目标的必然选择^[3]。但核电站由于装机容量大、结构系统复杂,运行于高温高压的极端工况,反应堆芯积累着大量放射性强的物质并且有迅速释放的可能,因此存在着特殊的核安全问题。美国三英里岛核电厂堆芯过热而发生烧毁的事故^[4],苏联切尔诺贝利4号机组因堆芯熔化引发的事故^[5],日本福岛核电站换料或停堆期间因堆芯冷却不足而发生过热烧毁的事故^[6],均带来了无法估量的重大损失和影响,也体现出核电安全是核能技术发展的关键所在^[7]。由此可见,反应堆作为核电站的主体之一,是实现核能向电能转化的关键,对其进行准确的热工水力设计是保障系统安全的基础。此外,随着能源结构的改变,更安全、更可靠、长寿命、高效率、绿色化的核电系统已成为未来核电发展的必然趋势,这就要求高校相关专业与时俱进,持续更新教学内容,不断创新教学模式与方法。

随着计算机技术的高速发展,基于相似原理、支持动态运行的虚拟仿真技术越来越受欢迎。利用该技术进行模拟训练,可使学生间接了解并掌握原型的原理和运行规律,实现对破坏性或危险性试验的评价和优选决策。由于虚拟仿真实验具有高度沉浸性、多维交互性、良好构想性的特点,且操作简单、成本低廉、绿色安全,因此在核工程相关专业的教学中逐步得到应用。上海交通大学核科学与工程学院将虚拟现实技术应用于核电厂

系统运行和事故分析研究中^[8],实现了棒控系统的过程仿真,方便使用者全面了解安全壳及主控室内情况。华北水利水电大学针对专业核心课程核电厂运行与管理的教学需求,构建了集核电厂虚拟漫游、核电厂主要设备拆装及换料操作、核电厂运行综合训练等于一体的虚拟实践教学平台^[9]。成都理工大学为保障核工程与核技术专业人才培养质量,在工程教育专业认证背景下,采用CORYS软件搭建了基于法国C-1300典型压水反应堆核电站的仿真模拟器^[10],实现了14种不同核电厂的启动、停堆及运行。上述虚拟仿真实验系统注重实现核电系统内的漫游,并不能让学生通过具体的操作深入了解运行原理、事故发生原因、热工参数变化规律及合理化设计范围,也无法帮助学生建立起安全操作和精确设计的工程理念。因此,高校需要建立涵盖基础知识、事故案例、仿真分析、规范操作、工程理念等内容的综合虚拟实验平台,为核电工程专业培养高精尖的专业技术人才。

本文拟介绍高温高压极端工况下核电系统综合换热虚拟仿真实验,该实验可使学生了解核电系统的构成,掌握核能与热能转化的基本原理及相应的安全知识,学习对流和相变换热特征参数的测量及分析方法,研究堆芯、蒸汽发生器、换热工质变化参数对系统温度特性的影响,掌握基于高效目标的设计策略,树立核电系统安全运行的观念,学会在合理范围内规范操作,并探索核电系统换热能效对安全可靠性的影响。同时,该虚拟仿真实验还可用于相关领域工程人员的业务培训,使他们积累各种工况下的实际运行经验,具备对复杂问题作出快速判断与正确响应的能力。

一、传统核电系统综合换热实验的特点及其局限性分析

核电站中的能量转换是工程热力学原理应用

的典型示例。核电站利用核反应堆产生的蒸汽来发电,将核能转化为电能。压水堆是基于热中子引起的链式反应,采用加压轻水作为慢化剂和冷却剂的核电装置,是目前最为成熟且应用广泛的堆型。以压水堆为例,核反应堆系统主要包括反应堆本体、一次侧冷却系统、蒸汽发生器、二次侧蒸汽动力系统、发电及输配电系统以及相应各部分辅助系统,如图1所示。

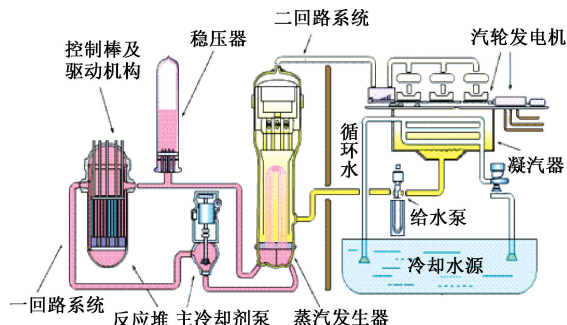


图1 核电装置系统构成示意图

核电系统的运行特点表现为以下几个方面:

