胡艺龄,聂静,张天琦,吴忭(2021).具身认知视域下VR技术赋能实验教学的效果探究[J].现代远程教育研究,33(5):94-102.

**摘要：**在积极推进“新工科”建设的背景下，借助新兴技术促进学生的工程实践和问题解决能力，成为工程教育变革的重要趋势。针对这一知识与技能并重的复合能力，传统实验教学在培养操作技能、启发深度认知上表现欠佳。虚拟现实（VR）技术通过多通道信息融合构建交互式三维立体动态场景及行为动作仿真，为实验教学提供了强交互性、想象性和沉浸性的学习环境，有益于促成身体感知、行为控制和意义构建的整合性学习。为了探究VR技术对实验教学的作用机制，从具身认知理论出发，对沉浸式VR环境与2D桌面仿真软件环境下的学习体验和学习成效进行了差异分析，结果发现：两种实验环境下的陈述性知识学习效果并无显著差异；和2D仿真软件相比，VR实验环境促进了行为技能的迁移与实际情境下的问题解决，显著提升了学习者的自我效能感和临场感体验，但也带来了诸如更高的认知负荷和生理不适等负面影响。因此，未来实验教学中应用VR技术应持谨慎态度，既要利用VR赋能教学的技术优势，同时也要正确认识沉浸式学习带来的认知负荷与深度学习间的复杂关系。

**关键词：**具身认知；虚拟现实；实验教学；深度学习；虚拟仿真

**一、引言**

随着媒体技术的不断演进，教育场景不断拓展着“所能”的边界，即能虚实结合、能实时监控、能仿真交互。教育的“空间”与“在场”被场景互联重新定义。愈加“具身”（Embodiment）的新技术环境为专业实验和实践教学提供了变革思路，也为“新工科”背景下创新人才培养环境与模式、学生工程实践和问题解决能力提升提供了支撑。实验教学作为新兴工程科技型人才培养的实践教学体系中的关键环节，一直以来都是学校建设与改革的重难点。随着信息技术在教育领域的创新应用与融合发展，虚拟实验在理工科实验教学中逐步普及推广，不断促进教学模式的变革。桌面虚拟实验平台通常基于2D或3D建模技术，通过提供模像直观的实验仪器和操作环境（于洪涛等，2008），以促进学习者对相关概念的理解与知识的习得，在当前中学理科教学中得到广泛应用。但桌面虚拟实验系统仅支持学习者与学习环境的浅层次交互（如在有限屏幕内的鼠标、键盘交互），对实验教学中操作技能的培养存在较大局限性。虽然学习者可通过想象的形式弥补部分操作细节，但体验到的临场感亦相对浅薄。

虚拟现实（Virtual Reality，VR）技术通过将多通道信息进行融合，创建可交互的三维立体动态场景及行为动作仿真，从而使用户产生沉浸式体验。由于其具备思维层次的深度化、构建场景的丰富性、感官刺激的多样化等优势（何聚厚等，2018），可模拟真实的全景实验环境，动态仿真实验教学方法与条件，提供基于姿势的行为交互，因而对增强学习者认知及动作技能具有极大潜力（Burdea et al.，2003）。近年来VR技术愈发受到国内外教育研究者的青睐，并成为我国新时代开展教育信息化2.0行动的重要基础（任友群，2018）。“VR＋教育”的融合发展已成为我国虚拟现实产业发展中的关键布局领域（中华人民共和国工业和信息化部，2018）。从国际上来看，已陆续有学者将VR技术应用于科学知识探究（Kim，2006）、化学的概念性知识学习（Liou et al.，2018）、生物细胞教学（Parong et al.，2018）、医学训练（Smith et al.，2015）等教学或实验中，但大多数研究仅关注VR环境是否提高了学习成效和学习动机等问题，并未深入探讨VR环境是否能促进认知迁移和动作技能的习得。在国内，也有很多学者不断挖掘VR在教育领域的应用潜能，但大多数研究集中于应用构想和系统设计开发层面（黄剑玲等，2009；王娟等，2016），而对在基于VR的沉浸式实验教学环境中，信息呈现和感官交互方式是否确实有利于促进学习者身心合一的学习表现尚缺乏充分的实证性探索。基于此，本研究从具身认知理论出发，将基于VR的沉浸式虚拟实验环境与当前广泛应用的2D桌面仿真软件同步应用于实验教学中，通过对比不同实验条件下的学习体验与成效，探索和验证VR环境对实验教学的作用和效果。

