

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2022.04.025

欢迎按以下格式引用:张东海,高蓬辉,王义江,等.深部地下空间热湿环境调控虚拟仿真实验教学系统的构建[J].高等建筑教育,2022,31(4):191-199.

# 深部地下空间热湿环境调控虚拟 仿真实验教学系统的构建

张东海,高蓬辉,王义江,魏京胜,黄建恩,刘展

(中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116)

**摘要:**虚拟仿真实验是将信息技术融入实验教学项目、提升实验教学质量和水平的重要举措,被列为教育部推出的5类国家“金课”之一,在创新人才培养方面发挥着重要作用。紧密依托学科优势和科研特色,基于“学生中心、自主交互”+“虚实结合、相互补充”+“科研前沿、特色明显”的设计理念,坚持需求和问题导向创新实验教学模式,将特色研究成果转化为实验教学资源,构建了“模块化+层次化+碎片化”的地下空间热湿环境调控虚拟仿真系统。学生可不受时间和地点限制,自主开展“沉浸式体验+专业化学习+交互式操作+全程化考核”线上虚拟仿真实验,弥补传统实体教学资源的不足,丰富实验教学手段和资源,提高学生动手实践及解决复杂工程问题的能力,有效提升人才培养的成效。

**关键词:**虚拟仿真;实验教学;深部地下空间;热湿调控系统;建环专业

**中图分类号:**G642.42 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2022)04-0191-09

互联网、大数据、人工智能、云计算、虚拟现实、人机交互等现代信息技术快速发展,全球经济和社会发展,以及人类生活正经历着一场全方位根本性的变革。教育作为信息技术的先行者和践行者,教育信息化建设和发展对于重塑教育理论、文化、形态,以及提高高等教育质量具有重要意义,得到了国家的高度重视<sup>[1]</sup>。教育部《教育信息化十年发展规划(2011—2020年)》(教技[2012]5号)中明确指出,信息技术对教育发展具有革命性的影响,全民教育、优质教育、个性化学习和终身学习已成为信息时代教育发展的重要特征,要求高校要推动信息技术与高等教育深度融合,把教育信息化摆在支撑引领教育现代化的战略地位<sup>[2]</sup>。

实验教学是培养学生大胆质疑、深度分析、解决复杂问题能力和高级思维的重要环节<sup>[3]</sup>,对于培养学生的综合素质、实践动手能力与创新意识具有重要作用<sup>[4-5]</sup>。虚拟仿真实验教学作为学科专业与信息技术深度融合的产物<sup>[6]</sup>,具有内容精彩、技术先进、构思巧妙、做法灵活、时空拓展等特征和优势<sup>[7]</sup>,近年来得到广泛关注和应用<sup>[8-11]</sup>。

修回日期:2020-08-16

基金项目:江苏省中外合作办学高水平示范性建设工程;中国矿业大学课程建设与教学改革项目(2021YB08)(2020TZX01)

作者简介:张东海(1977—),男,中国矿业大学力学与土木工程学院副教授,博士,主要从事暖通空调研究,(E-mail)dhzhang@126.com。

为加强和规范高校优势虚拟仿真实验教学资源建设和应用,推动高校积极探索线上、线下教学相结合的实验教学模式,2017年教育部决定开展国家级示范性虚拟仿真实验教学项目建设工作(2017—2020),指出虚拟仿真实验教学项目是推进现代信息技术融入实验教学项目、拓展实验教学内容广度和深度、延伸实验教学时间和空间、提升实验教学质量和水平的重要举措<sup>[12]</sup>。2019年教育部印发《关于一流本科课程建设的实施意见》(教高[2019]8号),要求按照“两性一度”标准,建设万门5类“金课”,即一流本科课程“双万计划”<sup>[13]</sup>。其中,国家虚拟仿真实验教学项目被列为教育部推出的5类“金课”之一,进一步凸显了其在高等教育实验信息化教学体系中的重要地位和作用,已成为高校实验教学改革和创新的重要着力点。

