

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_ 编号 \_\_\_\_\_



云南师范大学  
YUNNAN NORMAL UNIVERSITY

## 硕士研究生学位论文

论文题目：元宇宙视域下基于 EEG 信号的学生学习投入的实证研究

英文题目：An Empirical Study on Student Learning Engagement Based on EEG Signals from the Metaverse Perspective

学 院 \_\_\_\_\_ 信息学院

专业名称 \_\_\_\_\_ 教育技术学（理学）

研究方向 \_\_\_\_\_ 智慧教学

研究生姓名 \_\_\_\_\_ 赵泽彦 \_\_\_\_\_ 学号 \_\_\_\_\_ 2123100035

导 师 姓 名 \_\_\_\_\_ 赵 波 \_\_\_\_\_ 职 称 \_\_\_\_\_ 教授

2024 年 5 月 22 日

## 摘要

通过对元宇宙在教育应用中的研究现状以及研究问题进行了分析和整理，发现元宇宙赋能教育虽然是当下的研究热点，但鲜有人关注元宇宙在课堂实践中的有效性，以及不同教学设计在元宇宙学习空间中是否对学生学习投入产生影响。为探究教育元宇宙是否对课堂教学的应用具有有效性，以及在元宇宙沉浸式的学习环境中，教育元宇宙在课程教学中如何设计与实施，才能使元宇宙的教育功能发挥到极致。

本研究以风力发电教学为例，设计了基于风能利用系数的元宇宙学习空间，满足学生“做中学”的现实诉求，实现了以学为本的教学理念，深入探究元宇宙虚拟学习空间对学生学习投入的影响机制。通过 3DS MAX 建模软件、Unity 3D 引擎软件等开发了元宇宙学习空间，促进了信息技术与学科的深度融合。

在本研究中，对四组参与元宇宙教学活动的大学生开展实证研究，借助脑机接口设备动态追踪学习过程的脑区激活情况，并结合心率监测设备和认知负荷量表，跟踪和监测学生在学习过程中的注意力表现、心流体验、学业表现以及学习效果。从认知神经科学的角度设计了相关的实证研究：（1）通过元宇宙教学组与传统 PPT 教学组对学生在脑区激活程度、认知负荷、学习效果以及心流体验方面进行对比，探究元宇宙是否对学生的投入产生影响；（2）根据（1）的实验结论，再设计先验知识是否能作为元宇宙学习空间中的学习支架对学习者的脑区激活程度、认知负荷以及学习投入产生影响。

研究表明：（1）相较于传统 PPT 组，元宇宙教学组能激活更多与认知相关的脑区，在学习过程中心率波动幅度小，注意力更集中，根据认知量表的反馈，元宇宙教学组能获得较高相关认知负荷，证实了元宇宙在教学中对学生的投入具有促进作用。（2）相较于缺失先验知识环节的元宇宙对照组，教学设计中包含先验知识环节的元宇宙实验组能激活了更多与认知相关的脑区，在学习过程中注意力更集中，且获得较高相关认知负荷。证实了先验知识在元宇宙学习空间中具有重要支架作用，能够促进学习者深度信息加工和对知识的迁移、内化，同时也能增强学习者获得心流体验的程度。

**关键词：**元宇宙；EEG 信号；学习投入；心流体验；脑机接口

## Abstract

By analyzing and organizing the current research status and issues of the metaverse in educational applications, it is found that the application of the metaverse in education is a current research hotspot. But few people pay attention to the effectiveness of the metaverse in classroom practice, and whether different teaching designs have an impact on student learning engagement in the metaverse learning space. To explore whether the educational metaverse is effective in the application of classroom teaching. And in the immersive learning environment of the metaverse, how to design and implement the educational metaverse in curriculum teaching in order to maximize the educational function of the metaverse.

The research takes wind power education as an example and designs a metaverse learning space based on wind energy utilization coefficient. Satisfying the practical demand of students for "learning by doing", implementing a student-centered teaching philosophy, and exploring the impact mechanism of the metaverse on student learning engagement. The development of metaverse learning spaces through 3DS MAX modeling software, Unity 3D engine software, and other software has promoted the deep integration of information technology and disciplines.

An empirical research was conducted on some college students from four groups participating in metaverse teaching activities. By utilizing brain computer interface devices to dynamically track the activation of their brain regions during the learning process, and combining heart rate monitoring devices and cognitive load scales, we can track and monitor their attention performance, flow experience, academic performance, and learning outcomes during the learning process. A relevant empirical research was designed from the perspective of cognitive neuroscience: (1) By comparing the activation level, cognitive load, learning effectiveness, and flow experience of students in brain regions between the metaverse teaching group and the traditional PPT teaching group, we explored whether the metaverse has an impact on students' learning engagement; (2) Based on the experimental conclusion of (1), whether prior knowledge can serve as a learning scaffold in the metaverse learning

space has an impact on the activation level, cognitive load, and learning engagement of learners in brain regions.

The research results indicate that: (1) compared to the traditional PPT group, the metaverse group can activate more cognitive related brain regions, with smaller fluctuations in centrality and more focused attention during the learning process. According to feedback from cognitive scales, the metaverse group can obtain higher cognitive load, confirming that the metaverse has a promoting effect on student learning in teaching. (2) Compared to the metaverse control group without prior knowledge, the metaverse experimental group with prior knowledge included in the instructional design was able to activate more cognitive related brain regions. This group of students is more focused during the learning process and receives higher related cognitive load. It has been confirmed that prior knowledge plays an important supporting role in the learning space of the metaverse. It can promote deep information processing and knowledge transfer and internalization for learners. At the same time, it can also enhance the level of flow experience for learners.

**Keywords:** Metaverse; EEG signal; Learning engagement; Heart flow experience; Brain computer interface;

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论.....                 | 1  |
| 1.1 研究背景.....                 | 1  |
| 1.1.1 科技赋能教育对教与学的新诉求.....     | 1  |
| 1.1.2 信息技术对学生学习投入的影响.....     | 1  |
| 1.1.3 认知神经科学在教育中的应用.....      | 2  |
| 1.2 研究现状与主要问题.....            | 2  |
| 1.2.1 元宇宙应用在教育中的国内外研究现状 ..... | 2  |
| 1.2.2 学习投入的国内外研究现状.....       | 6  |
| 1.2.3 脑机接口在教育中的应用.....        | 9  |
| 1.2.4 主要的问题及启迪.....           | 11 |
| 1.2.5 课题研究问题.....             | 12 |
| 1.3 研究目标和研究意义.....            | 12 |
| 1.3.1 研究目标.....               | 12 |
| 1.3.2 研究意义.....               | 13 |
| 1.4 研究内容和研究方法.....            | 13 |
| 1.4.1 研究内容.....               | 13 |
| 1.4.2 研究方法.....               | 14 |
| 1.5 研究思路和创新点.....             | 15 |
| 1.5.1 研究思路.....               | 15 |
| 1.5.2 创新点.....                | 17 |
| 第 2 章 相关概念界定与理论基础 .....       | 18 |
| 2.1 概念界定与辨析.....              | 18 |
| 2.1.1 元宇宙.....                | 18 |
| 2.1.2 学习投入.....               | 19 |
| 2.1.3 脑机接口.....               | 20 |
| 2.1.4 脑电波.....                | 21 |
| 2.1.5 心流体验.....               | 22 |
| 2.2 理论基础.....                 | 23 |
| 2.2.1 具身认知理论.....             | 23 |
| 2.2.2 认知负荷理论.....             | 23 |
| 2.2.3 分布式认知理论.....            | 25 |
| 2.2.4 建构主义学习理论.....           | 25 |
| 2.2.5 戴尔金字塔理论.....            | 25 |
| 2.2.6 教育目标分类理论.....           | 26 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 2.3 本章小结.....                         | 27 |
| 第 3 章 元宇宙学习空间的开发 .....                | 28 |
| 3.1 面向风力发电的元宇宙学习空间的设计 .....           | 28 |
| 3.2 面向风力发电的元宇宙学习空间的开发流程 .....         | 31 |
| 3.2.1 3DS MAX 软件简介 .....              | 32 |
| 3.2.2 Unity 3D 软件简介 .....             | 34 |
| 3.2.3 Oculus Quest2 VR 设备简介 .....     | 35 |
| 3.3 风力发电元宇宙学习空间的设计及关键技术 .....         | 36 |
| 3.3.1 风力发电元宇宙学习空间的场景设计及关键技术 .....     | 36 |
| 3.3.2 风力发电元宇宙学习空间中场景漫游的关键技术 .....     | 39 |
| 3.3.3 风力发电元宇宙学习空间中人机交互的关键技术 .....     | 40 |
| 3.4 本章小结.....                         | 42 |
| 第 4 章 风力发电元宇宙学习空间多模态课堂的实证研究 .....     | 43 |
| 4.1 基于风力发电元宇宙学习空间的多模态课堂的前端分析 .....    | 43 |
| 4.1.1 教学内容分析.....                     | 43 |
| 4.1.2 教学对象分析.....                     | 44 |
| 4.1.3 教学环境分析.....                     | 46 |
| 4.1.4 教学现状分析.....                     | 46 |
| 4.2 基于风力发电元宇宙学习空间的教学实验设计 .....        | 50 |
| 4.3 基于风力发电元宇宙学习空间的教学实施 .....          | 52 |
| 4.4 本章小结.....                         | 56 |
| 第 5 章 基于风力发电元宇宙学习空间多模态课堂教学的效果分析 ..... | 57 |
| 5.1 基于风力发电元宇宙学习空间多模态课堂教学的评价模型设计 ..... | 57 |
| 5.2 基于风力发电元宇宙学习空间的多模态课堂教学的评价工具 .....  | 58 |
| 5.2.1 基于 TGAM 模块的动态 EEG 脑波监测 .....    | 58 |
| 5.2.2 基于 MKB0805 模块的动态心率血压监测 .....    | 60 |
| 5.2.3 基于认知负荷理论的认知测评.....              | 62 |
| 5.3 基于风力发电元宇宙学习空间的多模态课堂教学的评价分析 .....  | 63 |
| 5.3.1 基于 TGAM 模块的动态脑波监测的评价分析.....     | 63 |
| 5.3.2 基于 MKB0805 模块的动态心率监测的评价分析 ..... | 66 |
| 5.3.3 基于认知负荷理论的评价分析.....              | 67 |
| 5.4 本章小结.....                         | 72 |
| 第 6 章 结论与展望 .....                     | 74 |
| 6.1 研究结论.....                         | 74 |
| 6.2 研究建议.....                         | 76 |
| 6.3 研究展望.....                         | 77 |
| 参考文献.....                             | 79 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 附录 A 元宇宙赋能教育问卷调查..... | 88 |
| 附录 B 认知负荷测评量表.....    | 90 |

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 科技赋能教育对教与学的新诉求

元宇宙是通过虚拟现实技术(VR)/增强现实技术(AR)/混合现实技术(MR)等数字技术搭建的虚拟世界。元宇宙对教育创新有着丰富的潜力,它是数字时代的产物,是通过视、听、触等多通道感知,使学习者沉浸到虚拟世界并真正实现人机交互的一种技术,使用户能获得身临其境的奇妙体验。元宇宙具有沉浸性、交互性、想象性和多感知性等特征。为服务国家重大战略,促进VR技术的发展和应用,我国印发《“十四五”特殊教育发展提升行动计划的通知》指出,应充分应用互联网、虚拟现实以及人工智能等新技术,推进智慧校园、智慧课堂建设<sup>[1]</sup>。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》指出,虚拟现实技术是国家重要前沿技术之一<sup>[2]</sup>,充分肯定了虚拟现实技术在未来经济发展和教育创新中的发展前景。2016年的《地平线报告(高等教育版)》提出,虚拟现实VR技术将作为旨在解决学生深度学习的问题的关键技术<sup>[3]</sup>;2019年《地平线报告(高等教育版)》提出混合现实MR,并为VR和AR技术与教育的进一步融合发展奠定基础<sup>[4]</sup>,同时也为元宇宙赋能教育提供了发展的机遇和平台。

从国家宏观层面,可以看出,信息技术和教育的协同发展是目前关注的焦点;课堂教学是科技赋能教育、创新运用最重要的环节;运用虚拟现实技术革新传统课堂的教学方式,通过信息技术优化学生的学习方式,从而培养学生高阶思维、创新思维的养成,是实现学生个性化学习、终身教育的国家战略。

#### 1.1.2 信息技术对学生学习投入的影响

信息技术辅助课堂,有效改变了学生对知识建构的结构和方式,从传统教学媒体,如教科书、黑板、模型、标本等,发展至现代教学媒体,如幻灯片、

电视、电影等。教学媒介升级的同时，也提高了课堂教学中知识传递的效率，且能更好地吸引学生注意力，有利于学生对知识框架的整体把握<sup>[5]</sup>。

传统教学中，教学内容主要以教材为中心展开，教师通常处于课堂教学的中心地位，较少关注学生的课堂行为；而现代教学，倡导以学生为主体，教师起主导作用，以课堂为中心植入新的教学方法，如小组学习、探究学习、项目学习等，把课堂还给学生，真正实现以学为本的教学理念。调查发现，信息技术与教育的协同发展对学生的认知情绪、认知过程等具有良好的辅助作用<sup>[6]</sup>，另一方面，信息技术辅助教学设计能有效提高学生的学习投入<sup>[7]</sup>。综上，围绕以学生为主体的教学设计，应强化教师的主导地位，同时对学生学习起到监督和指导作用，才能提高学习积极性，激发学生主动增加学习投入。元宇宙创造了沉浸式的学习环境，能为学习者提供接近真实的实践经验，随着信息技术的不断发展，元宇宙将更好的走进课堂，赋能教育创新发展。

### 1.1.3 认知神经科学在教育中的应用

认知神经科学是一门融合了心理学、认知科学、脑科学等领域的新兴学科，围绕行为、认知、大脑三个角度来探究认知活动的大脑加工机制。随着认知神经科学的不断发展，以及脑机接口等产品的进一步升级，认知神经科学也逐渐应用于教育领域，可以研究学生的认知活动以提高学习效率，以及了解学生的思维和记忆过程，有助于教师优化教学方案以及更好的进行教学设计，提高教学效果。

## 1.2 研究现状与主要问题

### 1.2.1 元宇宙应用在教育中的国内外研究现状

元宇宙并不是一个新事物，是VR、AR、MR、XR、区块链、云计算以及数字孪生等先进技术的集合，是数字化和智能化发展到一定阶段出现的产物。纵观信息社会的发展历程，元宇宙的发展经历了以下五个阶段：

第一阶段，平面阶段——以桌面虚拟现实为代表的二维平面技术<sup>[8]</sup>。该阶段主要依托于PC端，主要通过鼠标、键盘以及空间传感球来实现导航，通过系统设计的三维环境实现人物的时空虚拟影像，通常运用于实验教学。由于它不需

要复杂的教学环境，也不需要昂贵的教学设备，且虚拟教学平台开发技术难度低。在 PC 端安装开发好的教学平台后就可使用其进行教学，安全方便、经济实惠，相较于传统教学模式，学生能获得更好的沉浸式学习体验，在一定程度上也实现了教育资源的均等化。

第二阶段，沉浸阶段——以沉浸式虚拟现实为代表的三维立体空间技术。该阶段通过计算机技术模拟出的三维虚拟空间，通过穿戴设备使学习者与虚拟造物实现自然交互，且能通过视觉、听觉、触觉等多重感官来使用户达到置身真实环境的沉浸式体验<sup>[9]</sup>，打破了时间和空间的限制。罗斑和冷伟通过沉浸式虚拟现实技术实现了地质地貌的重建和虚拟地质考察，以及地球内部结构和演化数据的三维分析等<sup>[10]</sup>，将空间想象复杂的学科知识通过计算机建模实现三维仿真可视化。

第三阶段，多维阶段——以分布式虚拟现实和远程呈现为代表的跨时空技术。分布式虚拟现实技术是将多个用户通过 VR 和网络通讯技术连接在一起，同时置身于一个虚拟空间<sup>[11]</sup>，与虚拟对象进行协同交互，提供给多用户深度沉浸式体验。比如，风电场维护人员的培训、火电厂维护培训、铁路轨道交通的培训等，都需要多人协同操作。谢建华、马剑等<sup>[12]</sup>运用分布式虚拟现实技术就导弹模拟训练进行了设计，实现多用户协同工作，有效提高多用户虚拟环境支持下的技能训练效果。远程呈现（TelePresence）就是虚拟实在，能够使人实时地以远程的方式在某处出场<sup>[13]</sup>，且实现声像一致、眼神交流、同帧率、低延迟的一种技术，该技术能为未来的混合式教学提供了新的发展方向。英国索尔福德大学的一个研究小组基于视频重建技术设计了一套远程呈现实验系统 withyou<sup>[14]</sup>，该系统可以实现全方位 3D 全视角重建。

第四阶段，全数字阶段——以 VR、AR、MR、XR、5G、云计算、人工智能、物联网、数字孪生等技术构建教育数字信息流。随着大数据、云计算、人工智能、VR、AR、MR、XR 等技术的不断发展且深度融合。在教学活动中，由于人数众多、学情复杂且各年龄均有涉及，收集教学行为数据生成数字信息流成为了教育元宇宙发展的壁垒，而学习行为数据的收集与分析对于实现学生个性化学习的路径优化至关重要。因此，教学活动中教学行为数字化和智能化为教育元宇宙的到来奠定了坚实的基础。

第五阶段，智慧集成阶段——教育元宇宙的形成。教育元宇宙借助人工智能和交互界面实现虚拟与现实之间的深度融通，通过人机接口将学习行为进行

数字化表征,通过云计算技术对数据进行分析,通过人工智能技术对学习路径进行优化和个性化指导。人类大脑通过神经元的传导实现信息的交流和反馈,大脑的神经回路是复杂的,生理结构是分布式的<sup>[15]</sup>。因此人类的学习方式应该是并行且相互协作的<sup>[16]</sup>,通过脑机接口设备可以拓展人类的脑区功能。教育元宇宙借助脑机接口设备,并通过各种先进技术和创新应用,为学习者搭建了协作、智能的学习空间。

#### (1) 国外研究现状

在1992年出版的科幻小说《雪崩》,Neal Stephenson 写到“戴上耳机与目镜,就能以虚拟化身的方式进入虚幻空间,感受冰天雪地”,这被认为是元宇宙最初的解释<sup>[17]</sup>。1997年,Murray 在《The Hamlet on The Holodeck》书中指出,虚幻世界并不是对现实的牵强想象,而是可以实现的未来,“我们可以随意停止、启动或关闭虚幻世界,它看起来就像真实世界一样,你甚至可以感受正在燃烧的炉火、热腾腾的茶和可以触摸、交谈甚至亲吻的角色”<sup>[18]</sup>。

