

教学研究

电子显微镜虚拟仿真实验的建设与应用

阎臻 杨军 彭锐 李成华 易培珊 林宏辉 张大伟 刘唤唤*

(四川大学生命科学学院, 生物科学国家级实验教学示范中心, 成都 610064)

摘要 电子显微镜是利用电磁透镜聚焦成像的一种具有超高分辨率的大型电子光学仪器。但由于电子显微镜的结构精密、价格昂贵、运行和维修的成本较高等特点,使其在本科实验教学中与实践培训中开展困难且存在着实验资源欠缺、教学成本高、仪器内部构造不易观察、实验时间过长等问题。为了解决这一难题,依据电子显微镜的成像原理,借鉴和参考最新的科研成果和技术应用案例,设计了教学目标并构建了知识体系,采用新一代信息技术建设了电子显微镜虚拟仿真实验项目。该实验包括电子显微镜超薄切片技术、负染色技术和线上答题等模块,可以实现实验内容的在线操作、自主学习、在线考核并对学生学习效果的全程追踪和综合性评价等功能。虚实结合的教学实践表明,该项目有效拓展了学生的学习空间与知识体系,丰富了实验教学与实践培训的内容和手段,形成了以学生为中心的自主学习教学资源,显著提高了实验教学效果,有利于基础学科创新拔尖人才的培养。

关键词 电子显微镜; 虚拟仿真; 实验教学; 超薄切片技术; 负染色技术

Construction and Application of Electron Microscope Virtual Simulation Experiment

YAN Zhen, YANG Jun, PENG Rui, LI Chenghua, YI Peishan, LIN Honghui, ZHANG Dawei, LIU Huanhuan*

(National Demonstration Center for Experimental Biology Education, College of Life Sciences,
Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract Electron microscope is a large optical instrument with ultra-high resolution using electromagnetic lens for imaging. However, it is difficult to carry out in the teaching of understanding experimental courses as well as practical training, due to a number of factors, such as its precise structure, high cost of operation and maintenance, lack of experimental resources, high teaching cost, its internal structure is not easy to observe, the long experimental time, et al. In order to solve these problems, the virtual simulation experiment project of electron microscope ultra-thin section technology and negative staining technology was developed based on its imaging principle. This project also incorporates the latest scientific researches and technical application cases as well as the new generation information technology in the process of designing teaching objectives, constructing corresponding knowledge system, establishing comprehensive evaluation system to track learning effect of stu-

收稿日期: 2022-08-11 接受日期: 2022-09-07

国家自然科学基金(批准号: 32200217)、教育部产学合作协同育人项目(批准号: 202101099027)和四川省2021–2023年高等教育人才培养质量和教学改革项目(批准号: JG2021-116、JG2021-31)资助的课题

*通讯作者。Tel: 028-85990207, E-mail: liuhuanhuan85@163.com

Received: August 11, 2022 Accepted: September 7, 2022

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.32200217), University-Industry Cooperation Collaborative Education Program of Ministry of Education of People's Republic of China (Grant No.202101099027), and 2021–2023 Sichuan Higher Education Talent Training Quality and Teaching Reform Project (Grant No.JG2021-116, JG2021-31)

*Corresponding author. Tel: +86-28-85990207, E-mail: liuhuanhuan85@163.com

dents throughout the whole process. Teaching practice of the combination of virtual and real teaching effectively expands students' learning space and knowledge system, enriches the content and means of experimental teaching and practical training, forms student-centered independent learning teaching resources, significantly improves the experimental teaching effect. This project is obviously conducive to the cultivation of innovative and outstanding talents in basic disciplines.