## 一、专业发展概况

中国矿业大学始建于1909年,在百余年的办学实践积淀中形成了以工为主、能源资源为特色、理工文管等多学科协调发展的学科专业体系。学校现有深部岩土力学和地下工程,以及煤炭资源与安全开采2个国家重点实验室,矿业工程和安全科学与工程为国家“双一流”建设A+学科,建有矿业工程国家级实验示范中心和虚拟仿真实验教学中心,体现了学校在深部地下工程和矿业工程领域的品牌优势和鲜明特色。

中国矿业大学建筑环境与能源应用工程专业(以下简称建环专业)成立于1989年,在专业发展过程中始终坚持以特色作为引领,主动与学校传统优势学科进行交叉融合,在传统地面建筑热湿环境调控理论和技术研究基础上逐步向深部地下空间环境调控领域拓展,在高温矿井降温技术、矿井多源互补热能回收利用、废弃矿井开发与利用、深部地下空间热湿环境评价等方面开展了大量探索和实践,形成了以深部地下空间热湿环境调控为特色的学科和专业发展模式。近年来,专业建设和发展取得明显成效。2006年获得博士学位授予权。2012年该专业被遴选为江苏省“十二五”高等学校重点建设专业。2014年、2019年先后2次通过住建部本科教育评估工作。2016年,与澳大利亚皇家墨尔本理工大学联合创办中外合作建环本科专业,被确定为江苏省首批中外合作办学高水平示范性建设工程项目<sup>[14]</sup>。2021年、2022年先后入选江苏省和国家一流本科专业建设点。

为切实提高学生解决专业复杂问题的综合能力,紧密依托学科优势和科研特色资源,基于工程教育“学生中心、产出导向、持续改进”的质量理念,坚持需求和问题导向创新实验教学模式,尝试将本学科在深部地下空间热湿环境调控领域的最新特色研究成果引入实验教学,以特色科研助力实验教学,实现科学研究和教育教学的深度融合。

## 二、深部地下空间及其热湿环境特点

经济建设、社会发展及国家战略安全的新需求,使地下空间开发不断走向深部已成必然趋势<sup>[15]</sup>。一方面随着浅部能源和矿产资源的逐渐枯竭,能源和资源开采不断向深部延伸。目前,我国中东部主要矿井开采深度均达800~1000m,且每年以10~25m的速度增加,据统计2015年我国采深超千米的矿井有47座,平均采深为1086m。此外,我国金属和有色金属矿山同样正进入1000~2000m深部开采区。另一方面,全球变暖、环境恶化、城市综合症等问题日益突出,使得传统意义上的人类地球生存空间(地面和浅地表)难以满足人类活动的需求,向地球深部寻求发展和生存空间、开发深部地下城市新型空间已成为人类活动的未来趋势<sup>[16]</sup>。谢和平院士<sup>[17]</sup>和袁亮院士<sup>[18]</sup>提出利用关闭/废弃矿井大体量的地下空间,变废为宝,实现关闭/废弃矿井的资源化利用和转型升

级。如建设地下生态城市、地下医学和疗养院、地下矿井特色旅游、深地科学探索区等,打造矿区地下空间综合利用模式。此外,基于国家政治经济安全角度考虑,在地球深部进行地下战略防护工程、核废料处置和石油战略储备也已日益受到广泛关注。

适宜的地下空间热湿环境是深部地下空间开发和利用的前提保障,深部岩土由于特殊的赋存环境,呈现出显著的“高地温”特性,导致地下空间出现高温高湿环境(“热害”),难以满足人类深部作业和生活要求。随着地下深度的不断增加,原岩温度不断升高,地下空间的高温热害愈加严重,成为制约深部资源开采和地下空间利用的难题之一。如徐州三河尖矿—980 m 深度水平上工作面温度高达 36℃~37℃,湿度达到 95%~100%,高温高湿环境严重影响工人身心健康和矿井安全生产<sup>[19]</sup>。为此,深部地下空间热湿环境调控成为地下空间开发和利用的必然选择。