元宇宙被认为是一个与现实世界无缝衔接的虚拟世界,是由虚拟现实技术(VR)、增强现实技术(AR)、混合现实技术(MR)等多种智能技术融合而成的数字环境。至今几十年的时间,科技加速了媒体的多样化进程。目前头戴式显示器(HMD)、可交互的数据手套以及实时3D建模引擎操作等已经融入到了智慧生活的方方面面。这些技术放大了身体视、听、触等的感官能力,为模拟和想象提供了巨大的可能性<sup>[19]</sup>,让我们体验到所思所想即所看,万物皆可模拟。可视化的呈现将充斥在人类经验不足的领域、学科和日常生活的各个方面<sup>[20]</sup>。

由于元宇宙能将现实世界和虚拟世界无缝连接,通常用于飞行员在虚拟空间中模拟飞行,掌握旋转等操作步骤,以及仿真训练应对恶劣天气的飞行任务<sup>[21]</sup>。元宇宙也被用于医护人员的培训,通过将培训技能的场所由真实手术室转至虚拟现实中,进而为虚拟现实应用到外科医生评估、培训等更复杂的场景奠定了基础<sup>[22]</sup>。Radianti 在高等教育沉浸式虚拟现实应用的研究中确定了虚拟现实技术在教育中的18个应用领域,可以帮助学生提高学习效率,增强学习效果<sup>[23]</sup>。Butussi 等人对不同类型的虚拟现实设备在安全培训场景的实际应用进行了研究<sup>[24]</sup>。Makransky 等人运用虚拟现实技术来教授各种STEM相关学科的陈述性和概念性知识,结果表明VR技术能激发学习兴趣,给学生更好的临场体验<sup>[25]</sup>。Howard 等人通过虚拟现实培训方案对社会技能发展的元分析中,指出虚拟现实是激发

沟通和协作学习的软技能<sup>[26]</sup>，而这也是有意义学习的核心。英国华威大学的研究证实了 VR 在课堂教学中的价值，即能激发学生学习动机、促进知识内化等<sup>[27]</sup>。在三星公司的调查报告中发现，80%以上的教师认为沉浸式环境能帮助学生理解概念、促进合作、提高学习动机<sup>[28]</sup>。

元宇宙提供了一种解决方案，让远程学生有机会在类似学校的环境中作为虚拟学生进行实践和学习。元宇宙能够突破物理空间的局限，展现更为丰富的教育内容，尤其是受物理条件局限的大量试验性内容。例如行星、恒星的演变与形成、生物成长过程等，都可以通过元宇宙来实现，而且这种实现过程还可以让学生全程参与。此外，完全沉浸式的 VR 教室使学生能够获得真实的课堂体验，而不受疫情、学校关闭和地区限制的影响<sup>[29]</sup>。Aspiotis 将脑电图可穿戴设备、心电图（ECG）传感器与 VR 耳机相结合，在高空场景中开展研究<sup>[30]</sup>。Behnam 使用脑电图和 VR 设备评估精神疲劳，以防止建筑物坠落危险<sup>[31]</sup>。Suh Woong 通过分析后疫情时代以学习者为中心的元宇宙运用的案例，对小学生的学习情况进行分析，以确定这种虚拟环境与小学生的生活有紧密的联系，研究表明 95.5% 的小学生认为元宇宙与日常生活密切相关<sup>[32]</sup>。

## （2）国内研究现状

相较于国外，国内的虚拟现实技术发展稍晚一些。《2020-2021 年元宇宙发展研究报告》中指出“元宇宙是整合多种新技术而产生的新型虚实相融的互联网应用和社会形态”<sup>[33]</sup>。刘妍等人发现 VR 有助于学习者对抽象概念的深层次理解，有助于促进学习者增大学习投入<sup>[34]</sup>。北京师范大学蔡苏等人发现增强现实的交互手段给知识提供了新的呈现方式，知识将越来越具有交互性、情境性和流动性，能帮助学习主体在“身心脑”三个方面获得发展<sup>[35]</sup>。王树祎等人运用虚拟现实技术研究受试者面对灾害场景的应激反应，通过虚拟实验研究现实灾害场景中人的生理、心理及行为等特性，研究发现 VR 能创造完美的临场体验，诱发应激反应<sup>[36]</sup>。马婧等人通过多维传感系统对学生在虚拟现实环境中的学习投入综合模型进行研究，为虚拟现实学习环境的开发设计提供了理论与实践支持<sup>[37]</sup>。西南大学高楠等人通过沉浸式虚拟现实（IVR）对学习者的知识迁移效果及效率进行研究，结果表明 IVR 能够有效提升学习者在学习过程中的情感体验，包括自我效能感、学习满意度和学习动机<sup>[38]</sup>。曲阜师范大学的王浩等人通过虚拟现实技术引发学生共情的元分析表明，VR 技术在知识学习类和体验类的教学共情效果更好<sup>[39]</sup>。

综上所述，虚拟现实技术构建的沉浸式学习环境在教育运用中的研究结果

令人感到兴奋和激动，虚拟现实技术具有的想象性能够帮助学习者从宏观或微观的视角来观察事物的发展过程。具有的交互性特征能很大程度满足学习者的临场体验，打破时间和空间的限制，使学习者身临其境；具有的沉浸性则将现实世界隔离开，思维和感官完全融入到了虚拟世界，能有效激发学习兴趣，促使学习者主动参与学习活动，提高了课堂教学中知识传递的效率。

## 1.2.2 学习投入的国内外研究现状

学习投入在文献里有很多名词，如 *academic engagement*、*learning engagement*、*student engagement* 等。在新世纪英汉词典对“投入”的解释为“富有激情的全身心融入其中”；根据我国新华字典对“投入”的解释为“置身其中，专心致志地完成一件事情”。

### (1) 国外研究现状

关于学习投入相关概念的发展，在不同的时代和不同的学习背景下通常关注不同方面。美国教育心理学家 Tyler 于 1969 年，提出了“任务时间”的概念，认为学习投入是完成学习任务的时间，认为学习时间的投入是预测学习效果的主要方面<sup>[40]</sup>。Glen 基于 Tyler 的观点进行了大量实证研究，进一步完善学习投入的理论，Glen 认为学校的建筑与学生成绩和学习行为有着密切的联系，学生学习投入的程度是影响学习成效的重要因素，营造浓厚学习氛围的教学环境也是辅助学生增大学习投入的重要考量因素<sup>[41]</sup>。

Astin 等人提出并描述了一种基于学生参与的学生发展理论。学习投入应从行为和心理两个方面进行研究；学生学习投入的程度由投入时间和自身努力质量决定；研究表明学生投入的程度与学生学习效果成正相关<sup>[42]</sup>。Natriello 的主要研究对象是中学生，他认为学生投入是学生参与学校提供的教学活动的总和<sup>[43]</sup>。研究者认为学习投入是基于学生完成教育目标的框架下，学生为完成学习任务而付出的学习时间和精力投入等以及其他在有效的学习实践中付出的生理和心理的全部努力。

Chapman 研究了学生在认知过程中，身体和大脑的主动参与和思维的认知投入，认为学习投入与学生在在学习过程中的注意力关系密切，或者在小组学习中，学生积极主动分享学习资源和经验的反映。Patrick 认为学生学习投入与学校、学习情境、课堂、师生和生生之间的关系具有密切联系<sup>[44]</sup>。Coates 梳理了

相关文献，对学习投入的定义进行了整理，他认为学习投入是一种包含学术和其他非学术方面的学习经验的综合，包括主动合作学习、参与具有挑战性的学术活动、与学术人员交流心得体会、投入到丰富的教学经验中和感受到大学学习社区的合法化和支持<sup>[45]</sup>。

Coates 参与定义的学习投入的组成要素在相关文献中得到了很好的体现。密歇根州立大学提出的良好教育实践框架也为该定义提供了验证，下表整理了 Coates 与良好教育七项原则的一一对应关系。1987 年，密歇根州立大学提出了良好教育实践框架。该框架由七项原则构成，是在长期的教学实践案例分析和众多研究成果的基础上凝结出来的关于良好教育的思维和行动准则。Gamson 等人提出以“良好实践”为核心的七项原则，并在美国各学院和大学的研究人员、教职员和管理人员共同努力下，制定了《本科教育良好做法七项原则》。七项原则包含了学生学习、师生互动、教师教学三方面的具体要求：提倡师生平等且活跃的互动；鼓励学生之间小组协作学习；学习阶段性成果及时双向反馈；教师应该对学生有信心并表达出乐观的期望；强化完成任务时间；督促学习进度；尊重个性化的学习方式<sup>[46]</sup>。

表 1.1 Coates 定义学习投入<sup>[47]</sup>

| Coates 定义        | 良好教育七项原则                |
|------------------|-------------------------|
| 主动合作学习           | 促进同学间的相互合作、激发学生学习的主动性   |
| 参与具有挑战性的学术活动     | 充分尊重不同才能和不同学习方法的学生      |
| 与学术人员交流心得体会      | 鼓励师生多交流                 |
| 投入到丰富的教学经验中      | 强调完成每项任务的时间、促进学生达成较高期望值 |
| 感受到大学学习社区的合法化和支持 | 及时反馈、鼓励师生多交流、促进同学间的相互合作 |

学习投入又可细分为情感投入和行为投入，包含学校给予学生的学业认同、归属感、学习价值，揭示出了学习投入的内部因素与学业结果之间的联系<sup>[48]</sup>。Schaufeli 等人提出学习投入是个体主动参与、积极付出、幸福愉悦的心理情景，包括奉献、活力、专注三个维度<sup>[49]</sup>。

## （2）国内研究现状

国内学习投入等同于学习参与。研究者们通常把学生参与放在学校教育这个大环境来进行研究。因此，与学生学习投入相关的因素很多，包括学校环境、社会环境、家庭教育、教育政策等。随着教育的开始，国内关于学习投入的相关研究主要有：孔企平介绍了国内研究者对学生投入相关概念的两种理解，

其一学习投入是学生在 学习过程中主动参与而获得个体化的课程经验；其二学生投入是学生在 学习过程中情绪参与的心理活动载体<sup>[50]</sup>。在此基础上，孔企平将学习投入总结为学生在 学习过程中的行为、认知和情感三方面的投入。

倪士光、伍新春基于对工作投入的研究对学习投入的起源进行阐述，认为后者是在前者的基础上发展起来的。在此基础上他们分析了 Fredricks 研究者对学习投入概念的定义，认为学习投入包括行为、情感、认知三个维度。然后再从学业倦怠的对立面出发，系统梳理了学生学习投入的测量方法与相关变量，也罗列了与学习投入相关的有待进一步探讨和完善的问题，其中包括学习投入概念的定义明确、研究方法的使用、理论模型的确立、干预研究的实践、测量工具的完善等<sup>[51]</sup>。李娜、任新成对国外学生投入及相关理论进行了整理，详细介绍了各著名教育学者提出的理论，在此基础上指出了国内学习投入相关研究的不足<sup>[52]</sup>，这也为国内关于学习投入的后续研究提出了理论依据，并指明了方向。

北京师范大学李新等人通过对国外有关学习投入的实证研究做了系统性文献综述，对我国学者开展学习投入的实证研究时，提出应注意以下五点：①学习投入概念的情境化，注重学生在学业上的身体和心理的双重投入；②学习投入的指标多维化；③学习场景的设计应该多元化；④对学生学习投入结果的影响因素需多方面考量，应包括教师、学生、课程、环境以及同伴等；⑤学习投入的测量数据应该多源化<sup>[53]</sup>。西南大学袁琳等人通过研究师范生职业使命感对学习投入的影响，研究发现职业使命感是作用于学习投入的关键<sup>[54]</sup>。刘在花通过研究发现，个体主观能动的学习投入以及自我效能感可以正向影响学习满意度，同时获得学习满意度也可以反作用于学习投入，可以促进学生实现成就目标定向<sup>[55]</sup>。山东师范大学李嘉欣等人通过研究初中生感知到的同伴支持对数学学习投入的影响，发现同伴支持能直接预测初中生的数学学习投入，还可以通过认同和焦虑的链式中介作用来预测学生学习投入<sup>[56]</sup>。北京师范大学李艳燕等人构建并应用了协作学习情境中学习投入的数字化表征模型，发现学生的行为投入趋于稳定，但认知投入和社会投入波动较大，学习投入的不同方面对学习成绩具有互惠的关系，作用于不同程度学习投入的各维度投入也不均衡<sup>[57]</sup>。

根据国内外对学习投入的不同定义和多维度分析，国外对学习投入的理论发展较早，而国内更注重对学习投入的实证研究。综上所述，学习投入的测量应该从多方面、多维度、多源化的数据中进行分析，国内外学者都一致认为应

该从生理和心理两方面来研究学习投入。

### 1.2.3 脑机接口在教育中的应用

认知神经科学是 20 世纪后期发展起来的一门新兴学科，将认知科学的理论与神经科学和计算建模等研究方法进行综合，进而探索人类心理和大脑的关系。在心理学领域，研究人员采用神经心理学和生理心理学的方法探究脑损伤对认知功能的影响。随着神经科学领域的脑影像技术的发展，使人们可以直接观察认知事件中大脑活动的模式，不仅在行为和认知层面上，亦或在神经回路、脑区和脑网络的层面上探索大脑与心智的关系。在近三十年的时间，认知神经科学得到了空前的发展，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》将“脑科学和认知科学”纳入国家重点支持的前沿科学领域之一<sup>[2]</sup>。在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中指出，要强化“脑与认知等基础前沿科学研究”，并将“脑科学与类脑研究”确定为科技创新 2030 重大项目<sup>[58]</sup>。

18 世纪，意大利 Galvani 发现了青蛙外周围神经及肌肉的带电现象。19 世纪中叶，英国 Richard Caton 发现了兔脑中的脑电信号。20 世纪初，研究者 Adolf Beck 发现了兔子和狗的大脑皮层脑电活动现象。1924 年德国 Hans Berger 首次在人类大脑中获取了脑电，将绘制的脑电图命名为 EEG (Electroencephalogram)。1933 年，英国著名生理学家 Adrian 和 Mathews 采用了当时最先进的设备共同研究了脑电波图。直至 1958 年，英国伦敦大学的 Dawson，成功研制出了一种用于瞬时脑诱发电位的电机械处理装备。生物电信号的发现在人类发展过程中开启了脑电研究的新征程。

大脑是控制人体神经系统的中枢器官，有着举足轻重的作用，主要负责控制和调节身体的各项运转机能。脑电波 (Electroencephalogram，简称 EEG) 是由大脑神经元内的带电离子在传递和移动过程中引起的比较微弱的电压波动。通过脑机接口 (Brain Computer Interface，简称 BCI) 设备，可以利用电极捕捉脑电信号的变化，并通过相关软件的 EEG 信号处理算法分析，最终通过计算机语言进行表征和识别 EEG 信号，并解析其中蕴含的生理活动<sup>[59]</sup>。根据电极采集方式的差异，脑电信号信号可分为皮层 EEG 和头皮 EEG 以及深部 EEG。

本研究以头皮 EEG 为研究对象。头皮 EEG 是指在头皮上由单个或多个电极

记录的单位时间内大脑的生物电活动信号。脑电波能反映学习者在生理和心理上的变化,包括知觉认知、情绪情感以及行为技能上的变化。脑电波技术能够识别学生在学习过程中的情绪波动,辅助学生调节大脑活动,预测和干预学生的学习状况,监测学习注意力和放松度,评估学习深度和学习投入。因此在学习过程中进行监测和记录的脑电图对教育研究极具价值。要实现人机一体化的脑电研究系统,首先应该深入了解大脑在协调、控制、运动等方面的加工机制,对该机制的研究主要集中在大脑的生理结构和大脑皮层不同区域的生理功能。对脑电信号的技术检测手段主要分为有损和无损两类。有损检测技术主要为针对大脑疾病的患者进一步确定病灶而进行的开颅手术;无损检测技术常用的有脑电图、磁共振成像、近红外光谱等。

1990到2000年,美国实施了“脑的十年”全国性脑科学计划以来,国际组织实施了一系列的脑科学计划,这使得认知神经科学的研究得到空前发展,能监测、记录、解码大脑生物电波的脑电图技术是这项计划的典型代表<sup>[60]</sup>。人脑在思考过程中会激活不同脑区的活动从而诱发不同的脑电波,脑电波根据其波长的大小又被分为 $\delta$ 波(Delta)、 $\theta$ 波(Theta)、 $\alpha$ 波(Alpha)、 $\beta$ 波(Beta)和 $\gamma$ 波(Gamma)<sup>[61]</sup>。Delta波起源于大脑皮层,通常出现在深睡眠时期、婴儿期或者由严重的器质性脑疾病所诱发,与脑深部的活动无关。

研究发现,Theta波与冥想集中和许多的认知过程相关联<sup>[62]</sup>。Alpha波通常反映枕部大脑区域的视觉影响,研究表明增加脑力劳动会抑制Alpha波的活动,Alpha波与大脑记忆功能有关<sup>[63]</sup>。Beta通常出现于大脑额叶和中央区域,多个频段的Beta波还与活跃、繁忙或者交流的想法有关<sup>[64]</sup>。Gamma波被认为是脑信号传导的重要节律并与认知处理相关<sup>[65]</sup>。

在教育领域,脑电波技术与教育评价的融合运用也是当下众多研究者感兴趣的课题。随着智能穿戴设备的发展,教育工作者可以在数据分析的基础上更科学、更深入地研究各种因素对学生学习投入的影响机制,从而帮助学生实现深度学习,同时提升学校整体的教育教学质量。在学校管理方面,课堂的教学质量和学生的课堂行为直接关系到学生的学习结果,精彩的课堂教育不仅能给学生传递知识,而且也能使学生更加容易地理解概念,更好地消化吸收课堂知识。课堂教学中,学生持续投入的注意力能够维持高度集中的学习状态,可以帮助学生更高效地学习课堂知识。

基于脑电技术在教育应用的文献研究,可知脑电技术在对学生注意力的个

个性化训练是主要的研究方向之一。研究者基于脑立方 Mindset 耳机提供的脑波数据,验证了脑电技术对个体注意力的训练方式的可行性及优越性<sup>[66]</sup>。来自神念科技 NeuroSky 的脑电设备在儿童注意力缺陷治疗、儿童多动症、青少年戒除网瘾方面都有着经验丰富的运用<sup>[67]</sup>。可见脑电技术的发展对研究学生深度学习以及心理健康有着举足轻重的研究意义。

#### 1.2.4 主要的问题及启迪

21 世纪是互联网时代、信息时代、智能时代,与此同时学生的学习方式也伴随着 5G、AI 等技术发生了翻天覆地的变化,从传统的私塾教育发展至今的个性化学习、终生学习。科技力量的加持改变着教师教的方式,同时也改变了学生学的方式,且加速了知识传递的速度和质量,科技力量的赋能正在掀起教育革新的浪潮。目前关于元宇宙应用于教学的探索结果令人兴奋,但大多数在实验室进行,关于它在课堂内的实际应用是否有效,有待商榷。对元宇宙也存在着诸多疑问,比如在元宇宙中是否能促进学习者更多的思考和想象,新技术的运用是否会影响和限制人类对已有学习材料的经验积累和图式建构的认知系统等等。