Keywords electron microscope; virtual simulation; experimental teaching; ultra-thin section technology; negative staining technology

电子显微镜是以波长很短的电子束为照明源,利用电磁透镜聚焦成像的一种具有高分辨率的电子光学仪器。相比于传统的光学显微术,电子显微术凭借着其纳米级别的分辨率和上百万倍的放大倍数成为了目前应用最广泛的电子显微表征手段和测试方法^[1],它被广泛应用于生命科学^[2]、地球科学^[3]、材料科学^[4]、物理^[5]和化学^[6]等相关领域的科学研究与生产实践中。与电子显微镜相关的实验项目的操作过程与实际的分析工作更接近,培训该过程有利于培养学生的动手操作能力和综合分析能力,因此很有必要在本科阶段开展电子显微镜相关的实验项目。但是由于电子显微镜的结构精密、价格昂贵、实验周期长等因素,在本科实验教学和实训培训中存在着实验资源紧张、仪器内部构造不易观察、教学成本高等问题,无法开设针对本科生的实体实验,严重影响了实验教学的效果^[7]。目前国内尚无高校开展电子显微镜相关的本科实验教学,而生命科学的发展依赖于高校创新拔尖人才的产出,本科教学阶段对于大型仪器分析实验的缺乏和实验实践教学资源的匮乏难以满足现阶段人才培养的需要^[8]。

培养新时代的生命科学拔尖创新人才,需要突破传统专业实验课程的设计思路,充分利用基于电子信息技术发展的虚拟仿真技术^[9],并将其与实验实践教学有机结合建立多场景、多层次、多类型的综合性和整体性的实验教学平台,统筹建设虚实结合的实验教学项目。本文以四川大学生命科学学院“电子显微镜超薄切片技术和负染色技术虚拟仿真实验”为例,聚焦生命科学领域大型精密仪器实验教学的现状,结合学科前沿动态,实现电子显微镜操作过程中实验前准备、超薄切片和负染色等过程中多场景、高精度模拟与实时交互式操作。这种虚实结合的完整实验体系,能够帮助夯实学生的专业基础,且有助于学生实践创新能力的培养。

1 电子显微镜等大型精密仪器实验教学现状

在大型精密仪器的实验教学中涉及了多种价格昂贵、运行成本高的仪器设备,例如透射电子显微镜和扫描电子显微镜等,这类仪器由于价格昂贵、使用和维护成本较高,学校的采购数量较少,无法在本科教学中进行大规模的应用和推广。如果面对本科生开放使用,学生不规范的操作可能会对仪器的稳定性、精密度和灵敏度产生不可逆的影响,降低仪器的使用寿命,甚至会造成仪器损坏等不良后果^[10]。以上因素导致大多数高校本科实验中关于大型精密仪器实验项目乃至实验课程的缺失,即使开设了课程,也以教师的演示和学生的参观等形式为主,学生无法真正动手操作、参与度不高,难以达到实验教学和实践训练的目的,不利于学生动手操作能力和综合能力的提升。

另外,透射电子显微镜和扫描电子显微镜等大型精密仪器的自动化程度较高且构造复杂,一般都是封闭式的,不利于学生对电子显微镜工作原理和内部构造的学习和实验操作的掌握。而且目前关于电子显微镜的实验准备和实验操作等过程时间较长,以电子显微镜超薄切片技术为例,整个实验过程需要3~4天,因受仪器设备和制样时间的限制,这对于本科实验教学来讲可操作性极低。为解决实验实践教学资源紧张以及教学手段缺乏的问题,本文根据电子显微镜的实验操作原理,运用虚拟现实和仿真技术,开发了电子显微镜超薄切片技术和负染色技术虚拟仿真实验项目,增加了本科实验教学和实训训练教学内容的广度和深度,提升了实验教学和实践训练的质量和水平。

2 电子显微镜教学目标与知识体系

在学习电子显微镜实验项目之前,学生已经在植物生物学实验、动物生物学实验、组织学和胚胎学实验课程中学习并掌握了普通光学显微镜的成像

原理、切片制备流程和操作方法。基于以上前期准备课程和知识体系的基础, 结合电子显微镜相关课程的教学目的与教学内容, 本团队梳理并设计了电子显微镜超薄切片技术和负染色技术虚拟仿真实验的教学目标与知识体系(图1)。