**二、研究综述**

1.虚拟实验应用于实验教学的现状

虚拟实验通过模拟现实世界中的某一领域知识及过程，或在一定程度上代替真实实验环境，以达到帮助学生掌握实验操作技能和促进学生认知技能发展的目的（刘兴波等，2011）。虚拟实验所具有的突破时空限制、安全、可靠、高效等优势为当下的实验教学模式变革提供了新的途径。目前学校中应用最为广泛的是基于2D建模技术呈现实验对象的桌面虚拟实验系统，比如中学物理实验中欧姆定律的探索、游标卡尺的度数技巧训练等，学生主要通过操作鼠标、键盘对虚拟对象进行控制与操作，进而习得相关知识与技能。有研究者从心理学视角分析了此类实验系统对技能发展的作用，认为该系统有助于学生提取相关信息，促进学生认知技能的习得与迁移（于洪涛等，2008）。但研究也指出，在这类虚拟实验中学生大多是通过实验仪器以及文字讲解等获得相应的形象表征和符号表征，这类仅依托键盘鼠标与虚拟环境的交互只能产生信息沉浸，并不能促进其获得实验所要求的动作表征（于洪涛等，2008）。随着VR技术在教育中的应用推广，国内外教育研究者也开始采用沉浸式虚拟环境展开实验教学，例如香港中文大学（2019）研究团队研发的EduVenture®VR（EV-VR）平台，通过提供沉浸式虚拟学习空间，帮助学生学习天文知识，模仿太空实地考察；Liou等人（2018）通过结合VR技术、VR设备以及三维交互式虚拟数字资源，为学生提供了一个整合式虚拟学习环境，以帮助其提升学业成就及学习动机；Bogusevschi等人（2020）则通过结合VR技术及VR实验室，为初中生讲授水循环和降水形成的概念，以提升他们对物理学习的兴趣。可以看到，随着沉浸式VR技术的诞生，依托于其沉浸感强、交互性强、想象空间广的特征，研究者陆续开始尝试将其应用于提升学习者的学习成效和学习兴趣，但还未探索其在促进深度学习和认知迁移方面的发展潜力。

2.具身认知视域下的VR环境应用成效

具身认知（Embodied Cognition）是心理学中的新兴研究领域，其主要涵义是认为认知是被身体及其活动方式塑造的，认知过程是身心一体的（叶浩生，2010）。具身认知强调我们知觉的世界是一个以身体为中心的意义集合，身体与学习环境间的互动是深度知识学习的关键。学者们尝试从知觉符号、技术现象学、身体现象学等视角展开辨析（陈醒等，2019）。目前主流的具身认知环境有通过器官感知与肢体运动来理解信息的感觉增强环境，基于手势与知觉符号相匹配的相称姿态动作环境，以及结合直接具身和代理具身的身体参与运动的学习环境三类（柴阳丽等，2017）。VR环境由于具有多模态感知与沉浸式体验的技术优势，有利于营造具身认知环境，促进学习者的深度认知加工，因而被视为探究技术与具身认知结合促进学习“能否有效”“为何有效”“如何有效”的重要途径。但是，VR的教学应用成效也一直备受争议。有研究认为，VR对学习效果有中等或以上的积极影响（Merchant et al.，2014），有利于学生认知、运动和情感技能的习得（Jensen et al.，2018）；沉浸式VR实验系统对于程序性知识的习得更有利（李欣等，2019）。但也有研究认为，尽管沉浸式VR实验环境比传统的PPT放映更能激发学生的兴趣与动机，但却并未能达到更好的教学效果（Parong et al.，2018），VR组与传统的文本教学组在知识保留测试上没有差异（Makransky et al.，2019）。值得一提的是，大多数实证研究在测评VR学习成效时，采用的多为题目类型的知识测试（李欣等，2019；Alfadil，2020），而很少设置贴近真实环境的行为迁移测试。

