

基于计算机系统结构实验课程的仿真教学研究

李章平 黄玉芬

广东理工学院 广东 526100

摘要: 计算机系统结构是计算机科学与技术专业的核心课程之一,它涵盖了计算机硬件设计、性能优化以及系统架构的基本原理与方法。在教学中,这门课程需要学生不仅掌握理论知识,还要通过实践深入理解计算机系统的运行机制。然而,传统的实验教学主要依赖于硬件实验平台,这种方式存在设备成本高、维护复杂、实验环境受限等问题,难以满足教学的广泛需求。随着仿真技术的发展,将仿真工具引入计算机系统结构实验教学成为一种可行的解决方案。仿真技术能够通过软件模拟硬件系统运行环境,为学生提供灵活、经济且高效的实验平台。通过仿真教学,学生可以在虚拟环境中设计、调试和优化计算机系统架构,从而弥补硬件平台的不足,提高教学效果,为计算机系统结构课程提供创新的教学手段,提升学生的学习兴趣和综合能力,同时为高校计算机教育改革提供参考。

关键词: 实验教学; 虚拟仿真; 系统结构

引言

计算机系统结构课程是计算机科学与技术专业的重要核心课程之一,目的在于使同学们了解电脑的基本结构,工作原理,以及电脑功能的最佳化。该专业是一门理论与实践相结合的专业基础课,它的教学质量将影响到对计算机整体观念的认识,也影响着其在实践中的应用。但是,目前很多大学的“计算机体系构造”课程都遇到了很大的困难。在以往的实验课程中,主要依靠硬件的实验平台。此类系统一般包含物理计算机、微处理器开发板等硬件,但其硬件成本高,维护困难,资源有限,已不能适应不断增加的学生数量和教育需要。另外,由于传统的实验都是在特殊的实验室条件下完成的,因此,由于实验的空间、时间等因素,使得实验的灵活性受到很大的影响。在现有的教育模式下,很难完整地观测到计算机系统中的各种复杂动作。由于在硬件环境下很难直观地观测到其内在机理,因此很难对其内在机理进行研究。目前,在实践中,实验教学还停留在表层层面,没有深入探究其运作规律。由于现代信息技术的快速发展,使得其日益复杂,但由于其自身的特点,使得其在信息时代背景下的课程体系难以适应社会发展的需要。这样的差异制约着学生掌握和运用现代计算体系结构的能力,从而影响了培养适应新时期要求的高质量人才。针对以上问题,国内外各大院校纷纷开展了以模拟为基础的“计算机体系架构”实验的研究。利用计算机仿真的方法,可以实现对物理教学的实时、实时、实时的控制,为学生的学习创造一个良好的学习环境。比如 Gem5 和 SimpleScalar 等软件可以精确地对当今计算机的工作流程进行建模,使同学们可以利用这些工

具来设计、测试和优化计算机结构。利用该模拟平台,对实验教学进行了设计,为学生提供了探索更多复杂体系特性和创新试验的机会。在“计算机体系构造”的基础上,把“模拟”技术引进到“计算机体系构造”中,可以很好地克服以往“模拟”的弊端,增强其“弹性”与“有效性”。在此基础上,对模拟实验进行了深入的研究。

一、实验教学的现状

《计算机系统结构》是一门与《计算机组成原理》、《汇编语言程序设计》等重点专业课程相重叠的学科,有的高校还将《计算机系统结构》和《计算机组成原理》这两个专业并入到一个课程中来。《计算机系统结构》课程是一个综合型的课程,课程设置有 16 个学时,4 个学时,包含:(1)求和运算的流水计划及模拟;(2)在静止水流环境下,实现了乘和加的组运算的计划及模拟;(3)研究了一种新的基于相乘和相结合的动态流动计算方法,并对其进行了验证;(4)通过模拟实验验证了该方法的有效性,并比较了其性能。

从反馈情况看,大概有 1/2 的同学对使用 VC 软件进行模拟的想法并不十分清楚,这与我们的教学目标存在着偏差。另外,课程中所讲的知识仅限于对各种 cache 的排序和 cache 替代的具体效果的认识,并不能使同学们对构成流水线的各个组件的工作机制有一个全面的认识。因此,目前的实验教学内容只适用于课堂之外的编程,无法进行专门的计算机试验,无法达到教学目标。此外,武汉大学、浙江大学、国防科技大学等高校已建立了基于 FPGA 的 CPU 集成试验平台,南京大学已向武汉大学,浙江大学,国防科技大学等高校和高校合作,为本课题的研究工作奠定了坚