2.1 教学目标

(1) 了解电子显微镜的基本结构和成像原理。利用虚拟仿真技术模拟电子显微镜内部结构和构造的真实场景, 引导学生建立电子显微镜的基本结构和成像原理的认知。

(2) 学习电子显微镜的使用方法和维护方法。结合最新的科研成果与应用案例, 帮助学生学习电子显微镜的常规使用方法和日常管理维护方法。

(3) 学习并掌握电子显微镜超薄切片技术。掌握透射电镜超薄切片制备过程中的实验准备、取材、双重固定、脱水、包埋和切片等实验过程中的具体步骤和方法。

(4) 学习并掌握电子显微镜正染色技术和负染色技术。掌握透射电镜样品制备过程中正染色技术和负染色技术中的不同染色液的配制方法, 学习电子显微镜中Formvar膜铜网制备过程中的关键步骤。

(5) 学习并加强在细胞生物学实验课程中涉及大型精密仪器的实验操作训练, 锻炼学生的综合素质能力。通过完整的虚拟仿真实验, 利用实时交互功能锻炼学生的动手操作能力, 同时培养学生运用电子显微镜进行样品制备、切片与观察的实践能力,

为后续的科研训练打下坚实的基础。

2.2 知识体系

(1) 电子显微镜的基本结构和成像原理模块。包括电子显微镜的基本构造、透射电子显微镜、扫描电子显微镜工作原理和电子显微镜的日常维护方法四个知识点。使学习者了解电子显微镜的内部构造, 了解不同显微镜的成像原理, 学习电子显微镜的使用方法和维护方法。

(2) 知识拓展模块。包括电子显微镜的发现历史、冷冻电镜的成像原理和样品制备过程三个知识点。使学习者了解电子显微镜的发现历史以及其在生命科学领域中的应用, 同时结合最新的研究进展, 使学习者了解冷冻电镜的相关知识。

(3) 实验前准备模块。包括锇酸固定液的配制、Spurr包埋剂的配制和电子显微镜Formvar膜铜网的制备三个知识点。使学习者学习并掌握电子显微镜样品制备过程中关键试剂的准备工作, 由于常规实验中的准备工作是由老师完成的, 该模块的学习能够帮助学习者进一步掌握制备电子显微镜样品前准备工作的关键步骤。

(4) 虚拟仿真实验模块。包括超薄切片样品的制备、样品的正染色实验和负染色实验三个知识点。使学习者掌握超薄切片实验中取材、双重固定、脱水、包埋、切片和染色等步骤中的实验流程、注意事项及实验参数等, 最终是学习者在实验交互过程中深刻理解电子显微镜样品制备中的流程及原理。

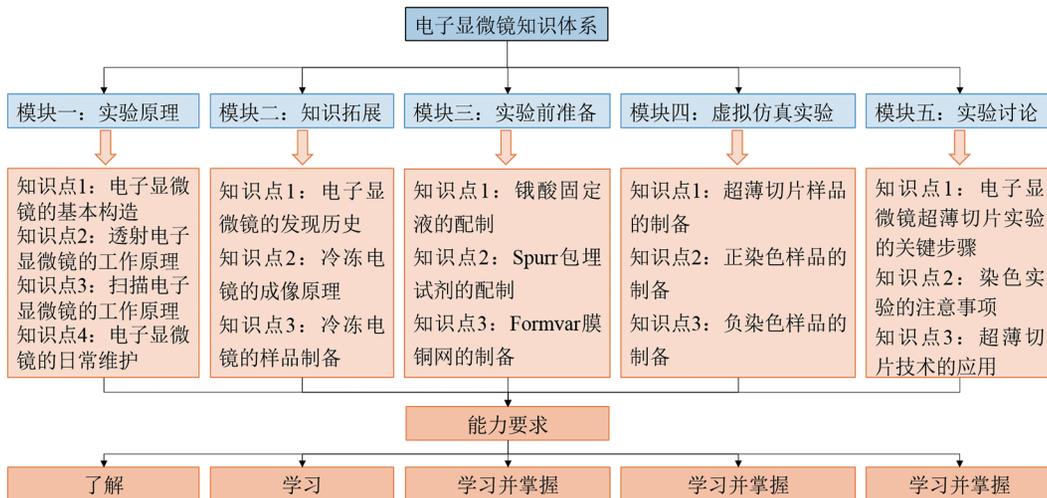


图1 电子显微镜超薄切片与负染色技术虚拟仿真实验项目知识体系

Fig.1 Knowledge system of virtual simulation experiment project of electron microscope ultra-thin section and negative staining technology