深部地下空间环境调控系统受控对象地处地球深部,垂直方向上距地面高差较大、水平方向上在地下可延伸至数十米,甚至数公里。鉴于深部地下空间环境调控系统具有环路复杂、系统庞大、风险系数高等特点,学生无法现场观摩和操作实际的地下工程热湿环境调控系统。为此,通过三维虚拟仿真技术,以本专业承担的某矿井地下降温工程为原型,构建深部地下空间环境热湿调控仿真模拟系统,对矿井降温主要实验设备原理、实验场景、仪器设备、实验方法、操作步骤、实验考核等进行模拟再现,让学生在开放、自主的虚拟环境中开展实时交互性实验,激发学习主动性和潜能,促进知识体系的构建,提升学生的创新创造能力。

### 三、虚拟仿真实验教学系统设计理念

深部地下空间环境热湿调控虚拟仿真实验系统基于国家虚拟仿真实验课程“两性一度”标准,按照“学生中心、自主交互”+“虚实结合、相互补充”+“科研前沿、特色明显”的设计理念而构建,旨在建成一套技术先进与高效实用相结合的虚拟仿真实验教学平台,服务实践和创新人才培养。

#### (一) 教学理念注重“学生中心、自主交互”

深部地下空间环境热湿调控虚拟仿真实验系统总体建设目标是通过三维虚拟仿真技术,构建矿井地下实验场景和降温调控系统实验对象,为学生完整呈现特殊空间环境调控的原理、设备与方法,学生可通过线上系统模块,不受时间和地点限制,自主开展“沉浸式体验+专业化学习+交互式操作+全程化考核”的开放式实验,完成专业的实验训练和能力提升。

通过虚拟仿真系统学生可以沉浸式体验深部地下空间场景、热湿环境调控系统的组成、工作原理和 workflow;专业化学习深部地下空间热湿环境调控系统的调控方式,掌握调控用主要设备(制冷系统、高低压换热设备、风机、水泵、调节末端等)的工作特性,能够对调节系统整体的经济性进行分析和评价;交互式操作虚拟实验系统,深入理解深部地下空间复杂条件下热湿环境调控系统的调控原理、手段及运行优化策略;全程化设置知识考核点及小练习,使学生边操作边学习,激发学生自主探索的热情和潜能,全面记录学生自主实验的结果,实现考核结果的智能反馈。教师可根据培养和教学目标要求,对实验项目进行设置和更新,对学生信息进行管理 with 查询,通过仿真平台开展师生互动交流、批改学生实验报告、反馈实验成绩,实现对整个实验过程的高效化管理和监控。虚拟仿真系统充分体现了“学生中心、自主交互”的教学理念,能够充分调动学生积极性,有利于提高实验教学质量和人才培养质量。

#### (二) 教学功能体现“虚实结合、相互补充”

学校建环专业教学实验室建有较为完善的实体暖通空调实验系统,实验室仪器设备资源主要

面向建筑室内热湿环境调控开展相关实验教学项目<sup>[3, 20, 21]</sup>。深部地下空间热湿调控虚拟仿真实验将环境调控技术与深部地下空间场景结合,面向深部地下特殊空间环境调控的复杂性和特殊性而开设,可应用于专业实验、专业实习、创新训练等实践教学环节,是传统实体实验室服务地面建筑室内环境调控的重要补充。“地面建筑空间+地下空间”两者有效结合,线下和线上相互补充,极大地拓展了实验教学的广度,充分体现了国家虚拟仿真实验“虚实结合、相互补充”的重要原则。

### (三) 教学内容彰显“科研前沿、特色明显”

虚拟仿真实验系统将学科在深部地下空间热湿环境调控领域的最新特色研究成果和信息化技术融合,以工程实际项目为支撑,将矿井热湿调控系统以虚拟仿真的形式完整地构建线上实验教学资源,开展不同层次的虚拟仿真实验教学项目,拓展了实验教学的深度,提升了实验课程的高阶性、创新性和挑战度,是本专业科研优势和特色资源的集中体现,彰显了教学内容的前沿性、特色性和时代性。