具身认知理论提出环境、身体、认知是一个有机整体,侧重于学习者在学习环境中,身体感知与认知建构之间的相互作用。然而,目前课堂使用元宇宙学习支架的设计更多依赖经验,缺少基于脑机接口的设计研究,忽略了身体在认知中的重要作用,而在元宇宙空间中可以充分地调动学习者的身体机能,使元宇宙为探索身体在认知中的作用提供了可能性。

目前学习支架的研究主要聚焦于支架的应用效果研究,鲜有人关注元宇宙学习支架中学生心流体验的影响机制。根据上述文献研究,目前我国在虚拟现实技术赋能教育领域方面,比较偏重理论研究、应用研究和实证研究,而在评价等方面涉及较少或者维度单一。对于风力发电相关教育元宇宙的研究鲜有人关注,其次采集和分析生理数据对元宇宙教学效果的评价研究相对缺乏。元宇宙赋能教育可能存在以下几方面问题:

(1) 目前的教育元宇宙理论研究较多,但元宇宙与教育资源的融合还不够深入,处于探索阶段,缺乏实证研究,且研究内容也不全面。

(2) 教育元宇宙的应用处于实验室阶段,很少运用到课堂学习中,学生并

不能很好地运用元宇宙进行自主学习，课堂实践方面研究不足。

(3) 对于学习评价的研究方面，脑波研究维度较少。

通过对目前各国具有代表性的元宇宙理论与实践的文献分析，元宇宙赋能教育是在信息技术发展的基础上，为了实现学习者高效、自主、有意义学习而开展的一个新兴的研究方向。与此同时，随着智能穿戴设备的发展，脑电技术在学习评价方面的应用也是该课题研究的方向之一。

### 1.2.5 课题研究问题

基于对国内外相关文献的研究，发现通过脑电信号评估学生学习状态的案例居多，而鲜有人结合心率、脑电等生理指标综合揭示学习发生的内在机理。本研究提出了“元宇宙视域下基于 EEG 的学生学习投入的应用研究”的论文选题，旨在解决以下研究问题：

(1) 在元宇宙沉浸式的学习环境中，教育元宇宙在课程教学中如何设计与实施，才能使元宇宙的教育功能发挥到极致？

(2) 探究教育元宇宙是否对课堂教学的应用具有有效性。

(3) 从认知神经科学的视角通过脑电、心率、问卷以及成绩来综合探究教育元宇宙在课堂教学中的学生学习投入情况，以及元宇宙课堂实践的有效应用模式。

本研究设计的教育元宇宙是基于线下学习环境，对构建教育元宇宙及空间功能进行具体设计，试图构建学生“做中学”的学习模式，激发学习兴趣，促进学习投入，探究培养学生高阶思维的教育元宇宙应用模式。

## 1.3 研究目标和研究意义

### 1.3.1 研究目标

本文通过对教育元宇宙的价值探析，对元宇宙学习空间的功能进行总体设计，由此探索实现学生“做中学”的学习模式，提高学习投入，发展高阶思维的教育元宇宙。以高等教育学科风力发电为例设计元宇宙学习空间，根据教学设计和教学目标进行案例设计，并通过生理数据的采集和分析来探索元宇宙在

教学实践中有效的应用模式。

### 1.3.2 研究意义

该研究的开展具有以下三方面的现实意义：

(1) 本研究对教育元宇宙的研究现状进行了梳理，深入探究了元宇宙对教育教学中创新实践的有效性。

(2) 本研究设计并开发了元宇宙学习空间，满足学生“做中学”的现实诉求，实现了以学为本的教学理念，揭示了元宇宙对学生学习投入的影响机制，丰富了元宇宙教学实践的理论意义。

(3) 本研究在高等教育风力发电课堂中进行了探索，促进了信息技术与高等教育学科的深度融合。教育元宇宙的运用将在学生学习方法、教师教学方式、课堂教学模式等方面带来改变，进而丰富了元宇宙在教学应用中的实践意义。

## 1.4 研究内容和研究方法

### 1.4.1 研究内容

#### (1) 构建、开发教育元宇宙学习空间

到实际风电场做前期调研，同时通过多渠道收集资料，确保所开发的风力发电元宇宙尽可能地模拟真实风电场，达到逼真的效果。元宇宙学习空间延续了虚拟现实技术的三大特性：沉浸性，即通过 3DS MAX 对风力发电机组建模，导入 Unity3D 虚拟引擎，并结合 C# 软件，构建虚拟可视化和场景漫游的功能，满足学生沉浸式的学习体验；体验性，即通过头盔、耳机、手柄等实现视觉、听觉和触觉等感知，构建了多通道的信息加工功能，增强了学习者的临场体验；交互性，即通过 Unity3D 虚拟引擎的设置，实现抓取、拆卸等操作，构建了学生“做中学”的教学功能，实现人机交互，最终构建教育元宇宙学习空间。

#### (2) 教育元宇宙的教学设计

根据教学对象的特点，满足课程标准的要求，有序安排教学进程，采用合适的教学媒体和教学方案，以完成教学目标的计划。教育元宇宙的课堂教学采用探究式学习，倡导学生通过动手做、在做中学、主动地收集与处理信息、发

现问题、提出假设、设计实验、得出结论等活动，获得认知，同时培养实践能力，也发展了对科学研究的探索精神与创新能力。

### （3）教育元宇宙的课堂实证研究

设计元宇宙教学与传统 PPT 教学以及元宇宙视域下不同教学设计的的横纵对比实验，第一轮设计了传统 PPT 组和元宇宙组，主要探究教育元宇宙沉浸式学习环境是否对学生学习投入产生影响；第二轮设计了在相同的教育元宇宙中，实验组设计了先验知识测试环节，而对照组没有设计先验知识测试环节，主要探究元宇宙如何进行教学设计，才能使元宇宙的教育功能发挥到极致。两轮实验均采用单因素完全随机实验设计，展开研究。

### （4）教育元宇宙课堂应用的效果分析

其一，通过采集学生学习过程中的脑电、心率、认知负荷来综合分析教育元宇宙是否影响学生认知行为。其二，在元宇宙沉浸式的学习环境中，教育元宇宙在课程教学中如何设计与实施，才能使元宇宙的教育功能发挥到极致。最后，对教育元宇宙的应用效果进行了总结性评价，揭示元宇宙在课堂教学中的应用价值。

## 1.4.2 研究方法

### （1）文献研究法

文献研究法主要通过搜索、鉴别、整理相关文献，并通过对文献的学习、分类、总结形成对客观事实科学认识的方法<sup>[68]</sup>。本研究运用文献分析法主要包含以下几个步骤：

- ①广泛阅读相关文献，提出课题或者假设；
- ②对所要研究的内容进行设计；
- ③通过检索数据库查阅有关元宇宙、学习投入、脑电波等的国内外相关文献，并对元宇宙、学习投入、脑机接口等的国内外研究现状进行梳理；
- ④分析国内外研究及应用现状，了解该领域的研究方法和发展脉络，基于国内外的研究成果，提出了目前教育元宇宙可能存在的问题；
- ⑤将课题内容设计成可重复、具体、可操作的活动，并且可以解决相关的教学问题以反复验证结论。

### （2）调查研究法

调查研究主要通过收集样本某一方面的材料, 并进行整理、综合、分析, 实现辅助验证假设的目的。本研究主要运用了问卷调查法和访谈法, 设立了各种明确的问题, 针对性强, 从而更好地了解学习者的学习情况以及情感投入等多种因素结合的内部机制。

### (3) 实验研究法

根据相对应的理论, 该研究设计了元宇宙 VR 组和传统教学组的对照实验, 以及元宇宙视域下不同教学设计的实验, 并进行横纵对比分析。该研究样本选取了云南省某高校风力发电专业大二的学生, 设计实验, 探究在教育元宇宙中学习者学习投入的情况, 并做精准分析。该研究在教育元宇宙的设计方面, 运用了基于实验研究方法, 以下为研究步骤:

①基于具身认知理论、认知负荷理论等与学习相关的理论, 为构建教育元宇宙的层次模型和功能模块提供设计思路。

②开发了风力发电的元宇宙学习空间, 并将其运用于课堂实践中, 对元宇宙学习空间的应用模式进行深入探究。

③通过试验阶段对元宇宙学习空间的应用效果进行分析评价, 目的是发现漏洞, 解决问题和完善教学设计, 通过多次循环试验和改进, 使学生和教师逐渐适应教育元宇宙的使用流程, 最终完成实验, 并进行总结评价。

## 1.5 研究思路和创新点

### 1.5.1 研究思路

数字化时代背景下, 教育创新逐步趋于个性化学习、自适应学习等, 强调“以学习者为中心”的教学理念<sup>[69]</sup>。通过教育技术的加持使学生在过程中体验到个性化学习带来的幸福体验, 是每一个教育工作者创新教育的目的所在。本研究采用研究基础—元宇宙功能设计—元宇宙开发—元宇宙教学实施—效果分析的主体思路, 对元宇宙视域下学生学习投入的研究进行总结性评价。具体研究思路如下图所示如下:

(1) 梳理国内外文献, 分析虚拟现实技术、元宇宙、学习投入的研究现状。分别从教育、学习、技术的视角对元宇宙学习空间做价值定位。从教育的视角, 元宇宙可以拓宽学习者的视野, 身临其境的体验现实世界中无法观察到的微观

或宏观变化，注重培养创新人才；从学习的角度，元宇宙能够帮助学习者实现“做中学”，同时提高学习兴趣，激发学习动机、强化实践操作能力；从技术的角度，元宇宙能够优化学习体验，提高学习效率，助力形成基于课堂的学习共同体。

(2) 调研元宇宙学习空间的需求情况。通过调查法分别对教师、学生进行调查，为开发元宇宙学习空间提供现实依据。

(3) 根据相关理论以及需求功能，对元宇宙学习空间进行功能设计，包括场景漫游、人机交互、学习引导等功能设计，并通过 3DS MAX、Unity 3D 等相关软件开发出风力发电元宇宙。

(4) 将元宇宙展开应用和效果分析，根据以上研究，提出假设，并设计实验，通过采集被试者的心率、脑电等生理信号。从认知神经科学的角度，量化学生学习投入的相关认知状态，综合以上研究，对元宇宙学习空间的课堂运用做总结性评价。



图 1.1 研究思路

本研究通过对国内外相关文献的梳理，掌握了元宇宙、学习投入等国内外的研究现状，结合对学生和教师的访谈及问卷调查，对教育元宇宙进行课堂需求和功能设计，为后续构建元宇宙学习空间，使用相关软件开发元宇宙提供了现实基础。最后，进行教学设计、课堂实践、效果研究，并从认知神经科学的

角度，对教育元宇宙的应用和效果做总结分析。

### 1.5.2 创新点

为实现培养创新人才的战略目标，构建元宇宙学习空间，并在教育、学习、技术三个方面，都展示出与时代共同进步的创新发展理念，综合以上分析，本研究具有以下三个创新点：

#### (1) 研究选题具有创新性

在目前的课堂教学中，针对一些需要学生实践操作的科目，或者是一些较复杂抽象的概念，由于时间、空间的限制学生无法进行操作或者到现场观摩，只能通过大脑想象来理解概念或知识点，这在一定程度上对学生的学习效果产生了不利影响。而元宇宙融入课堂为解决这一难题提供了一个安全可行的方案，实现了风力发电场的场景漫游，真实再现风电机组的运行状态，进而优化学生的学习方式。目前针对元宇宙教学实验的研究，存在重理论、轻实践的研究，该选题结合了脑电和心率等生理数据进行学习评价，具有一定的创新性。

#### (2) 相关理论的实践具有创新性

本研究以认知神经科学为主导贯穿始终，基于具身认知理论、戴尔金字塔理论、建构主义、资源图式理论等基础上设计并开发元宇宙学习空间，以及教学实验的设计。目前虚拟现实技术运用在课堂教学中，鲜有研究者从认知神经科学的角度关注学生在虚拟教学环境中学习投入研究。因此针对元宇宙在课堂教学中的应用研究对未来元宇宙泛在化的运用具有一定的现实意义，是元宇宙课堂实践相关理论的发展和探索，因此该研究在理论的实践方面具有一定的创新性。

#### (3) 研究方法具有创新性

本研究将虚拟现实技术运用在课堂教学中，从认知神经科学的角度分析学生的认知状态，通过心率检测识别注意力、脑电信号检测识别脑区的激活程度，再结合调查法采集被试学习者的主观想法和认知负荷的心理感受，其研究结论更具客观性。因此，本项目的研究方法具有创新性，也是自然科学研究方法和社会科学方法的交叉融合。

## 第2章 相关概念界定与理论基础

研究涉及相关的核心概念包括元宇宙、学习投入、脑机接口、认知神经科学。理论基础包括建构主义学习理论、具身认知理论、教学目标分类理论、认知负荷理论以及戴尔金字塔理论。

### 2.1 概念界定与辨析

#### 2.1.1 元宇宙

从技术的视角看，元宇宙囊括了VR、AR、MR、人工智能、大数据、区块链等多种数字技术，组成了与现实世界既映射又相互独立的数字世界。广义元宇宙是对现有信息数字技术集成的综合运用；狭义元宇宙是计算机开发的一个虚拟现实的用户平台<sup>[70]</sup>。元宇宙是一个沉浸式的虚拟空间，它具有虚拟现实的技术特性：沉浸性，即用户认为自己的身体和思维都是虚拟系统的一部分，通过技术和设备产生的听觉、触觉、视觉等多通道感知将用户与现实世界隔离开，用户便会与虚拟世界发生共鸣，感觉置身于另一个真实世界；交互性，即用户对虚拟环境内的物体进行操作并得到反馈的行为，用户的操作和环境产生了相互作用，也就是说用户对虚拟物体有所动作，物体和环境的位置和状态会随之发生改变。如在虚拟环境中追逐，用户会发现环境在向相反的方向移动；如虚拟世界中模拟地震场景用户能感受到大地的抖动。多感知性是指通过计算机技术实现的视觉、听觉、触觉、运动等感知方式。

纵观信息社会的发展历程，本研究总结了元宇宙的五个主要特征：

(1) 虚实融通、深度交互。元宇宙搭建了虚拟和现实相对应的虚拟空间，换句话说，也就是为了满足学生情景化学习的需要，将情景融入了虚拟世界，通过智能穿戴设备实现人机交互的功能，帮助学生获得真实场景的学习体验，元宇宙借助高带宽的5G技术和沉浸式的交互技术产生逼真的临场体验，实现学习者沉浸式的学习体验<sup>[71]</sup>。

(2) 智能化和数字化的集合。元宇宙是基于各种智能数字技术搭建的一个

复杂巨大的综合系统，其涵盖了整个网络空间、终端设备以及现实条件<sup>[72]</sup>。VR、AI、5G、云计算等技术为教育元宇宙学习空间提供了强大的算力支持，通过分析海量数据，模仿人脑的思维和决策过程，为学生提供个性化的精准服务。人工智能技术通过神经网络、模糊逻辑等算法模拟专家型教师的教学思维深度融合于教育元宇宙学习空间，实现学习内容的智能推送，以及学习过程的多元化评价，最终实现智能化学习<sup>[73]</sup>。

(3) 人机融合互联互通。教育元宇宙创造了智能的数字学习空间。其一，系统通过分析学习活动的后台数据，可以及时帮助学生规范学习行为，根据长期的数据分析还可以帮助学生查缺补漏，优化学习路径，合理的调整短期计划，以实现该生设定的长期学习目标；其二，通过学生端的数据分析，教师可通过查看智能系统所反馈的当前学习活动中可能存在的问题，根据系统提出解决方案，结合班级实际和学生情况，及时调整教学方案。因此元宇宙能够帮助教师更好开展教学活动做好辅助。因此，教育元宇宙实现了学生与教师、学生与机器、教师与机器的互联互通，且持续优化教学行为，以实现个性化的教育服务。

(4) 使用户思维具象化。教育元宇宙为学习者提供了一个专注于学习者思维空间的沉浸式环境，学习者通过与学习环境中虚拟对象的交互感受到真实的临场体验。元宇宙还能够使抽象思维即时地实现具象化、清晰化和表象化，为学习者的学习创造良好的条件。通过对现实环境的模拟，学习者能够避免过多关注计算机技术提供的中介信息，从而能够完全的融入虚拟世界，专注思考和想象<sup>[71]</sup>。教育元宇宙中，区块链技术赋予每个用户唯一的实名身份，整合学习者正式、非正式和虚拟的学习，根据推送的学习内容，自主地管理学习，将有助于培养学生自主学习的能力<sup>[74]</sup>。

(5) 场景构建、智慧教育。场景主要是为了增强用户体验，通过时间、空间、内容三要素组合成包括功能设施、价值体现以及情感载体的空间<sup>[75]</sup>。通过构建场景，满足学习者的情景化需求，场景学习帮助学习者获得更好的学习体验，同时在场景的时间和空间上，也可以培养学习者如同在现实社会中形成的价值观和人生观<sup>[76]</sup>。

### 2.1.2 学习投入

通过第一章对学习投入进行国内外研究现状的文献分析后，得知目前学习

投入还没有统一的定义，Schaufel 认为学习投入是“学生意识到学习对自己的意义，以充沛的精神状态投入学习任务中去”<sup>[49]</sup>。

另外，对学习投入的测量一般有两种方法，其一是通过认真观察学生在学习过程中的行为表现，比如课堂中注意力的集中程度，或者在课堂中与老师的互动情况以及小组协作等表现，做记录、后整理、再分析、得结论，最终得出学生学习投入的综合报表；其二是学习者完成研究者提前设计好与学习投入相关题目的作答，将得分进行分析整理，以此了解学习过程中学习投入的情况。本研究试图从认知神经科学的视角，通过采集和分析学习者学习过程中的生理数据，比如心率、脑电、血压等数据来分析学生学习投入的情况。

### 2.1.3 脑机接口

脑机接口（Brain-Computer Interface，简称 BCI）是实现大脑与机器设备之间建立的双向控制通路的智能技术，它实现了从大脑到设备的指令交换，接收到指令的设备完成指令后也会对大脑产生影响，从而进一步实现大脑-机器两者的功能整合<sup>[77]</sup>。De Bettencourt 等人利用脑机接口技术训练大学生对认知事件的神经反馈，对受试者的行为表现方面呈现出积极地作用<sup>[78]</sup>。

脑机接口实现了大脑与外界设备的直接交互，在特殊教育课堂中使用脑控游戏可以有效减少学生的学习焦虑，提高学习积极性以及专注度，有效支持学生的学习，为特殊儿童随班就读带来的各种适应性问题提供解决方案<sup>[79]</sup>。北京师范大学蔡苏等人利用轻量级脑机接口的增强现实科学探究工具，研究发现脑机接口的交互方式能大幅提高学生认知水平以及注意力<sup>[80]</sup>。