(5) 实验讨论模块。包括考核学生对于电子显微镜超薄切片的制备过程、染色实验的注意事项和超薄切片技术的应用三个知识点。使学习者掌握电子显微镜超薄切片制备的实验过程和应用等, 最终使学习者在实验交互过程中认识到严格按照实验顺序进行超薄切片制备的重要性和必要性。

3 虚拟仿真实验项目的设计与开发

基于电子显微镜超薄切片技术与负染色技术虚拟仿真实验项目的教学目的与知识体系, 本项目设计了软件的系统架构。同时运用系统仿真、虚拟现实和动画技术等开发配套软件, 采用面向服务对象的软件架构开发, 集真实场景仿真、实物仿真、创新设计和教学管理于一体。通过数据层、支撑层、通用服务层、仿真层和应用层的无缝衔接, 实现实验项目的高度开放和适应, 最终达到实验教学过程中的实时交互性、自主性、灵活性和可扩展性^[1]。

结合以上设计理念和系统架构, 按照B/S架构路线, 综合运用XLua等开发技术与Unity等开发工具进行软件的开发与测试^[2]。为了构建系统稳定、高度仿真和多种感官刺激的虚拟实验场景, 设计的软件适用于IIS、Apache和Tomcat服务器, 软件中贴图分辨率为512×512, 单场景中的模型总面数不少于1 000面, 画面每秒传输帧数稳定于60 fps(2.1 ms), 显示分辨率为1 920×1 080。

4 实验过程

电子显微镜超薄切片技术与负染色技术虚拟仿真实训软件使用文字图片、3D动画、三维场景、交互操作与场景漫游等多种形式展现16个知识点, 组成实验原理、知识拓展、实验前准备、虚拟仿真实验和实验讨论5个模块, 可供学习者进行理论学习、实验操作、实验讨论和学习考核。

4.1 实验简介

学习者登录软件后, 点击进入实验简介部分, 可依次学习实验目的、实验仪器与药品(包括实验材料、实验设备和实验药品与试剂)、实验原理(包括电子显微镜的成像原理与内部构造和电子显微镜的日常使用和维护方法)、知识拓展(包括电子显微镜的发现历史、电子显微镜的发展历程和冷冻电子显微镜)和实验文献库等内容(图2A)。在实验仪器部分, 可通过鼠标放大缩小或者是旋转电子显微镜

的模型, 进行仪器结构和细节的学习(图2B)。

4.2 虚拟仿真实验

4.2.1 实验前准备 学习者进入虚拟仿真实验部分后, 点击实验前准备按钮进入模块, 该模块主要内容包括锇酸固定液的配制、Spurr包埋剂的配制、柠檬酸铅染液的配制和Formvar膜铜网的制作等(图3)。从该模块开始, 学习者进入虚拟的实验室进行漫游学习, 同时可以根据自己的学习习惯自由选择学习任务, 进入实验。由于传统实验中的准备工作大部分都是由实验教师完成的, 学生接触的较少, 该模块的学习能够帮助学习者掌握实验前的准备工作, 加强对整个实验过程的了解与学习。

4.2.2 超薄切片实验 在实验准备学习模块完成后, 学习者点击超薄切片实验按钮进入实践实验模块, 依次学习取材、双重固定、脱水、包埋、切片、染色和透射电镜下观察切片等7个实验环节(图4)。

4.2.3 负染色切片实验 学习者进入负染色切片实验部分后, 依次学习透射电镜样品制备过程中Formvar膜铜网的制作、负染色液的配制和负染色实验组样品的观察等内容(图5)。由于Formvar膜铜网的制作已经在实验准备部分进行了学习, 此处以视频解说的形式帮助学习者复习之前的学习内容。