1. 极端工况,运行温度和压力都较高。一回路内压强保持 150 个大气压,冷却水被加热至约 330℃(不沸腾);二回路蒸汽发生器内约为 70 个大气压,二回路水被加热至 260℃(沸腾)。
2. 高危条件。核燃料(铀)可控链式裂变反应释放核能,堆芯物质放射性强,作业条件高度危险。
3. 大型装置。核电站装机容量大,占地面积大,如三门核电站占地 740 万立方米,装机总容量达 1 200 万千瓦以上。
4. 高额成本。单单 CRP1000 一台机组一回路主设备的购置成本就在 20 亿左右。
5. 复杂结构。核电站由核反应堆、压力容器、蒸汽发生器、主循环泵、汽轮发电机组、稳压器、管道、阀门、配套设施等组成,组成元件多,系统复杂。
6. 高安全性。为确保放射性物质不外泄,防止核电站周围环境受到核放射污染,核电站设置了三道严密可靠的屏障,其中堆芯为第一道屏障,压力壳为第二道屏障,安全壳为第三道屏障。

庞大的系统、高危的工况及大额的成本,使得教师在传统课程教学中难以搭建相应的试验台进行实验演示操作;由于能量转换体系结构复杂,包含设备、零部件数量多,布置分散,加之核电系统

安全级别较高,因此教师难以带学生进行现场认识实习;能量转换的核心部分包覆在安全壳内,学生即使在核电站现场,也无法对其系统构成和运行过程产生直观的认识,更没机会实际操作。

因此,开发核电系统综合换热虚拟仿真实验平台,激发学生的学习兴趣,提升学生的实践创新能力,对未来能源领域工程师的培养具有十分重要的意义。

二、核电系统综合换热虚拟仿真实验设计原则与教学目的

教学团队针对压水堆核电站系统进行三维建模,将核电一、二回路中关键热设备单元的换热过程及安全场景形象地表现出来,使学生能够在虚拟的学习环境中扮演工程师角色,对核电系统及装备进行设计、操作。虚拟仿真实验能够有效避免危险工况及实验时间、地点等因素的限制,拓展实验教学的深度和广度。

虚拟仿真实验建设秉持“虚实结合、相互补充、能实不虚”的总体原则。教学团队充分利用团队科研成果和学院平台优势,设计开发了“高温高压极端工况下核电系统综合换热虚拟仿真实验”教学项目。该项目的建设旨在更新传统实验教学内容 and 实验技术方法,强化综合性、设计性、创新性实验,努力打造具有创新性、高阶性和挑战度的“金课”;创新教学模式、凝练科研创新素材,依托虚拟仿真实验平台推进以科学思维、创新能力培养为导向的课程建设之路;坚持科教融合,培养具有实践能力、工程意识、科研创新精神的高素质人才。

(一)坚持“以学生为中心”的实验教学理念

教学团队开放学习资源和学习空间,采用以学生为本的基于问题、项目、案例的启发式、互动式、研讨式教学方式和自主探究式学习方式,开创线上线下教学相结合的个性化、智能化、泛在化实验教学新模式,创新使用多样化的实验教学方法与手段,以激发学生的实验兴趣,提高学生的实验操作技能。实验教学采用虚实结合的授课方式,其中必修实验 2 学时、拓展实验 2 学时,共计 4 学时。指导教师通过课堂讲解、现场指导、实验报告

总结点评以及启发讨论环节,帮助学生系统地认识和把握所学理论与实践的关系。

(二)突出实验的科学性、前沿性和实用性

本实验结合国家能源发展战略需求和部署,以压水堆核电系统为研究对象,针对一、二回路综合换热设计与安全运行开展研究,兼具前沿性、科学性和实用性,有利于学生了解科技前沿,明确专业导向,提高学习兴趣,拓展工程视野,培养创新精神。本实验依托虚拟仿真技术开展,以弥补无法对核电站进行认识实习的缺陷,解决常规实验难以开展的难题。将高温、高压、高辐射等极端实验条件与危险性实验操作迁移到在线平台生动形象地呈现出来,不仅在技术性与安全性方面实现了双重保障,而且实现了科研的绿色化、安全性、高效性和教学内容的可视化呈现。

