

# 新技术在线上实物实验平台的研究与探索

郑磊, 胡仁杰, 堵国樑, 黄慧春

(东南大学 国家级电工电子实验教学示范中心, 南京 210096)

**摘要:** 为推进线上实验教学的发展, 深入分析实物实验的需求和特点, 结合传统实验教学模式积累的成功经验, 引入可重构、大数据、混合云计算、物联网、人工智能等技术, 研究线上实物实验平台的建设方法, 探索新技术应用于实验教学模式的改革方向, 构建线上实物实验的实施方案。实施结果表明, 在疫情特殊时期下能保障和提供给学生良好的教学效果, 值得参考与借鉴。

**关键词:** 线上实物实验; 电工电子; 可重构; 大数据; 人工智能

**中图分类号:** G 642.0 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7167(2021)05-0163-07



## Research and Exploration of New Technology in Remote Online Experiment Platform

ZHENG Lei, HU Renjie, DU Guoliang, HUANG Huichun

(National Experimental Teaching Center of Electrical and Electronic Technology,  
Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to promote the development of online experimental education, the needs and characteristics of experiments are thoroughly analyzed, the successful experience of traditional experimental teaching mode is summed up, technologies such as reconfigurable, big data, hybrid cloud computing, Internet of things, artificial intelligence are also introduced. The construction of online experiment platform is studied, the reform of experimental teaching mode with new technology is explored, and the implementation plan of online experiment is presented. The implementation results show that online experiment platform can guarantee and provide good teaching effect for students during the outbreak, and it is worthy being popularized and applied.

**Key words:** online-experiment; electrical and electronic; reconfigurable; big data; artificial intelligence

## 0 引言

2013年,教育部发出了《关于开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设工作的通知》,通知指出,虚拟仿真实验教学是高等教育信息化建设和实验教学示范中心建设的重要内容,是学科专业与信息技术深度融合

的产物<sup>[1]</sup>。《教育部关于一流本科课程建设的实施意见》<sup>[2]</sup>中提出进一步的建设目标,从2019~2021年,完成4000门左右国家级线上一流课程(国家精品在线开放课程)、4000门左右国家级线下一流课程、6000门左右国家级线上线下混合式一流课程、1500门左右国家虚拟仿真实验教学一流课程、1000门左右国家级社会实践一流课程认定工。2019年底到2020年初的新型冠状病毒疫情,给全国乃至世界范围内的教育行业带来新的挑战,线上课程、直播网课成为主流的教学手段,初见成效的线上实验平台也给在家学习的学生带来全新的实验学习体验。教育部印发《疫情防控期间做好高校在线教学组织与管理工作指导意见

收稿日期: 2020-07-18

基金项目: 2019年江苏省高等教育教改研究立项课题(2019JSJG061); 东南大学教学改革项目(5251012004A)

作者简介: 郑磊(1984-),男,江苏徐州人,硕士,工程师,主要研究方向为嵌入式软硬件、模式识别与智能系统。

Tel.: 13813025040; E-mail: 103007101@seu.edu.cn

见》等文件<sup>[3-5]</sup>指出,各高校应充分利用上线的慕课和省、校两级优质在线课程教学资源。在慕课平台和实验资源平台服务支持带动下,依托各级各类在线课程平台、校内网络学习空间等,积极开展线上授课和线上学习等在线教学活动,保证疫情防控期间教学进度和教学质量,并全天候开放国家虚拟仿真实验教学项目共享平台,免费提供2 000余门虚拟仿真实验课程资源,实现“停课不停教、停课不停学”<sup>[6]</sup>。

目前的线上实验平台融合了理论/实验、课内/课外、线上/线下混合式等实验教学模式<sup>[7]</sup>,拓宽了实验的时空与内容的外延和深度。但是大部分线上实验室作为理论教学或者MOOC的辅助工具存在,没有形成独立、完整的教学体系;而且现有的线上实验任务以验证性为主,鲜有探究性;涉及的问题客观性居多、缺乏主观性;实验过程没有针对性引导、帮助和交互;系统缺乏完整、明确详细的考核机制;对于海量的多维度数据很少进行分析,难以对教学设计提供良性反馈。

杨全胜等<sup>[8]</sup>对计算机专业的远程实验系统作了初步的探讨和研究,建立基于FPGA的带底层硬件支持的虚实结合的远程实验系统。曾永安等<sup>[9]</sup>通过融合Proxmox虚拟化、VNC等技术,实现多主机互联的在线实验课程。徐志国等<sup>[10]</sup>从课程大纲的优化与调整、在线资源的建设、线上线下互动教学的设计及组织、考核标准与实施等方面提出了电子信息类专业课程混合式教学模式改革的思路,探索利用在线平台进行混合式教学对于提升电子信息类专业课程教学效果的重要意义。Fujii等<sup>[11]</sup>利用Web服务器、VPN、分布式资源和服务管理等技术实现共享实验室框架,为远程多用户分时复用硬件实验系统的应用提供可能。