4.3 实验讨论

学习者在完成实验简介和虚拟仿真实验学习后, 点击进入实验讨论部分考核学习者对于电子显微镜超薄切片的制备过程、染色实验的注意事项和超薄切片技术的应用三个知识点的掌握程度。

4.4 实验报告

学习者在完成实验项目的所有内容后, 可点击实验报告按钮进行评分面板和实验报告的下载(图6)。评分面板部分主要用于展示软件对选择题评分的细则, 使学习者通过该模块直观了解其对相关知识点的掌握情况, 期望能够做到及时查漏补缺。

4.5 实验学习评价

该虚拟仿真实验依托于四川大学生物科学与技术虚拟仿真实验教学中心管理平台(以下简称“平台”)结合交互式知识点对学习者在实验过程中的理论知识掌握情况和实验操作进行综合评价, 当学生完成线上实验后, 还需要提交包括实验讨论在内的线下实验报告, 教师对实验报告的完成情况进行评价, 如实验完成度是否合格、实验结果是否可信、



A: 实验简介部分不同功能模块的展示; B: 实验仪器展示部分电子显微镜模型的学习画面。
A: display of different functional modules in the experimental introduction section; B: the interface of electron microscope model in the experimental instrument display section.

图2 软件中实验简介部分的学习画面
Fig.2 Interface of the experiment induction in the software



图3 虚拟仿真实验部分实验前准备阶段
Fig.3 Interface of virtual simulation experiment part of the pre-experimental preparation stage



图4 超薄切片实验界面
Fig.4 Interface of the ultra-thin slice experiment



图5 负染色切片实验界面

Fig.5 Interface of the negative staining section experiment



A: 实验报告模块的整体界面; B: 选择题细则评分面板的展示和下载界面。

A: the overall interface of the experiment report module; B: the display and download interface of the multiple-choice rules scoring panel.

图6 实验报告模块的软件界面

Fig.6 Interface of the experiment report module

实验讨论是否合理、报告格式是否规范等。最终,教师结合线上报告和线下报告同时加权实验操作过程和实验数据处理等方面完成对学生的整体评价。

5 实验项目的应用和反思

5.1 实验项目的应用

本实验项目已纳入四川大学细胞生物学实验课程的教学大纲和教学日历中,项目设置4学时,为每年春季学期的必开项目。项目自2022年4月开放

以来,已经在2020级生物科学专业和2021级基础医学专业学生中应用,累计服务在校生300余人,实验用户总访问量达1 000人次。针对该项目在学习过程中的反馈意见和建设的调查结果显示,有81.67%的学生认为电子显微镜虚拟仿真实验的仿真度较高,能够有效帮助学习相关的实验原理和知识内容,说明虚拟仿真实验教学在学生中的认可度较高。目前该项目已经完成与在四川大学生物科学与技术虚拟仿真实验中心教学管理平台的对接与信息整合,课程团队已将本实验项目从生物科学专业和基础医

学专业推广至生物技术、生态学、临床医学等专业学生的培养方案中, 此项目成为这些学生实验课程的必修项目。另外, 项目后期还将依托平台与签署共享协议的武汉大学、厦门大学和山东大学等十余所高校中进行推广, 为这些学校的师生提供开放使用。

同时, 本实验项目还可为校外电子显微镜技术人员、研究生和科研人员提供在线学习和远程答疑等服务。目前已与众睿启智(南京)数字技术有限公司签订共享协议, 作为其内部员工学习和培训的数字资源, 并将与更多单位合作, 达成共享合作意向, 进一步扩大教学资源在社会的共享辐射面。