## 四、虚拟仿真实验教学系统的内涵建设

### (一) 技术实现方法

深部地下空间热湿环境调控虚拟仿真实验系统采用 B/S 架构,具有标准统一接口,可链接到校外虚拟仿真管理平台上,支持网页和手机界面操作方式,可实现网络学习和开放共享。系统基于 Unity3D 引擎在 Windows 平台下通过 DirectX 技术实现 3D 渲染,通过计算机图形学(实时阴影、光照贴图、凹凸贴图等)和计算几何学(碰撞检测、射线检测、刚体模拟等)实现图形的仿真,使用 C#语言实现虚拟实验操作功能程序编制,重点突出交互性和开放性,具备形象逼真的实验场景、实时互动的实验过程、丰富多样的实验现象和细致完善的结果反馈。

### (二) 虚拟仿真实验教学模块设置

深部地下空间热湿环境调控虚拟仿真实验系统基于“层次化+模块化”设计实验教学项目和内容,按照认知→基础→综合→提升四个层次,设置调控系统整体认知、核心设备性能测试、地下空间热湿调控效果和系调控统运行能效综合评价四个实验模块,如图 1。

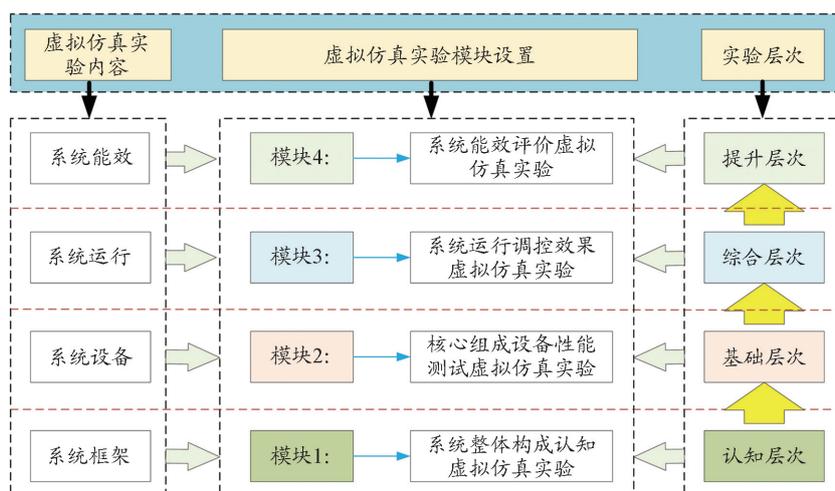


图 1 深部地下空间热湿环境调控虚拟仿真实验系统模块设置

#### 1. 模块 1: 系统认知虚拟仿真实验

该实验模块为认知层次,基于深部地下空间热湿环境调控虚拟实验系统模型,以第一人称视角采

用漫游模式通过键盘、鼠标等控制方式,全景漫游和沉浸式体验整个深部地下空间,以及环境调控系统三维仿真模型,掌握地下空间热湿环境调控系统组成(如图2所示)及其工作原理,帮助学生建立地下空间热湿环境调控系统的整体概念,思考深部地下和建筑空间热湿调控系统的异同。

三维仿真系统认知模块可实现:(1)所有核心设备模型按照工程原型采用主流三维建模软件搭建,均可拆卸组装、可透视设备内部细节;(2)核心设备聚焦和字幕弹出功能,当鼠标扫过系统主要组成设备时,会热点显示出设备轮廓,点击设备会弹出设备功能说明页面,为学生提供学习帮助;(3)仿真系统可对不同水系统管路循环(冷却水、一次制冷机侧冷冻水、二次换热器冷冻水)分类单独显示,清晰呈现整个调控系统的逻辑组成关系。