线上实物实验平台,契合教育部当前“线上”+“线下”混合式教学模式,加强培养学生的设计能力、探索能力、创新能力和实干能力,尽量多给学生留出独立思考和自主学习空间,引导学生自主设计实验,并严格按照科学规范对学生进行监督、培养与考核<sup>[12]</sup>。本文在Web服务器、VPN技术、分布式控制技术的基础上,结合混合云计算<sup>[13]</sup>、物联网<sup>[14]</sup>、大数据、人工智能、可重构<sup>[15]</sup>等新技术,融合实验教育资源<sup>[16]</sup>,为线上实验教学带来新的机遇,将全面改变现有的教学环境和培养模式。

## 1 平台框架介绍

当前在线实验主要有两种形式:软件设计仿真与远程实物实验<sup>[17-18]</sup>。软件设计仿真的实验环境由软件模拟,如使用Multisim、Pspice、QuartusII、Vivado等计算机辅助设计软件或者专门设计的虚拟现实空间软件环境中进行相关课程实验。这种方法可以在没有实际设备的情况下进行实验,并且许多学生可以同时进行

相同的实验。但是,实验的结果是已成定局的结论,并且在许多情况下,结果的偏差很小。远程实物实验是通过远程控制实际的实验设备,如实际的数字电路、模拟电路,用这种方法可以得到与实验室实际电路相似的结果,限制条件是同一台设备只能被有限的同学使用。

电子信息类课程,尤其是基础课程中,软件设计仿真是实验设计和参数优化通常采用的方法。但是软件仿真与实物电路之间存在不可消除的差异,如电子元器件理想集中参数与真实器件分布参数,理想仪器状态与真实仪器驱动能力、频率特性等非理想状态,纹波、噪声、干扰对电路运行的影响,线路分布阻抗参数及接触阻抗对电路的影响等。因此,线上实物实验能够充分融合理论/实验、课内/课外、线上/线下的教学理念,通过实践与理论的差异化分析和学习,践行理论指导实践和实践对理论具有决定作用这一辩证思想。

线上实物实验平台框架结构如图1所示。系统由实验室实验板卡机箱、仪器组、网络、服务器、管理员管理端、教师管理端和学习者客户端组成。

实验板卡机箱采用标准机箱式结构,按照课程分为模拟电子线路实验、电路分析实验、数字逻辑电路实验等,机箱内按照使用人数配置一定数量的实验板卡,硬件资源由服务器动态分配,每个机箱能并发多个学生同时实验;系统可实现多个平台级联。

仪器组与板卡机箱连接,每台仪器均可通过网络远程操控,提供真实的实验环境和仪器测试体验。

学习者在客户端设计的实验均有实际硬件电路对应,通过浏览器访问在线实验平台,可在类似面包板的实验平台上配置电子元器件、选择元器件参数、用导线连接电路;可以选择实验仪器设备,如远程操控程控稳压电源的输出电压、激励信号源的波形/频率/幅值、万用表的测量功能、示波器的通道/耦合/灵敏度/扫描速率;可选择电路中信号接入点与电路观测点,观察并测量电路参数与信号的波形、频率、幅值、相位等参数。学习者可以在线编写实验报告,将实验电路、实验数据、信号波形植入实验报告,形成的实验报告可在线提交。

教师通过教师管理端管理实验内容和学生实验过程,在线批改报告,评价实验过程和实验结果。

管理员根据学校的课程教学要求,在管理员配置端配置实验板卡和实验仪器,配置系统功能模块。

服务器为实验平台提供无人值守、24 h全天候开放运行的服务。服务器铺设在校外,由成熟的云服务供应商提供服务,实验板卡和仪器铺设在学校,通过VPN网络交互数据。学生、教师、管理员均可通过网络访问各自角色的网络内容,学生可在家庭、宿舍、教室、图书馆等任何有网络的场地进行实验。