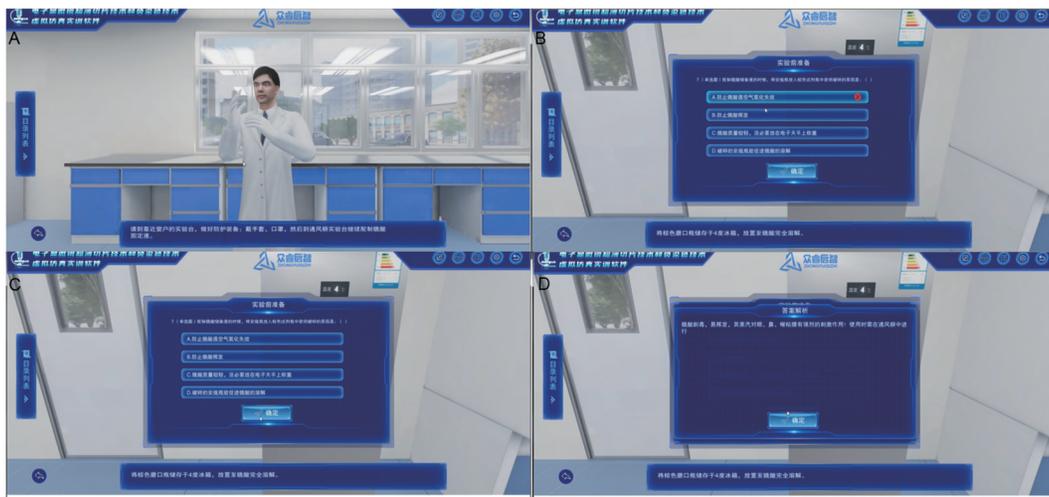
5.2 实验项目的创新

5.2.1 教学方法和手段的创新 本实验项目基于“能实不虚、虚实结合”的教学原则^[13], 根据教学目的发挥信息技术的优势, 将真实场景虚拟化、情景代入、人机实时交互融入实验教学当中, 克服了传统教学方式中程序化的枯燥讲解过程, 拓展出了新的实验教学项目, 有效激发了学生的学习兴趣并提高了学生自主学习的能力。在实验过程中, 学习者根据系统提示进行实验操作(图7A), 执行提示外的操作将无法进行后续的实验, 保证了学习者的实验操作和流程的正确性。在实验操作中的关键操作步骤设置问答题(图7B), 学习者选择后系统都会给出相应题目的判断(图7C)和答案解析(图7D), 加深学

习者对于该步骤的理解和记忆。该项目的开发打破了传统实验教学中实验时长、实验空间和实验安全等因素的限制, 借助信息技术, 学生可以在电脑、平板和手机上进行随时随地的学习, 大大拓展了实验教学的深度和广度。

5.2.2 实验评价体系的创新 在传统实验教学中, 往往以学习者的实验报告为实验评价体系的核心成分^[14], 但在本实验项目中, 实验评价体系包括学习者的“线上”实验报告、“线下”实验讨论和学习者对实验软件的评价三个部分。系统根据学习者的在线学习记录, 对其实验操作和原理掌握进行自动评价, 并在实验结束后生成“线上”部分的实验报告, 给出成绩A(占比40%); 指导教师则根据学生在“线下”实验讨论中对实验操作和关键问题的理解程度, 给出评价和成绩B(占比40%); 同时为了在教学过程中对软件进行进一步的优化, 鼓励学生反馈软件使用过程中的问题, 教师根据学生的反馈和评价给出成绩C(占比20%); 最终教师将三个成绩进行加权, 生成学习者的最终成绩。该评价体系将虚拟仿真实验项目的考核与传统实验项目的考核有机结合, 创建了多元化、合理性的实验评价体系, 实现了虚拟仿真实验教学中“以虚补实、以虚促实、虚实结合”的目的, 值得在后续的实验教学改革中应用和推广。

5.2.3 对传统实验教学的延伸和拓展 一直以来, 四川大学生命科学学院生物科学实验教学示范中心



A: 系统提示学习者进行正确操作; B: 实验操作前的提问界面; C: 系统判断问题界面; D: 问题回答后的系统解析界面。
 A: tips of the system for the learner to perform the correct operation; B: the question interface before the experimental operation; C: interface of the system determination of the question; D: the system interface after the question is answered.