实的基础。由此可以看出,我校开设的这门课程的教学内容还不够完善,与其他同类高校也有较大差距。

二、计算机系统结构实验教学现状分析

(一) 计算机系统结构课程的特点

计算机系统结构课程是计算机科学与技术专业的核心课程之一在此基础上,提出了一种新型的基于网络的网络拓扑模型。本课程以了解计算机系统的构成及运作机制为目的,了解计算机软硬件的互动,并训练其分析与设计的能力。主要研究方向包括:(1)指令集体系结构(ISA);(2)处理器(包括流水线技术);(3)内存分层(Cache与内存优化);(4)输入/输出(输入输出);(4)多核与分布式系统。其主要特征是:一是理论与实践相结合;不仅要求学员能够熟练地学习到系统的结构与功能,而且还必须从系统的角度对系统进行深入的研究。这样的教学方法,对于提高大学生的实际操作技能和创造精神具有十分重要的意义。其次是学科教学的复杂性和多层次的特点;由于从低层次的硬件到高级的应用,各子系统之间的协同和最优,要求学习者具有较强的综合分析能力,从而更好地了解其工作机理。同时,本专业的教学内容也与当今的电脑科技紧密结合。近几年,多核处理器、加速器以及云计算等新兴科技的飞速发展,使得该领域的学科范围越来越广,涵盖了当今计算机系统架构方面的前沿研究。这就需要教育方法的与时俱进,保证学生掌握与生产实践密切相关的知识和技能。在人才的培养过程中,“计算机系统架构”具有承前启后的功能。本项目将为未来嵌入式系统、操作系统、高性能计算等相关学科的发展奠定坚实的理论和实验基础,使学生能够更好地应对日新月异的科技环境。

(二) 传统实验教学模式的内容与特点

传统的计算机系统结构实验教学模式主要以硬件实验为主,辅以少量的软件模拟实验,其目的是帮助学生深入理解计算机硬件系统的运行机制,并把所学的理论和方法运用到实践中去。该模型的试验内容如下:第一部分为指令集合体系的结构解析试验,通过编制汇编语言和借助硬件设备,对整个指令的运行进行观测,从而了解该系统的指令循环及其相应的工作机理。二是软件开发试验,利用 VHDL、Verilog 等硬件描述语言对芯片进行初步的设计与模拟,并对其进行模拟,以把握其数据路径与控制逻辑的具体实施方式;三是内存分层试验,通过构建内存分层模型(比如 cache 和内存的相互作用)或者对现有内存模型进行分析,掌握内存性能的最优控制方法。四是 I/O 试验,在硬件环境下对各器件的工作流程进行观测,了解器件之间的通信协定及中

断的处理方法。该部分的实验基本上涵盖了该专业的重点和难点。在传统的实验教学中,依靠的是实物的硬件环境。为了使实验的效果更好,可以让同学们对硬件的工作状况有一个直观的认识。但是,目前的教育系统中,由于设备昂贵、维护烦琐以及设备的限制,使得现有的教育资源很难适应大量的学生使用。另外,对实验条件要求较高,对实验的控制要求较高,由于实验时间及空间有限,影响了学生的灵活度。在我国,由于缺乏对其内在运作机理的深入分析,使得其在实践中的应用受到了极大的限制。在硬件试验过程中,学生一般都是严格地按说明书进行试验,试验结果往往只是对预先设定的试验结果进行检验,缺乏对复杂体系特性的探究。但传统的硬件环境不能直观地展示其内部的信息流程及具体的运作过程,因此,对于其内在机理的认识常常只限于浅层。在培养学生创新能力、综合能力等方面,常规的实验教学手段相对薄弱。由于传统的硬件平台一般都是具有一定的功能与结构,因此很难对其进行适应性调整来适应较强的试验要求。比如,一些具有挑战性的课题,比如多核处理器的设计和先进的缓存的优化,都很难用常规的试验方式来完成。目前,高校本科生的试验主要以验证性试验为主,缺少对新体系架构进行设计与研制的实际操作,影响了其创新与整体素质的发展。

三、基于计算机系统结构实验课程的仿真教学

(一) 虚拟仿真实验项目的设置

在国外各大高校的教学中,也出现了不少类似的仿真软件,如同济大学的张晨曦老师开发的模拟程序在全国都处于领先地位。经实践证明,此系统具有简单易用、原理清晰等特点,基本能达到我们的教学要求。从表 1 中可以看到,通过对实践工程的训练,可以让学生对计算机体系结构的基本概念,基本原理,基本结构有一个比较清晰的认识,同时也能熟练地把握各种评价算法和管线体系结构的基本实施方法。