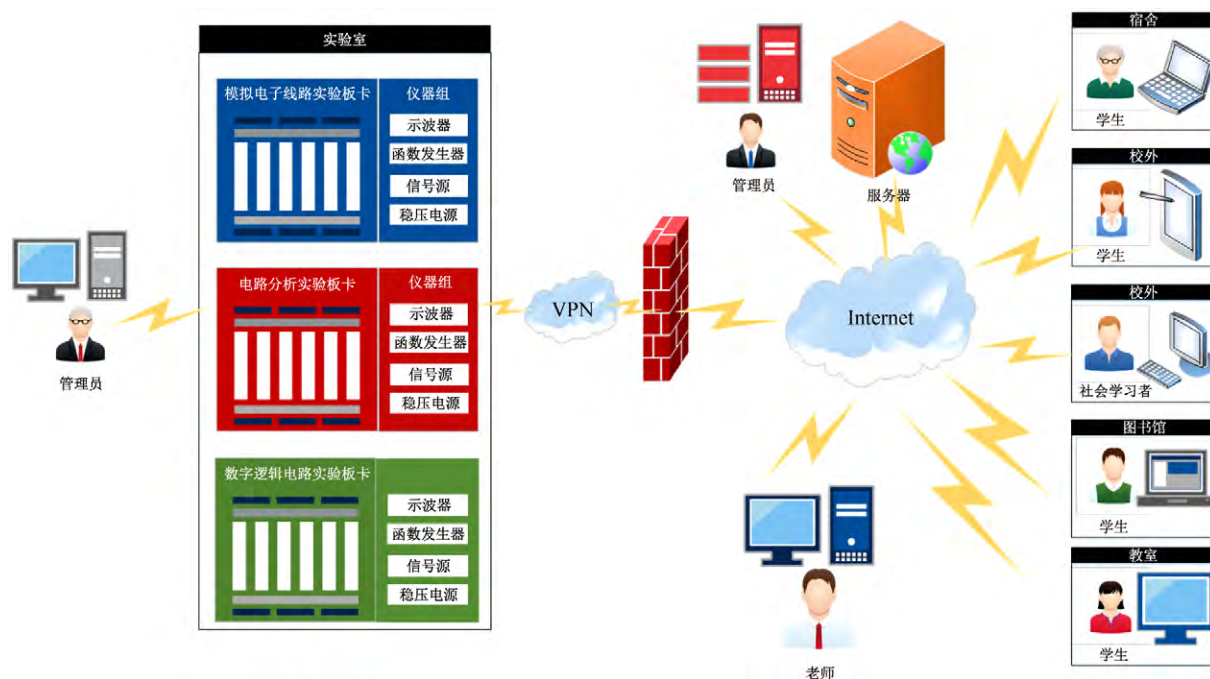


图1 线上实物实验平台框架示意图

本文将可重构技术、混合云计算、物联网、人工智能等新技术引入和应用到线上实物实验平台,融合这些新技术,为线上实物实验教学带来新的机遇,将全面改变现有的教学环境和培养模式,高度数字化、网络化、智能化教学环境条件的快速普及,为提供更具个性的教学内容和教学引导,为实现更加精准、更具耐心的实验教育提供了基础硬件条件,为提供更加多样的教学模式和学习方式、实现由知识传授到知识构建的重大转变提供了可能。而沉浸式的学习体验和智能化的学习过程,将为每位学习者特定的学习需求生成个性化、定制化的学习方案。

## 2 系统设计

为了融合理论/实验、课内/课外、线上/线下的教学资源,拓宽了实验的时空与内容的外延和深度,线上实物实验平台以数据和技术为驱动力,结合可重构技术、大数据、混合云计算、物联网、人工智能等新技术,实现理论知识驱动实验技能、实验技能转化学习能力、学习能力提升科研素质的良性循环,通过打造集合施教、学习、实验、管理等功能于一体的智慧在线实验管理系统,探索全面、精准评价机制,并能够支持学习过程的动态优化、实验过程智能引导和在线帮助,提升实验效率。

### 2.1 可重构技术

可重构技术<sup>[15]</sup>是指利用可重用的软硬件资源,根据不同的应用需求,灵活地改变自身系统结构的设计方法。在线实验系统需要根据不同的实验项目更改电路结构,根据学生的不同设计改变电路结构和参数,可重构技术的应用可以保证在线实验系统的设计具备足

够的灵活性和多样性。

如图2所示,在线实验系统的实验板卡设计采用可编程的数字开关阵列、可编程的模拟矩阵开关阵列、可编程电阻和电容器件、可编程运算放大器、可编程电源等可重构硬件资源,通过基于“ARM+FPGA”结构的重构控制器配置可重构硬件资源。ARM处理器接收远程控制信号指令,解析后转化为FPGA的控制信号,FPGA配置可重构硬件资源,改变实验电路的结构和参数。同时,ARM处理器采集实验对象和相关电路的工作状态,反馈给服务器,记录实验过程数据,监测实验效果。

