

轻量级脑机接口 AR 探究工具的 科学课堂应用研究

蔡 苏 李江旭 柳昌灏 周海涛 刘紫凤

(北京师范大学 教育学部, 北京 100875)

[摘要] 本研究在心流理论的指导下, 开发了一款基于轻量级脑机接口的增强现实科学探究工具, 对两组参与基于脑机接口和无脑机接口的 AR 科学探究活动的 41 名小学生开展实验。结果显示, 基于脑机接口的 AR 探究工具提高了学生科学探究成绩和参与自我效能, 而对认知负荷无显著影响。访谈结果也表明, 学生对脑机接口的 AR 探究工具持正面态度。本研究的发现可为未来虚实融合学习环境的学习监测系统构建提供参考。

[关键词] 增强现实; 脑机接口; 科学探究; 心流理论

[中图分类号] G639.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1007-2179(2023)01-0081-10

一、问题提出

教育部(2019)发布的《关于加强和改进中小学实验教学的意见》指出:“要创新实验教学方式, 对于因受时空限制而在现实世界中无法观察和控制的事物和现象、变化太快或太慢的过程, 以及有危险性、破坏性和对环境有危害的实验, 可用增强现实(AR)、虚拟现实(VR)等技术手段呈现”(2019)发布的《关于加强和改进中小学实验教学的意见》指出:“要创新实验教学方式, 对于因受时空限制而在现实世界中无法观察和控制的事物和现象、变化太快或太慢的过程, 以及有危险性、破坏性和对环境有危害的实验, 可用增强现实(AR)、虚拟现实(VR)等技术手段呈现”。VR/AR 技术融

合教育教学的创新教学已引起广泛关注。

以往将 AR 运用于科学教育的研究多关注学习成就、动机和态度等变量(Arici et al., 2019), 关注的是学生学习结果, 而学生科学探究能力因常体现在学习过程中而被忽视。科学探究过程的评估, 不仅可以通过问卷、量表和访谈等方式记录学生科学探究过程的心理状态, 还可以使用设备实时监测大脑的脑波状态(任岩等, 2019)。脑机接口(brain computer interface, BCI)技术可用于收集学生的脑电波, 帮助研究者通过数据了解学生, 具有极大的应用潜力(任岩等, 2019)。脑机接口的核心价值体现为促进大脑与计算机之间的双向交互, 有学者称其为“脑机交互”(胡航等, 2019)。

[收稿日期] 2022-11-07

[修回日期] 2022-12-23

[DOI 编码] 10.13966/j.cnki.kfjyyj.2023.01.009

[基金项目] 2019 年国家自然科学基金面上项目“智能增强现实学习环境中多通道信息融合计算及评测研究(61977007)”。

[作者简介] 蔡苏, 副教授, 北京师范大学教育学部, 研究方向: VR/AR+教育、STEM 教育(caisu@bnu.edu.cn); 李江旭、柳昌灏、周海涛、刘紫凤, 硕士研究生, 北京师范大学教育学部, 研究方向: VR/AR+教育、STEM 教育。

[引用信息] 蔡苏, 李江旭, 柳昌灏, 周海涛, 刘紫凤(2023). 轻量级脑机接口 AR 探究工具的科学课堂应用研究[J]. 开放教育研究, 29(1): 81-90.

基于此,本研究试图使用脑机接口技术监测学习者科学探究过程注意力的变化,及与脑电整合的AR探究工具和普通的AR探究工具相比能否显著提升学生的注意力,以及注意力的变化能否对学生的科学探究表现产生显著影响。

二、文献综述

(一)增强现实技术应用于科学教育

科学探究指学生能够发现现实世界的科学问题,并针对特定的科学现象,进行观察、提问、实验设计、方案实施及结果的交流与讨论(钱长炎等, 2012; 张祥, 2019)。AR是一项支持将虚拟对象和真实世界融合并协同显示在真实环境的技术。它的虚实结合、实时交互特性使其具有极强的情境塑造能力,能够在科学知识和现实世界之间构建交互的桥梁,为学生提供体验、探究的机会和空间(蔡苏等, 2016; 张四方等, 2018)。近年来,研究者尝试运用AR实验环境解决科学教育问题。

目前,AR用于科学教育的研究主要聚焦于考察AR与传统媒体不同的优势,并通过测试和问卷等方式了解其对学生认知和非认知层面的影响(Boboc et al., 2021; Cai et al., 2021a; 宋燕等, 2021)。学业成绩、学习动机和学习态度是相关研究关注的三个最常见变量(Arici et al., 2019)。此外,还有研究涉及实验操作技能、自我效能、参与度、沉浸感、学习兴趣等变量(Chang & Hwang, 2018; Fidan & Tuncel, 2019; Shin et al., 2020)。常见的数据收集工具包括成就测试、问卷调查和访谈。因此,多数研究采用定量研究或以定量为主的混合研究。考察学生学习过程的研究通常通过对课堂观察获得的非结构性数据进行人工编码、定性数据挖掘和滞后序列分析等方法,分析学生的学习行为(Cai et al., 2021b; Chiang et al., 2014)。但这种方法费时费力,操作不易,且数据收集和分析只能在学生学习结束后进行,不能实时监测学生的学习状态并加以提醒。因此,能实时监测脑电波状态的脑机接口技术逐渐进入教育研究领域。

(二)脑机接口技术用于教育教学

1929年,德国精神病学家汉斯·贝格尔(Hans Berger)从颅骨缺损患者的大脑皮质处成功检测出活动电流,并像心电图一样用图标的形式表现出来。

这就是脑电图(EEG)的由来(苏珊·格林菲尔德, 1998)。人有四种脑电波。当人们处于高度清醒状态(高度兴奋和紧张)时,大脑在13-25 Hz波段工作,称为 β 波;中度清醒(松弛而清醒)时,大脑在8-13 Hz波段工作,称为 α 波;睡眠初期,大脑在4-8 Hz波段工作,称为 θ 波;深度睡眠时大脑在0.5-4 Hz波段工作,称为 δ 波(张旺等, 2000)。