3.VR环境对非认知因素的影响

VR对学习的影响不仅仅体现在认知效果上，也表现于对学习者非认知因素的作用。已有研究主要基于学习动机理论与认知负荷理论来分析VR促进学习的作用机制。其中，学习动机理论又包括学习兴趣理论（Renninger et al.，2016）与自我效能理论（Schunk et al.，2016）。学习兴趣理论认为，学习者在学习感兴趣的内容时会更加投入，并获得更好的学习成效。学习环境是激发学习者学习兴趣的关键因素（Renninger et al.，2016）。VR提供的沉浸、交互式环境为激发学习兴趣提供了支撑，而强烈的学习兴趣又能进一步增强学习者的自我效能感。自我效能感是人们对自己是否有能力从事某项具体任务的主观评价，学生会在相信自己有能力完成学习任务时更加投入学习（Schunk et al.，2016）。然而根据认知负荷理论可知，在多媒体学习中，有趣但与教学目标无关的材料与细节会影响学习者的学习（Mayer et al.，2008）。也就是说，如果将有限的认知容量分配给与学习目标不相关的冗余信息，则会增加认知负荷，进而影响学习效果（Sweller et al.，2011）。因此，若要营造形象可观的虚拟实验环境，必然会包含许多与学习目标不相关的视觉或听觉信息，而这些冗余信息也必然会增加学习者的认知负荷。

综上所述，纵观虚拟实验教学的发展，从广泛应用的桌面仿真软件到VR环境，学习媒体的变迁会如何影响学习体验？高沉浸感的媒介条件能否更好地提升学习成效？新媒介环境对学习者非认知因素又会产生何种影响？这些都是值得研究者探讨的问题。基于此，本研究选择数字电路模拟实验为教学内容，设置对照实验探究低沉浸感的2D仿真软件与高沉浸感的VR环境在提升学习效果上的表现。由于实验教学不仅关注知识的获取，更注重实验技能的迁移，因此在测评方式上，本研究选择不同难度的知识保留测试（难度较低）与行为迁移测试（难度较高）来综合评价学习者的学习成效。此外，研究还关注了两种环境下学习者的自我效能感、临场感体验、认知负荷、生理不适以及技术接受度等因素，以便客观比较两类环境对学习的影响机制。具体地，本研究聚焦以下问题：（1）在基于VR和2D仿真软件的实验环境中，学习者的自我效能感、临场感体验、认知负荷、生理不适及技术接受度是否存在差异？（2）基于VR和2D仿真软件的实验环境在学习者的知识获取与技能迁移效果上是否存在显著差异？

**三、实验设计与实施**

1.研究对象

本研究的被试选择了来自上海市某所高校具有教育学相关专业背景的53名大学生，年龄在17~21岁之间。所有参与者的视力或矫正视力均正常，被随机分配到VR组（即实验组，27人）和2D组（即控制组，26人），两组被试的个体背景特征（视力、游戏频率、VR学习体验等）无显著差异。实验前被试均独立完成了先验知识测试，对实验组成绩（M＝2.74，SD＝0.81）和控制组成绩（M＝2.31，SD＝0.83）进行T检验，发现两组学生在实验干预前的物理电路基础知识水平不存在显著差异（t＝1.94，p＞0.05）。

2.实验设备

本研究的学习内容为电子技术中的电路基础知识与基本操作。具体包括电路相关概念（如串联与并联、短路与断路等）与欧姆定律，以及各类电子元件（面包板、发光二极管、七段显示数码管、光敏电阻等）的使用方法。被试将通过PPT自主学习上述内容。之后，实验组学生通过观看视频了解沉浸式VR实验环境并熟悉相应的操作，控制组学生则通过图片与文字介绍了解2D仿真软件的操作面板并熟悉相应的功能。在任务开始前，主试也会提供必要的操作培训，并保证每一位被试都能独立进行软件的操作。

实验组使用的VR设备是连接台式电脑的HTC Vive头戴式设备，包括一个头戴式显示器以及两个单手持控制器，运行Steam平台的“Short Circuit VR”应用，可以为被试提供全沉浸式的学习体验（见图1）。控制组使用配置相同的台式电脑，所有操作在2D仿真软件“Breadboard Simulator”上进行（见图2）。