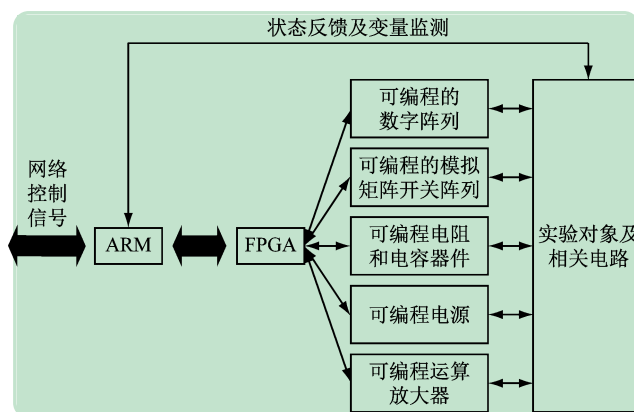


图2 可重构硬件资源示意图

### 2.2 大数据

数据是指通过科学实验、检验、统计等方式所获得的,用于科学研究、技术设计、查证、决策等目的的数据。通过全面、准确、系统地测量、收集、记录、分类、存储这些数据,再经过严格的统计、分析、检验这些数据,就能得出一些很有说服力的结论。大规模、长期地测



量、记录、存储、统计、分析这些数据,所获得的海量数据就是大数据<sup>[19]</sup>。

在实验教学中,学习者的视频课件学习行为、实验操作行为、在线时长、结果正确率、测试成绩、与教师互动情况、教学评价等数据,可以很好反映学习者的学习规律,教师的在线时长、教学材料反馈、与学习者互动情况等数据,可以反映教师施教的有效性,反映实验材料、实验项目设置的科学性。在线实验后台运行数据可以反映平台的承压能力、带载能力、性能缺陷、功能开发方向等。

数据是人工智能的“养料”,因此实验大数据是实验平台智能化的基础,大数据技术可以通过对教育数据的分析,挖掘出教学、学习、评估等符合学生实际与教学实际的情况,这样就可以有的放矢地制定、执行教育政策,制定出更符合实际的教育教学策略;也有利于人工智能技术在实验平台的实施。

### 2.3 混合云计算

线上实物实验不同于纯软件虚拟仿真,其依赖的硬件实验装置不是标准化的计算机设备,无法托管到互联网机房,只能部署在实验室;软件系统(管理、预约、实验报告)面对的用户数量多、分布广,为了保证访问速度,需要使用互联网云服务器。借助混合云计算技术,实验室的实验装置硬件可以与互联网云服务器(分布在华北、华东、华南)结合,构成混合云服务,为全国各地用户提供近乎实时的实验操作(见图3)。

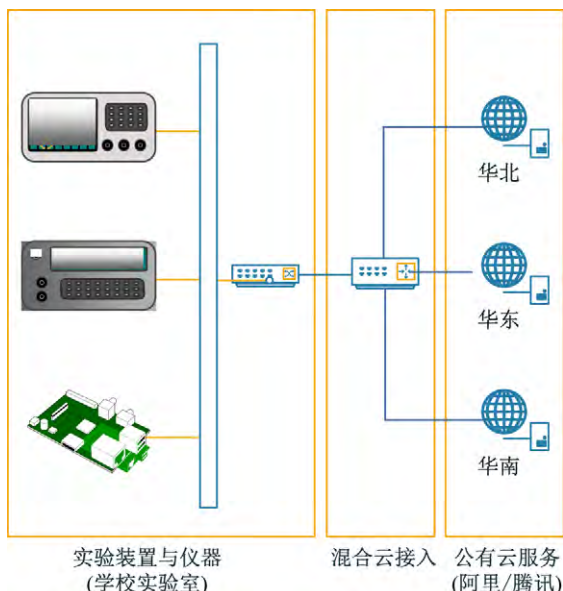


图3 混合云计算部署示意图

### 2.4 物联网技术

目前高校实验室的仪器设备都可以基于https协议实现与智慧实验管理终端的互联,可以自动识别并记录仪器的相关信息(型号、序列号、位置、使用时长等);实现实时监控所有实验台仪器的状态(是否在线、仪器是否正常);可批量设置实验室所有仪器的状

态(上线、下线、统一设置等);可在线获取某个实验台测量仪器的详细数据(测量数据、屏幕截图或主要参数);支持学生在实验报告中读取测量仪器的数据,这些智慧仪器为本项目提供了很好的物理基础。

在线实境实验配套的实验装置与仪器设备功能架构各不相同,来自不同的厂商,这些硬件通过物联网连接在一起,支持了从基础到综合的各类实验项目,而且装置的数量可以按需调整,实验内容的扩充也非常方便。