随着技术的发展,人们可以使用干电极等简单轻便的设备收集被试的脑电波,被试无需洗头涂胶。基于此类设备的研究还处于探索阶段,国外已有研究者将其用于学习过程的认知心理实验。威尔逊和科恩(Wilson & Korn, 2007)认为,脑机接口技术可以提供新的非肌肉通道,用于向外部发送消息和命令,通常被用来测量注意力和焦虑值。基于这一结论,绝大多数研究用脑电检测学习者的注意力水平,并证明了被测量数据与学习者自我报告的注意力水平之间正相关(Rebolledo-Mendez et al., 2009)。此外,还有研究利用脑电数据为学生提供监督机制或反馈策略,让学生或教师随时了解学习状况并作出调整。林和考欧(Lin & Kao, 2018)试图利用脑机接口分析在线学习者的脑电信号,从而形成学习能量。该研究通过为学生提供即时学习的预警监督机制,发现脑机接口技术对学生学习具有促进作用,同时能够使教师理解学生学习的障碍并及时给予关心和鼓励。顾宣宣(2018)运用脑电开展元认知科学教育研究,发现可促进学习者的自我认知,形成外部调节,提升学习效率。杨晓哲(2018)研究发现基于脑电的反馈策略可以提升学生的艺术创造力。

将脑机接口技术与增强现实技术结合的研究也有相关成果。学生注意力在知识同化过程中发挥重要作用,有研究者利用便携式脑电设备检测学生使用AR学习时的注意力变化,并对比传统教学方式的结果发现,AR对提升学生注意力有显著作用(Bos et al., 2019)。此外,AR教育应用研究关注的参与度、沉浸感、自我效能、心流体验等变量(Arici et al., 2019)与注意力水平等脑电数据密不可分,因此脑机接口和增强现实的结合能够从生理角度揭示增强现实给学习者带来的体验感。

目前,简易便携式干电极脑电采集设备大都来自于国外厂家,如Muse头环、NeuroSky脑立方耳

机等, 主要用于注意力训练和冥想。本研究采用电极数较多、电极灵敏度较好的轻量级设备 Muse。该设备是一个大脑感知头环, 包含七个精确校准传感器, 其中有两个位于额叶区的前额传感器(FP1、FP2), 两个位于颞叶区的智能导电橡胶耳部传感器(TP9、TP10)和三个参考传感器。Muse 头环可通过蓝牙与电脑、平板或智能手机等连接, 使用简单, 不仅可以作为个人冥想助手, 而且可以供医院、诊所或高校等应用于认知神经科学、大脑健康、心理治疗和音乐认知等研究(Herrera-Arcos et al., 2017; Mehreen et al., 2019)。

(三) 心流理论

心流理论将个人体验分为三个层次: 心流前兆、心流体验和心流结果(Csikszentmihalyi, 1990)。契克森米哈伊(Csikszentmihalyi, 1990)认为当一个人专注于某件事时, 会产生心流(flow), 表现为注意力高度集中、感觉时间飞逝、心情愉悦等。这种体验能有效减少人在虚拟网络环境中被孤立和被隔绝的感觉, 从而激励人们重复参与活动(代宝等, 2015)。

由于 AR 能够创造沉浸式学习环境, 有研究将心流理论应用到 AR 教学。例如, 研究者开展了利用 AR 工具模拟宇宙行星运动的科学探究活动, 发现使用基于 AR 的学生的心流体验和动机提升明显, 且优于对照组学生(Chen et al., 2022)。伊瓦内斯等(Ibáñez et al., 2014)发现在学习电磁学时, 使用 AR 探究的参与者与使用基于网络应用的参与者相比能获得更高层次的心流体验。

有研究发现, 心流体验与学生的学习成绩正相关(蔡林等, 2020)。此外, 心流还与注意力水平、自我效能、学习动机和学习投入等相关(谢文澜等, 2022)。还有研究发现心流体验在自我效能和学习投入之间的中介作用显著, 自我效能感可以对学生

心流体验的注意力集中和投入度等产生显著正向影响(蔡林等, 2020)。本研究以心流理论为指导, 将学生 AR 科学探究活动的注意力水平、心流体验与自我效能等概念建立联系, 探索与脑机接口技术整合的 AR 探究工具对学生科学探究过程的影响。

三、研究设计

(一) 预实验

1. 预实验设计

为验证 Muse 设备注意力算法的有效性及其基于脑机接口的 AR 实验环境是否可行, 本研究在实验前开展了预实验, 旨在回答以下两个问题: 1) 通过注意力算法输出的注意力值与心流体验是否相关? 2) 基于脑机接口的 AR 实验环境技术接受度如何? 研究者招募了来自北京某小学 5~6 年级、10~13 岁的 31 名学生。预实验要求被试头戴 Muse 在 AR 环境中完成注意力训练任务: 意念弯勺、爆炸气球、火箭起飞(见图 1)。根据被试完成的时间评估等级, 研究者要求被试完成任务后填写心流体验问卷和技术接受度问卷, 并对 3 名被试开展半结构访谈。本实验使用的量表是心流体验评估量表(flow experience)(Jackson et al., 2010), 共 10 题(Cronbach's $\alpha = 0.75$); 技术接受度量表(Hwang et al., 2013), 共 13 题(Cronbach's $\alpha = 0.92$), 分感知有用性(Cronbach's $\alpha = 0.94$)和感知易用性(Cronbach's $\alpha = 0.88$)两个子维度, 问卷测量方式均为李克特 5 点量表。