(三)构建全过程的实验流程

本实验项目构建了覆盖现场认知实习和实验全过程(预习、实施、复习、考核)的虚实结合的实验流程,既可较好地解决学生理解难、复习难、考核难,以及示教效果差和安全隐患大等问题,又能

让学生充分学习核电系统对流换热和相变换热的原理。学生通过虚拟实验操作,能够了解核电系统部件参数对系统温度特性的影响,掌握合理有效地设计核电系统部件参数的方法,领会每个实验步骤的设计思想和目的;在此基础上,还可以掌握基于高效目标的核电系统设计策略,探索新的研究思路,接受完整的科研训练过程。学生通过事故案例分析及安全运行工况探究,能够增强安全意识,提高作为未来工程师恪守工程伦理和职业道德的自觉性,树立家国情怀和使命担当,牢记公众利益与安全的重要性。

通过本实验的系统结构及模块(见图2),学生可以了解核电系统的构成,掌握核能与热能转化的基本原理及相应的安全知识,学习对流换热和相变换热特征参数的测量及分析方法;研究堆芯参数、蒸汽发生器参数、换热工质变化对系统温度特性的影响关系,掌握基于高效目标的设计策略;建立核电系统安全运行的观念,学会在合理范围内进行规范操作的方法;探索核电系统换热能效对安全性和可靠性的影响。



图2 系统结构及模块

三、实验原理及考核要求

CAP1400“华龙一号”核电机组是中国广核集团和中国核工业集团研发的具有我国自主知识产权的高功率先进非能动大型压水堆核电机组。

本虚拟仿真实验即以“华龙一号”压水堆核电机组为原型,对核电系统的综合换热过程进行计算。

在压水核反应堆(PWR)系统运行过程中,冷却系统中的冷却剂流经堆芯,由主泵送入蒸汽发

生器传热管,将核燃料裂变反应所释放的大量热量通过传热管传递给管外的二回路给水,实现一回路和二回路之间的热量传递,使二回路水由过冷态转化为饱和蒸汽。饱和蒸汽经过汽水分离装置后,变成具有一定压力、温度及干度的饱和蒸汽,进入汽轮机做功并发电,从而实现从核能到电能的能量转化过程。本虚拟仿真实验涉及的主要参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

参数	数值
反应堆热功率	3 150MW
设计压力	15. 7MPa
设计温度	343℃
换料周期	18 个月
一次侧压力	15. 5MPa
工质流量	7 591. 5kg/s
入口温度	321. 1℃
出口温度	280. 5℃
二次侧压力	5. 61MPa
饱和温度	271. 3℃
给水温度	226. 7℃
蒸汽产量	943. 7kg/s

一回路系统是压水堆核电站发电系统的核心部分,主要由反应堆压力容器、稳压器、主循环泵(冷却剂泵)、蒸汽发生器及相应的管道、阀门和其他辅助设备组成。工作压力、反应堆冷却剂冷段温度、热段温度、流量等的选择将直接影响核电厂运行的安全性与经济性,因此反应堆冷却剂系统参数的合理选择是核电厂设计的主要内容之一。冷却剂能否高效且安全地将燃料组件中核燃料释放的热量带出堆芯,对核电站的安全性和经济性有着直接的影响。核电蒸汽发生器是核岛内的三大设备之一,也是压水堆核电厂一回路、二回路的边界,其主要作用是将一回路的热量传递给二回路的水并使其汽化。同时,核电蒸汽发生器也起

到了隔离一回路系统(有放射性)和二回路系统(无放射性)的作用,是第二道屏障的重要组成部分。蒸汽发生器换热管的管径及换热系数,一回路、二回路工质的流量大小等因素,均会对换热效果产生影响,因此需要定量分析。

本实验提供了核电换热系统的整体三维动画,可以形象地展示在学生面前,如图 3 和 4 所示。

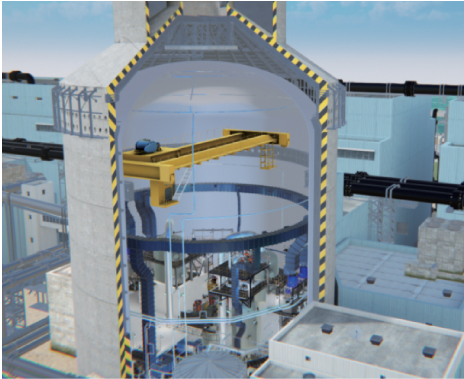


图 3 压水反应堆系统结构图



图 4 关键元件仿真示意图

本实验的考核强调过程评价与结果评价并重,既反映学生的知识掌握情况,又关注学生的科学探究能力与价值观等素质的提升情况。教师从预习、知识学习、实验操作、实验报告等多个维度对学生进行客观评价,考查学生是否熟练掌握实验原理并达到了实验教学要求,如图 5 所示。