(二) 虚拟仿真实验的优势分析

该课程的实验材料是张晨曦教授于 2015 年出版的《计算机系统结构实践教程》,经过一学期的实践与训练,体会到将虚拟仿真技术引入到课堂中来,可以有效地改善课堂教学效果。(1)促进了理论课的授课方式的转变,由原来的老师只是简单地讲解,变成了由老师与学生共同寻找问题,最后再进行求解,这样的探究式的学习模式,极大地减轻了理论课的教学负担,提高了学生的学习效果,提高了教育的质量。(2)完善了实验课的架构,既可以让同学们在课前模拟试验的过程,对实验的难点做出初步的判断,从而极大地增加了课堂实践的成功率,也可以把许多验证

表1 实验项目

实验项目名称	实验要求	实验类型	学时	实验目的
MIPS 指令系统和 MIPS 体系结构	必做	验证	2	(1) 掌握 MIPS 模拟器的操作和使用方法; (2) 熟悉 MIPS 指令系统及其特点, 加深对 MIPS 指令操作语义的理解; (3) 熟悉 MIPS 体系结构。
流水线及流水线中的冲突	必做	验证	2	(1) 加深对计算机流水线基本概念的理解; (2) 理解 MIPS 结构如何用 5 段流水线来实现, 理解各段的功能和基本操作; (3) 加深对数据冲突、结构冲突的理解, 理解这两类冲突对 CPU 性能的影响。
指令调度和延迟分支	必做	验证	2	(1) 加深对指令调度技术的理解; (2) 加深对延迟分支技术的理解; (3) 熟练掌握用指令调度技术解决流水线中的数据冲突的方法。
Cache 性能分析	必做	验证	2	(1) 加深对 Cache 的基本概念、基本组织结构以及基本工作原理的理解; (2) 掌握 Cache 容量、相联度、块大小对 Cache 性能的影响。
Tomasulo 算法	必做	验证	2	(1) 加深对指令级并行性及开发的理解; (2) 加深对 Tomasulo 算法的理解。
ROB 工作原理	必做	验证	2	(1) 加深对指令级并行性及开发的理解; (2) 加深对基于硬件前瞻执行的原理; (3) 掌握 ROB 在各阶段进行的操作。
多 Cache 一致性——监听协议	必做	验证	2	(1) 加深对多 Cache 一致性的理解; (2) 掌握解决多 Cache 一致性的监听协议的基本思想; (3) 掌握在各种情况下监听协议是如何工作的。
多 Cache 一致性——目录协议	必做	验证	2	(1) 加深对多 Cache 一致性的理解; (2) 掌握解决多 Cache 一致性的目录协议的基本思想; (3) 掌握在各种情况下目录协议是如何工作的。

性的试验课时进行整合, 形成完善的提升式和综合式实验的实施方式, 为扩展性试验搭建了良好的平台。

(3) 促进多领域的理论与知识的结合, 不断地优化学生的知识体系, 同时, 通过设置各种参数, 实施多种模拟, 反复实践, 深化对课程资源的理解, 促进课程资源的不断改进, 强化实践类、综合类课程的作用, 为推进精品课堂、翻转课堂、慕课建设等教育改革的深入开展打下坚实的基础。可以看出, 将虚拟模拟技术引入到“计算机体系构造”的实践中, 具有十分重要的作用。另外, 还能够强化整个计算机专业的知识结构, 使学生的问题解决能力和知识创新能力得以提高, 从而提高高校的教育水平。

四、基于仿真教学的优势与改进建议

(一) 仿真教学的优势

1. 灵活性与经济性

基于仿真技术的实验教学相比传统教学模式, 具有明显的柔性和经济上的优点。常规的实验课程通常

依靠价格高昂、维修烦琐的开发板、逻辑分析仪等硬件测试平台, 这既会导致教学费用的提高, 也会影响到学生的学习。利用虚拟仪器来模拟实际操作, 减少了对仪器设备的依赖性, 节省了仪器设备的造价。另外, 模拟器一般都可以在一般的微机上进行, 使学员可以在任何时间、任何地点进行试验, 从而为个体化、自学创造了有利的环境。另外, 模拟教学的试验环境可以很容易地在网络中进行设置与更改, 不存在任何的硬件损伤或失效问题, 提高了实验的安全性与实用性。该方法不仅效率高, 而且费用低廉, 特别适合在班级众多或学校中使用, 对优化教学资源、提高教学质量具有重要意义。