2. 预实验结果

对被试的心流体验和注意力值进行皮尔逊相关性分析的结果见表一。被试的注意力值与心流体验之间存在显著相关性($p < 0.010$), 且两者之间高度正相关($r = 0.815 > 0$)。由于心流体验反映了被试参与实验的投入程度, 实验数据显示注意力值能代表心流体验的程度, 因此该注意力算法能通过

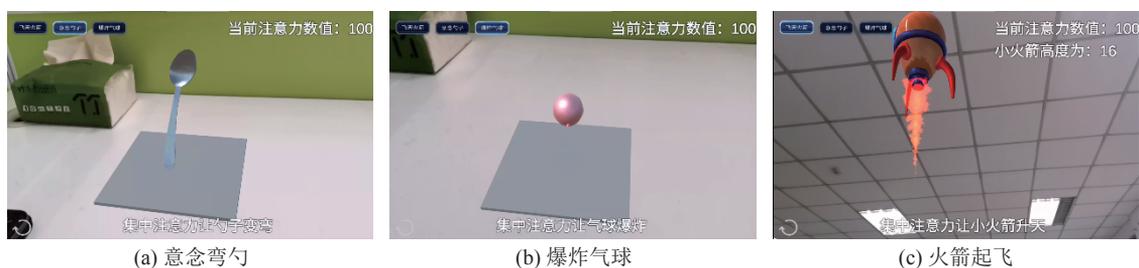


图 1 预实验任务

表一 注意力值与心流体验的相关性

	心流体验	注意力值
心流体验	1	0.815**
注意力值	0.815**	1

注:***表示 $p<0.001$,**表示 $p<0.010$,*表示 $p<0.050$.

注意力值反映被试的注意力水平。

被试的技术接受度描述性统计结果见表二。无论是总体技术接受度还是子维度感知有用性和感知易用性,其均值都在4分以上(满分为5),可见基于脑机接口的AR注意力软件有用且易于使用。

表二 技术接受度

	样本量	均值(标准差)	项数	克伦巴赫 α 系数
技术接受度	31	4.46(0.3944)	13	0.92
感知有用性	31	4.45(0.5128)	6	0.94
感知易用性	31	4.47(0.3875)	7	0.88

在访谈中,被试均认为本次实验活动有趣,乐意使用这套实验环境。例如,第三位学生说:“感觉像是在玩游戏,用大脑控制(虚拟物体)的感觉很神奇”。同时,第一位学生有更多的创新想法:“这个实验很好玩,要是内容多些就更好了,比如用意念控制机器人”。此外,被试均认为基于脑机接口的AR注意力软件显示的注意力值能正确反映其注意力水平,这与技术接受度有用性维度的数据分析结果一致。例如,第二位学生说:“当我屏住呼吸集中精神时小火箭会上升,当我放松时它就掉下来。”AR呈现的场景将学生的注意力具象化。同时他们表示首次接触实验环境有个适应的过程,使用该软件两个场景后逐渐掌握了方法,能通过集中注意力控制场景中虚拟物体的变化。学生表示:“刚开始时我不知道怎么操作,但是在吹气球时掌握了,后面(操作)小火箭就比较顺利了。”“刚开始时像戴了紧箍咒,总要调(头环松紧),但调好了就不用管了,结束后差点忘了自己头上还戴了这个”。可见,被试有必要熟悉虚实结合的AR场景和头环设备,这与技术接受度易用性维度的数据分析结果一致。此外,学习者对使用Muse和平板进行AR探究的认可度较高,但Muse设备使用前需正确佩戴,否则容易造成接触不良影

响信号传输。关于能否控制自己的注意力,有学生认为能够通过集中注意力控制场景AR物体的变化,部分学生觉得注意力检测存在延迟,但处于可接受的范围。正如第二位学生所说:“我能控制自己的专注度,这个软件让我知道专心是什么感觉”。这表明基于脑机接口的AR注意力软件在一定程度上能让学生掌握注意力集中的方法,从而达到锻炼注意力的目的。

总体而言,该注意力算法可以测量学生的注意力,可运用于后续的软件开发和实证研究,部分实验对象认为软件中的注意力值变化较为频繁。从脑电信号记录看,注意力确实呈小幅波动,这说明算法的精度还有待提升。被试感觉整套“脑机接口+AR”的实验系统有用,且使用起来不复杂,但需要时间适应和研究者的指导。

(二)AR软件

预实验结果表明,该注意力算法可用于后续AR科学探究工具的开发。本研究使用Unity 3D开发引擎和Vuforia工具包实现增强现实功能,并将软件打包为APK文件在安卓移动终端使用。实现基于脑机接口的AR工具还需通过Muse Monitor软件将Muse信号通过内置算法转化为注意力Concentration值,即数值为0-100之间的整数,数值越高表示注意力水平越高。

该工具注重AR软件与学习者的交互功能,为学习者创设了交互式探究学习环境。以AR科学探究工具“杠杆原理”为例,学生通过使用平板电脑的摄像头扫描特定的标记卡片即可看到虚拟实验装置,虚拟杠杆两端为可调节的砝码,学生可以调节砝码的质量和力臂大小,点击“开始”按钮即可让砝码受到重力作用。装置会给出结果反馈(偏左/偏右/两端平衡),学生结合学习任务单就可以完成杠杆平衡实验。

有研究者指出,运用AR开展教学需使用辅助教学支架,否则容易降低学生学习动机(Chu et al., 2019; Kerawalla et al., 2006)。目前常见的支架包括流程图、模型、工作样例、概念图、提示等,在基于本文的教学环境中,提示是一种较为切实可行的方式。真实课堂环境的声音提示容易扰乱课堂秩序,因此本研究采用文字提示方式(Yoon et al., 2018),将预实验使用的注意力算法作为输入信号,与上述