华南师范大学王朋利等人利用可穿戴的脑机接口设备测量学生的认知负荷、注意力、情感等内隐状态，分析了常态化课堂教学中学生的注意力特征及变化规律，根据学生学习过程中注意力特征提出课堂教学优化策略，为教师课堂教学策略提供新的解决方案<sup>[81]</sup>。

脑机接口中，“脑”指的是人的大脑通过神经活动而产生的生物电信号；“机”指的是机器、设备，即人类能够生产并能够控制的设备；“接口”指的是通过设备内置的机器学习算法或模式识别等算法，将神经活动产生的电信号转换为机器能够识别的数字信号。脑机接口的技术主要通过以下三部分来实现。

### (1) 信号采集与处理

大脑内部活动主要依靠神经元细胞之间突出的连接和信息互换。当信息开始传递时，神经元细胞的表面会产生微弱的电位变化，研究者们通过记录该脑区的电位变化来辨析大脑活动。脑电信号采集主要有植入式和非植入式两种方式。植入式采集方式由于其能够实现对病灶的精确定位，主要适用于动物实验和医疗临床。非植入式采集方式的采集要求较高，采集设备价格昂贵，但由于更容易被待测试人员接受，在教育领域采集脑电信号的方式主要以头皮脑电为基础的非植入采集方式为主。

### (2) 特征提取与解码

通过从大脑皮层采集到的脑电信号中提取与神经活动相关的信号，通过低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器等清理信号中的杂质，再将信号通过主成分分析、小波变换等提取后，将信号解码成可识别的计算机语言。可提取出能够表征大脑内部活动的特征如 $\delta$ 波、 $\theta$ 波、 $\alpha$ 波、 $\beta$ 波、 $\gamma$ 波、注意力、放松度等。生物电信号的解码是指在特征提取的基础上，通过特定的算法将提取的特征还原成所代表的内容和信息。

### (3) 量化转换与应用

生物电信号的量化转换是指根据被测对象的具体行动要求将解码出的信息再转换成计算机或机器可以识别的数字信号。

在教育应用领域，脑电信号的转换在增强和提高大脑认知能力、监测学生学习专注力，以及替代或恢复身体丧失的机能，并且扩展到对外部设备的控制等方面都有巨大的突破，脑机接口在各行各业的应用潜力巨大。

## 2.1.4 脑电波

脑电波（Electroencephalography，简称 EEG）是指大脑在活动时，神经元细胞同步发生的突触后电位经总和后形成的电信号，是一种使用电生理指标记录大脑活动的方法，是脑神经细胞的电生理活动在大脑皮层或头皮表面的总体反映<sup>[82]</sup>。如下表所示，脑电波一共有 $\delta$ 波、 $\theta$ 波、 $\alpha$ 波、 $\beta$ 波、 $\gamma$ 波，如表 2.1 所示。

表 2.1 EEG 脑波分类

| EEG 脑波       | 频率        | 特性                             |
|--------------|-----------|--------------------------------|
| $\delta$ 波   | 0.1 - 4Hz | 属于“无意识层面”的波，是在非快速动眼睡眠第三期时出现的脑波 |
| $\theta$ 波   | 4~9Hz     | 属于“潜意识层面”的波，与记忆、知觉和情绪相关        |
| $\alpha$ 波   | 8 - 12Hz  | 与注意力的变化有关                      |
| $\beta$ 波（低） | 12~16 Hz  | 放松但精神集中                        |
| $\beta$ 波（中） | 16~20 Hz  | 思考、处理接收到外界讯息（听到或想到）            |
| $\beta$ 波（高） | 20~30 Hz  | 激动、焦虑                          |
| $\gamma$ 波   | 30Hz 以上   | 提高意识、幸福感、减轻压力、冥想               |

脑电信号在教育应用中的研究有以下两个方向，一方面是在学生的学习活动中，通过脑机接口可以识别和监测学生学习状态，教师可以及时了解学生的学习行为，引导并纠正学生在课堂中不当的学习行为，这方面着重于监测学生的学习状态，改善学生的认知活动。另一方面是在教师的教学活动中，教师可以利用脑机接口实时监测学生的学习状态，及时调整教学方法以及教学策略，帮助学生更好地学习，这方面着重于调整教师的教学方法、内容以及教学策略。

### 2.1.5 心流体验

心流体验是由著名心理学家 Csikszentmihalyi 提出，将其定义为一种将个人精神力完全投注在某种活动上的感觉，心流体验产生的同时会有高度的兴奋和充实感<sup>[83]</sup>。Ulrich Martin 从神经科学的角度验证了当人类从事一项要求苛刻的任务时，而任务要求与个体的技能或能力水平相平衡时，心流体验就会随之产生<sup>[84]</sup>。Baehwan Kim 通过实证研究发现 VR 环境比传统媒介更能通过生动性、交互性和临场感放大沉浸体验，同时心流体验也被放大，显著的提高了用户满意度<sup>[85]</sup>。Chongsan Kwon 通过研究发现 VR 学习环境再现得越真实，学生的心流体验就越容易产生，利用 VR 进行的体验式学习就越有效<sup>[86]</sup>。

心流理论可用于指导数字化学习环境和教学活动设计，以及 VR 虚拟学习环境的空间布局和创意设计，并与学习环境发生互动，使学习者自发地增大学习投入。Csikszentmihalyi 指出，引发心流体验的条件包括明确的目标、技能与挑战的平衡、及时的反馈、持续的挑战<sup>[83]</sup>。Lackey 利用 VR 对士兵进行训练，发

现 VR 可有效地减轻与标准任务相关的压力和工作量,并增强了学员的临场感和心流体验,从而降低了实际表现失败的可能性<sup>[87]</sup>。综上所述,VR 可有效增强学生学习的沉浸感、临场感和心流体验。

## 2.2 理论基础

### 2.2.1 具身认知理论

F.瓦雷拉(F. Varela)等认为具身认知,即人的认知依赖于经验,而经验的载体是充满各种感知觉的身体,因此认知的获得与身体密不可分,核心在于认知过程与身体感知和环境的交互作用<sup>[88]</sup>。因此,教育元宇宙的设计要注重让学习者置身于 VR、AR、MR、XR 技术创设的沉浸式环境,通过传感设备和人机接口充分调动身体感知系统,并与环境动态交互,通过大脑、身体与环境间相互作用,帮助学习者实现个性化学习,以及对知识的有效习得。同理,人的智慧从根本上也是具身的,并不是简单的大脑神经活动的结果。而是在现实环境中,人类通过了身体的感知觉系统在概念形成和理性推理中扮演了一种基础性的角色,由此衍生的认知、思维等都完完全全地嵌入和映射到我们的身体活动中。

### 2.2.2 认知负荷理论

Sweller 综合了工作记忆理论、资源有限理论,提出认知负荷是指学习者在处理一认知事件时,特定学习时间内认知事件作用于学习者认知结构的心理活动总量<sup>[89]</sup>。内在认知负荷、外在认知负荷、和关联认知负荷共同组成学习者的认知负荷总量。难度相异的学习任务产生的认知负荷不同,认知负荷也是学习者能否成功解决问题和获得图式的重要因素。

外部认知负荷是由于教学活动或学习资源设计不当造成的,外在认知负荷的增加会占用更多的工作记忆容量,导致无用信息资源存放过多,提取受限,从而阻碍学习过程,影响学习效果<sup>[90]</sup>。美国当代心理学家 Mayer 在其专著《多媒体学习》中,提出学生学习过程中会出现冗余效应,导致学习效果下降。由此可见,外在认知负荷主要来自于视觉、听觉通道的超载,因此在教学实践中

应避免学习材料方式的冗余信息，否则将会造成外在认知负荷的过载。

内在认知负荷的产生与学习材料自身的难易程度息息相关，内在认知负荷的产生的多少还与学习者长时记忆中储存的相关图示数量有关。学习材料的复杂性是指学习材料中各板块、元素、图式、层级之间的相互关联和作用<sup>[89]</sup>。建构认知系统的旧图式往往储存在长时记忆中，学习者接受的新图式必须在工作记忆中进行加工，旨在构建新图式与旧图式的关联，合成新的知识结构。此时，如果长时记忆中没有储存相关的图式，那么工作记忆就需要临时构建新的图式，并构建与图式之间的关联。然而，工作记忆的容量与资源是有限的，认知资源额外用于图示的临时构建，导致个体感受到较高的内在认知负荷<sup>[91]</sup>。

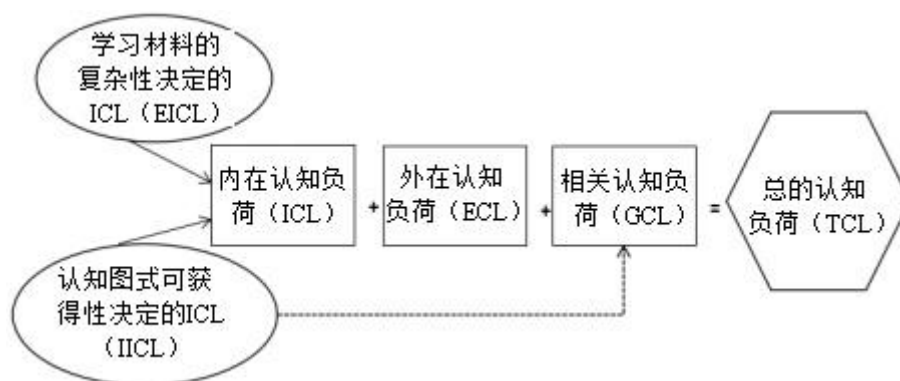


图 2.1 认知负荷示意图

如果学习者对学习材料所涉及的专业知识较为生疏，针对同一认知事件，学习者在同一时间内就需要同时加工更多的材料，工作记忆的负担就较重，产生的内在负荷也就更高<sup>[91]</sup>。Seufert 等人把内在认知负荷分为两方面，一方面是由学习材料的复杂性主导的外部因素，即外部内在认知负荷 (EICL)；另一方面是受学习者先前知识经验影响的内部因素，即内部内在认知负荷 (IICL)，关系如图 2.1 所示<sup>[92]</sup>。

相关认知负荷 (GCL) 由学习者在图式建构中投入的剩余认知资源数量决定<sup>[93]</sup>。由于大脑的认知负荷总量是有限的，当三种认知负荷在面对同一认知事件时，三者存在着此消彼长的现象。当学习者承受内在、外在认知负荷相对量较小的情况下，此时就会产生更多相关认知负荷，用于信息加工和图示迁移，以及知识结构的重组，从而更好的帮助学习者学习，加大学习投入，并获得较好的学习效果。大量研究证实，认知负荷会对学习过程和学习效果产生不同的

影响。通过教学资源设计对学习者的认知过程进行外部控制与管理；同时也可以通过调动学习者的动机和元认知等策略从内部对认知负荷进行控制与管理<sup>[94]</sup>。

### 2.2.3 分布式认知理论

分布式认知理论认为，认知分布于个体内、个体间、媒介、环境、文化、社会以及时间之中<sup>[95]</sup>。知识是个体与环境交互过程中建构的一种交互状态<sup>[96]</sup>，是对个体内部表征与环境外部表征进行信息加工的过程<sup>[97]</sup>。分布式认知理论的核心在于知识的建构过程与个体本身、他者影响、工具使用、资源调配、环境交互密切相关<sup>[98]</sup>。知识是情境的，只有将知识与环境产生联结，且在真实的活动中通过使用才能真正理解。因而，分布式认知理论对教育元宇宙中学习资源、沉浸式环境、学习媒介以及个性化学习活动的创设与布局提供了指导。

### 2.2.4 建构主义学习理论

Peggy A.Ertmer 等人认为，建构主义教学设计强调教学情境在教学设计中的关键地位，指出了学习者应当具备控制和操纵信息的能力，并强调在教学设计中为学习者运用所学知识技能解决实际问题创造条件<sup>[99]</sup>。元宇宙沉浸式学习环境为建构主义教学情境提供了重要的技术支持，为协作学习和项目式学习提供了条件，为学习者获得真实的学习体验创造了环境，促使向以学生为中心教育观的转变，有助于激发学习动机，提升学生的参与感和存在感。

教育元宇宙学习空间包括丰富的建模工具包和交互窗口，赋予学习者更多的自主控制和探索，这样符合建构主义学习理论中关于“学习者是知识的主体”的观点，注重发挥学习者积极、主动、能动的作用<sup>[100]</sup>。基于建构主义理论，教育元宇宙通过 VR、AR、MR、XR 技术创设了沉浸式的学习情境并将知识进行三维立体可视化，学习者通过人机接口与环境实时交互，促进了学生对知识的建构和认知<sup>[101]</sup>。

### 2.2.5 戴尔金字塔理论

“经验之塔”理论由美国教育家戴尔在《视听教学法》一书中提出<sup>[102]</sup>。教

育元宇宙个性化学习空间使观察经验不再局限于观察示范、参观模型等，而是产生了针对于观察经验的新手段<sup>[103]</sup>，即可交互的观察。学生深度沉浸于虚拟空间并实时交互，即可参与模型的设计，又可操纵学习对象的运动及变化，从而发现规律。教育元宇宙突破时空界限，在沉浸式环境中，学生可亲身体验到“做”的经验，从而促进抽象经验的获得。

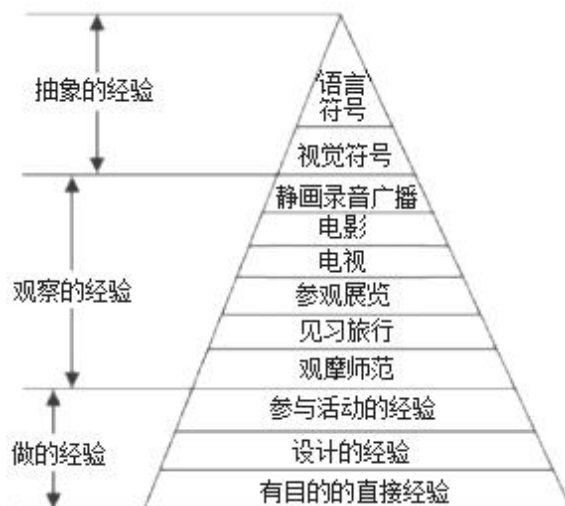


图 2.2 戴尔的“经验之塔”理论

如图 2.2 所示<sup>[102]</sup>，基于戴尔经验之塔理论，教育元宇宙基于学生的认知领域实现了从抽象经验到观察的经验，再到做的经验的循环。知识必须通过使用才能建构，如果独立于情境之外为了应试的需求单纯的学习书本知识，就会产生惰性而非强而有用的知识，难以将知识运用在复杂的生活情境中解决实际问题<sup>[104]</sup>。元宇宙创设了沉浸式学习环境，促使学习者与环境交互，使学习者“做的经验”更直接、更有目的，更直观的获得“抽象经验”，从而促进学生的深度学习。

### 2.2.6 教育目标分类理论

美国当代著名教育学家本杰明·布鲁姆于 1956 年出版了《教育目标分类学：认知领域》，提出“知道、理解、应用、分析、综合和评价”从简单到复杂、从具体到抽象的认知框架<sup>[106]</sup>。认知领域的目标为知道，指认识、了解；理解指对事物初步的解释等；应用是指对所学习的原理等初步的应用；分析是指把知识整体进行分解，从而明确各元素间的相互关系；综合是在分析的基础之上，

全面加工已分解的组成部分，并再次把它们按要求重新组合成整体，以便综合地解决问题；评价是理性、深刻地对事物本质的价值作出有说服力的判断，它综合内在与外在的资料、信息，作出符合客观事实的推断<sup>[105]</sup>。动作技能领域教学目标分7个层次：知觉、定势、指导下的反应、机械动作、复杂的外显反应、适应、创新。情感领域的目标分类为：接受、反应、形成价值观念、组织价值观念系统、价值体系个性化<sup>[106]</sup>。

### 2.3 本章小结

在本章中，首先对元宇宙、学习投入、脑机接口、脑电波等概念进行了界定，为后续研究打下坚实的思想根基；然后详细阐述了课题所涉及到的教育目标分类理论、具身认知理论等，并解释了每个理论对本研究所做工作的指导意义。

## 第3章 元宇宙学习空间的开发

风力发电元宇宙学习空间是以实际风力发电场为原型，使用虚拟现实技术进行开发，并用于高等教育风力发电的课堂教学中，旨在解决风力发电课堂中学生无法到现场实际操作的问题。本章将围绕元宇宙学习空间的总体设计、元宇宙学习空间的工具介绍、元宇宙学习空间的场景设计以及关键技术三方面来介绍风力发电元宇宙学习空间。

### 3.1 面向风力发电的元宇宙学习空间的设计

根据戴尔提出“经验之塔”理论，经验之塔最底层的学习经验最具体，越向上越抽象。教育元宇宙创设的学习空间能实现学习者从做的经验到观察的经验再到抽象经验。在元宇宙中，学习者通过穿戴设备操纵虚拟物体，直接与虚拟对象进行交互，从而获得做的经验；通过观看图片、视频等案例信息，学习者可在元宇宙学习空间中观摩虚拟学习对象的变化进程，从而获得观察的经验；获得以上经验之后，学习者即可通过语言符号和视觉符号获得抽象的学习经验。

根据布鲁姆教育目标分类理论，教育元宇宙学习空间的目标分类如下：知道是指认识并记忆，在元宇宙中教师进行知识的讲解和案例的展示，帮助学生对具体知识的记忆、识别；领会即教育元宇宙借助技术和应用对知识进行描述、解释、区别，实现学生对事物的初步领会；应用即元宇宙创设问题场景帮助学习者实现对所学习的抽象概念、法则、原理的运用；分析即将元宇宙中学习对象进行模型解构，从而使各知识点和概念间的关系更加清晰，相互作用更加明确；综合是高层次的要求，以分析为基础，即将元宇宙学习对象拆分的各要素重新进行加工并组合成整体，实现创造性地解决问题；评价，即在元宇宙中学生学习过程和自我认知的评价总和，并作出符合客观事实发展的推断和预测；创造，是认知领域的最高层次，即知识的拓展和再生。因此，基于布鲁姆认知领域的教育目标分类对教育元宇宙中学生学习的认知过程提供了指导，有助于学习者建构知识体系和规范个性化学习行为。

元宇宙是人类社会高度智能化和数字化发展的结果，打破了场景边界，使学习者沉浸在虚实融合的智能空间，通过头显、耳机、手柄、神经传输等实现

视觉、听觉和触觉多通道的信息感知和加工，并为之进行多模态融合互动，为学习者创造了身临其境的沉浸式学习体验。蔡苏团队实践了5G环境下的多模态智慧课堂——“彩虹的秘密”，通过多模态智慧教学方式，利用5G技术，借助VR、AR、MR设备，实现多种软硬件设备间的无缝连接、协同工作，为学习者提供沉浸式的学习体验<sup>[107]</sup>。根据文献研究的分析和综合，如图3.1所示，风力发电元宇宙学习空间的技术基础主要由以下几个方面组成：