2. 提高学生对系统运行机制的理解

仿真技术能够直观地展现计算机系统内部的运行细节, 对了解复杂体系的运行机理具有重要意义。在常规的实验教学中, 学生对计算机硬件的操控主要局限于对外界的现象进行观测, 而不能对其内在的动力

学过程进行直观的了解,如指令的执行过程、数据在存储层级上的流向等。借助模拟软件,学员能够对整个过程中的各种功能进行实时监测,例如:命令流程的执行,寄存器状态的改变,以及缓冲命中的概率分布等,从而使学员对所学的理论 and 现实中的行为有一个更好的认识。比如,利用 Gem5 模拟软件,同学们就能够深刻地了解各种指令体系结构之间的差别,进而了解到各种设计方案对于整个系统的效能所产生的作用。通过直观的、可追溯的方式,使学生对整个系统架构有了更为深入的认识。

3. 支持复杂实验的开展

仿真教学支持开展复杂实验,特别是与当代计算机架构有关的尖端部分。然而,现有的研究方法很少考虑到现有的研究方法,如众核体系结构设计, GPU 加速技术的性能优化,异构计算平台的资源分配等。通过计算机仿真,使同学们能够自由设定试验的参数,对多种体系结构与使用情景进行仿真,实现对多种方案的探究与检验。同时,该软件还具有较强的测试能力及测试结果,便于同学们快速查找问题,并进行最优方案的选择。同时,模拟课程也为同学们的个性化设计、特定任务优化的体系结构设计等带来了更多的机会,为同学们创造一个更加贴近实际的研究环境。这样既可以提高同学们的实际操作技能,又可以让他们更好地从事专业研究或企业工作。模拟试验在灵活性、经济性、理解深度和对复杂性试验的支撑上显示了显著的优越性。该方法可以有效地解决现有的实验教学中存在的问题,使学生获得更加全面和优质的学习经验,从而提高了“计算机系统构造”的教学质量。

(二) 仿真教学中存在的问题

1. 学生技术门槛问题

仿真教学通常依赖专业化的仿真工具,由于其具有较强的性能,同时又具有较高的运算难度,因此对同学们提出了一些要求。但是,由于刚开始学这门课,他们还没有很好地掌握所要学的知识,加之缺少模拟软件的实际应用,从而影响了他们的学习效率。比如,在模拟工具的安装,环境的配置,代码的编译和结果的解析等方面,都存在着很大的问题,这既加重了学生的负担,也影响了他们的学习积极性。另外,有些同学对程序设计并没有掌握好,这就更加大了他们的难度。很多模拟软件都要求学生自己编写软件(例如 Verilog、VHDL 等),或者进行一些复杂的参数组态,而这类技巧通常并不是主要的学习目标,但是在模拟试验中又是必不可少的。这样的教学模式,往往会让学生过于注重工具的运用,而忽视了架构的原则。因此,

在模拟课堂中,如何有效地解决模拟课程对学员的技能要求,并寻求两者的均衡,是当前模拟课堂教学发展所要面对的一个重大问题。

2. 仿真工具的局限性

尽管仿真工具在实验教学中功能强大,但它们本身也存在一定的局限性,这会影响到课堂的教学效果。模拟软件倾向于用于科研或者产业使用,侧重于精度和功能性的覆盖,而不是易于教授。比如 Gem5 作为一种开放源码架构模拟工具,但是它存在着一个比较烦琐的界面,缺少一个可视化的指导,使得学员在实际应用中往往要耗费很多的精力来进行试验环境的建立与分析。另外,各种模拟方法研究的焦点也不尽相同,有的研究了处理器体系结构,有的研究了数据的分层和通信,使得单个的研究方法很难涵盖整个体系结构的全部知识。模拟器的执行速度会影响到试验的范围与深入。对于一个大型的多核或大型内存系统,进行复杂架构的仿真往往会耗费巨大的运算资源。尤其是当实验课的教学时长较短时,这样的“效能瓶颈”会影响到同学们的学习感受。另外,现有的仿真手段对仿真的准确性也有很大的局限性。比如,仿真器在仿真众核时,不能充分还原真实的物理模型,造成仿真的仿真与现实中的仿真数据有一定的差距,进而影响到人们对系统的认知。模拟器在对最新的科技的支援上常常会落后。比如,在人工智能、量子计算等领域,很多已有的模拟软件还没有充分发挥其支撑作用。因此,在进行模拟试验时,很难了解当前计算机架构研究的前沿动态,因而制约了其研究的广度和深度。