主题为“杠杆原理”的 AR 科学探究工具结合, 设计基于注意力算法的反馈系统, 实时监测学生开展科学探究的注意力水平值, 并以支架式教学理论为

基础, 采用文字反馈的方式给予提醒。学生学习过程中如果注意力较低, 将会收到“集中注意力, 想一想”的提醒反馈(见图 2)。

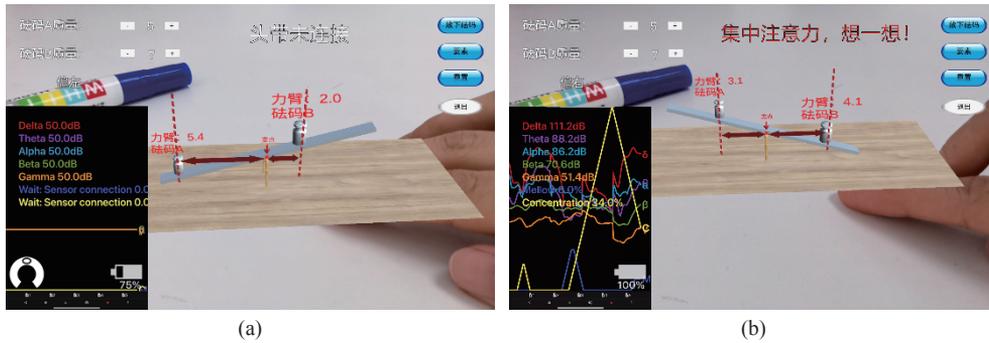


图 2 集成了脑电注意力反馈的AR 科学探究工具截图界面

(三) 样本 T 检验

本实验招募了北京某小学六年级、10~13 岁的 41 名学生为被试, 其中, 实验组 21 人, 对照组 20 人。独立样本 T 检验结果显示, 实验组和对照组学生科学探究前的学业成绩无显著差异(见表三)。

表三 对照组和实验组学生学业成绩前测
独立样本 T 检验

	样本量	前测	T 值
实验组	21	51.86(8.2176)	1.19
对照组	20	48.70(8.7305)	

注: ***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.010$, *表示 $p < 0.050$ 。

(四) 实验流程

在正式开始科学探究前, 研究者向实验组和对照组的介绍实验内容和 AR 工具使用注意事项, 并完成知识前测和科学探究参与自我效能问卷填写。实验开始后实验组采用基于脑机接口的 AR 科学探究工具, 对照组使用没有脑机接口的常规 AR 科学探究工具。两种工具除有无注意力提示外, 呈现的知识内容和交互方式等相同。两组学生在 AR 环境完成主题为“杠杆原理”的科学探究任务(见图 3)。实验结束后本研究完成知识后测及科学探究参与自我效能后测问卷、心流体验问卷和认知负荷问卷, 最后随机选择实验组的四名同学开展访谈(见图 4)。

(五) 研究工具

本次实验的学业成绩测试题源于教材课后试

题。问卷涉及学习者科学探究参与自我效能、心流体验评估和认知负荷。科学探究参与问卷(Cronbach's $\alpha = 0.89$)来自麦吉尔学习者探究参与自我效能问卷(Ibrahim et al., 2016), 分为分析和解释数据(Cronbach's $\alpha = 0.71$)、实施调查(Cronbach's $\alpha = 0.81$)、知识应用(Cronbach's $\alpha = 0.72$)、定义问题(Cronbach's $\alpha = 0.73$)和概念性知识理解(Cronbach's $\alpha = 0.78$)五个维度, 共 17 题, 采用李克特 5 点量表。心流体验问卷来自杰克逊心流问卷(Jackson et al., 2010), 共 10 题, 也采用李克特 5 点量表(Cronbach's $\alpha = 0.84$)。认知负荷问卷(Cronbach's $\alpha = 0.91$)来自黄国祯等(Hwang et al., 2013)的认知负荷问卷, 分心智负荷(Cronbach's $\alpha = 0.83$)和心智努力(Cronbach's $\alpha = 0.83$)两个维度, 共 8 题, 其中心智负荷表示被试对任务难度或任务挑战性的态度, 心智努力表示被试对任务呈现的格式及解说方式的态度。实验结束后, 研究者邀请 4 名学生开展半结构访谈。