四、实验的创新之处与实施效果

在实验方案设计思路方面,本实验采用可视化、信息化等先进技术将核电系统的换热系统以人机交互的方式进行展示,可以避免现场实验的高风险和高成本,同时能将现场实验过程中不易直接观测的环节展示出来。我们与行业领先的公司合作,采用国际先进的 Unity3D 引擎对实验场景、设备装置、系统等进行高度仿真建模,将实验

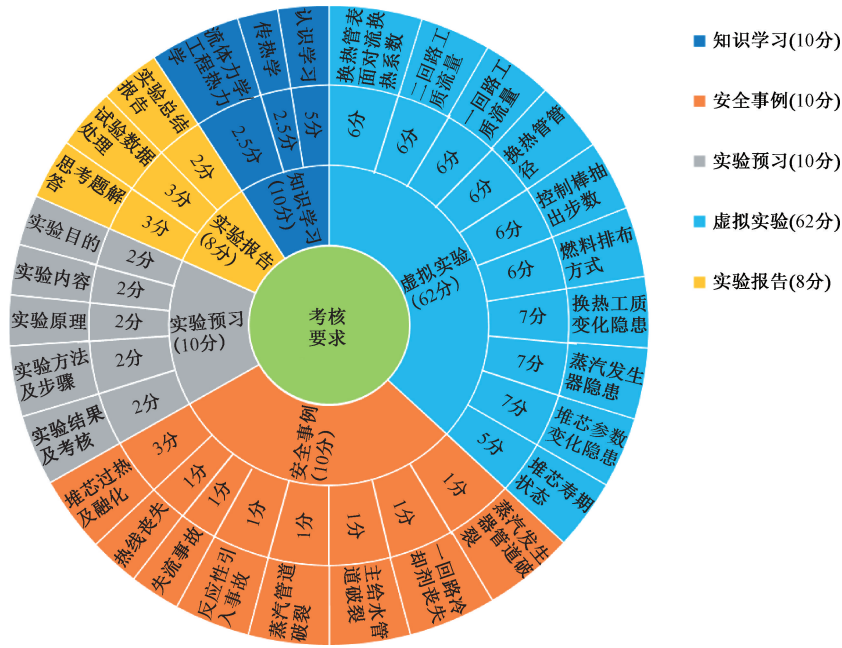


图 5 虚拟仿真实验考核要求

全过程用三维动画展示出来,操作规范、标准,实验场景立体逼真,体验感和交互性强,激发了学生强烈的参与兴趣。

在教学方法方面,我们将课堂理论与实验操作相结合,增加学生的参与感,实现了以学生为主体的教学。教学团队将引导式与开放式教学相结合,采用互动自主式的教学方法,开展师生线上讨论和线下交流。本实验涵盖了课前指导、实验预习、实验操作、实验结果、实验报告等环节,并提供线上答疑功能,方便学生随时讨论实验内容,也方便教师及时将学生反馈的问题汇总、整理并开展答疑。通过核电系统工程安全案例的学习和分析,学生树立了工程安全意识,掌握了规范化的操作方法。虚拟仿真实验系统会对实验操作中超出范围的情况进行安全预警,以进一步增强学生对操作规范、标准制定与约束的认识和理解,为其将来成为合格的工程师打下基础。学生可以通过自主研究、合作、探究等方式完成实验内容,并根据个人兴趣选做拓展性实验。如在能量转换与传递过程的认识环节,学生可以了解系统运行过程中出现的复杂变化规律,尝试分析并解决故障问题。这样的教学方法能够激发学生的实验兴趣,提高学生的实验操作技能,有效培养学生的创新实践能力。