### 2.5 人工智能

智慧教育经历了最近2~3年的高速发展后,为“人工智能+实验教学”的结合提供有效的实验数据和经验支持<sup>[20]</sup>。目前工具型辅助学习、人工智能学科教育和智慧校园是人工智能在教育行业比较流行的应用场景,人工智能的多项技术被运用到教学和辅助教学环节,已经积累了一定的成功经验。人工智能与线上实物实验的结合,可以在课程教学目标、教育模式、教学要求、评价机制等方面进行整合、重构,建立全面的智能实验教学体系。

基于人工智能的实验教学研究包含内容研发、数据及技术开发,也涉及到数据供应和底层设施,如图4所示。内容研发涉及认知科学、学习心理学、教育测量学、学科教研经验等;数据及技术开发涉及新兴的机器学习、计算机科学、大数据、物联网等多个领域;数据供应端包含在线开放课程、MOOC、传统课堂等;底层设施包含智能仪器、计算设备、实境实验台等。这些模块的跨界协作和共同摸索,构建人工智能实验教育系统,结合线下实验,为在线实验教学有目的地提供实践引导和智能学习过程支持,在各类人工智能技术的支持下,构建认知模型、知识模型、情境模型,并在此基础上针对学习过程中的各类场景进行智能化支持,形成诸如智能学科工具、个性化在线帮助等支持工具。其中在线帮助分层次供学习者选择,如相关知识导读、相关实验引导、相关设计参考、设计方案实时评价、相关技能延伸等,并根据所选择的帮助层次制定影响考核成绩的评价因子。学习者在实验过程中出现问题、故障,难以继续实验后,人工智能从任务分析、问题引导、操作指导等不同层次供学习者选择故障在线帮助,引导学习者顺利完成学习和实验任务。

利用人工智能技术对学习者的学习状态进行诊断和反馈,从每个学习者实践过程的科学性、完成度、准确性、实效性(效率)等角度评价学生实验成效,分析学习者的行为、心理等活动。

通过对实验设计方案、过程操作、实验结果等数据的分析,对学习者的设计方案给出评价,分析潜在问题和设计特点,并对实验操作过程的合理性、有效性给予反馈。

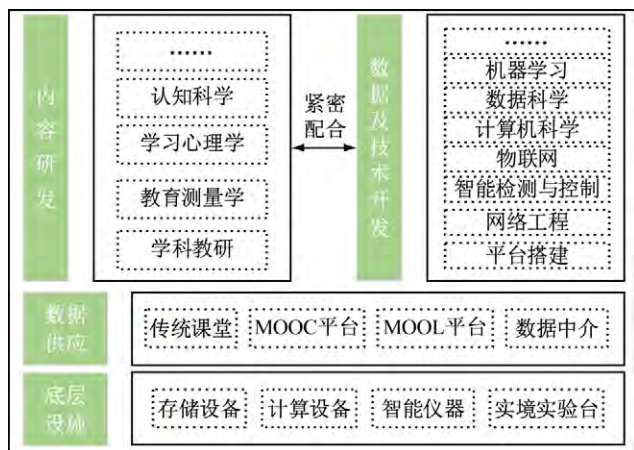


图4 基于人工智能的实验教学研究

根据每个实验的教学目标,对学生实验中各个环节的实验行为自动给予个性化的综合评价。并给出包括学生问题解决能力的智能评价、心理健康检测与预警、学生成长与学习路径发展规划等形成性报告。

分析实验群体在实验进程、任务完成等方面的数据状态,提供实验教学在任务与要求、教学与引导、考核与评价、环境与条件等方面教学设计的成效分析数据,为教学设计者提供完善改进参考数据。

人工智能技术的引入,实现一个24 h在线的AI导师,对学生操作中的问题进行解答,帮助教师改善教学内容。

### 3 系统实施方法

“东南在线实验”由东南大学国家级电工电子实验教学示范中心联合南京润众科技有限公司、南京凌速科技有限公司从2017年联合建设的线上实物实验平台。平台提供的实验项目都有对应的硬件资源实现,而非软件仿真。实验系统配置与线下综合性实验室相同,用户的所有操作均映射到可远程控制的实验对象和测量仪器,实验对象和测量仪器的配置机柜如图5所示。

#### 3.1 实施概况

建设“东南在线实验”平台的初衷是为学生提供一种时空完全开放,自主设计、自我管理的全新实践渠道。同时也为社会学习者提供终身学习实践的平台。新冠肺炎疫情期间,高校纷纷采用线上学习方式开展教学。为保障疫情期间高校实验教学“停课不停教、停课不停学”,“东南在线实验”平台为全国高校免费提供线上实物实验服务。