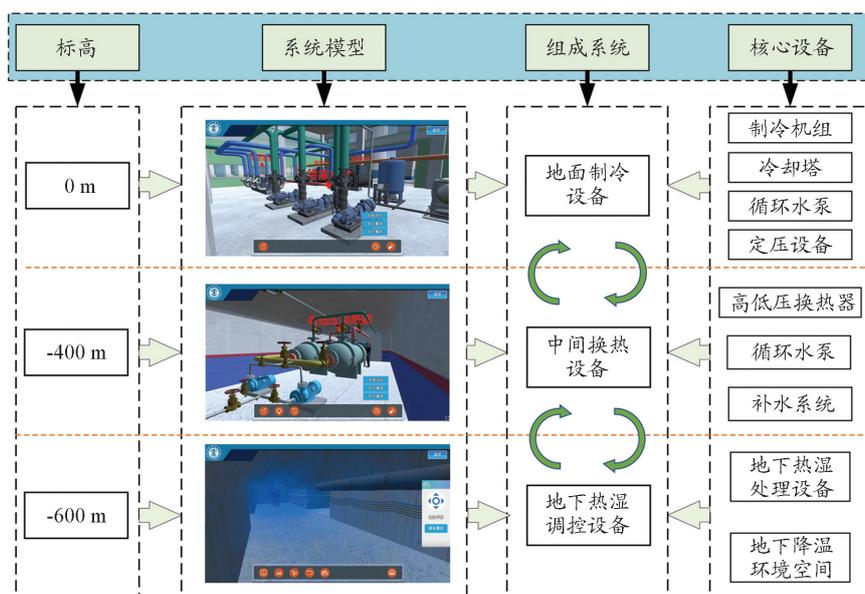


图2 深部地下空间热湿环境调控系统组成

## 2. 模块2:主要组成设备特性虚拟仿真实验

该实验模块主要完成深部地下空间热湿环境调控系统,如制冷冷水机组性能、循环水泵、中间换热器、冷却塔、末端喷淋装置等主要组成设备的特性虚拟仿真实验。通过实验让学生熟悉调控系统主要核心设备的构造、组成及工作原理,通过互动式操作掌握主要设备的工作特性和影响因素,加深对理论的理解,为后续系统设备的耦合运行实验打下基础。

图3a为虚拟仿真制冷系统模型展示。机组模型基于工程实际尺寸搭建,通过模型拆解和相关文字信息反馈,配合鼠标拖动旋转视觉,可多角度透视机组内部组成部件,让学生全面了解制冷系统的结构组成及其功能。此外,还可以动画呈现机组内部制冷剂的蒸发和冷凝过程,强化学生对制冷循环过程的理解。在此基础上,学生通过虚拟仿真操作开展制冷系统特性和运行实验(图3b所示),掌握深部地下空间热湿环境调控用制冷系统运行工艺流程、系统动态热性、调控措施,以及制冷系统过载保护控制模式等。实验过程中通过输入相关参数,可对制冷系统性能及其影响因素作出评价。

## 3. 模块3:地下空间热湿环境调控系统耦合运行虚拟仿真实验

该实验模块主要对深部地下空间热湿调控系统的整体运行进行模拟仿真,为综合层次的实验教学内容。要求学生将地面制冷系统、中间换热系统和地下空间末端调控系统组合连接并实现耦

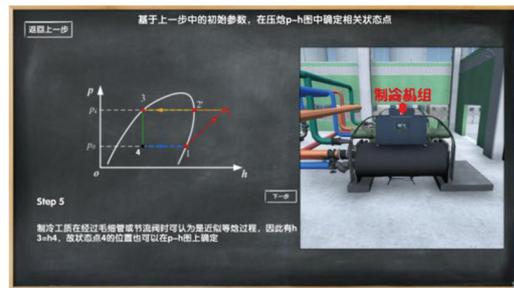
合运行,让学生掌握热湿调控系统的整个工作过程,特别对深部地下特殊空间末端调控用喷淋降温装置的原理和降温效果有深入把握,在实验过程中获得地下空间温湿度的变化规律,分析热湿调控效果及其有效性,研究影响系统调控效果的主要影响因素。

#### 4. 模块4:地下空间热湿环境调控系统节能性能评价虚拟仿真实验

该模块通过在系统中合理位置设置流量计、功率表、温度计、压力表等测试仪表和装置,实现对深部地下空间热湿环境调控系统运行能耗进行虚拟监测,并开展节能评价。通过虚拟仿真实验,辨析制冷机组性能系数和系统能效系数的区别,加深对制冷机组性能系数和系统能效系数的理解,学习系统能效系数的测试方法,研究系统运行工况对系统能效的影响规律,以便能够优化地下空间热湿环境运行参数,提出提高系统运行能效的对策。