图 3 基于脑机接口的AR 杠杆原理探究活动

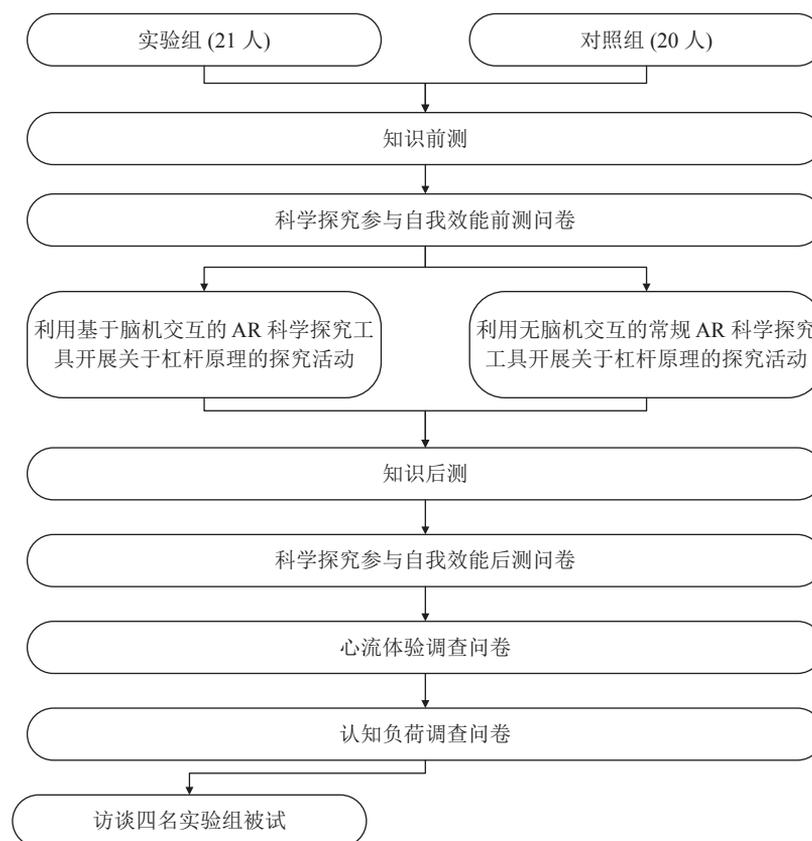


图4 实验流程

四、研究结果

(一) 实验组学生学业成绩提升明显

研究者分别对实验组和对照组的学业成绩进行配对样本 T 检验, 结果显示(见表四), 实验组和对照组的学业成绩在完成科学探究后显著提升($p < 0.001$)。以前测学业成绩得分为协变量, 对实验组和对照组的后测学业成绩进行协方差分析的结果表明, 在满足方差齐性的情况下($p = 0.371$), 实验组后测成绩在 0.05 水平上显著高于对照组, 因此实验组成绩提升更明显。

表四 对照组和实验组学生学业成绩横纵比较

	样本量	前测	后测	T 值	F 值
实验组	21	51.86(8.2176)	79.19(6.5086)	-11.251***	4.897*
对照组	20	48.70(8.7305)	73.80(9.1226)	-8.732***	

注: ***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.010$, *表示 $p < 0.050$ 。

(二) 实验组自我效能感更强

研究者分别对两组学生的科学探究参与自我效能得分进行配对样本 T 检验, 结果显示(见表五),

他们的探究参与自我效能在 0.001 水平上均有显著提升。再以自我效能的前测得分为协变量, 对两组自我效能后测得分进行协方差分析的结果表明, 在满足方差齐性的情况下($p = 0.133$), 实验组自我效能的后测得分在 0.050 水平上显著高于对照组。这表明实验组学生的科学探究参与自我效能感更强。

表五 对照组和实验组自我效能的横纵比较

	样本量	前测	后测	T 值	F 值
实验组	21	3.73(0.3742)	4.14(0.4466)	-4.171***	4.653*
对照组	20	3.69(0.5178)	3.95(0.3681)	-7.627***	

注: ***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.010$, *表示 $p < 0.050$ 。

研究者将前测对应维度水平作为协变量, 对五个维度分别展开协方差分析的结果见表六。实施调查维度满足方差齐性($p = 0.405$)在 0.050 水平上存在显著差异, 实验组其他维度的成绩普遍高于对照组。

表六 两组自我效能五维度得分对比

维度	样本量	组别	前测	后测	F
分析和解释数据	21	实验组	3.58(0.5553)	4.30(0.4976)	3.491
	20	对照组	3.64(0.6255)	4.10(0.5026)	
实施调查	21	实验组	3.71(0.5087)	4.30(0.5954)	5.756*
	20	对照组	3.77(0.6675)	4.00(0.5407)	
知识应用	21	实验组	3.63(0.3637)	4.02(0.5424)	0.290
	20	对照组	3.62(0.5104)	3.93(0.5682)	
定义问题	21	实验组	3.92(0.4958)	4.13(0.5340)	1.179
	20	对照组	3.83(0.4873)	3.96(0.4158)	
概念性知识理解	21	实验组	3.79(0.6789)	3.90(0.7160)	0.082
	20	对照组	3.57(0.7017)	3.68(0.1313)	

注:***表示 $p<0.001$,**表示 $p<0.010$,*表示 $p<0.050$.

(三) 实验组科学探究沉浸度更高

对心流体验进行独立样本 T 检验结果表明, 两组学生的心流体验存在显著差异(见表七), 实验组学生的心流体验得分在 $p=0.001$ 的水平上显著高于对照组, 说明他们的科学探究过程的沉浸度更高。

表七 两组心流体验得分对比

	样本量	心流体验	F	t
实验组	21	4.58(0.2827)	0.021	9.044***
对照组	20	3.78(0.2845)		

注:***表示 $p<0.001$,**表示 $p<0.010$,*表示 $p<0.050$.

(四) 实验组和对照组的认知负荷无显著差异

对认知负荷及其两个子维度心智负荷和心智努力分别进行独立样本 T 检验(见表八)的结果表明, 两组学生的认知负荷不存在显著差异。其中, 心智负荷表示被试对任务难度或任务挑战性的态度, 心智努力表示被试对于任务呈现的格式及解说方式的态度, 两者仍没有显著差异。

表八 两组认知负荷及其子维度得分对比

	组别	样本量	后测	F	t
认知负荷	实验组	21	2.10(0.7862)	0.560	0.005
	对照组	20	2.10(0.8835)		
心智负荷	实验组	21	1.91(0.7227)	0.092	-0.200
	对照组	20	1.96(0.7416)		
心智努力	实验组	21	2.41(0.9363)	1.416	0.242
	对照组	20	2.33(1.1598)		

注:***表示 $p<0.001$,**表示 $p<0.010$,*表示 $p<0.050$.