图7 实验操作界面及考核系统

Fig.7 Experimental operation interface and assessment system

和四川大学生物科学与技术虚拟仿真实验教学中心(以下简称“双中心”)始终坚持并鼓励“以人才培养为导向”的实验教学改革,不断完善实验课程体系和实验内容,教学手段与时俱进,借助多媒体技术和虚拟仿真技术,建立了“虚实结合”的实验教学体系来延伸和扩展传统实验教学。本实验项目运用了学生自主学习、教师导学的教学模式,有助于提高学生的综合素质;将实验教学与电子显微镜的应用有机结合,进一步推动了细胞生物学实验教学的发展和相关的学科建设,为生物科学、生物技术和基础医学等专业的学生提供了现代化的教学手段和模式。依托基于信息化技术的智能化教学管理平台,本项目不仅能够为在读本科生提供一个智能、开放、共享的学习平台,而且能够面向校外人员开放,为显微镜相关的专业技术人员和科研工作者提供专业指导,是一项集实验教学、人才培养和社会服务于一体的综合性实验实践教学项目。

5.3 虚拟仿真实验的局限性

借助于信息技术,虚拟实验的场景和操作具有极强的仿真性,但是并不完全等同于真实的实验,理想化的虚拟实验也不能够完全替代真实的实验。学习者在进行真实实验操作的时候,虽然可能会遇到多种问题和异常情况,但是对这些问题的解决和对异常情况的分析能够锻炼学生发现问题、分析问题和解决问题的能力。理想化的虚拟实验项目,不利于培养学生分析问题和解决问题等方面的能力。此外,在传统实体实验教学中,实验项目的完成通常是由学生之间的相互合作来实现的,这种教学方法潜移默化地培养了学生之间沟通、交流特别是协作的能力,但是虚拟实验往往由学生独立完成,不利于培养学生的团队协作能力。因此,只有将虚拟实验与实体实验有机结合,综合运用虚拟仿真实验和实体实验的优势,才能够更好地建设虚实结合的实验体系,有效提升实验教学的质量和效果。

6 结语

为解决细胞生物学实验中关于电子显微镜的实验教学与实践培训受实验课时、实验空间和实验安全的限制以及教学手段和资源的缺乏等问题,课程团队建设了电子显微镜超薄切片技术和复染色技术虚拟仿真实验项目,将该实验项目应用到教学实践后取得了良好的教学效果。同时该实验项目在教

学方法和模式上还表现出以下三个特点。

(1) 按照“理论与实践的深度融合、应用与发展有机结合”的教学理念,借助电子信息技术将电子显微镜相关实验中的场景和操作虚拟化,补充了实体实验中无法开展的教学内容,通过人机实时交互实现学习者对与理论知识的理解、应用与实验技能的培养,打造了场景化、体验式与融入式相结合以及实时交互式的实验教学新模式。

(2) 形成了以学习者为中心、以满足人才培养的需求为导向,采用以信息化教学手段为基础的虚实结合的实验教学模式,运用了细胞生物学虚拟仿真实验中模块化、层次化和体系化的教学资源,整体提升了学习者的综合素质,特别是专业实践能力、创新能力和信息化应用能力,有助于培养具备专业知识和实践与创新能力的复合型人才。

(3) 借助于电子信息技术构建的逼真、沉浸式的三维实验空间,有效地扩展了学习者认知记忆的范围,突破了传统实验教学中时间和空间的限制。该虚拟仿真实验有助于加深学习者对于电子显微镜实验的认识和理解,能够增强学习者对已有知识体系的实践和应用能力,对提高学习者的创新性和发散性思维具有积极作用。

参考文献 (References)