(a) 制冷系统模型



(b) 制冷系统虚拟仿真实验

图3 制冷性能虚拟仿真实验

### (三) 虚拟仿真实验教学知识点设计

深部地下空间热湿环境调控虚拟仿真实验系统来源于实际科研项目,具有较强的综合性、工程性和前沿性,符合“两性一度”建设标准,设计知识点覆盖了本专业认知、基础、综合和提升四个层次共22个重要知识点,具体如表1所示。通过虚拟仿真实验,学生可经历一次从系统整体认知到单一核心设备性能实验,再到系统整体运行时地下空间调控效果实验,最后完成系统整体能效综合评定的专业系统性学习和综合锻炼,极大地促进了学生对专业知识的重构,增强了学生运用专业知识解决复杂工程实际问题的能力。

表1 深部地下空间虚拟仿真实验系统知识点

实验模块层次	知识点
系统认知虚拟实验	(1)热湿调控系统主要设备组成及其工作原理;(2)深部地下空间热湿调控系统工作流程;(3)深部地下空间热湿调控系统水系统竖向分区原则;(4)特殊空间空调末端方案的合理设计
设备性能虚拟实验	(5)制冷系统运行工艺流程;(6)制冷系统过载保护控制;(7)制冷系统运行性能;(8)制冷系统变工况运行特性;(9)热湿调控用典型离心泵特性;(10)离心泵串、并联工作特性;(11)管网特性曲线绘制;(12)水系统运行工况点概念;(13)变工况运行下水力工况点的变化规律;(14)冷却塔工作特性
系统调控效果虚拟实验	(15)深部地下空间环境热湿负荷及分布特性;(16)多级直接接触式热湿调控设备构造和工作原理;(17)直接接触式热湿调控设备热质交换性能影响因素;(18)地下空间热湿环境调控效果评价方法
系统调控能效虚拟实验	(19)热湿调控系统中主要运行参数的测量方法、仪表及其工作原理;(20)基于载冷剂法测量冷水机组冷量方法;(21)热湿调控系统能效测试和评价手段;(22)地下空间调控系统能效影响因素及优化措施

## 五、虚拟仿真实验教学方法

本虚拟仿真系统基于虚实结合、科研反哺教学的思路,采用虚拟仿真技术完成深部地下空间热湿调控系统的构建,作为实验室实体热湿调控实验系统的重要补充,学生可通过本系统实现互动式体验、操作和学习,系统掌握暖通空调专业知识,提升综合实践和创新能力。

### (一) 基于虚拟仿真系统和实体设备,实现虚实互补、通特结合,全面提高实践教学效果

实验室实体设备和校外实习基地,主要面向建筑空间热湿调控单一设备和系统局部开展实验和实习工作,由于受空间限制和视觉影响,学生一般无法获得暖通空调系统整体性的架构认知和核心设备内部的详细构造,实践教学存在“只见树木不见森林”之弊端。

地下空间热湿环境调控虚拟仿真系统依托信息化和计算机技术,面向地下特殊空间环境场景,基于学科特色科研成果和工程实际资源,搭建了热湿调控系统完整的全尺寸仿真模型,具有形象逼真的实验场景、实时互动的实验过程和丰富多样的实验现象。通过设备细节拆解、局部透视、动画视频、视角切换将声、光、电多媒体和虚拟仿真技术结合,让学生身临其境、沉浸式体验设备内部结构组成、系统工作原理和运行特性,达到“既见树木又见森林,还可见树木纹理”的良好效果。

虚实结合的实验教学方法发挥了虚拟系统和实验室现场设备双方的优势,让学生全面了解建筑空间和深部地下特殊空间调控系统,实现线上线下资源优势互补、通用和特色兼修,有利于拓展学生的知识体系和就业渠道,提升其综合竞争力。