(五) 访谈结果

对第一个问题“你在本次活动中学到了什么?”有学生回答“今天学习了杠杆原理后我觉得更会玩跷跷板了”“书上阿基米德说给我一个支点我能翘起地球, 今天学完后我更明白他为什么这么说了”。学生表示能大致说出观察到的现象和所学到的知识, 对教学活动和教学内容有较深刻的理解。

对于第二个问题“你觉得使用这种方式学习有利于科学探究吗?”有学生回答:“老师以前上课时拿旧的天平做实验演示, 今天使用平板电脑学习很先进, 可以自己动手做(实验), 比那个(天平)方便, 也好玩。”“这种(学习)方式让我可以亲手做实验, 生动形象。”学生认为 AR 能激发他们对科学探究的兴趣, 原来做杠杆原理实验会因为天平和砝码存在磨损和腐蚀等情况, 实验仪器精准度存在问题, 使用 AR 可以避免这些问题, 也让原本肉眼不可见的信息(如力臂)清晰显示。

对于第三个问题“你觉得使用此软件有助于提升学习专注度吗?”有学生回答:“这个软件能鼓励我集中精力, 增强继续探究的动力。”学生认为基于脑机接口的 AR 科学探究工具可以提升其科学探究信心, 注意力反馈系统在注意力不集中时加以提醒, 起到良好的监督作用, 有助于保持良好的心理状态持续探究。对于第四个问题“你本次学习中有感觉困难的时候吗?”有学生回答:“我使用这个软件时总忍不住去看提醒的字。”“有时做实验时这个(提醒文字)总是出现后随即消失。”学生认为脑电波反馈提示让界面变得更复杂, 对其判断造成干扰, 让其无法“自由”探究。综合学生对第三、四个问题的回答可以得出, 两组学生的认知负荷无显著差异的原因: 一方面反馈系统让学生在注意力不集中时及时发现并调整, 另一方面反馈界面可能干扰学生。

总体而言, 基于脑机接口的 AR 科学探究工具促进了学生理解所学知识, 提升了学生参与科学探究的信心, 脑电信号的反馈内容起到了监督作用, 对提升学生专注度有积极效果, 可提升科学探究的效率, 然而注意力反馈方式还有待优化。

五、结论与讨论

本研究聚焦学生在 AR 环境中开展科学探究

的学习过程,通过两轮实验探索了基于脑机接口的 AR 科学探究工具在科学课堂的应用。本研究通过预实验验证了脑电注意力算法的有效性;准实验环节设计并开发了基于脑机接口的 AR 科学探究工具,以杠杆原理为知识点,针对小学生开展实证研究,发现该工具有助于提升学生的科学探究成绩,提高学生科学探究参与自我效能和达成心流状态,实验结果可为未来虚实融合学习环境的学习监测系统构建提供参考。

预实验结果显示,学生使用软件的心流体验与注意力算法值显著正相关,即注意力算法值可以反映学生的心流状态,而心流状态能反映个体注意力的真实水平,因此该注意力算法可真实反映个体的注意力水平。

在准实验中,通过对实验组和对照组学生的科学探究成绩进行协方差分析发现,实验组的科学探究成绩显著高于对照组,说明基于脑机接口的 AR 科学探究工具能显著提升学生的科学探究成绩,对学生的科学学习有积极作用。这一结论与此前研究者的观点相似。有学者研究在线同步教学中注意力反馈和监督报警机制对学生成绩的影响时发现,注意力与报警次数和学习成绩之间有较强的相关性,且持续注意和注意报警频次对学习成绩有较强的预测作用(Chen & Wang, 2018)。穆里斯(Muris, 2006)对儿童的注意力控制和学习成绩之间的关系开展了全球调查,发现两者呈正相关。学生访谈中也提到,基于脑机接口的 AR 科学探究工具加深了他们对学习概念的印象及对知识的理解,这也是成绩提高的原因所在。

通过对两组学生科学探究参与自我效能的协方差分析,本研究发现使用基于脑机接口的 AR 科学探究工具的学生科学探究参与自我效能比使用普通的 AR 科学探究工具的学生有更显著的提升,说明本研究设计与开发的探究工具有利于提高学生参与科学探究的信心。访谈中有学生表示其注意力不足时,基于注意力的反馈鼓励其继续探究,可见基于脑机接口的 AR 科学探究工具能及时发现问题并予以提醒,有利于学生探究。

为考察基于脑电信号的注意反馈系统的有效性,本研究在准实验中测量了学生的心流体验,作

为学生使用基于脑机接口的 AR 科学探究工具进行科学探究时注意力水平的参考。结果显示,实验组的心流体验显著高于对照组。由于基于脑机接口的 AR 科学探究工具融入注意力反馈系统,学习者使用该系统时会根据收到的脑电信号反馈自我调节注意力,有助于他们保持高水平注意力,达成心流状态。访谈结果显示,学生对本次实验活动表现出较大兴趣,学习过程投入度较高。同时,基于脑机接口的 AR 科学探究工具便于操作,让学生能自然地进入探究式学习情境,专注探究过程。

两组被试的认知负荷没有显著差异,一定程度上说明基于脑机接口的 AR 科学探究工具的文字提示没有对学生造成过多干扰。学界对 AR 学习环境的学生认知负荷一直有争议,有研究证实通过使用 AR 与虚拟对象交互可以有效降低认知负荷(杨广军, 2006),也有部分研究者从 AR 软件设计角度关注如何降低学生认知负荷(Yim & Seong, 2010)。与此相反,有研究者认为 AR 给学生造成了学习材料的负载和较重的学习负担(Akçayır et al., 2016),学生可能会因为过多的学习材料、难以理解其内容(Kılıç, 2007)和需要学习操作方式(Bujak et al., 2013; Lai et al., 2019; Wei et al., 2015)而受到干扰。