需要在线实验服务的高校,由责任教师指定实验课程,制定教学计划,提供学生信息(学号);实验平台教师要求为指定学生建立实验教学班,学生即可自主登录实验平台、预约实验时间,然后在预约时间进入平台进行实验。实验中,学生可以保存实验的完整状态,



图5 线上实物实验板卡和仪器配置机柜

包括电路结构状态、元器件参数、要求设备状态,再次进入实验平台,可以即时恢复所保存的状态。学生提交的实验报告可以由责任教师评阅、评价。

从2月24日第一个教学班级开始在线实验,截至6月7日,共有83所高校220位教师提交了开课信息,开设了631个实验教学班级,共有39 593名学生开通账号。累计实验271 122人次,提交实验报告41 800份。

“东南在线实验”平台无人值守,可24 h全天候开放运行,学生可在家庭、宿舍、教室、图书馆等任何有网络的场地进行实验,图6所示为在线实验平台分时段在线使用平均数据统计图,图中从9:00~22:00点是使用者的集中时间段,平均每小时使用人数均超过1 500人次,而在23:00~0:00时段,平均实用人数在1 000人次左右,即使在凌晨1:00~7:00时间段,也始终保持一定数量的活跃用户,因此,由数据可见东南在线能够满足使用者全天候的实验需求,为学生提供了自主设计、自我管理实践渠道,为当前疫情特殊时期学生的课程实践提供了有效途径。

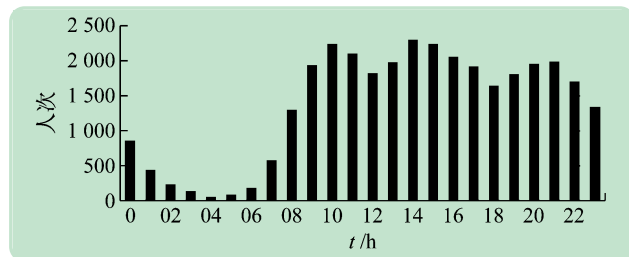


图6 线上实物实验24 h使用人次统计数据

#### 3.2 实验内容

“东南在线实验”现已上线《电路实验》《模拟电子电路实验》《数字逻辑电路实验》3门课程的30余项实验,每个实验都有可远程操控的仪器仪表及硬件电路,而非软件仿真。使用者通过浏览器访问在线实验平



台,用真实电子元器件、连接导线构建电路,设置仪器工作状态,测量参数观察波形,分析处理实验数据,撰写提交实验报告,完成设计性、综合性、探究性实验。

在线实验开创了多人远程合作实验、开放式在线观摩、实验过程记录保存、实验现场快速恢复再现、实验时间可碎片化、任意场合调用实验资源等前所未有的学习模式;有利于激发学习者自主研学兴趣与积极性,拓展了学生自主探索、研究性的时空。

以《模拟电子电路实验》中“单级放大电路”实验为例,如图7所示,实验电路利用硬件可重构技术,学习者在线设计三极管单级放大电路,根据设计要求选择不同的电阻电容器件,设计合乎需求的电路结构,服务器接收到相应的指令,采用可编程的模拟矩阵开关阵列、可编程电阻实现学习者设计的电路。学习者利用页面提供的信号源为电路提供激励信号,利用万用表和示波器测量电路中感兴趣的被测信号,这些仪器在后台都是利用物联网技术将实际的仪器挂在实际的实验电路中,因此,学习者得到的实验结果与仿真软件得到的结果不同,包含了实际电路噪声,反映实际电路器件的性能。

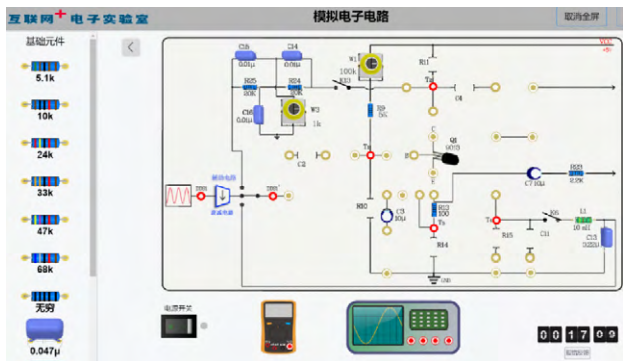


图7 单级放大电路实验操作界面示意图

“东南在线实验”根据已经开设的3门实验课程的30余项实验,收集学习者的学习大数据,如实验操作数据、实验过程数据、设计方案数据、故障数据、评测数据、学习心理数据等,为智能考核提供原始数据。