(1) 元宇宙技术基础

①网络环境。基于5G技术高宽带、低延迟技术，将数字信息化从简单的流量服务模式向全要素生态链模式转变，是数字化时代最重要的技术支撑，并指向“万物智联，数字孪生”<sup>[108]</sup>。其三大核心使用情景：增强型移动宽带、超可靠和低延迟通信、大规模机器类型通信（ITU-R，2015）<sup>[109]</sup>，进而对教育元宇宙学习空间的数字传输呈现高清、高速、低延迟的效果。

②物理镜像。通过建模以及引擎等相关技术，设计并开发近乎真实的虚拟风力发电场，通过4K高清监控，采集教学行为数据并进行数字化表征，创造出现实世界的镜像数字世界。另一方面，通过3D建模、场景渲染等，实现虚实融合，旨在提供虚拟仿真的现实环境，促进学生沉浸式的深度学习。

③人机交互。元宇宙通过脑机接口建立机器与人脑的信息传递，融合视觉、触觉、听觉、肌体反应等多通道感知，实现现实本我与虚拟造物的动态交互，从而实现人机共生、脑机融通的理想范式<sup>[71]</sup>。

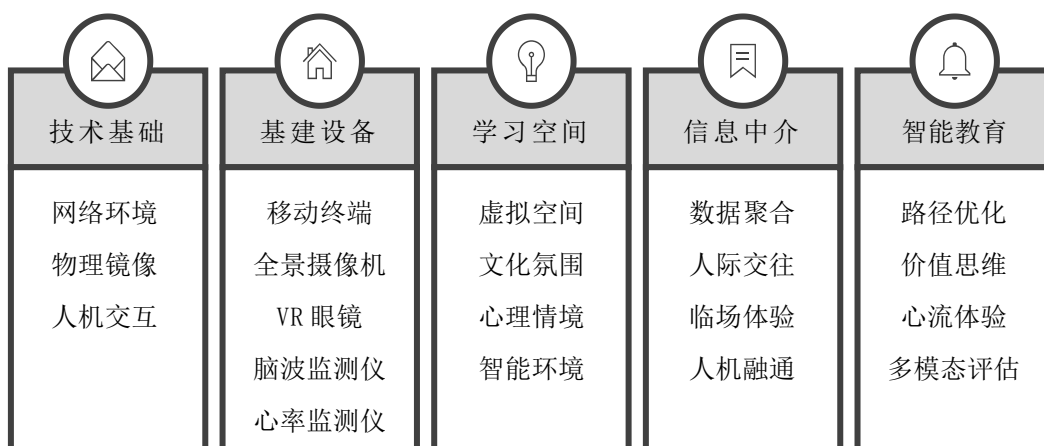


图3.1 构建风力发电元宇宙学习空间

## (2) 元宇宙主要基建设备

风力发电元宇宙学习空间通过移动终端设备、全景摄像机、VR设备、心率以及脑电监测仪等基建设备,实现了学习场景的迁移,即身体仍然坐在现实的教室中,但是学习体验是从虚拟空间中获得的。元宇宙学习空间通过搭建了虚拟且智能的风力发电野外环境,从而为学生学习创设了现实环境才具有的文化氛围以及心理情境。

## (3) 元宇宙学习空间

①虚拟空间。虚拟现实技术在教学运用中能满足更加多样化和专业化的学习需求,同时也提升了学生的学习动机以及对自身学习能力的认可。通常具有较高自我认同感的学习者一般具有较强的学习动机,学习动机的强弱可以直接影响学习效率。例如,学习者可以在风力发电元宇宙中,自由行走、攀爬风机、设备拆卸,直观的学习风力发电机组的运行机制。虚拟现实技术在教育中的运用不仅改善学习者的临场体验,使用户沉浸在虚拟场景中,而且在虚拟场景中还能实时交互,超强的临场体验使学习者能更真实地体验到知识探索的乐趣。

②文化氛围。通过传感器设备识别、获取真实环境中的客观信息,通过互联网将课堂的真实学习与网络学习环境融为一体<sup>[110]</sup>,即将人类智慧与机器智能进行有效融合产生“协同智能”<sup>[111]</sup>,可形成人机融通的学习。

③心理情境。即在元宇宙中某一时刻与个体有关的所有心理上的环境因素。精神分析学专家认为,心理情境包括潜意识元素、动机等<sup>[112]</sup>。虚拟现实技术为学习者提供了动手、交互、沉浸式的学习环境,有助于学生持续开展积极主动的学习,是一种创新的学习方式。学生通过沉浸在多感官的体验中打破了以往单一的学习方式,并且能够激发学生动手实践的兴趣,比如在元宇宙中拆卸风力发电机,学生的学习兴趣容易被激发,使他们更活跃地参与课堂讨论并共享学习的经验。在元宇宙中的学习经历为学生提供了独特而新奇的学习机会,使学生积极探索和主动参与到学习活动中,无形中提高了学习投入。

④智能环境。虚拟现实技术为学习者创造了沉浸式的学习环境,通过这种学习方式有助于对知识的深层理解和记忆,直接改进学生获得知识的方式和途径,强化学习者对知识的实践性和有用性,通过良性互动培养学习者的学习兴趣,同时激发学习动机。

学习资源的可交互性很大程度上提高了学生课堂参与程度,激发学习者特别是在线学习者的学习动机;虚拟教学情景能够增加学生的临场感,这也是虚

虚拟现实技术创造更多使学生感兴趣、眼前一亮的教育体验的优势。脑机接口技术可以优化大脑对外部信息在加工和存储时的神经处理机制，再通过有意识的训练或反馈促进大脑活动以改善信息的加工及存储功能，因此脑机接口技术能够帮助学生提高学习能力。

在某种意义上，脑机接口技术的发展可能有助于提升学生的学习能力，加快或改善知识在大脑的加工和存储的效率，部分学生能依靠脑机接口技术获得“鲤鱼跃龙门”式的跃升。

#### (4) 信息中介

元宇宙学习空间创设的虚拟空间通过脑机接口和数据聚合，精准地分析了学习者在学习过程中的相关数据，实现了学习者的群智学习以及学习过程的多模态评估。在此过程中，虚拟空间具备了现实世界所能赋予人类的文化氛围以及心理情景，使师生之间以及生生之间实现情感交流和具身感受，形成人际交往的社会心理，这为虚拟世界中培养学生的价值思维以及具身认知方面起到了信息中介的作用。

#### (5) 智能教育

VR眼镜 Oculus Quest 2 设备具备了全景摄像机的功能，因此当学习者进入元宇宙空间，就可以很快融入到虚拟场景中，并产生虚实相融的临场体验。通过心率监测仪和脑波监测仪，可以实时分析学习者的生理数据，可实现学习的路径优化、心流体验、高阶思维的培养以及多模态的评估，为后续创建智慧化的学习环境创造条件。

### 3.2 面向风力发电的元宇宙学习空间的开发流程

该风力发电元宇宙学习空间具有以下特点：

#### (1) 三维模型尽可能贴近真实风电场

教育元宇宙所需资料均来自实际风电场，这使得所开发的元宇宙学习空间尽可能无限贴近真实风电场，进而增强用户的临场感和学习体验<sup>[13]</sup>。

#### (2) 元宇宙学习空间场景逼真

通过三维建模软件以及 3D 引擎软件高度还原风电场的真实环境；在元宇宙空间中虚拟教师将全方位地展示和讲解风力发电机组的内部结构，并深入探究

其工作原理，从而引导学习者更好地学习风能利用系数的相关概念以及工作原理。

### (3) 人机交互

本研究设置了发电机设备拆卸的操作。当学习者进入学习空间便可通过手柄的抓握功能对虚拟物体进行抓取、拆卸和安装，进而加深学习者对发电机内部结构和相关工作原理的理解。同时，人机交互的操作也使得学习者能快速融入学习环境，并从中获得实践经验，促进认知建构。

### (4) 虚拟教室增加元宇宙学习功能

在风力发电元宇宙学习空间中设置了虚拟教室，在教室内安排了虚拟教师、和虚拟学伴，老师负责讲解知识，带领同学们参观风力发电机组，并引导同学们对发电机进行拆卸和组装。虚拟教师和虚拟学伴的设置，使元宇宙增加了学习功能，也使学习者感受到虚拟教学环境带来的如同在现实环境下获得的学习体验。

本研究通过 3DS MAX 软件和 Unity 3D 引擎软件开发了元宇宙学习空间，并使用了 VR 眼镜 Oculus Quest2 进行了交互设置。具体流程如图 3.2 所示，在准备阶段，到实地的风电场进行参观和考察，并获得专业风力发电机尺寸以及相关资料；然后根据所获得的数据通过 3DS MAX 软件创建 3D 模型，实现风力发电机的几何造型并渲染处理。设计风机叶片旋转的路径，其目的是尽可能提高元宇宙学习空间的可视化精度。将建好的 3DS MAX 文件导出为 .FBX 文件格式，导入 Unity 3D 软件，进行界面的设计和人机交互的设计，以及 3D 虚拟动态教学资源设计和场景的优化，目的是优化风力发电元宇宙学习空间的界面和交互功能。最后通过 Oculus Quest2 VR 眼镜和 PC 端的连接，本研究采用有线连接，进行场景漫游的设计和手柄的抓握参数的设置，以及语音播放和文本信息的呈现，旨在提高元宇宙学习空间的教学交互性和功能性。

## 3.2.1 3DS MAX 软件简介

3D Studio Max，又被称为 3d Max 或 3DS MAX 软件，是一款基于 PC 系统的三维建模渲染和制作软件。该软件可以进行三维建模、动画制作以及模型渲染及优化，具有操作灵活、简便易学、操作灵活等特点<sup>[114]</sup>。本研究建模使用 3DS

MAX 2022 版软件，被广泛地应用在游戏开发、动画制作、广告宣传、多媒体教学等领域当中。3DS MAX 软件具有以下优点：

(1) 3DS MAX 软件能够按尺寸精准建模，并实现细微的特效功能，旨在建模真实环境的动态感官，被建模的物体可以很好地应用在不同引擎软件中，进行二次开发，其强大的建模功能是开发元宇宙场景及物体的关键。

(2) 页面简洁、操作简单，中文版本容易掌握，实操也容易上手。

(3) 具有很好的兼容功能。与一些制图插件比如建模插件、贴图制作插件等都能很好地兼容，并实现很好的效果。

(4) 渲染效果更加自然和明显。3DS MAX 软件的编辑窗口在开发制作过程中可以便捷地提供各种着色器以及渲染插件，实现更加完美的渲染效果，与此同时还可以实时检查动画效果。

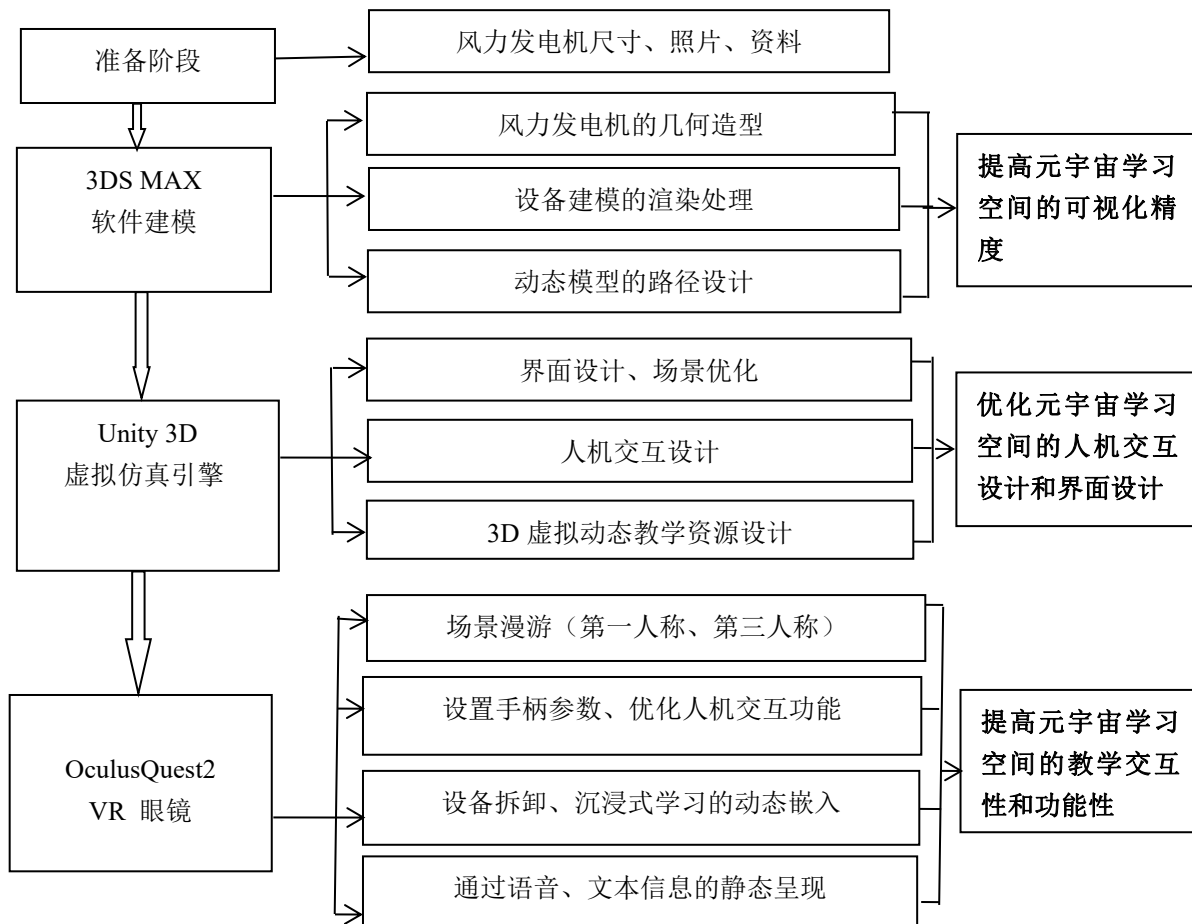


图 3.2 元宇宙学习空间开发流程

(5) 将复杂立体场景简单化。通过 3DS MAX 渲染完成并输出成品, 可使复杂场景简单化并减少不必要的内存。

在本研究中, 需要使用 3DS Max 软件进行建模。完成建模后, 打包生成并保存为 .FBX 文件, 以便后期将模型导入 Unity 3D 软件。风电机组建模画面如图 3.3 所示。

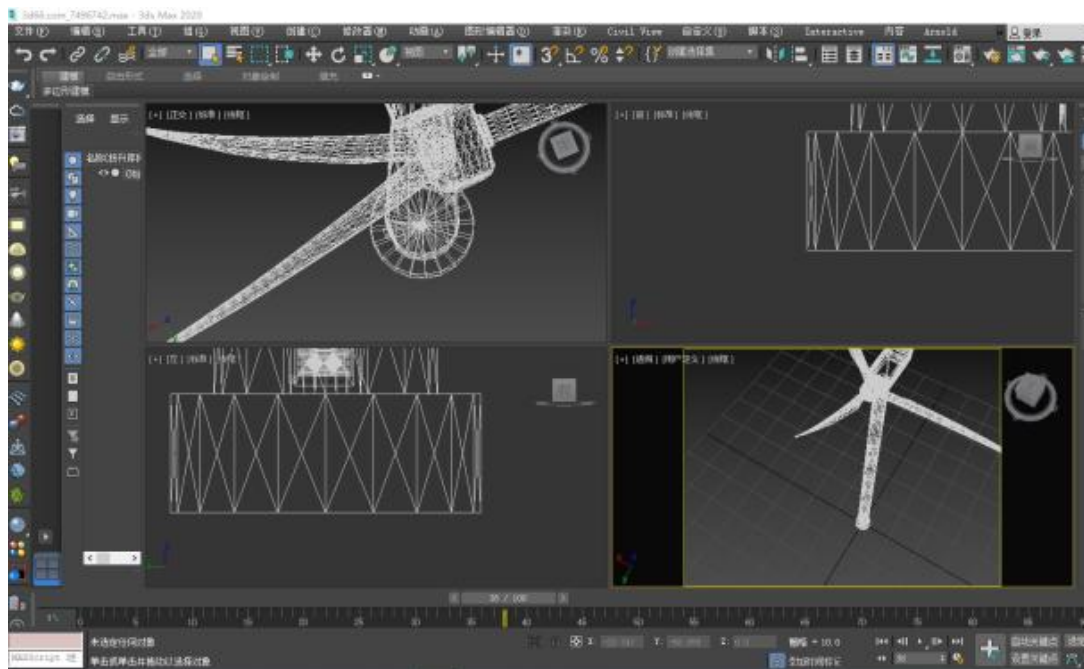


图 3.3 风电机组建模

### 3.2.2 Unity 3D 软件简介

Unity 3D 软件是一款虚拟现实引擎软件, 具有良好的跨平台特性以及优质的 3D 渲染效果。该软件具有良好的兼容性, 在 Windows、Andriod 等平台都可以运用此软件。Unity 3D 软件的操作界面简洁明了, 编辑窗口功能强大, 可以实时查看当前创作的虚拟场景运行效果, 及时更改和调整, 这无疑方便了广大的 VR 游戏开发者以及其他人员。Unity 3D 虚拟现实引擎软件具有以下特点:

(1) 操作简单。软件的编辑界面包含种类型的操作方式和所需程序, 可供操作人员按照需求选择, 大大提高了开发效率。

(2) 导入资源方便。支持 3DS MAX 软件建模的模型导入，不影响其他程序的同时，在导入界面能够快速导入相关的资源，进入场景还可以进行调整和再加工。

(3) 着色器的调用方便快捷。Unity 3D 的着色器编辑窗口，界面简洁，功能丰富，操作简单，着色器性能更高<sup>[115]</sup>。

(4) 分布式远程开发。Unity 3D 软件功能强大，能够实现分布式的远程开发，程序可以允许单人到多人联网开发和运营。

(5) 发布程序简单。通过 Unity 3D 软件所开发的虚拟程序可以传输至 PC 端、手机端或 VR 眼镜等多个平台，且发布程序简单。

### 3.2.3 Oculus Quest2 VR 设备简介

场景开发完成后，还要完成 Unity 3D 软件与 Oculus Quest2 VR 眼镜的连接，Oculus Quest2 VR 眼镜如图 3.4 所示。首先在电脑上下载安装 Oculus 软件并登陆，将头盔用 USB 线与电脑相连，打开 project setting 窗口，找到 player 设置相关参数，完成后打开 quality 进行设计，将 pixel light count 设置改成 1，textures 改为 per texture，往下找到 XR Plugin Management，然后点击安装 XR 插件；完成后在 Oculus 复选框打勾，再安装 Oculus 的 SDK，通过 Assets store 找到 Oculus integration 并下载添加到软件资源处，再导入到场景，重启进行升级。