(三) 改进建议

1. 提高仿真工具的易用性

为了降低仿真技术的技术门槛,增强学生的学习体验,提高模拟器的使用效率是今后研究的一个重点。模拟器的接口应该是更直接、更适合新手的操作逻辑。比如,在实验环境中加入了一个图形用户接口(GUI),使同学们可以在虚拟环境中进行配置,运行模拟和显示实验的效果,降低了对指令行的依赖性。这种方法既减少了仪器的操作困难,又增加了实验的乐趣。在此基础上,通过对软件的设计和实现,可以对模拟过程进行更好的改进。比如,为适应目前较为复杂的试验组态流程,可以通过编写自动组态指令码或参量模版,使同学们可以更快地建立试验环境。另外,本项目还将发展一套预先定义好的试验方法,使学员能够在不需要从头构建试验体系的情况下,仅需要进行一些简单的参数调节或者重要的逻辑设计。这样做不仅

保持了模拟教学的弹性,而且极大地降低了系统的复杂度,给了学员一个更加友善的学习环境。师资及师资队伍能让学员获得更多的学习资料。比如,通过对模拟器的视频教学,编写详细的用户说明书,以及建立一个互动的教学平台,使学员逐步了解模拟器的使用方法及先进的功能。在课程实施中,还可以通过分组讨论、主题训练等方式,让学员快速学会重要技术,进而提升学员的实践积极性和有效性。表2所示为《计算机系统结构》实验课程教学的应对策略。

表2 《计算机系统结构》实验课程教学的应对策略

教学环节	内容组成	专业方向	支撑条件
课程实验	基础验证性实验	硬件	实验教学团队
实习实训	课内综合性实验	软件	硬件平台
课程设计	综合课程设计	多核	软件环境
毕业设计	自主科研 创新实验	计算机网络	交流平台

2. 多样化实验内容设计

为了充分发挥仿真教学的优势,应注重设计多样化的实验内容,目的是为了适应各水平的学生,调动他们的学习积极性。该项目将围绕指令集体系结构、存储体系结构、多核处理器等关键概念进行研究,并通过实例教学,让同学们了解到该领域的理论和应用。比如,通过对RISC与CISC两种体系结构进行仿真,使同学们能够更好地理解命令的基础,并且能够对各种情况下的执行情况进行比较。在教学过程中,通过分级教学,为各层次的学员设置不同的教学内容。比如,对于新手来说,可以完成一些基础的试验工作,比如一个循环的处理机的设计或者一个内存管理的组态;如果有较好的学习能力,还可以为他们提供更为复杂的作业,例如管道的最佳化,或是分散式的系统仿真。这样的教学模式既可以帮助学习成绩参差不齐的同学得到成功,又可以培养他们的创造力。同时,在课程设置上要注意与当前科技发展相联系,让同学们了解国内外的科技动态。研究内容包括:结合GPU加速技术、边缘计算体系结构、以及深度神经网络的硬件优化等,使学生能够更好地理解产业发展的需要。这样的实习经历,不但让学生获得了更多的实际操作技巧,而且也提升了他们在将来的工作中的竞争力。

3. 加强对大学生自学能力的训练

模拟教学给了学生更多的实验空间,所以要重视对其进行模拟教学,以提高其自学的水平,使其能够更好地适应今后日益复杂的学习和工作。在教学实践中,要引导学生独立地探究问题求解的途径。比如,针对“怎

样对cache的性能进行优化?”、“怎样提高众核处理器的执行效率?”通过查阅资料,调整实验参数,得出实验结论。这样既可以提高同学们的思维能力,又可以提高他们的思维和解决问题的能力。在此基础上,通过课题研究,使老师更深入地了解学生的自学能力。将“分组”模式应用于“模拟”课程,让同学们在基本的试验之后,自主地进行相应的系统或功能模块的开发。在课题研究中,同学要进行小组活动,阅读有关的资料,完成试验报告,这样既可以锻炼自己的自学能力,又可以锻炼自己的小组工作和论文的写作水平。老师要营造有利于学生自我学习的氛围。比如,构建网上教学社群或实验讨论等,使同学们可以自由地分享自己的实验经验,讨论自己的问题,并得到反馈。另外,加强实验报告的重要性,让他们把实验过程,问题解决方法,以及自己的体会都写在实验报告里,以此来强化自己的知识,培养自己的自主学习习惯。通过增强模拟工具的易用性、多样化的实验内容的设计和深入的训练,可以使模拟教学更好地达到自己的教学目的,既可以使学生的专业技能得到提高,又可以为他们今后的学业和事业发展打下良好的基础。