本研究依据基于脑机接口采集的注意力信号值,在平板电脑的 AR 界面使用文字反馈,在一定程度上加重了学生操作软件的认知负荷,尤其是对第一次接触 AR 的学生来说,熟悉 AR 的操作方式本身就是挑战,因此他们既要熟悉 AR 操作方式,又要关注知识学习。基于注意力的文字反馈只在学生注意力水平较低时才会出现,对知识学习困难导致注意力不集中的学生而言,可能因频繁出现的提醒,加重了他们的心智负荷。

[参考文献]

- [1] Akçayır, M., Akçayır, G., Pektaş, H. M., & Ocak, M. A. (2016). Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories[J]. *Computers in Human Behavior*, 57: 334-342.
- [2] Arici, F., Yildirim, P., Caliklar, Ş., & Yilmaz, R. M. (2019). Research trends in the use of augmented reality in science education: Content and bibliometric mapping analysis[J]. *Computers & Education*, 142: 103647.
- [3] Boboc, R. G., Chiriac, R.-L., & Antonya, C. (2021). How aug-

mented reality could improve the student's attraction to learn mechanisms[J]. *Electronics*, 10(2): 175.

[4] Bos, A. S., Herpich, F., Kuhn, I., Guarese, R. L. M., Tarouco, L. M. R., Zaro, M. A., Pizzato, M., & Wives, L. (2019). Educational technology and its contributions in students' focus and attention regarding augmented reality environments and the use of sensors[J]. *Journal of Educational Computing Research*, 57(7): 1832-1848.

[5] Bujak, K. R., Radu, I., Catrambone, R., Macintyre, B., Zheng, R., & Golubski, G. (2013). A psychological perspective on augmented reality in the mathematics classroom[J]. *Computers & Education*, 68: 536-544.

[6] 蔡林, 贾绪计(2020). 学业自我效能感与在线学习投入的关系: 学习动机和心流体验的链式中介作用 [J]. *心理与行为研究*, 18 (6): 805-811.

[7] Cai, S., Liu, C. H., Wang, T., Liu, E. R., & Liang, J. C. (2021a). Effects of learning physics using Augmented Reality on students' self-efficacy and conceptions of learning[J]. *British Journal of Educational Technology*, 52(1): 235-251.

[8] Cai, S., Niu, X. J., Wen, Y. X., & Li, J. X. (2021b). Interaction analysis of teachers and students in inquiry class learning based on augmented reality by iFIAS and LSA[J]. *Interactive Learning Environments*. 1-17.

[9] 蔡苏, 王沛文, 杨阳, 刘恩睿(2016). 增强现实(AR)技术的教育应用综述 [J]. *远程教育杂志*, (5): 27-40.

[10] Chang, S.-C., & Hwang, G.-J. (2018). Impacts of an augmented reality-based flipped learning guiding approach on students' scientific project performance and perceptions[J]. *Computers & Education*, 125: 226-239.

[11] Chen, C. C., Chen, H. R., & Wang, T. Y. (2022). Creative situated Augmented Reality learning for astronomy curricula[J]. *Educational Technology & Society*, 25(2): 148-162.

[12] Chen, C. M., & Wang, J. Y. (2018). Effects of online synchronous instruction with an attention monitoring and alarm mechanism on sustained attention and learning performance[J]. *Interactive Learning Environments*, 26(4): 427-443.

[13] Chiang, T. H. C., Yang, S. J. H., & Hwang, G.-J. (2014). Students' online interactive patterns in augmented reality-based inquiry activities[J]. *Computers & Education*, 78: 97-108.

[14] Chu, H.C., Chen, J.M., Hwang, G.J., & Chen, T.W. (2019). Effects of formative assessment in an Augmented Reality approach to conducting ubiquitous learning activities for architecture courses[J]. *Universal Access in the Information Society*, 18(2): 221-230.

[15] Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The psychology of optimal experience*[M]. New York: Harper & Row.

[16] 代宝, 刘业政(2015). 基于期望确认模型、社会临场感和心流体验的微信用户持续使用意愿研究 [J]. *现代情报*, 35 (3): 19-23.

[17] Fidan, M., & Tuncel, M. (2019). Integrating augmented reality into problem based learning: The effects on learning achievement and attitude in physics education[J]. *Computers & Education*, 142: 103635.

[18] 顾宣宣 (2018). 基于脑电信号的处理与分析及其在元认知

科学教育中的研究 [D]. 上海: 上海师范大学.

[19] Herrera-Arcos, G., Tamez-Duque, J., Acosta-De-Anda, E. Y., Kwan-Loo, K., De-Alba, M., Tamez-Duque, U., Contreras-Vidal, J. L., & Soto, R. (2017). Modulation of neural activity during guided viewing of visual art[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11: 581.

[20] 胡航, 李雅馨, 曹一凡, 赵秋华, 郎启娥(2019). 脑机交互促进学习有效发生的路径及实验研究——基于在线学习系统中的注意力干预分析 [J]. *远程教育杂志*, 37 (4): 54-63.

[21] Hwang, G.J., Yang, L.H., & Wang, S.Y. (2013). A concept map-embedded educational computer game for improving students' learning performance in natural science courses[J]. *Computers & Education*, 69: 121-130.

[22] 教育部(2019). 教育部关于加强和改进中小学实验教学的意见.[EB/OL]. [2019-11-22]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A06/s3321/201911/t20191128_409958.html.

[23] Ibáñez, M. B., Di Serio, Á., Villarán, D., & Delgado K.C. (2014). Experimenting with electromagnetism using augmented reality: Impact on flow student experience and educational effectiveness[J]. *Computers & Education*, 71: 1-13.