图 3.4 Oculus Quest2 VR 眼镜展示图

为了获得更好的体验感，将手柄重新调整为双手的样子，会给学习者更好的临场体验。有些先进的虚拟现实设备，例如谷歌的 Cardboard, Daydream View,

Oculus Rift, HTC Vive, Samsung Gear VR, Playstation VR 和 Microsoft Holo Lens 的出现, 解决了虚拟现实设备价格昂贵、不易获取的问题。虚拟现实技术有望在教育、企业培训、医疗保健、工业制造等方面大展拳脚, 也有利于将来的信息交流模式沿着更直观、交互性更强、更有效的创新发展路径延伸。随着人工智能、云计算、大数据等技术的集成, 为未来教育中智能生成的学习内容提供了可能, 将有利于学生个性化的学习<sup>[101]</sup>。

### 3.3 风力发电元宇宙学习空间的设计及关键技术

#### 3.3.1 风力发电元宇宙学习空间的场景设计及关键技术

基于对元宇宙学习空间的功能模块设计, 本研究在集合了具身认知理论、认知负荷理论、建构主义理论的基础上, 通过相关软件开发出风力发电元宇宙空间。根据对真实风电场的考察, 对山地、风力发电机进行建模, 旨在营造更真实的虚拟学习环境, 以下为元宇宙学习空间中相关场景设计的关键技术:

##### ①场景构建

将 3D Max 软件生成的 .FBX 文件通过编辑窗口的 Import 将文件导入 Unity 3D。接下来对山地建模: 点击“Hierarchy”视图菜单栏创建地形, 再到窗口右侧“Inspectors”视图中调整地形参数以模拟真实风力发电厂的外型地貌。

根据现实风力发电厂的数据设置“Terrain”的相关参数, 构建虚拟的风电环境。然后在 Assets store 中, 下载所需要的植物材质, 并添加到 Unity 3D 软件中, 通过“Terrain”一栏中“Brushes”的相关操作在山地种上草和树。将风力发电机的模型添加到场景中, 并对模型的材质进行设置, 使之和真实环境下的风力发电机尽可能一样。

##### ②动画设置

在 scene 里面添加 skybox 天空盒, 根据场景的变化随时调整状态, 从 Assets 中导入 Skybox 相关素材, 并通过在编辑栏 edit 里点 render setting 对天空样式进行设置。下一步是对风力发电机叶片进行设置。该步骤可以通过编程和动画来设置。在本研究中使用的是通过 Animator 制作的动画。

先给风机叶片添加 Animation 组件, 选择在 Hierarchy 视图选中该模型, 点菜单栏 Window 里的 Animation, 时间轴位置表示该模型到这个时间点的变化,

把时间轴拉到最后，把动画的长度设为三秒。将风力发电机叶片设置为顺时针围绕中心点进行旋转<sup>[116]</sup>，点击运行，通过时间轴调节合适的速度，进行录制，完成后点击保存，关掉该窗口，运行场景即可实现动画效果。

### ③人物导入

场景内的虚拟人物通过 Assets store 导入到场景，再根据课程安排将人物的肢体运动进行具体的设计，以营造多人场景的学习空间。

基于风力发电元宇宙学习空间的场景设计主要有森林场景、虚拟教室场景以及风力发电机组内部场景。

#### (1) 森林场景

进入如图 3.4 所示的元宇宙中师生会感觉心情舒畅、赏心悦目，这有益于激发学生的求知欲和探索欲。教育元宇宙的应用开展是以 5G 网为基础，对于元宇宙的开发设计，学习环境的营造除了能强化教学功能之外，还能如同现实环境一般陶冶人的情操<sup>[117]</sup>。



图 3.4 森林场景

元宇宙所搭建的沉浸式学习环境，可以使学习变得更加有趣，学习对象变得更加生动，在学习情境中学习不再是被动地接收知识的传递，而是主动的探索，这对于增强学生的学习主观能动性有着至关重要的作用。元宇宙风力发电学习空间是基于真实环境下的风电场建模的，森林场景的设计开发是在基于具

身认知理论的基础上, 专注身体-大脑-环境的认知一体化, 主要是为实现学生有意义学习, 促进高效认知建构设计的。

### (2) 虚拟教室场景

在元宇宙虚拟教室场景中, 如图 3.5 所示, 根据戴尔金字塔理论设计了实验探究步骤, 使他们在实践中学习和理解知识, 学生可以根据提示信息通过手柄进行模拟操作, 这有助于学生更好地掌握和运用知识。由于 VR 环境提供了视觉、听觉和触觉等多种感官刺激, 这种全面的感官体验使学生更容易记住学习内容。

VR 技术的实践证明, 沉浸式体验对增强肌肉记忆特别有效, 例如在物理实验、运动训练、外科模拟等需要动手操作的学习活动中, 学生可以在 VR 环境中进行大量的模拟练习<sup>[118]</sup>。这不仅可以帮助他们掌握正确的操作技能, 还可以通过反复练习将这些技能转化为肌肉记忆, 从而提高他们的学习效果和操作效率。

元宇宙还可以提供即时的反馈和修改, 让学生可以立即看到自己的操作结果, 从而及时进行调整和改进。这对加强肌肉记忆和提高学习成绩也很有帮助<sup>[119]</sup>。



图 3.5 虚拟教室场景

### (3) 风力发电机组的内部构造场景

如图 3.6 所示, 风力发电元宇宙学习空间对风力发电机组的内部结构进行了详细的介绍, 可视化地呈现了风力发电机的运行过程以及内部发电机制, 比如

主轴轴承、齿轮箱、主轴、控制器、刹车装置、发电机、冷却系统、液压站、偏航电动机等，这有助于学生加深对相关概念的理解。

齿轮箱的主要作用是将风轮在风力作用下所产生的动力传递给发电机并使其转子达到相应的转速切割磁感线，使动能转换为电能。在日常生活中，可以观察到叶片的转速并不快，无法达到发电机发电所要求的转速，通过齿轮箱大小齿轮的转动可以实现增速作用。

同时，在风力发电教育元宇宙中，设计了发电机的拆卸场景。这使学生可以进行直接的拆卸操作，进而快速地掌握和理解知识，节省了学习成本，同时优化了学习效率。该场景中学生可操作手柄进行拆卸，旋拧螺丝，移动零部件，抓握零部件等进行仔细观察，也可以将零部件重新组装。在此过程中，培养了学生的动手能力和学习兴趣。研究表明，元宇宙赋能课堂既能提高学生兴趣，又能增强学生的学习能力，还能提高学生的记忆力和学习效率，高效的学习方法更能满足现代社会快节奏的生活需求<sup>[120]</sup>。



图 3.6 发电机的内部构造场景

### 3.3.2 风力发电元宇宙学习空间中场景漫游的关键技术

元宇宙通过虚拟空间的场景构建，实现信息的互联互通，以降低学习者认知负荷，实现多模态的数据融合，促进学习者知识内化，进而精准服务学习对象。

面向风力发电元宇宙学习空间，实现场景漫游的关键技术主要涉及 VR 设备中关于手柄的设置，以下为场景漫游的关键技术：

#### (1) 相机转换

将 Unity 3D 软件与 Oculus Quest 2 VR 眼镜连接成功后，打开场景，在编辑窗口“Hierarchy”视图的中的“Oculus”菜单，点击 VR，找到其下属菜单中的 prefabs 下的 OVRCameraRig，并将其拖到 scene 中，此时发现场景整体色调发生变化，再将场景默认的相机 Camera 取消激活，此时，Oculus Quest 2 VR 眼镜能够很清楚的看见场景，视角会随着眼镜移动而变化。

### (2) 设置手柄

我们将 prefabs 下的 OVRPlayerController 插件拖入场景，此插件应调整高度设置，高度相当于一个成年人的身高，再拖入手柄模型 OVRControllerPrefabs，并调整参数，再进行调试即可在场景进行漫游。

教育元宇宙可通过互联网将课堂的真实学习与网络学习环境融为一体<sup>[110]</sup>，即将人类智能与机器智能进行有效融合产生“协同智能”<sup>[111]</sup>，可形成人机融通的学习生态；其次教育元宇宙中学生和老师、学生和虚拟教师无时无刻都在进行着心灵的接触；在元宇宙中学习者通过实践还可形成真实世界中独有的人生观、世界观及价值观，决定着人的价值取向、具体行为模式和对待生活的态度<sup>[121]</sup>，双向循环服务于学生终身学习。

元宇宙学习空间通过设备和技术实现了视觉影响、听觉影响、触觉影响三方面的综合作用，可以让学习者在虚拟空间中，切实感受到心理、文化、环境的多重作用。

### 3.3.3 风力发电元宇宙学习空间中人机交互的关键技术

元宇宙最大的特征就是交互性，人机交互功能的实现能帮助学习者快速融入学习情境，在心理和生理上获得更好的归属感和临场感，在心理情境方面人机交互的实现能帮助学习者在虚拟空间获得更真实的学习经验。心理情境即在元宇宙中某一时刻与个体有关的所有心理上的环境因素，包括潜意识元素、动机等<sup>[112]</sup>。

心理环境包括：①临场感，即元宇宙使学习者亲身感受到如在真实世界上产生的交互；②认同感，即元宇宙让学习者拥有对所处环境的掌握和操控，能让学习者产生较高的心理认同感；③具身感，即通过身体参与活动、行为感知增强等，可产生环境和身体高度融合的具身体验；④归属感，即元宇宙能够构建让学习产生情感依托、价值认同的归属感。因此，人机交互的设计，在很大程度上有利

于学习者在虚拟空间获得更真实的学习经验。

学习者通过在元宇宙学习空间中拆卸设备，其目的是为了使学生直观、高效、深刻地了解设备的各部件功能和运行机制，如图 3.7 所示。该交互功能可以降低学习成本，减少学员对各零部件的认识和学习时间，具有较高的现实意义。由于部件较多，本研究设计的人机交互主要是学生对风力发电机的拆卸。



图 3.7 人机交互的抓取

在虚拟空间中对三维物体进行拆装操作，该过程是学员在真实环境下对真实物体进行拆装过程的写照。学员通过扣动手柄上的扳机键即可抓取到相应的设备模型，同时可以根据个人学习需要操作手柄来移动零部件，还可以将模型任意移动、360 度旋转零部件模型、近距离仔细的观察等，从而实现对设备模型的拆装，实现人机交互的关键技术有以下几点：

#### (1) 碰撞检测

针对被抓取的物体时，通常采用的是射线碰撞检测。手柄通过设置 API 函数进行射线生成，用于检测射线是否与碰撞器发生碰撞，当发生碰撞时物体将被拾取。其中在进行射线 Ray 检测时，需要将模型设置为刚体(rigidbody)或碰撞体(collider)。

#### (2) 射线检测

射线检测使用 Collision 函数，该函数触发的条件为两个物体中有 Collider，其中一个有 Rigidbody Trigger；两个参与抓取的双方其中至少一个勾选了“is Trigger charactercontroller”就能检测碰撞。

#### (3) 脚本设置

为该拆卸模型添加抓取脚本，当射线定位到该物体时，学员通过手柄中的键，进行抓取，从而实现拆装。

虚拟现实技术以视、听、触等多感官界面为特点，帮助学习者进入一个封闭的沉浸式环境并与虚拟对象进行交互。从计算机技术层面上，虚拟现实技术

能够通过生成虚拟 3D 环境的计算机应用,在虚拟环境中学习者和教师都是参与者;学习者通过一系列多感官接口与虚拟对象进行互动。

通过虚拟现实技术,教师为学习者搭建了近乎真实的学习场景,同时也搭建了一个方便、低成本、安全的实践环境,学生可以在其中进行实际操作和反复练习新的技能。在已有的研究中发现,如果虚拟现实技术的使用是建立在教育理论和适当的学习理论的基础上,那么学生在沉浸式的学习环境就可以更好的优化知识加工的程序,提高学生学习效率,进而输出更好的学习结果。学生是课堂的主要参与者,以学生为中心强调学生在学习中的主动意识,以教师为主导注重教师的教学设计以及监督作用,把课堂还给学生,激发学生积极主动地参与课堂。

虚拟现实技术提供个人以及群体在同一场景中进行的分布式体验,这为小组在项目和反馈上提供了互动和协作的机会。

在虚拟场景中,学生可以反复操作、亲自体验获得实践经验,从而更深刻地理解抽象概念。例如,在国外对医学院临床专业学生的手术教学中,学生通过佩戴虚拟现实眼镜和手柄,对虚拟病患进行手术。当看向病患时,同时提示关注血压血氧仪,精确地引导学生接下来要做什么以及需要注意的事项,这无疑可以更好地训练外科医生手术的技能以及更快地熟悉手术室的环境和操作流程[101]。

面对人类发展中的共同问题,元宇宙的诞生也吸引了全球的参与者参与其中,通过虚拟现实技术近距离地感受其他国家面临的饥饿、贫穷以及自然灾害等危机,为全人类以合作的方式寻找应对全球挑战的解决方案。

### 3.4 本章小结

本章对论文所研究的风力发电元宇宙学习空间的系统开发工具进行了阐述。首先简要介绍了风力发电元宇宙学习空间的特点,其次阐述了系统的开发工具,最后展示了元宇宙开发的最终效果。

虚拟现实技术与教育的融合为以学生为中心的教学提供了一种体验式学习的探索工具;当无法到真实环境体验或实践的,虚拟现实技术为学习者获得了移情体验的真实经验,以及使抽象概念得到具体化的可视化呈现。

## 第4章 风力发电元宇宙学习空间多模态课堂的实证研究

元宇宙通过先进的技术和创新应用,将情境预设、路径选择、过程优化、动态建模、感知共生等相结合动态生成的智能学习环境中,依托多元评价、沉浸式学习和智能环境的载体<sup>[122]</sup>。构建智慧教育评价体系全程化、多元化、多维度、主体化、可视化、以评促学、以评促发展<sup>[123]</sup>。当学习者增大学习投入完成了深度的认知加工后,将转向更高层次的“智慧成长”,高阶思维得到发展<sup>[124]</sup>。

教育元宇宙中人类智慧与智能技术融合发展,共同创造并不断优化学生的智慧教育环境<sup>[125]</sup>。除此之外,教育元宇宙还有助于学习者实现知识外显化、组合化,以及社会化的流通场域构建<sup>[126]</sup>,形成高阶思维与智慧学习的螺旋式上升发展。

为了更好地研究元宇宙赋能教育的可行性,对云南R大学的风力发电课堂的教学现状进行调查分析,旨在发现其教学创新的路径,随之开展教学实证研究。

### 4.1 基于风力发电元宇宙学习空间的多模态课堂的前端分析

#### 4.1.1 教学内容分析

云南R大学的“风力发电基础”是一门理论与实践相结合的课程。风力发电是风能利用的主要形式,近年来我国在风电技术和风电产业方面取得了长足进步。《风能技术》是一本全面介绍风力发电技术的专著,内容翔实,图文并茂,应用性强,是近年来国际上较有影响的一本风能专著,对提高我国风电技术水平,促进风电产业发展,培养风电专业人才起到积极作用。

##### (1) 课程内容

##### ① 本节在教材中的地位

风能利用系数在高等教育《风力发电》的第一章,第三节,属于该课程的基础知识,对后续学习风力发电的基本原理起着关键作用。该内容由浅入深讲述了风能利用系数,充分地利用了先前学习的知识,综合推导出了风能利用系

数的公式，并详细讲述了风能利用系数的现实意义，既有陈述性知识、程序性知识，也有策略性知识，符合常态化深度学习中复杂知识的综合形态特征<sup>[127]</sup>。

### ②学习本节所需要的基础知识

学习风能利用系数，学生需要对能量转换、路程、速度、体积、功率等基础知识有所了解，这些知识点均来自初高中物理教材。

### ③教学重点

通过观察风力发电机组的运行状态以及对相关概念的学习，学生能够掌握风能利用系数的概念以及相关计算。

### ④教学难点

通过对风能利用系数的学习，提高学生对风力发电机组运行状态的辨析程度。风力发电机组的运转是一个复杂的过程，为保持风机高效率的正常运转，学生在学习风能利用系数的同时，应对风机叶片的变桨具有一定的认知。

## (2) 教学目标

知识与技能目标：

- ①通过小组学习，使学生知道风能利用系数的概念；
- ②理解其推算的过程和工作原理；
- ③掌握并应用风能利用系数对相关问题进行计算；
- ④使学习者初步学会风能利用系数在风力发电中的简单计算。

过程与方法目标：

- ①该研究通过观察法，让学生感受风电场；
- ②认识到风力发电机组的基本工作原理；
- ③将观察到的运行状态运用在对风能利用系数的相关计算中。

情感、态度与价值观目标：

- ①学生通过探究式学习的过程，能帮助学习者激发学习兴趣；
- ②端正百折不挠的科学研究态度和学习态度；
- ③懂得知识的运用价值；
- ④养成热爱科学研究的思想情感。

## 4.1.2 教学对象分析

本节课的学生均来自云南 R 大学物理学专业大二的学生，风力发电的课程是该班的辅修专业课，男女比例 1.3:1，班级人数 51 人。这个班级的学生物理基础比较好，大部分学生对于机械操作非常感兴趣。相比女同学，大部分男同学对电脑操作、机械检修更感兴趣。男女生的学习态度无明显差别，经专业课教师反映，该班的学生学习较勤奋，能积极主动地去学习，学习习惯较好。

为了控制无关变量对实验结果的干扰，剔除自我调节能力过低或过高、以及对计算机图形图像不适应的被试。班级共 51 人参加，最终保留有效被试 47 名，如图 4.1 所示。其中，男生 24 人，女生 23 人，平均年龄 21 岁，所有被试无脑损伤、精神病史。

被试被随机分为四组，第一组传统 PPT 教学组 13 人和第二组元宇宙教学组 14 人，自我调节学习能力 ( $F=0.001$ ,  $p=0.999 > 0.05$ ) 不存在显著差异，符合实验要求。第三组为元宇宙对照组 10 人，第四组为元宇宙实验组 10 人，自我调节学习能力 ( $F=0.001$ ,  $p=0.999 > 0.05$ ) 不存在显著差异，符合实验要求。在本研究中，有幸邀请到了延安医院的神经内科医生，为本实验采集生理信号方面给予了专业的指导。



图 4.1 实验对象图集

实验开始前进行了实验培训，培训内容不属于被试的先验知识，旨在使教

学设计能够对被试形成学习效应<sup>[127]</sup>。元宇宙教学组、元宇宙实验组和元宇宙对照组在元宇宙学习空间中的学习内容和形式是主要通过 Oculus Quest 2 VR 眼镜的交互设计来呈现。而传统 PPT 教学组的学习内容和形式是通过多媒体呈现全部知识点来实现。