**图1　被试穿戴设备进行试验（左）和视野所见的VR 虚拟实验室：Short Circuit VR（右）**

**图2　2D仿真软件Breadboard Simulator操作界面**

3.测量工具

前测和后测任务。前测使用包含6道选择题的先验知识测试，题项由研究团队成员根据相关知识编制，并由物理教师交叉评阅确定，用来检测被试与实验相关的物理电路基础知识水平，测试结果用于确保随机分组的被试水平无显著差异。后测设置了题目类的知识保留测试和真实环境下的动手操作实践测试两种不同难度的测评任务。其中，知识保留测试也包含6道选择题，用于考察被试是否掌握了与实验任务相关的原理性知识；行为迁移测试要求被试应用真实的物理元件来正确连接电路。

调查问卷。为充分了解参与者在不同媒体环境下的学习体验和态度，研究使用的调查问卷包括临场感（Wiebe et al.，2014）、自我效能感（Meluso et al.，2012）、认知负荷（Hart et al.，1988）、生理不适（Kennedy et al.，1993）、技术接受度（Davis et al.，1989）等5个因子。通过对上述采纳度较高的量表进行编译，并由专家对问卷内容进行审查，匹配问卷内容与学习情境的适切性后，最终确定了包含19个题目的后测问卷，其中临场感5题（原始问卷中结构效度为0.92）、自我效能感3题（原始问卷中结构效度为0.80）、认知负荷3题（原始问卷中结构效度为0.82）、生理不适3题（原始问卷中结构效度为0.78）、技术接受度5题（原始问卷中结构效度为0.90）。最终整体问卷内部一致性系数达到0.853，且除生理不适外，问卷各维度的一致性系数均大于0.7（详见表1），这表明问卷整体和部分的信度良好。考虑到生理不适维度的3个题项涉及视觉疲劳、头晕感、呕吐感三种不同类别的生理反应，尽管其内部一致性系数相对较低，但后续分析仍将其作为重要的参照依据。

**表1　后测问卷各维度代表题目与内部一致性系数**

4.实验流程

本实验时长约80~100分钟（如图3所示）。首先被试需要填写基础信息问卷，并完成电路知识水平测试。然后自主播放PPT，学习与实验相关的电路知识与物理元件的使用，并初步熟悉操作环境和实验任务要求。实验组与控制组分别在沉浸式VR与2D仿真软件的实验环境中完成两项实验任务。之后，两组完成同样的后测问卷、纸质知识测试题，以及行为迁移测试（即完成真实情境下的电路连接任务）。实验环节与行为迁移测试的任务描述见表2。

**图3　实验流程**
**表2    实验任务与行为迁移测试任务**

**四、结果与分析**

1.非认知因素的感知问卷结果分析

为了解学习者在非认知维度上是否会因为学习媒体的不同而存在差异，研究对两组学习者完成学习后的临场感、自我效能感、认知负荷、生理不适与技术接受度进行了独立样本T检验，结果如表3所示。实验发现，在临场感方面，实验组（M＝4.23，SD＝0.55）高于控制组（M＝3.44，SD＝0.66），且存在显著差异（t＝4.69，p＜0.001），这表明沉浸式VR技术相比2D仿真技术能提供更强的沉浸感，更能激发学生的学习兴趣。在自我效能感方面，实验组（M＝3.89，SD＝0.65）也高于控制组（M＝3.36，SD＝0.81），且存在显著差异（t＝2.64，p＜0.05），表明沉浸式VR技术相比2D仿真技术能让学生在完成任务时获得更强烈的成就感，更能激发他们的学习动机。在认知负荷方面，实验组（M＝3.43，SD＝0.82）高于控制组（M＝2.69，SD＝1.13），且存在显著差异（t＝2.73，p＜0.01），这说明沉浸式VR环境比2D仿真环境更加复杂，学生在学习过程中需要处理更多的环境信息或干扰信息。在生理不适方面，实验组（M＝2.31，SD＝0.69）也高于控制组（M＝1.78，SD＝0.62），且存在显著差异（t＝2.89，p＜0.01），这表明沉浸式VR技术相比2D仿真技术会对学生的生理造成更多不适，如学生在沉浸式VR环境中会体验到眩晕感。在技术接受度方面，实验组（M＝4.27，SD＝0.52）亦高于控制组（M＝3.87，SD＝0.53），且存在显著差异（t＝2.79，p＜0.01），这说明即使沉浸式VR技术给学生带来了较高的认知负荷及生理不适，但VR技术带给学生完备的知觉体验也使得他们对该技术有着更高的接受度。