### (二) 基于电脑和手机终端平台,突破时空束缚,实施全开放性教学

传统实验室和校外基地实践教学由于受时间、空间、经费和人员等条件的制约,实验教学质量往往达不到理想效果。虚拟仿真系统基于电脑和手机双平台客户端而构建,学生可利用计算机和手机终端随时随地开展虚拟实验,实现沉浸式体验、互动式操作和专业化学习的效果。此外,本虚拟实验系统可实时记录学生登录、学习、操作、问题反馈等数据,教师可基于虚拟系统数据评定学生参与度和成绩,与学生在线开展交流。因此,地下空间热湿环境调控虚拟仿真系统真正实现了实验教学的全开放,拓展了实验教学的时空,体现了以学生为中心的教学理念,大大激发了学生的实验兴趣,有利于学生个性化培养和成才。

### (三) 基于模块化虚拟实验内容,实现碎片化学习,开展层次化教学

虚拟仿真实验系统按照认知→基础→综合→提升四个层次,设置系统整体认识、核心设备性能测试、地下空间调控效果和系统运行综合能效评价四个实验模块共 22 个重要专业知识点,充分体现了“两性一度”标准。在教学实施过程中,每个模块按照 1 个学分设置,要求学生利用开放时间,按照模块层次高低顺序,分阶段逐步完成所有实验考核环节,系统性学习、仿真操作整个热湿调控系统。这种“模块化+层次化+碎片化”的教与学模式符合知识的构建规律,有利于信息化时代背景下知识系统的形成,促进教学效果的提升。

## 六、虚拟仿真实验教学实施成效

深部地下空间热湿环境调控虚拟仿真系统依托学科科研优势和特色资源构建,目前全部教学资源已发布在学校专用平台网站,并已申获计算机软件著作权。虚拟仿真系统在专业实验、认知实习、生产实习、创新训练等实践教学环节已得以大量应用,有效弥补了传统实体教学资源的不足,丰

富了实验教学手段和资源,提升了学生创新实践能力和解决复杂工程问题的能力,促进了人才培养的成效,提升了专业影响力。

基于深部地下空间虚拟仿真系统,面向全校建环、能源动力、采矿工程、安全工程等专业每年约450人,开展专业实习和制冷空调课程实验,提高学生的基本实验能力。虚拟仿真系统还可为大学生科技创新训练和科技竞赛活动提供实验资源和技术支撑,提高科技创新能力和水平。近年来,学生先后申请“高温热水型金属深井矿井降温与余热梯级利用研究”“废弃巷道地面漫流换热特性的实验研究”“高温矿井采区集中降温空调器实验研究”等国家级、省级和校级各类大学生创新项目20余项,完成的“高温深部矿井降温冷凝余热综合梯度利用系统”“基于喷射器的矿井降温及余热利用系统”等科技作品在全国大学生节能减排大赛、CAR-ASHARE设计大赛、中国制冷空调行业大学生科技竞赛等重要学科竞赛中获奖14项。此外,深部地下空间热湿环境调控虚拟仿真资源还服务于教师开展科学研究工作,通过与合作企业共享,扩大了学校在深部地下空间环境调控领域的知名度和影响力,已先后完成多个高温矿井工作区域降温系统的研究和实施,取得了良好的应用效果。

## 七、结语

虚拟仿真实验教学是现代教育改革和发展的必然要求。为充分发挥虚拟仿真实验教学在人才培养中的重要支撑作用,今后需进一步充分利用学科、专业优势和特色,按照“两性一度”金课标准,在实践中持续更新和完善虚拟仿真实验教学资源 and 内容,探索线上线下资源的高效结合,扩大资源开放度和共享面,以适应不断发展的高等教育教学新形势和新要求。