### 4.1.3 教学环境分析

本研究中教学环境由 PPT 课件、VR 场景、视频材料、音频材料、文本等组成。模态是交流的通道和媒介，主要包括文字、音视频、色彩等符号<sup>[128]</sup>。传统教学组的教学环境依托多媒体教室以及内置的其他设备来创造，元宇宙教学组的教学环境旨在构建多模态的虚拟学习空间，以帮助学生获得最佳临场体验以及真实的经验。

### 4.1.4 教学现状分析

在努力实现教育现代化建设的背景下，信息技术也在不断地发展，信息技术与课程的融合呈现多元化的趋势。但是，新型技术赋能课堂目前处于实验室阶段，并未大范围推广，元宇宙赋能教育有关课堂应用的可行性有待进一步验证。本节主要对云南 R 大学风力发电的课程进行调查研究，了解其教学现状，发现其存在的问题，为后期进行风力发电元宇宙学习空间教学模式的探究提供相关参考依据。为获得该调查结果，设计了相关的问卷，详情为附录 A，旨在调查师生对元宇宙学习空间的真实需求。

#### (1) 调查内容

为更好地了解当下学生在风力发电课堂中的学习情况，通过网络问卷的方式对云南省 R 大学的学生进行调研，发放问卷 88 份，收回有效问卷 88 份。该问卷主要收集学生对元宇宙的了解程度，以及在传统理论课上，学生学习投入的情况；学生所期待的理论课形式；学生对元宇宙课堂的态度等多个维度的数据。

#### (2) 数据分析

在被问及对元宇宙的了解程度的题目中，有 1.14%的人正在研究元宇宙相关技术，17.05%的人正在关注元宇宙相关新闻，54.41%的人偶尔听说过元宇宙，28.41%的人不了解。如图 4.2 所示。



图 4.2 对元宇宙的了解程度

在被问及对元宇宙赋能教育持何态度的题目中，1.14%的人认为元宇宙教育是无稽之谈，31.82%的人认为有待商榷，发展形势不明确，44.32%的人认为形势向好，但还需改进，22.73%的人认为元宇宙教育是大势所趋，前途光明。如图 4.3 所示。

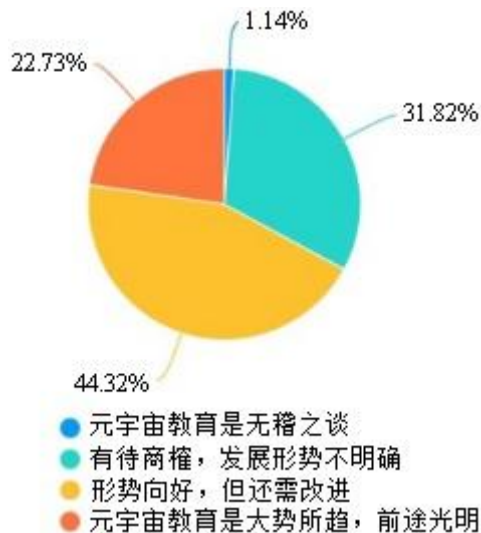


图 4.3 对元宇宙赋能教育的所持态度

在被问及传统理论课上，学习投入的情况时，5.68%的人非常投入，29.55%的人投入，62.5%的人学习投入一般，2.27%的人学习投入非常差。如图4.4所示。



图4.4 传统理论课上学习投入情况

在被问及学生期待怎样的理论课时，2.27%的学生期待教师的PPT设计，3.41%的学生期待以多做练习题为主，94.32%的学生期待精彩的理论讲解+亲身实践操作，0%的学生期待坐着听教师的讲解就好。如图4.5所示。



图4.5 学生内心所期待的理论课

在被问及如果您可以坐在教室里，通过VR眼镜进入到近乎真实的风力发电厂，跟着虚拟形象的教师，一边参观高大雄伟的风力发电机，一边学习发电原理并亲自动手操作设备，您是否愿意接受在这样的虚拟教室中上课呢？68.18%

的学生十分愿意，26.14%的学生有点兴趣，5.68%的学生感觉一般，0%的学生没兴趣。如图 4.6 所示。

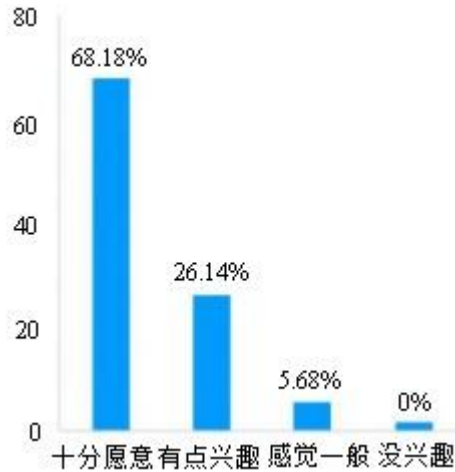


图 4.6 虚拟教室中上课的意愿

在被问及学生所期望的课堂教学形式时，6.28%的学生倾向讲授型，11.36%的学生倾向讨论型，79.55%的学生倾向情境型，2.27%的学生倾向其他。如图 4.7 所示。

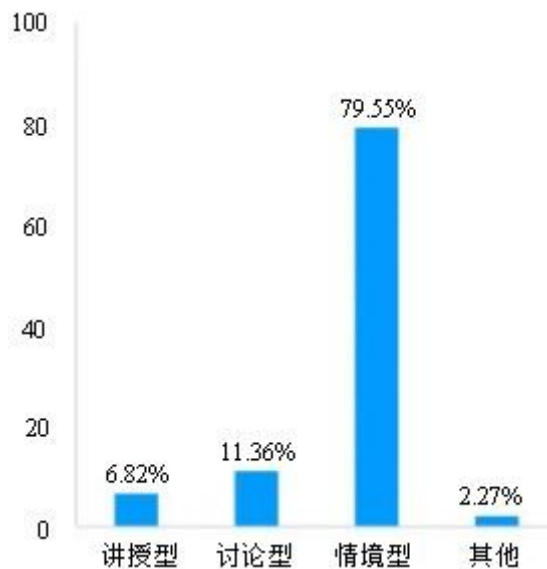


图 4.7 学生所期待的课堂教学形式

在被问及期望在元宇宙中学习何种类型的课程时, 19.32%的学生倾向讲授类专业课程教学, 79.55%的学生倾向安全知识、实践操作等情景体验教学, 1.14%的学生倾向其他。如图 4.8 所示。



图 4.8 在元宇宙所期望的课程类型

### (3) 调查总结

通过对问卷调查所得数据进行分析, 可知传统理论课学生的学习投入总体情况较为一般, 精彩的理论讲解加动手实践相结合的情景型课堂是学生们所期待的, 有 70% 以上的学生非常愿意体验元宇宙课堂, 并对情景体验式的课堂充满期待。

## 4.2 基于风力发电元宇宙学习空间的教学实验设计

学习支架是根据辅助学习机制以及最近发展区理论提出的促进学习者有效学习的阶梯和认知协助<sup>[133]</sup>, 是学生认知水平发展的过渡。教师通过教学设计搭建学习支架帮助学生建构、内化高阶的认知技能, 使其能够参与到之前无法独立完成任务中, 可以促进学生的深度学习<sup>[134]</sup>, 有利于学习者将外部动作内化为抽象思维, 有利于高阶思维的发展<sup>[135]</sup>。

基于以上理论, 为探究传统 PPT 教学与元宇宙教学的效果对比分析, 以及探究先验知识作为学习支架是否对元宇宙学习产生影响, 本章基于风力发电元宇宙学习空间进行了教学实验设计, 如图 4.9 所示。

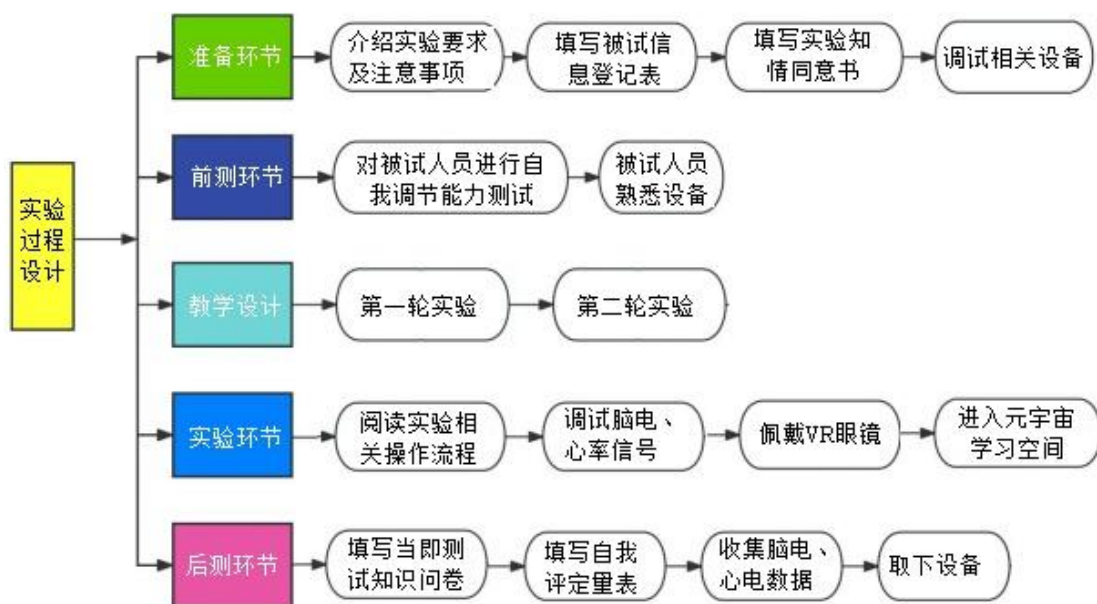


图 4.9 实验过程设计

本研究采用单因素完全随机实验设计，在第一组实验当中自变量为两个不同的学习媒介，即元宇宙教学组以及传统 PPT 教学组；在第二组实验当中两组均采用元宇宙教学媒介，而教学设计两组有差异，对照组缺失了先验知识测试，实验组是完整的教学设计。在此基础上检测被试人员的脑波信号，包括 theta 波、alpha 波、beta 波、gamma 波、注意力值等，也检测身体的生理信号，包括心率、血压的变化曲线以及学习结果。实验流程包括准备环节、前测环节、教学设计环节、实验环节、后测环节。

在准备环节，被试人员按要求提前半小时到达教室，由专门的教师介绍该实验的要求以及注意事项，有不自愿参加的学员可申请退出；然后填写被试信息登记表以及实验知情同意书。与此同时，负责调试设备的教师对即将进行的实验设备包括 TGAM 设备、心率检测设备、VR 设备等进行调试。

在前测环节，完成对被试人员自我调节能力的问答，以及对被试人员佩戴 VR 眼镜进行调试，并对 VR 设备的操作进行培训，以确保每一个被试人员都能正常操作该设备完成实验。

在教学设计环节，根据实验目的，设计实验流程以及教学设计，完成第一轮实验和第二轮实验。

在实验环节，被试人员应仔细阅读实验操作流程，由实验操作的教师为实验人员佩戴 VR 设备、脑电波设备以及心率设备，并使通道信号正常，完成以上操作以后，即可开始实验环节，然后进入元宇宙虚拟空间开启神奇的学习之旅。

在后测环节中，虚拟空间课堂结束后，由实验操作的教师拆除设备，收集并保存相关数据，被试人员稍作休息，当即填写测试的知识问卷，并填写 Pass 自我评定量表、WP 认知负荷量表，最后收集并整理数据以及问卷，实验结束。

### 4.3 基于风力发电元宇宙学习空间的教学实施

基于上述的研究设计思路，设计了两轮实验的教学实施过程，详情如图 4.10 所示。在第一轮元宇宙教学组与 PPT 教学组进行的实验中，都在现实教室中进行课堂导入，回顾相关知识，并完成了先验知识的测试。

元宇宙教学组通过元宇宙学习空间学习新知，并在虚拟教室中动手操作；而 PPT 教学组则通过 PPT 学习新知，并通过观看相关音视频来获得实践经验，最后均在现实教室中强化新知。第二轮实验设计了以元宇宙为教学媒介，通过改变两组的教学设计来完成实验，其中元宇宙实验组回顾相关知识，并完成了先验知识的测试，而元宇宙对照组则没有该步骤，之后两组均通过元宇宙学习新知，在虚拟教室中动手操作，最后在现实教室中强化新知。



a) 第一轮实验过程设计



b) 第二轮实验过程设计

图 4.10 教学实施的过程设计

本研究正是基于文献研究的基础上，大胆地进行设想，从认知神经科学的角度来验证元宇宙与教育的融合是否具有有效性和可行性，由此设想了第一组的实验，即传统 PPT 教学与元宇宙教学进行对比。

在得到第一组的实验结果后，有两种假设，如果结果中教学的优势偏向传统教学，那么毋庸置疑新技术不适合教学。新兴技术在某些方面可能会增加学习者的认知负荷，从而影响学习效果。另一种假设是，如果上一轮结果的优势偏向元宇宙教学，那么我们可以大胆的猜想，该结果的出现是由于技术本身，还是由于教学设计，哪一方面对学生的学学习产生的影响更大，由此出现了第二轮实验的设计。

以下是两轮实验的设计思想，分别由四组被试组成。

第一轮实验：第一组传统 PPT 教学组 13 人和第二组元宇宙教学组 14 人，该实验的设计是基于对新技术在教学实践应用中的有效性而设计的，以此来探究新兴技术在教育活动中的应用和传统的教学方式之间对于师生有无差异。一方面是针对教师的教学方式是否有差异；另一方面是针对学生的学习效果、学习状态等是否有差异。

在第一轮实验中，收集学生在学习过程中的脑电信号以及心率信号，在医生的指导下以专业的方式，采集生理数据，同时用严谨的数据处理方法整理数据，得出结论，并分析原因。

第二轮实验：第三组为元宇宙实验组 10 人，第四组为元宇宙对照组 10 人。该轮实验是在第一轮实验的基础上设计的，在第一轮实验中，通过数据分析结果显示，元宇宙教学组中被试学员的学业成绩和学业表现优于传统组。

因此，大胆提出猜想，是元宇宙技术主导了教学方式和教学行为的改变从而使学生学习效果得到改善吗？教育是一个复杂的系统，它的关键要素在于教学设计、教师、学生等多方面的协调。所以在设计第二轮实验，两组实验均使用元宇宙教学方式，但是两组的教学设计不相同。

第四组元宇宙对照组在教学设计中，教师在课堂情景导入后，没有进行先验知识的回顾和测试。而元宇宙实验组的教学设计中，在教师在课堂情景导入后，进行了先验知识的回顾和测试。由此可知，先验知识的回顾和测试是本轮实验的唯一变量，从而可以探究在元宇宙的沉浸式学习环境下，先验知识作为学习支架是否对学生的产生影响。

以下为第一轮实验中的元宇宙教学组和传统 PPT 教学组，以及第二轮实验中的元宇宙实验组和元宇宙对照组的具体教学实施过程。

#### （1）课堂导入

在传统 PPT 教学组、元宇宙教学组、元宇宙实验组、元宇宙对照组的课堂导入阶段，主要采用情境导入的方式，均整合了相同的多模态的学习资源，旨在能够更好地帮助学生高效的获取信息，激发学生的学习兴趣，吸引学生的注意力。

最后通过观看一段视频，引发学生思考。开始风速很慢，并逐渐变快，在控制室的仪表盘上可以观察到，输出功率的曲线也缓慢上升，到达一个临界值的时候，曲线开始在一条线的上下浮动，此时，我们也可以观察风机叶片在做变桨操作。那为什么会这样呢？抛出问题，引发学生思考，同时引出新课题。

#### （2）对相关先验知识的复习

在传统 PPT 教学组、元宇宙教学组、元宇宙实验组的课堂复习阶段，在现实课堂中对本节课的公式推导中可能涉及的初高中基础知识进行回顾，其中包含动能、势能、路程、速度、体积、功率等概念，让同学们对相关知识点加深

印象,同时也可以更好地帮助学习者对后续知识的掌握和理解。而元宇宙对照组则没有该环节。

先验知识是先于经验的知识,是存储在长时记忆中的图式。当学习者接收到新的信息和刺激时,通过复杂的认知加工后,大脑便会调动长时记忆中存储的图式和新的知识构建出新的图示,从而获得认知,该图示暂时存储在短时记忆中。

先验知识被认为是学习者已经习得的知识,与此同时,他们认为先验知识对学习者开展进一步的深度学习有着重要的支撑作用。尽管先验知识是认知建构过程中的主要因素,而且在教学活动中教师也自然运用到课堂中,但先验知识在很多常规实践中依然会被忽视。也有研究者认为先验知识是学习者大脑中的一种内在准备状态,代表学习者原有的知识框架。当习得新信息的时候先验知识能够帮助学习者快速地将新信息整理并融合成新的结构。

### (3) 讲授新课

在讲授新课时,引出刚才的问题,鼓励学生思考,大胆假设,然后教师再对其进行讲解。多模态互动既体现了新课改中以学生为主体的教育理念,又激发了学生学习动机。

元宇宙教学组、元宇宙实验组、元宇宙对照组经过课堂导入和复习阶段之后,均通过元宇宙学习空间学习新知识,进入沉浸式学习环境,跟随虚拟教师解密新知,并在虚拟教室中动手实践。而PPT教学组则通过PPT学习新知,通过观看相关视频获得实践经验。

教育元宇宙注重教学设计和对学习过程的多模态评价为主线贯穿整个设计过程,教学资源不再是平面教材和PPT,而是一个自主探究、动态交互的智慧环境,极大地激发了学习者的学习动机,提高了学习效率。

探究式学习是指在教学活动中设计类似于学术研究的情境,学生通过动手做、做中学主动地发现问题,通过收集与处理信息、调查、实验、操作、表达与交流等活动,锻炼学习者勇往直前的探索精神,培养了崇尚科学的创新能力。探究式学习倡导学生的主动参与,是一种科学的学习过程。祝智庭<sup>[129]</sup>等提出新兴技术应用于教学方面,预先的教学活动设计和学习过程的监控、双向反馈是取得最佳学习效果的关键。

元宇宙赋能教育旨在营造智慧教育的学习环境,帮助学生更好地进行探究式学习,有利于学生更好地学习和内化知识。黄荣怀等<sup>[130]</sup>认为智慧学习环境包

括感知环境、记录过程、识别情景和联接社群等显著特征。知识是静态的、符号化的；智慧是动态的、个性化的。

祝智庭教授指出智慧教育应构建融合信息技术的智能化学习环境，本着“精准、个性、优化、思维、共享、创造”的原则，让学习者能够获得适宜的个性化学习服务和美好的发展体验<sup>[131]</sup>。智慧教育是信息技术与教育发展高度融合而产生的新型教育模式，通过各种信息技术赋能教育，提升现有教育平台的智慧化水平，培养大批具备创新意识和创新能力的智慧型人才<sup>[132]</sup>。