**表3   后测问卷T检验结果**

（注：\*\*\*p < 0.001， \*\*p < 0.01， \*p <0.05，下同。）

2.学习效果分析

为了解学习者在认知维度上是否会因为学习媒体的不同而存在显著性差异，研究对两组学习者的知识保持测试得分、迁移任务得分与迁移任务用时进行了独立样本T检验，进而比较基于沉浸式VR和2D仿真软件实验环境中学习者知识获取（用知识保持测验评价）与技能迁移的效果（用行为迁移任务得分和任务用时评价），结果如表4所示。实验发现，实验组的知识保持测试得分（M＝3.11，SD＝0.80）低于控制组（M＝3.35，SD＝1.02），且不存在显著差异（t＝-0.93，p＞0.05），这表明2D仿真技术与沉浸式VR技术在促进学生获取知识方面没有显著差异。实验组的迁移任务得分（M＝3.52，SD＝0.70）高于控制组（M＝2.92，SD＝0.84），且存在显著差异（t＝2.80，p＜0.01）；同时实验组的迁移任务用时（M＝13.78，SD＝7.34）低于控制组（M＝20.35，SD＝9.01），且存在显著差异（t＝-2.92，p＜0.01），这表明无论从任务完成质量还是效率来看，沉浸式VR技术相比2D仿真技术都能让学生在知识迁移上表现更好。

**表4    后测成绩T检验结果**

**五、结论与讨论**

1.具身认知视域下的VR学习环境促进了深度学习

从学习效果分析可以看到，沉浸式VR环境中被试在知识获得上并未显现优势，这与以往研究结果类似（Makransky et al.，2019）。本研究中知识保持测验的题目内容大多属于陈述性知识，主要考察学生对理论知识的识记与理解，比如七段显示数码管某个接口对应的引脚功能、发光二极管的作用原理等，此类题目并不涉及对所学知识的深层次加工，也无法凸显不同媒介环境的效果差异，因此在两种实验环境下的学习效果差异不明显。从知识保留测试到真实任务实践，需要被试将知识从一种情境迁移至另一种情境进行应用，这可视作深度学习发生的表征，需要学生对概念的深度理解和灵活应用（龚静等，2020）。通过行为迁移实验可以发现，沉浸式VR环境中被试的行为迁移表现显著优于对照组，无论从任务完成质量还是完成效率来看，实验组都表现得更好。在本实验的沉浸式VR环境中，实验学习涉及到身体知觉、物质技术、时空关系等要素，这些相互作用的要素共同促成了具身认知。在这一背景下，认知、身体动作和环境形成了一个具身认知系统，动作技能是联结大脑与身体并通向认知的重要通道，人的感知广度、阈值、极限等都受到身体的物理属性限制。在沉浸式VR环境中由于有身体参与认知，激活的交感神经有助于对概念的理解，同时交互引导也有助于心智扩展（黄红涛等，2018），这使得深度认知得以发生。因此，实验组通过具身认知实现了对知识的深层理解与组织建构，也使得其在认知迁移的真实任务完成中表现得更好。