### 3.3 智能考核

大数据、云计算、机器学习等技术,能够智能分析学习大数据,构建认知模型、知识模型、情境模型,并在此基础上为考核评价提供支持。

知识图谱技术是人工智能技术的重要组成部分,其建立的具有语义处理能力与开放互联能力的知识库,在智能搜索、智能问答、个性化推荐等智能信息服务中广泛应用。

“东南在线实验”通过知识抽取技术,从实验涉及的理论知识、实践技能等知识点提取出实体、关系、属性等知识要素,通过知识融合,消除实体、关系、属性等指称项与事实对象之间的歧义,形成高质量的知识库。利

用知识融合和知识加工技术建立如图8的知识模型,将简单的线性化的知识关系转换成大规模的复杂的统一语义连接的高质量知识体系。根据实验教学的特点和教学规律,总结推理规则,采用基于逻辑的知识推理方法,进一步挖掘隐含的知识,从而丰富、扩展知识库。

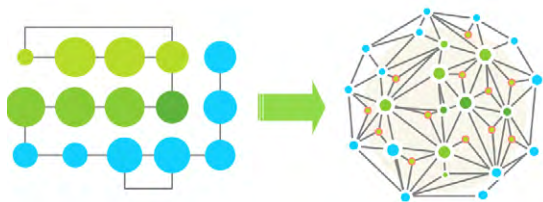


图8 知识图谱模型

“东南在线实验”利用建立的实验知识体系库,分析学习者的操作行为数据,查询理解操作意义,或者通过语义理解学习者解答含义,并分解为多个小的知识点,通过知识检索,然后逐一去知识库中抽取匹配的关系知识点,并自动检测其在时间与空间上的吻合度等,最后判断操作或者答案的正确性,并将错误操作或者解答以知识点的形式直观地展现给学习者,以供学习者复习。

## 4 结 语

融合可重构技术、大数据、混合云计算、物联网、人工智能等技术,线上实物实验平台可以提供贴近真实操作、获得真实实验现象和实境实验结果的在线实验体验;提供学生自主学习的环境,不受时间地点限制,充分利用碎片时间;可以保存学生实验操作,不断积累实验大数据,进一步的引入知识图谱等人工智能技术,提供智能考核方法。

截至2020年6月中旬,全国新型冠状病毒性肺炎疫情的防疫工作取得阶段性胜利,线上教学方法得到长远的发展,“东南在线实验”经历一个学期的考验,为83所高校631个实验教学班级、39593名学生提供在线实验学习的机会。由此可见线上实物实验方式在特殊条件下有着广阔的应用空间,通过在线教学方法的分析研究,结合目前在线课程教学的实施反馈情况,教学效果普遍受到教师和学生的认可。虽然在线课程教学也存在不足,如实验操作的体验感不足、对在线网络要求高、使用人数过多排队时间长、不够智能等问题,但在疫情特殊时期下能保障和提供给学生良好的教学效果,是值得长期应用和推广的。

### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国教育部. 关于开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设工作的通知. (教高司函[2013]94号) [Z]. 2013-08-13.
- [2] 中华人民共和国教育部. 教育部关于一流本科课程建设的实施意见(教高司函[2019]8号) [Z]. 2019-10-30.

- [3] 中华人民共和国教育部. 教育部应对新型冠状病毒感染肺炎疫情工作领导小组办公室关于在疫情防控期间做好普通高等学校在线教学组织与管理工作的指导意见(教高厅[2020]2号)[Z]. 2020-02-05.
- [4] 中华人民共和国教育部. 教育部应对新型冠状病毒感染肺炎疫情工作领导小组办公室关于疫情防控期间以信息化支持教育教学工作的通知(教技厅函[2020]7号)[Z]. 2020-02-06.
- [5] 中华人民共和国教育部. 教育部应对新型冠状病毒感染肺炎疫情工作领导小组办公室关于在疫情防控期间做好普通高等学校在线教学组织与管理工作的指导意见(教高厅[2020]2号)[Z]. 2020-02-04.
- [6] 杨永洁,王晶,严瑛,等. 新型冠状病毒肺炎疫情防控期间“停课不停学”线上教学状况的调查与分析[J]. 青岛大学学报(医学版), 2020, 56(5): 601-604.
- [7] 邵冰莓,刘展. “新冠肺炎”疫情环境下实验教学形式多样化的运用[J]. 力学与实践, 2020, 42(1): 80-84.
- [8] 杨全胜,翟玉庆,舒华忠,等. 贯通式与虚实结合的计算机系统实践平台建设[J]. 计算机教育, 2018(1): 19-24.
- [9] 曾永安. 基于多技术融合的在线教育平台设计[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(10): 142-145.
- [10] 徐志国,陈正宇,杨莉. 基于在线平台的电子信息专业课程混合式教学研究[J]. 集成电路应用, 2019, 36(12): 25-27.
- [11] Fujii N, Koike N H. A new remote laboratory for hardware experiment with shared resources and service management [C]//Proceedings of the Third International Conference on Information Technology and Applications. [s.l.]: IEEE, 2005(2): 153-158.
- [12] 常鸣,雷纯,蔡国军,等. 基于教实结合的泥石流实验教学改革模式探讨[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(5): 153-155.
- [13] 黎启龙,李小志,叶新东. 智慧实验教学中心特征、模型与建设路径[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(5): 260-263.
- [14] 周春月,闫子淇. 基于物联网技术的智慧实验室架构研究[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(5): 239-243.
- [15] 何宾. 可重构嵌入式系统设计与实现: 基于 Cypress PSoC4 BLE 智能互联平台[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [16] 武立华,刘志海,孟霍,等. 依托国家级示范中心的线上线下混合科普教育新模式[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(5): 140-142.
- [17] Ebner M, Schön S, Braun C, et al. COVID-19 epidemic as E-learning boost? Chronological development and effects at an Austrian university against the background of the concept of “E-learning readiness.” [J]. Future Internet, 2020, 12(6).
- [18] Chung H, Sarker S, Long S, et al. A comparative study of online and face-to-face embedded systems learning course [J]. ACM International Conference Proceeding Series, 2018(18): 63-72.
- [19] 王祖霖. 大数据时代学生评价变革研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [20] 中国人工智能自适应教育行业研究报告. 2018年(R). 艾瑞咨询系列研究报告[Z]. 2018(1).