[24] Ibrahim, A., Aulls, M. W., & Shore, B. M. (2016). Development, validation, and factorial comparison of the McGill self-efficacy of learners for inquiry engagement (McSELFIE) survey in natural science disciplines[J]. *International Journal of Science Education*, 38(16): 2450-2476.

[25] Jackson, S. A., Eklund, R. C., & Martin, A. J. (2010). *The flow manual: The manual for the flow scales*[M]. Mind Garden, Incorporated.

[26] Kerawalla, L., Luckin, R., Seljeflot, S., & Woolard, A. (2006). "Making it real": Exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science[J]. *Virtual Reality*, 10(3-4): 163-174.

[27] Kılıç, E. (2007). The bottle neck in multimedia: Cognitive overload[J]. *Gazi University Journal of Gazi Educational Faculty*, 27(2): 1-24.

[28] Lai, A. F., Chen, C. H., & Lee, G. Y. (2019). An augmented reality - based learning approach to enhancing students' science reading performances from the perspective of the cognitive load theory[J]. *British Journal of Educational Technology*, 50(1): 232-247.

[29] Lin, F.R., & Kao, C.M. (2018). Mental effort detection using EEG data in E-learning contexts[J]. *Computers & Education*, 122: 63-79.

[30] Mehreen, A., Anwar, S. M., Haseeb, M., Majid, M., & Ullah, M. O. (2019). A hybrid scheme for drowsiness detection using wearable sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 19(13): 5119-5126.

[31] Muris, P. (2006). Relation of attention control and school performance in normal children[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 102(1): 78-80.

[32] 钱长炎, 陈桢科(2012). 多元智能在高中实验探究教学中的应用 [J]. *技术物理教学*, 20 (2): 38-40.

[33] Rebolledo-Mendez, G., Dunwell, I., Martínez-Mirón, E. A., Vargas-Cerdán, M. D., De Freitas, S., Liarokapis, F., & García-Gaona, A.

- R. (2009). Assessing neurosky's usability to detect attention levels in an assessment exercise[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 149-158.
- [34] 任岩, 安涛, 领荣(2019). 脑机接口技术教育应用: 现状、趋势与挑战 [J]. 现代远程教育, (2): 71-78.
- [35] Shin, S., Noh, T., & Lee, J.(2020). An exploration of learning environment for promoting conceptual understanding, immersion and situational interest in small group learning using Augmented Reality[J]. Journal of the Korean Chemical Society-Daehan Hwahak Hoe Jee, 64(6): 360-370.
- [36] 宋燕, 曹蕾(2021). AR 在小学科学实验教学中的应用——以“我们来养蚕”为例 [J]. 中小学信息技术教育, 1: 70-72.
- [37] 苏珊·格林菲尔德(1998). 人脑之谜(杨雄里等译) [M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- [38] 谢文澜, 徐宪斌, 孙雨圻, 王玉正(2022). 学前专业师范生学习心流对创造力倾向的影响: 学业自我效能的中介作用 [J]. 陕西学前师范学院学报, 38 (3): 105-113.
- [39] Wei, X., Weng, D., Liu, Y., & Wang, Y.(2015). Teaching based on augmented reality for a technical creative design course[J]. Computers & Education, 81: 221-234.
- [40] Wilson, K., & Korn, J. H.(2007). Attention during lectures: Beyond ten minutes[J]. Teaching of Psychology, 34(2): 85-89.
- [41] 杨广军(2006). 从脑科学理论看高中物理教材设计 [J]. 当代教育论坛, 20: 99-100.
- [42] 杨晓哲 (2018). 虚拟现实和脑电波反馈系统对于创造力表现影响的实证研究 [D]. 上海: 华东师范大学.
- [43] Yim, H. B., & Seong, P. H.(2010). Heuristic guidelines and experimental evaluation of effective augmented-reality based instructions for maintenance in nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering & Design, 240(12): 4096-4102.
- [44] Yoon, S. A., Anderson, E., Park, M., Elinich, K., & Lin, J.(2018). How augmented reality, textual, and collaborative scaffolds work synergistically to improve learning in a science museum[J]. Research in Science & Technological Education, 36(3): 261-281.
- [45] 张四方, 江家发(2018). 科学教育视域下增强现实技术教学应用的研究与展望 [J]. 电化教育研究, 39 (7): 64-69+90.
- [46] 张旺, 张万春, 袁宝华(2000). 基于脑的教育——当今脑科学给教育的启示 [J]. 教育探索, (5): 35-37.
- [47] 张祥(2019). 例谈生物学核心素养中“科学探究”素养的培育 [J]. 教学与管理, (27): 115-117.

(编辑: 李学书)

Application of Augmented Reality Inquiry Tool Based on Lightweight Brain-Computer Interface in Primary School Science Classroom

CAI Su, LI Jiangxu, LIU Changhao, ZHOU Haitao & LIU Zifeng

(Faculty of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To improve the inattention problem of elementary school students and to monitor the Augmented Reality(AR) scientific inquiry process, a Brain Computer Interface(BCI)-based AR scientific inquiry tool was developed and a quasi-experimental study was conducted under the guidance of the Flow Theory. The study participants were 41 elementary school students, divided into two groups to participate in AR scientific inquiry activities based on BCI or no-BCI. The results of the study show that the BCI-based AR scientific inquiry tool has a positive impact on students' scientific inquiry and promotes the improvement of learners' self-efficacy in scientific inquiry participation, while there is no significant impact on cognitive load. The interview results indicate that students have a positive attitude toward the BCI-based AR scientific inquiry tool. The results of this study provide a reference for the construction of future learning monitoring systems for virtual-real integrated learning environments.

Key words: Augmented Reality; brain computer interface; scientific inquiry; Flow Theory