- [1] 贾志宏,丁立鹏,陈厚文. 高分辨率扫描透射电子显微镜原理及其应用[J]. 物理(JIA Z H, DING L P, CHEN H W. The principle and applications of high-resolution scanning electron microscopy [J]. Physics), 2015, 44(7): 446-52.
- [2] 李叶, 黄华平, 张新春, 等. 浅析透射电子显微镜在生物学科中的应用[J]. 热带农业科学(LI Y, HUANG H P, ZHANG X C, et al. Current application of transmission electron microscope in biology [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture), 2019, 39(12): 58-67.
- [3] 唐旭, 李金华. 透射电子显微镜技术新进展及其在地球和行星科学研究中的应用[J]. 地球科学(TANG X, LI J H. Transmission electron microscopy: new advances and applications for earth and planetary sciences [J]. Earth Science), 2021, 46(4): 1374-415.
- [4] 王绍娟, 辛瑞, 扈健, 等. 透射电子显微镜在聚合物不同层级结构研究中的应用[J]. 高分子学报(WANG S J, XIN R, HU J, et al. Applications of transmission electron microscopy in study of multiscale structures of polymers [J]. Acta Polymerica Sinica), 2022, 3: 289-306.
- [5] 凌旸, 章冠群, 马延航. 基于透射电子显微镜的沸石分子筛结构研究进展[J]. 高等学校化学学报(LING Y, ZHANG G Q, MA Y H. Progress of zeolite structural analysis based on transmission electron microscopy [J]. Chemical Journal of Chinese Universi-

- ties), 2021, 1: 201-16.
- [6] 刘乐, 王文可, 卓静, 等. 扫描电子显微镜叔丁醇冷冻干燥快速制样方法的探索[J]. 电子显微镜学报(LIU L, WANG W K, ZHUO J, et al. Studies on scanning electron microscope method for rapid leaf sample preparation with tert-butanol [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society), 2022, 41(1): 98-104.
- [7] 张万群, 邵伟, 柯玉萍. 大型仪器分析实验教学多层次培训体系的建立与实践[J]. 化学教育(ZHANG W Q, SHAO W, KE Y P. Development of multi-level training system in experiment teaching of large scale analytical instrument and its practice [J]. Chinese Journal of Chemical Education), 2018, 39(10): 24-8.
- [8] 柴占丽, 白风华, 张兵兵. 大型仪器分析实验中虚实结合教学模式改革的探索与实践——以透射电子显微镜为例[J]. 大学化学(CHAI Z L, BAI F H, ZHANG B B. Exploration and practice of the reform in large-scale instrumental analysis experiment with the combination of virtual and actual teaching mode: taking transmission electron microscope experiment as an example [J]. University Chemistry), 2021, 36(9): 2104005.
- [9] 卢婧, 杨峰. 水力发电全过程虚拟仿真实验教学系统建设[J]. 实验科学与技术(LU J, YANG F. Construction of virtual simulation experimental teaching system for the whole process of hydroelectric power generation [J]. Experiment Science and Technology), 2021, 19(4): 131-4.
- [10] 张小芬, 张向军. 高校重点实验室开放与大型精密仪器管理的探究[J]. 实验室科学(ZHANG X F, ZHANG X J. Research on opening of key laboratories and management of great precision instruments in universities [J]. Laboratory Science), 2020, 23(1): 163-8.
- [11] 刘海峰, 庞在祥, 王晓东, 等. 新工科背景下智能制造虚拟仿真实训教学平台建设与应用[J]. 实验技术与管理(LIU H F, PANG Z X, WANG X D, et al. Construction and application of virtual simulation teaching platform for intelligent manufacturing under background of new engineering [J]. Experimental Technology and Management), 2020, 37(10): 255-8,262.
- [12] 李和明. 基于XLua的Unity脚本框架的设计与实现[J]. 无线互联科技(LI H M. Design and implementation of unity script framework based on XLua [J]. Wireless Internet Technology), 2019, 3: 80-1.
- [13] 郭婷, 杨树国, 江永亨, 等. 虚拟仿真实验教学项目建设与应用研究[J]. 实验技术与管理(GUO T, YANG S G, JIANG Y H, et al. Study on construction and application of virtual simulation experimental teaching projects [J]. Experimental Technology and Management), 2019, 36(10): 215-7.
- [14] 刘亚丰, 吴元喜, 苏莉, 等. 生命科学与技术虚拟仿真实验教学体系的构建[J]. 实验技术与管理(LIU Y F, WU Y X, SU L, et al. Construction of virtual simulation experimental teaching system of life science and technology [J]. Experimental Technology and Management), 2015, 32(9): 120-3.