### 参考文献:

- [1] 中共中央国务院. 国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010-2020年)[EB/OL]. [2020-03-09]. [http://old.moe.gov.cn/publicfiles/business/htmlfiles/moe/info\\_list/201407/xxgk\\_171904.html](http://old.moe.gov.cn/publicfiles/business/htmlfiles/moe/info_list/201407/xxgk_171904.html).
- [2] 教育部. 教育信息化十年发展规划(2011-2020年)[EB/OL]. [2020-01-19]. <http://old.moe.gov.cn/publicfiles/business/htmlfiles/moe/s5892/201203/133322.html>.
- [4] 张东海,黄炜,张建功,等. 暖通空调多功能综合实验台研制[J]. 实验技术与管理, 2013,30(12):87-90,100.
- [5] 徐明,熊宏齐,吴刚,等. 土木工程虚拟仿真实验教学中心建设[J]. 实验室研究与探索, 2016,35(2):139-142,216.
- [3] 左铁镛. 高等学校实验室建设的作用与思考[J]. 实验室研究与探索, 2011,30(4):1-5.
- [6] 李平,毛昌杰,徐进. 开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设提高高校实验教学信息化水平[J]. 实验室研究与探索, 2013,32(11):5-8.
- [7] 熊宏齐. 国家虚拟仿真实验教学项目的新时代教学特征[J]. 实验技术与管理, 2019,36(9):1-4.
- [8] 王柏华,马秀飞,马军,等. 轨道交通信息与控制虚拟仿真实验教学中心建设[J]. 实验室研究与探索, 2019,38(5):147-150.
- [9] 袁小平. 电工电子虚拟仿真实验教学中心建设的研究与探索[J]. 实验室研究与探索, 2017,36(12):164-167.
- [10] 祖强,魏永军,熊宏齐. 省级在线开放虚拟仿真实验教学项目建设探讨[J]. 实验技术与管理, 2017,34(10):153-157.
- [11] 刘亚丰,余龙江. 虚拟仿真实验教学中心建设理念及发展模式探索[J]. 实验技术与管理, 2016,33(4):108-110.
- [12] 教育部. 关于2017-2020年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知[EB/OL]. [2020-04-02]. [http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721\\_309819.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721_309819.html).
- [13] 教育部. 关于一流本科课程建设的实施意见[EB/OL]. [2020-04-02]. [http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191031\\_406269.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191031_406269.html).
- [14] 张东海,桑树勋,高蓬辉,等. 建环专业中外合作办学人才培养模式探索与实践——以中国矿业大学中澳合作项目为

- 例[J]. 高等建筑教育, 2020,29(4):22-31.
- [15] 赵生才. 深部地下空间开发利用——香山科学会议第230次学术讨论会侧记[J]. 地球科学进展, 2005,20(1):115-118.
- [16] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2017,49(1):1-8.
- [17] 谢和平,高明忠,高峰,等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报, 2017,42(6):1355-1365.
- [18] 袁亮,姜耀东,王凯,等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报, 2018,43(1):14-20.
- [19] 何满潮,郭平业,陈学谦,等. 三河尖矿深井高温体特征及其热害控制方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(S1):2593-2597.
- [20] 张东海,黄炜,黄建恩,等. 建筑环境与设备工程专业综合创新型实验平台的建设[J]. 实验室研究与探索, 2014,33(6):193-196,203.
- [21] 张东海,魏京胜,黄炜,等. 气流组织综合实验装置设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2012,29(11):70-73.

## Construction of virtual simulation experimental teaching platform of air conditioning system for deep underground space

ZHANG Donghai, GAO Penghui, WANG Yijiang, WEI Jingsheng, HUANG Jianen, LIU Zhan  
(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** Listed as one of the five top-quality courses launched by Ministry of Education of China, virtual simulation experiment is an important measure to integrate the information technology into experimental teaching to improve the quality and level of experimental teaching, and plays an important role in cultivating the talents. Students-oriented teaching and learning with emphasis on interaction and engagement has been adopted to design the virtual experimental system with combination of real resources to aid mutually with advantages. The scientific research is introduced to demand-oriented and problem-based virtual experimental teaching. The modular, hierarchical and fragmented virtual simulation experimental teaching system of air conditioning system for deep underground space is developed based on cutting-edge research in the field of deep underground space air conditioning. The students will be able to implement the online virtual experiment anytime and anywhere with engaging experience, professional learning, interactive operation, and whole process assessment. It can make up for the shortage of traditional experiment apparatus, enrich the experimental teaching means and resources, enhance the students' innovative capability of solving the complex problem and improve the teaching quality.

**Key words:** virtual simulation; experimental teaching; deep underground space; air conditioning system; building environment and energy application engineering

(责任编辑 梁远华)