2.多感官通道融合的临场感有助于动作技能的习得

沉浸式VR技术能营造出更贴近现实物理空间的学习情境，使得学习者在信息沉浸的基础上进一步获得感官沉浸。沉浸式VR通过模糊物理世界与数字或模拟世界之间的界限，营造出强化后的临场感，使得学习者能够更好地与环境互动。在利用五感（视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉）塑造场景的过程中，随着感知维度的增加，多模态特征更有助于增强学习者的沉浸感（Merchant et al.，2014）。多自由度、多感官通道融合所带来的信息刺激，为学习者营造出极尽真实的感觉，并且能放大情绪反应与感官体验；也能为学习者提供身体归属感、涉入感以及态势感知。相关脑电研究进一步证实，相较于2D桌面仿真应用软件，在VR环境下人类大脑更易呈现与真实场景相似并稳定的神经模式（Petukhov et al.，2020），并使感知、认知、操作协同发展，因而也更易于将实验教学中所获得的动作技能迁移至真实情境的问题解决过程中。从实验教学目标层面上看，动作技能的习得与迁移是教学的重中之重。在2D桌面仿真软件环境中，学习者仅依靠鼠标键盘与学习内容的简单交互进行实验学习，并未涉及肌肉和骨骼的调动，这就会省略更多的仪器操作细节而使其无法获得必要的动作表征。相对而言，VR环境更利于动作技能的培养，它不仅可以为学习者提供启发性的交互式学习体验，还可以激发其学习动机和探索积极性，使其在整合熟练中逐步掌握操作技能。

3.VR环境下的学习需平衡深度学习与认知负荷

VR技术可为学习者创设完全沉浸式的学习环境，支持学习者在环境中自由移动、操控和创作；实时感官刺激能带给学习者更强的临场感，激发学习兴趣，并使其更加投入理解学习内容。同时，高投入的付出与及时的互动反馈有助于提升学习者的自我效能感，促使学习行为的持续深入。因此，相较于2D桌面仿真环境，沉浸式VR环境中学习者在临场感与自我效能感上的自我感知更为强烈。根据Pintrich（2003）的价值期望模型，兴趣诱发的学习价值与自我感知的胜任感会促使参与者保持较高的学习动机，提升学习效益。但实验结果也揭示，VR技术在营造高沉浸感的学习环境、带来积极学习体验的同时，其高维的感知特性也会对学习过程产生负面影响，如VR环境导致了学习者更高的认知负荷及生理不适问题（如疲劳、眩晕感等）。这提示我们在教育应用中需要谨慎使用VR技术，尤其要谨防虚拟现实世界中多维的感知和丰富的场景信息可能对学习者的注意力和专注度造成的干扰。在进行实验设计时可以考虑以人脑的认知结构为基础、以工作记忆的局限性为核心，通过“分离关联元素效应”（Isolated Interacting Elements Effect）或“模块碎片化效应”（Molar-Modular Effect）来调节内部认知负荷，并尽量避免提升外部认知负荷的注意力分散效应、形式效应及冗余效应。但辩证地看，在高层次信息加工及深度学习中，一定程度的认知负荷又会促使学习者进行有意义的探索。例如，本研究中VR实验环境中部分元素并非与实验任务直接相关，可能会给学习者造成一定认知负荷，但正是受这些多维感知和场景信息的启发，实验组被试才可能在对物理元件的连接方式上有更多的创新性尝试。

4.VR技术在教育场景中的应用前景及教学建议

通过本实验的研究发现，未来VR技术可以尝试性地应用于以实验教学为代表，涉及学生认知、动作等综合技能培养的教育情境中，比如中学或高等教育理工科实验教学中的复杂情境下的问题解决等。但同时，这类教学对教师的“控场”能力提出了更高要求。由于VR技术能带来丰富的感官体验和交互效果，高度的沉浸感使学生更能专注思考和自由探究，因而如何辨别学生是否真正在学、效果如何，都需要教师对其进行系统性设计。因此，事先设计合理的课程方案、实验中基于实时数据反馈监控学习行为和过程（如虚拟化身的肢体语言观察等）、课后汇聚多模态数据进行综合性评价，是未来VR技术教学应用的有效方式。同时，VR技术的教学应用离不开相应教育资源的建设，目前更多是类似于Steam VR社区中关于VR游戏的应用产品，而与具体学科教学内容相匹配的VR教育资源极为稀少。随着“VR＋教育”理念的不断深化，基于VR技术的教育资源开发将是未来教育新的发力点。