五、结语

基于仿真技术的教学模式能够有效提高学生的学习和实验效果,为计算机系统结构课程提供了一种经济、灵活且高效的教学方法。然而,部分学生在使用仿真工具时可能会遇到技术门槛,影响学习体验;同时,仿真工具的选择和配置仍需进一步优化,以更好地适应不同教学目标和课程内容。因此,未来的研究应进一步完善仿真教学平台,优化其易用性和功能性,并通过多样化的教学实践验证其推广价值。通过持续探索和改进,仿真技术将在计算机教育中发挥更加重要的作用,为培养具备创新能力和实践能力的高素质人才提供支持。

参考文献:

- [1] 游宇琳,高劲松,李先文,等.虚拟仿真实验在检验医学实验教学中的应用及其意义[J].内江科技,2024,45(9):151-153.
- [2] 张文科,崔萍,周守军,等.虚拟仿真实验助力高校能源与动力工程专业人才培养的探索[J].大学教育,2024(15):126-130.
- [3] 高翔.“双基”教学资源创作平台[D].喀什大学,2024.
- [4] 徐一梦,周璇,蒋玲玲.基于科教融合理念下的虚拟仿真对有机化学实验教学的改革与探索[J].广东化工,2024,51(7):190-193.

- [5] 马中静, 邓斌, 郭胜杰, 等. 四旋翼无人机新工科人才培养的教学探索 [J]. 电气电子教学学报, 2024, 46(2):199-204.
- [6] 郝小燕, 杨春合, 李碧波, 等. 虚拟仿真技术背景下的羊生产学实践教学教学改革探索 [J]. 畜禽业, 2024, 35(3):48-51.
- [7] 亢立明. 高校网络安全课程实验教学平台的设计与研究 [J]. 网络空间安全, 2023, 14(5):94-98+110.
- [8] 赵海波, 刘焕卫, 高兴奎, 等. 虚拟仿真实验课程综合评价 [J]. 中国教育技术装备, 2023, (19):50-53+69.
- [9] 张继川, 吴晓辉, 张同飞, 等. 橡胶工程高等实验课虚拟仿真教学势在必行 [J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(6):154-159.
- [10] 唐峰, 唐雨顺, 刘永华, 等. 虚拟仿真实验在炭疽实验室诊断及皮毛检疫实验中的应用 [J]. 中国免疫学杂志, 2023, 39(7):1516-1518.
- [11] 邓云霞, 王露, 杨雪霞, 等. 肽聚糖的生物合成虚拟仿真实验设计及实践 [J]. 纺织服装教育, 2023, 38(3):86-90.
- [12] 朱新开, 朱敏, 刘涛, 等. 融合虚拟仿真实验技术的作物栽培学教学新模式探讨 [J]. 创新创业理论研究与实践, 2023, 6(11):143-148.
- [13] 贺彦博. 基于 C/S 架构的 SAR 成像仿真教学系统的设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [14] 丰蓉. 生物学虚拟实验培养高中生批判性思维倾向研究 [D]. 合肥: 合肥师范学院, 2023.
- [15] 伍健坤. 虚拟仿真软件在攻克高中物理难点教学中的应用研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2023.
- [16] 黄琪珍. 虚拟仿真实验在高中生物学实验教学中的应用研究 [D]. 南宁: 南宁师范大学, 2023.
- [17] 徐悦悦. 中职《前厅服务与管理》ASSURE 虚拟仿真实训教学设计研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2023.
- [18] 刘传宁. NOBOOK 虚拟仿真软件在高中物理实验教学中的应用研究 [D]. 黄冈: 黄冈师范学院, 2023.
- [19] 于杨, 钟茂昌, 郝珂雨. 高校虚拟仿真课程设计与开发模型初探 [J]. 吉林师范大学学报(人文社会科学版), 2023, 51(3):84-91.
- [20] 孙晓叶, 李攀, 薛韡. 工程教育认证背景下计算机组成原理课程改革研究 [J]. 教育信息化论坛, 2023(5): 60-62.