(上接第138页)

## 4 结 语

本文利用 USRP 和 LabVIEW 构成的软件无线电平台设计实现了 802.11a OFDM 的发射机与接收机。介绍了 IEEE 802.11a 标准的物理层参数及帧结构以及发射机和接收机的具体实现过程,最终实现在无线信道环境下进行文本的传输。测试结果表明,该平台可以快速搭建通信系统原型并可在此基础上进行性能测试及算法验证,适用于通信学科的形象化实验教学及相关的科研工作。

## 参考文献(References):

- [1] 丁凌琦,穆道生,蒋太杰. OFDM 技术应用现状分析[J]. 软件, 2016, 37(10): 130-134.
- [2] 王磊,李广雪,李冬霞,等. 基于 OFDM 符号特征的干扰抑制与盲波束形成方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1397-1402.
- [3] 刘琴. 基于软件无线电的 OFDM 调制与解调技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [4] Peng S, Morton Y. A USRP2 based reconfigurable multi-constellation multi-frequency GNSS software receiver front end[J]. GPS Solutions, 2013, 17(1): 89-102.
- [5] 陈为刚,赵干,李思,等. 基于 USRP 的 DVB-T 接收机实现[J]. 电视技术, 2014, 38(9): 155-159.
- [6] 陈建华,陈树新,吴昊,等. 基于 USRP 的缩比 GNSS 干扰测向误差分析系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(10): 68-74.
- [7] 刘明珠,刘雨晴,乔季军,等. 基于 LabVIEW 的通信原理虚拟实验平台的设计[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(4): 123-126, 160.
- [8] 杨宇红,袁焱,田砾,等. 基于软件无线电平台的通信实验教学[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(4): 186-188.
- [9] Designing Hands-On wireless communications labs with the NI universal software radio peripheral and LabVIEW [EB/OL]. <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13848>.
- [10] Welch T B, Shearman S. Teaching software defined radio using the USRP and LabVIEW [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Kyoto, Japan: IEEE, 2012: 2789-2792.
- [11] Ozan W, Ghannam H, Haigh P A, et al. Experimental implementation of real-time non-orthogonal multi-carrier systems in a realistic fading channel [C]//IEEE Radio and Wireless Symposium. Anaheim, CA: IEEE, 2018: 121-124.
- [12] Soni G, Megh G. Experimental investigation of spectrum sensing for LTE frequency band based on USRP 2920/VST 5644 [C]//International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies. Kumaracoil, India: IEEE, 2016: 801-804.
- [13] Aziz A, Adithya A. Utilization of spectrum holes for image transmission using LabVIEW on NI USRP [C]//International Conference on Networking, Embedded and Wireless Systems. Bangalore, India: IEEE, 2018: 1-4.
- [14] 唐俏笑,赵利,蔡成林,等. 基于 USRP 的软件无线电算法验证平台的设计[J]. 桂林电子科技大学学报, 2018, 38(2): 97-101.
- [15] 尹长川,罗涛,乐光新. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [16] 史治国,洪少华,陈抗生. 基于 Xilinx FPGA 的 OFDM 通信系统基带设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009.