另外，VR教育产品设计离不开学习科学相关理论的指导。以本研究中VR实验环境为例，设计因素需要在认知负荷与启发深度学习之间力求平衡，比如可以考虑日常学习工具的习惯操作，减少学习者在适应新技术上的困难，从而避免不必要的外在认知负荷。但在涉及技能操作的具体细节上，需要尽可能详尽呈现，因为这些细节通常会与实验任务相关，并且是真实环境下切实存在的问题。此类设计要素可能会削弱操作的流畅度，增加一定的认知负荷，却能启发学习者深入思考并开展多样化尝试，促进其深刻理解学习内容。总之，对于VR这种新的学习媒介，多媒体学习理论的相关原则是否适用，也值得进一步探索。

**六、总结与展望**

综合来看，本研究基于数字电路模拟实验内容，通过与2D桌面仿真软件对比，对沉浸式VR环境中的学习体验和成效展开探究。结果表明，对VR环境下学习体验的认识需要理性辩证地看待：与2D仿真软件相比，VR实验环境能显著提升学习者的自我效能感和临场感体验，但同时带来更高的认知负荷及生理不适；VR实验环境对于知识获取没有明显提升作用，但是却显著促进了学习者的行为技能迁移与实际情境下的问题解决能力；学习者对VR的技术接受度更高。可以看到，VR技术在虚拟实验教学上具有应用潜力，尤其是在问题探究与操作技能培养方面，但未来设计VR实验环境需要权衡认知负荷的要素，并尝试突破VR自身的技术不足，尽力为学习者提供更为流畅与舒适的学习体验。值得注意的是，由于研究情境与实验数据的单一性，本研究也体现出一定的局限性，如对于VR和2D仿真软件学习环境下的注意力与认知加工过程缺乏深入的探索，未来可通过采集学习过程中的眼动和脑电波等生理表征数据，进一步分析并论证不同媒体环境下的认知差异。此外，由于实验设计的局限性，本研究仅关注了VR环境对学习者学科问题解决能力的考察，并未关注到VR技术对其他高阶思维能力（如创新能力）的影响，从“离身”到“具身”的高阶思维发展机制还有待进一步深化。