在评价体系方面,本实验主要考查学生对专业理论知识的掌握情况和对系统操作的熟练程度。实验系统大数据平台具有日志管理、数据备份、系统监控、信息安全保障等功能,可以自动收集学生实验预习、实验操作、实验数据记录、实验报告内容等信息,作为评价依据。另外,思考题的解答情况也可以作为考查学生对于核电系统基础知识掌握情况的依据。教师通过学生对实验系统、实验设计、学习效果的反馈,了解每个学生对实验的掌握程度,从而进行因材施教。此外,教学团队还将该实验项目纳入我校安全科学与工程专业人才培养方案,并不断改进实验评价体系,与相关兄弟院校和社会各界共同探索项目开放共享机制,保证实验项目的可持续发展。

五、结束语

本虚拟仿真实验项目是在对实际核电系统换热设备进行调研的基础上设计开发的,相关参数与实际系统的吻合度高。学生可在合理范围内修改实验参数,并观察对应的实验现象。该实验项目的实施提高了学生的学习效率,拓展了学生的学科视野,较好地解决了现场实验受限导致的学生理解难、复习难、考核难且教学效果差的问题。基于虚拟仿真实验系统的数据多元分析有效增强

了学生解决复杂工程问题的能力,促进了学生对流传热设计新方式、高效目标设计策略的探究,充分发掘了学生的创新潜能。通过堆芯燃料组件安全运行工况范围的探究和对核电安全事故的认知分析,学生树立了规范操作和安全运行的意识,增强了对公众利益与安全重要性的认知,培养了家国情怀,强化了使命担当。该实验拓展了传统实验的范围,弥补了现场实验不能覆盖所有运行工况的不足,激发了学生的学习兴趣。该教学项目的实施达到了教学目标,提升了教学效果,提高了工程热力学专业的教学质量和水平。

(责任编辑:李丽妍)

参考文献:

[1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Nuclear power for sustainable development [R]. Vienna:IAEA,2017.

[2] 王海洋,荣健. 碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析[J]. 中国电力,2021,54(6):86-94.

[3] 郑乐,孙萌. 核电在我国低碳能源发展中的作用[J]. 科技视界,2019(15):66-67.

[4] 邢馥吏. 美国调查三里岛核电站事故委员会对事故原因和后果的分析[J]. 国外核新闻,1980(10):18-19.

[5] 李宗明. 让切尔诺贝利核事故的警钟长鸣——纪念切尔诺贝利核事故 25 周年[J]. 核安全,2011(3):1-8.

[6] 陈达. 核能与核安全:日本福岛核事故分析与思考[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(5):597-602.

[7] 李朝君,张春明,左嘉旭,等. 核电安全目标与公众接受性[J]. 辐射防护通讯,2014(3):20-23.

[8] 刘鹏飞,杨燕华,杨永木,等. 虚拟现实技术在核电厂仿真中的应用[J]. 原子能科学技术,2008(z1):169-175.

[9] 田书建,宋小勇,李重阳.“新工科”背景下《核电厂运行与管理》虚拟仿真实验教学探索[J]. 中国电力教育,2019(1):78-80.

[10] 辜峙铎,张庆贤,谷懿,等. 工程教育专业认证背景下核电厂运行虚拟仿真课程实验教学研究[J]. 中国现代教育装备,2021(23):77-79.

(上接第 71 页)

[10] Lin J, Wang L. Comparison between linear and non-linear forms of pseudo-first-order and pseudo-second-order adsorption kinetic models for the removal of methylene blue by activated carbon[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China,2009,3(3):320-324.

[11] Nnadozie E C, Ajibade P A. Adsorption, kinetic and mechanistic studies of Pb (II) and Cr (VI) ions using APTES functionalized magnetic biochar[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 309:110573.

[12] Furukawa H, Cordova K E, O’Keeffe M, et al. The chemistry and applications of metal-organic frameworks[J]. Science,2013,341(6149):123044.

[13] Li J R, Kuppler R J, Zhou H C. Selective gas

adsorption and separation in metal-organic frameworks[J]. Chemical Society Reviews, 2009, 38(5):1477-1504.

[14] Wang J, Zhuang S. Covalent organic frameworks (COFs) for environmental applications [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2019, 400:213046.

[15] Zeng Y, Zou R, Zhao Y. Covalent organic frameworks for CO₂ capture [J]. Advanced Materials,2016,28(15):2855-2873.

[16] Gao H, Sun Y, Zhou J, et al. Mussel-inspired synthesis of polydopamine-functionalized graphene hydrogel as reusable adsorbents for water purification [J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2013,5(2):425-432.