**参考文献：**[1]柴阳丽,陈向东(2017).面向具身认知的学习环境研究综述[J].电化教育研究,38(9):71-77,101.[2]陈醒,王国光(2019).国际具身学习的研究历程、理论发展与技术转向[J].现代远程教育研究,31(6):78-88,111.[3]龚静,侯长林,张新婷(2020).深度学习的生发逻辑、教学模型与实践路径[J].现代远程教育研究,32(5):46-51.[4]何聚厚,梁瑞娜,肖鑫等(2018).基于沉浸式虚拟现实系统的学习评价指标体系设计[J].电化教育研究,39(3):75-81.[5]黄红涛,孟红娟,左明章等(2018).混合现实环境中具身交互如何促进科学概念理解[J].现代远程教育研究,(6):28-36.[6]黄剑玲,邹辉(2009).基于虚拟现实技术的实验教学系统及其特点[J].中国电化教育,(4):108-111.[7]李欣,沈夏林,黄晓等(2019).沉浸式VR可视化空间线索促进程序性知识学习的实证研究[J].电化教育研究,40(12):64-71.[8]刘兴波,王广新(2011).桌面虚拟实验促进学生操作技能迁移的验证与分析[J].中国远程教育,(11):42-46,96.[9]任友群(2018).走进新时代的中国教育信息化——《教育信息化2.0行动计划》解读之一[J].电化教育研究,39(6):27-28,60.[10]王娟,陈瑶(2016).资源建设新形态:虚拟仿真资源的内涵与设计框架[J].中国电化教育,(12):91-96.[11]香港中文大学(2019).未出门而尽知天下事:庄绍勇寓虚拟于实学[EB/OL].[2020-09-13].http://www.cuhk.edu.hk/chi-nese/features/morris\_jong.html.[12]叶浩生(2010).具身认知:认知心理学的新取向[J].心理科学进展,18(5):705-710.[13]于洪涛,杨雪,孙艳丽(2008).桌面虚拟实验的教学效应研究[J].现代教育技术,(1):115-118.[14]中华人民共和国工业和信息化部(2018).工业和信息化部关于加快推进虚拟现实产业发展的指导意见[EB/OL].[2021-03-05].http://www.cac.gov.cn/2018-12/26/c\_1123903256.htm.[15]Alfadil, M. (2020). Effectiveness of Virtual Reality Game in Foreign Language Vocabulary Acquisition[J]. Computers & Education, 153:103893.[16]Bogusevschi, D., Muntean, C., & Muntean, G. (2020). Teaching and Learning Physics Using 3D Virtual Learning Environment: A Case Study of Combined Virtual Reality and Virtual Laboratory in Secondary School[J]. Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching, 39(1):5-18.[17]Burdea, G., & Coiffet, P. (2003). Virtual Reality Technology (Second Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons.[18]Davis, F. D., Bagozzi, R. P., & Warshaw, P. R. (1989). User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models[J]. Management Science, 35(8):982-1003.[19]Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research[J]. Advances in psychology, 52:139-183.[20]Jensen, L., & Konradsen, F. (2018). A Review of the Use of Virtual Reality Head-Mounted Displays in Education and Training[J]. Education and Information Technologies, 23(4):1515-1529.[21]Kennedy, R. S., Lane, N. E., & Berbaum, K. S. et al. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 3(3):203-220.[22]Kim, P. (2006). Effects of 3D Virtual Reality of Plate Tectonics on Fifth Grade Students’Achievement and Attitude Toward Science[J]. Interactive Learning Environments, 14(1):25-34.[23]Liou, W. K., & Chang, C. Y. (2018). Virtual Reality Classroom Applied to Science Education[C]// Proceedings of the 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology. Zabljak, Montenegro:1-4.[24]Makransky, G., Borre-Gude, S., & Mayer, R. E. (2019). Motivational and Cognitive Benefits of Training in Immersive Virtual Reality Based on Multiple Assessments[J]. Journal of Computer Assisted Learning, 35(6):691-707.[25]Mayer, R. E., Griffith, E., & Naftaly, I. et al. (2008). Increased Interestingness of Extraneous Details Leads to Decreased Learning[J]. Journal of Experimental Psychology: Applied,14(4):329-339.[26]Meluso, A., Zheng, M., & Spires, H. A. et al. (2012). Enhancing 5th Graders’Science Content Knowledge and Self-Efficacy Through Game-Based Learning[J]. Computers & Education, 59(2):497-504.[27]Merchant, Z., Goetz, E. T., & Cifuentes, L. et al. (2014). Effectiveness of Virtual Reality-Based Instruction on Students’Learning Outcomes in K-12 and Higher Education: A Meta-Analysis[J]. Computers & Education, 70:29-40.[28]Parong, J., & Mayer, R. E. (2018). Learning Science in Immersive Virtual Reality[J]. Journal of Educational Psychology, 110(6), http://dx.doi.org/10.1037/edu0000241.[29]Petukhov, I. V., Glazyrin, A. E., & Gorokhov, A. V. et al. (2020). Being Present in a Real or Virtual World: A EEG Study[J]. International Journal of Medical Informatics, 136:103977.[30]Pintrich, P. R. (2003). Motivation and Classroom Learning[M]// Reynold, W. M., & Miller, G. E. (Eds.). Handbook of Psychology: Vol. 7. Educational Psychology. New York, NY: Wiley:103-122.[31]Renninger, K. A., & Hidi, S. (2016). The Power of Interest for Motivation and Engagement[M]. New York: Routledge.[32]Schunk, D. H., & DiBenedetto, M. K. (2016). Self-Efficacy Theory[M]// Wentzel, K. R., & Miele, D. B. (Eds.). Handbook of Motivation at School (2nd Ed.). New York, NY: Routledge:34-54.[33]Smith, P. C., & Hamilton, B. K. (2015). The Effects of Virtual Reality Simulation as a Teaching Strategy for Skills Preparation in Nursing Students[J]. Clinical Simulation in Nursing, 11(1):52-58.[34]Sweller, J., Ayres, P. L., & Kalyuga, S. (2011). Cognitive Load Theory[M]. New York: Springer.[35]Wiebe, E. N., Lamb, A., & Hardy, M. et al. (2014). Measuring Engagement in Video Game-Based Environments: Investigation of the User Engagement Scale[J]. Computers in Human Behavior, 32:123-132.收稿日期　2021-03-07　责任编辑　刘选