#### （4）多模态评估

在元宇宙教学组、PPT 教学组、元宇宙实验组、元宇宙对照组的整个学习过程中，为了更客观且多方面地评估学生的学习效果，四组实验均使用了智能穿戴设备检测学生在学习过程中的脑电波和心率。以此从认知神经科学的角度来探析学习者在沉浸式学习环境下的学习状态，以实现对学习效果的多元评价。

#### （5）强化新知

在传统 PPT 教学组、元宇宙教学组、元宇宙实验组、元宇宙对照组的课堂强化阶段，均采用相同的检验材料并在现实教室中完成。

为了更好地检验学生对该知识点的掌握程度，课程结束要求完成课后测试，包括简答题、选择题和选做题，兼具对基础知识的复习和高阶思维的拓展。

此项设计主要为了从当即测验以及认知负荷量表两方面来评估学生在传统 PPT 教学和元宇宙教学两种教学模式下学习的效果，同时也对未来元宇宙融合教育提供更多实践案例的参考。

## 4.4 本章小结

本章主要介绍了本文的研究设计。第三章是元宇宙的开发篇，通过 3DS MAX 建模软件、Unity 3D 引擎软件以及 VR 穿戴设备开发了元宇宙学习空间；第四章对元宇宙学习空间的前端分析、实验设计以及实施过程进行了阐述；而第五章则在前三章的基础上做效果分析，从多个角度进行考量和评估，以回答研究课题提出的问题。

## 第 5 章 基于风力发电元宇宙学习空间多模态课堂教学的效果分析

在研究中，将被试学生随机分为四组，第一组是探究 PPT 传统教学与元宇宙教学在学生在学习过程中的学习投入的差异对比，分别是传统 PPT 教学组 13 人和元宇宙教学组 14 人；另一组是针对元宇宙学习支架下不同的教学设计而开展的实验，分别为元宇宙对照组 10 人、元宇宙实验组 10 人。本研究中使用单导联的 TGAM 脑波检测模块、MKB0805 心率模块来检测被试的脑波 EEG 信号以及心率的变化，本章将从脑区激活水平、心流体验发生程度、认知负荷量表、学生当即测试成绩四个方面展开，对实验的结果进行分析。

### 5.1 基于风力发电元宇宙学习空间多模态课堂教学的评价模型设计

该研究设计了基于风力发电元宇宙学习空间的多模态课堂的评价模型，如图 5.1 所示。评价模型分为三大模块，第一，基于 TGAM 模块的动态脑电波监测的评价分析；第二，基于 MKB0805 模块的动态心率监测的评价分析；第三，基于认知负荷理论的认知测评分析。

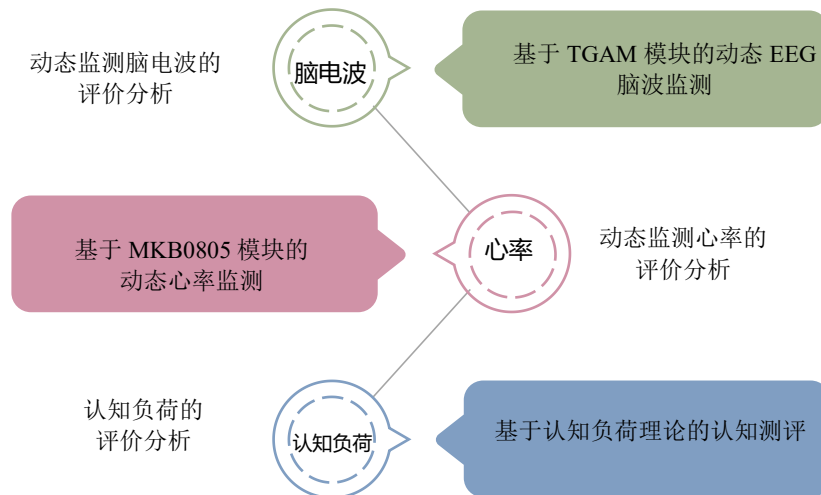


图 5.1 多模态课堂教学的评价模型设计

根据文献研究的结果表明,基于以上三个维度的效果分析,beta波的振荡频率与活跃的思维有关,gamma波与认知处理相关,因此beta波和gamma波的振荡频率高,说明被试在学习过程中被激活了更多与认知相关的脑区功能,学习者的学习投入在大脑激活方面投入更多;基于心率的数据数据分析可得,心率变异性强,注意力不集中,学习者的学习投入在注意力维度上投入较少。

元宇宙实现了身处异地的不同终端学习者通过化身可共享相同的元宇宙虚拟空间,基于元宇宙中的社交规则,参与者还能进行资源共享、实战演练与合作互动等学习活动。

对于学习者,可以根据学习安排进入不同的元宇宙空间,开展探究式学习、自主学习、小组合作学习等,这种学习方式提高了学习效率,也激发了学生的学习兴趣,同时培养了学生的学习自控能力。

对于教师,在元宇宙中教师可以通过现场讲解、实地勘察、作品展示与经验分享等活动,创新教学模式,按教学设计的需要切换教学需要的场景,这无疑会帮助学生更好地理解概念,提高了教师的教学效率,也活跃了课堂氛围。在元宇宙进行教学的这种方式将消除教与学的界限,使得师生平等地畅游在学习场景中,并一同体验学习的快乐以及探索知识的乐趣。

## 5.2 基于风力发电元宇宙学习空间的多模态课堂教学的评价工具

### 5.2.1 基于TGAM模块的动态EEG脑波监测

TGAM模块是一种基于Think Gear Asic模块的可编程半导体芯片,是一种高度集成的单片脑电传感器。通过脑波信号的采集、滤波、放大、A/D转换和计算的集成,采样频率为512Hz,其内置的滤波降噪电路可以在使用过程中自动滤除环境中的各种噪声干扰,功耗低<sup>[136]</sup>,图5.2所示为脑波传感器的电路图。

TGAM传感器有三个接触点,EEG(EEG采集点)、REF(参考点)和GND(接地点)。如图5.3所示,REF参考点的耳夹1和耳夹2通常夹在被试的两只耳朵上,一般夹在测试者耳垂上。EEG采集点应放置在测试人员的额头上,使用设备前要注意清理皮肤,头发也会对信号造成干扰。

通过蓝牙模块,被试可以摆脱传统采集模式中有线通信的束缚,测试者

可以带着设备自由活动，这为监测学生在元宇宙学习空间中的脑电信号提供了便利。

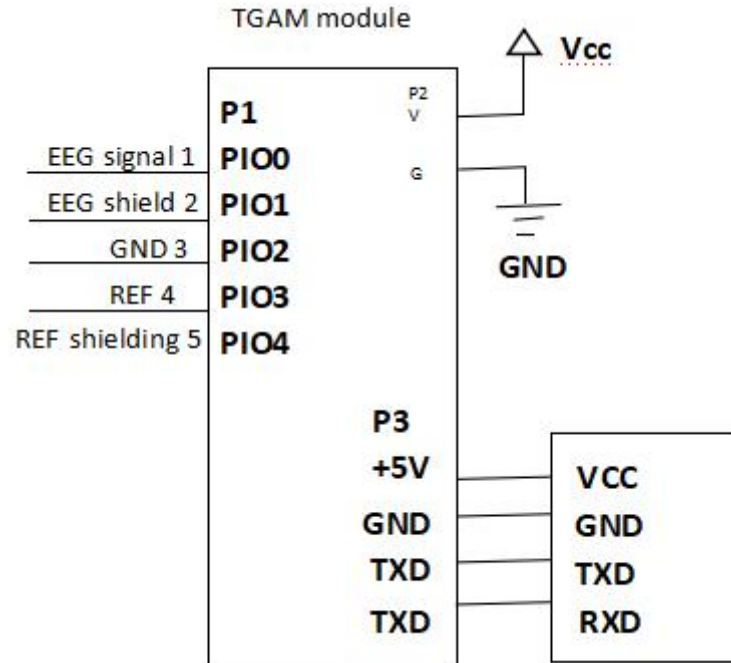


图 5.2 脑波传感器电路图



图 5.3 TGAM 模块

TGAM 模块大约每秒钟发送 513 个包，发送的包有小包和大包两种：小包的格式是 AAAA 04 80 02 *xxHigh* *xxLow* *xxChecksum* 前面的 AAAA 04 80 02 是不变的，后三个字节是一直变化的，*xxHigh* 和 *xxLow* 组成了原始数据 *Rawdata*，*xxChecksum* 就是校验和<sup>[137]</sup>。通过滤波、降噪和特征提取，处理信号通过数据包的形式传输至电脑端；EEG 脑电分析软件系统通过以下程序<sup>[138]</sup>实现数据分析。

$$sum = ((0x80 + 0x02 + High + Low) \wedge 0xFFFFFFFF) \& 0xFF$$

并对数据包进行校验，算出丢包率，丢包率在 10% 以下是不会对最后结果造成影响的。再通过以下程序解析出 EEG 原始数据。

$$Rawdata = (xxHigh \ll 8) | xxLow;$$

$$If (Rawdata) > 327680 \{ Rawdata = 65536; \}$$

将高字节左移 16 位，中字节左移 8 位，低字节不变，然后将他们或运算，得到的结果为 8 个脑波信号值，还有注意力和放松度值<sup>[138-139]</sup>。这些值是没有单位的，只有在和其他的 Beta, Gamma 等值相互比较时才有意义<sup>[138]</sup>。

本研究基于 TGAM 模块采集脑电信号，通过数字滤波器以及带通滤波器对采集的脑电信号进行预处理，然后通过相关内置算法以实现信号输出，最后通过蓝牙设备，将数据传输至终端设备进行相应的处理和分析。

对于脑电波的监测，传统研究通常采用湿电极收集方法。为了减少以这种方式收集脑电图信号时阻抗的影响，通常需要在人体头部涂抹大量导电膏，并且随着时间的推移定期更换导电膏，这种方法对实验者和操作者来说更麻烦。鉴于传统脑电信号采集方法的上述缺点，该系统采用单导干电极传感器进行信号采集。

### 5.2.2 基于 MKB0805 模块的动态心率血压监测

MKB0805 心率血压监测方案主要由 1 颗 YK1801 脉搏传感器芯片、1 颗 HR6707 脉搏芯片、1 颗 HR6816 增益芯片和 1 颗 SFB9712 算法芯片组成。MKB0805 心率血压监测模块的电路图如图 5.4 所示。

脉搏传感器芯片可实现的心率血压监测功能如下：心率血压采集计算、脉搏波和心电波形输出、人体佩戴状态识别、脱落无数据输出，自动增益功能。该智能穿戴血压测试模块算法 MCU 中，植入了心率血压算法，可直接输出串口 uart 信号，数据提取方便快捷。该设备血压测量真实可靠、高精度、高稳定、高

灵敏度，被广泛应用于心率计、腕带、手环、手表、耳机、医疗器械、健身器材等。

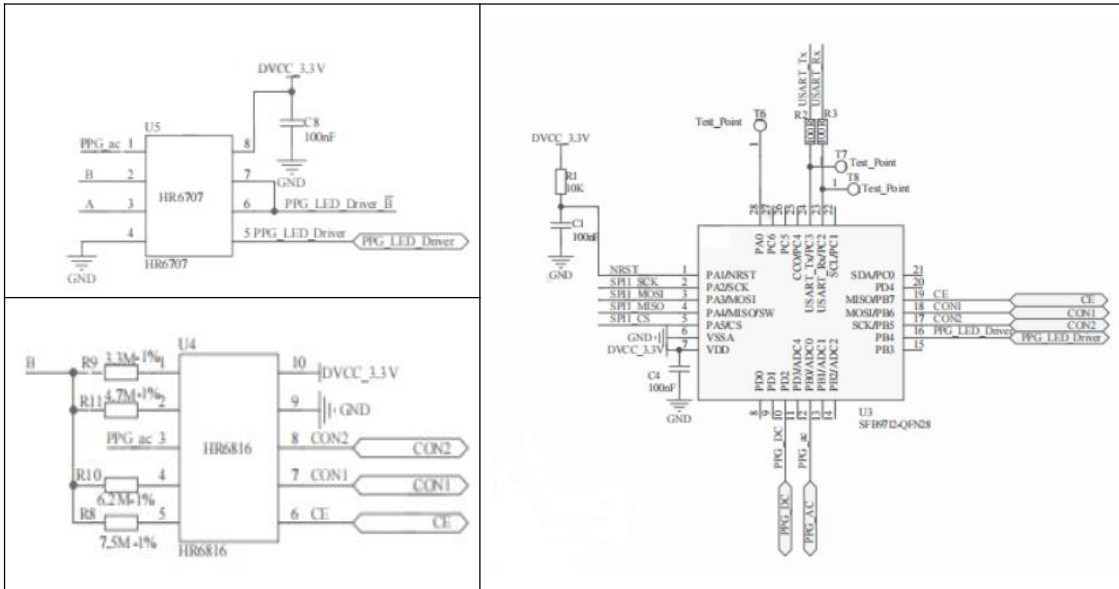


图 5.4 脉搏传感器的芯片电路图

心脏每次周期性的收缩与舒张运动都会导致血管壁呈现周期性变化，并产生一个脉搏波<sup>[141]</sup>，而 PPG 是借助光电手段在活体组织中检测脉搏波的一种无创检测方法<sup>[142]</sup>。



图 5.5 MKB0805 模块

Veltman 对飞行员的生理反应指标进行分析，发现随着负荷增加，心率增加，结果发现心率及心率变异性与认知负荷的关系密切<sup>[143]</sup>。Paas 等人认为心率测量不会干扰学习过程，通过心率变化来估计不同的认知负荷并且对认知负荷的细

微变化较为敏感，能有效测量认知负荷<sup>[144]</sup>。

根据著名的 Moens-Korteweg 方程，血压越大脉搏波传播速度越快，同样的距离，脉搏波传输时间越短，因此脉搏波传输时间通常与血压呈反比关系<sup>[145]</sup>。心理学领域也得出结论，心率变异性（Heart Rate Variability，简称 HRV）能够反映持续注意力的变化<sup>[146]</sup>。HRV 已成为衡量注意水平的重要指标，高 HRV 的稳定值可以灵敏地反映被试在测试过程中注意的稳定性<sup>[147]</sup>。

### 5.2.3 基于认知负荷理论的认知测评

本实验前测通过自我调节学习能力问卷，实验结束后被试需填写当即测试问卷和自我评定量表。本实验采用 WP( the Workload Profile Index Ratings)量表进行认知负荷的测量。WP 量表是 Tsang 和 Velazquez 提出的新的主观评价负荷量表<sup>[148-149]</sup>。

孙崇勇博士经过多媒体学习实验研究，认为该量表是多媒体环境下认知负荷测量较为理想的工具<sup>[150]</sup>。如表 5.1 所示，WP 自我评定量表共有 7 个维度，每个维度对应一种资源。被试在学习任务结束后，要确定出某一种资源投入了多少；其中“0”代表完全没有占用该资源，“10”代表该资源被全部占用。

表 5.1 WP 量表<sup>[149]</sup>

| 维度名称   | 维度含义                         |
|--------|------------------------------|
| 中枢处理资源 | 你在任务选择与执行过程中所消耗的心理资源         |
| 响应资源   | 你感觉要对任务作出反应所消耗的心理资源          |
| 空间编码资源 | 你完成任务过程中大脑空间活动所消耗的心理资源       |
| 语言编码资源 | 你完成任务过程中大脑语言活动所消耗的心理资源       |
| 视觉接收资源 | 你完成任务过程中从视觉通道获取信息所消耗的心理资源    |
| 听觉接收资源 | 你完成任务过程中从听觉通道获取信息所消耗的心理资源    |
| 操作资源   | 你完成任务过程中你感觉操作自己的肢体对认知负荷造成的影响 |

此外，在本文中采用 Paas 自我评定量表进行心理努力评价和任务难度评价。Paas 自我评定量表共有两个维度，即：（1）在刚才的任务当中，你投入了多少心理努力？被试要从如图 5.6 所示 9 个数字中选择适合自己的数字，其中“1”代表最少努力，“5”代表中等努力，“9”代表最大努力。（2）你认为刚才的任务难度如何？被试要从如图 5.6 所示 9 个数字中选择适合自己的数字，其中“1”

代表非常容易，“5”代表中等难度，“9”代表非常困难<sup>[151]</sup>。

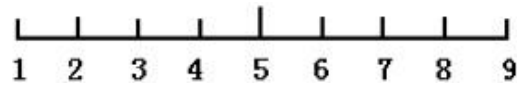


图 5.6 Paas 量表

## 5.3 基于风力发电元宇宙学习空间的多模态课堂教学的评价分析

### 5.3.1 基于 TGAM 模块的动态脑波监测的评价分析

将 TGAM 模块设置为 9600 波特率，使用串行端口通信以输出 delta、theta、alpha、beta、gamma 脑电波带数据以及注意力和放松度值。大脑包括 delta 节律波（0.5~4 Hz）、theta 节律波（4~8 Hz）、alpha 节律波（8~13 Hz）、beta 节律波（12~30 Hz）和低频 gamma 节律波（30~80 Hz）、高频 gamma 节律波（80~150 Hz）。

为了更好地保持原始数据的特征量而不失真，通过降噪、平滑、低通滤波、带通滤波、高通滤波和傅立叶变换等操作对信号进行分类和处理。由于 TGAM 模块检测的脑电波数据，单个数字并无意义，只有与同种脑波进行比较才有意义。本研究使用 Origin 软件进行 EEG 数据预处理，用设置为 0.5Hz 的高通滤波器和设置为 100Hz 的低通滤波器对原始 EEG 数据输出进行滤波，再进行对比，进而说明外部刺激对与认知相关的脑区激活的程度。

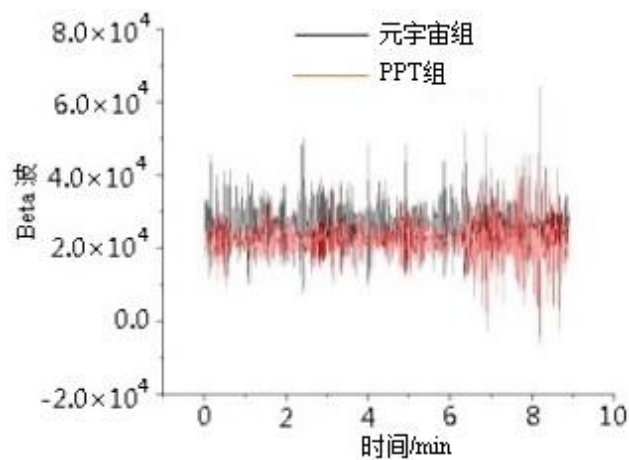
随着对更直接的学习测量的迫切需求，最近的几项研究表明，脑电图（EEG）是捕捉利用虚拟现实技术进行学习的认知过程的有效方法<sup>[152]</sup>。脑电图是一种神经成像技术，它捕捉认知过程中同时振荡的神经元产生的总电活动<sup>[153]</sup>。为了能够更好地解析 EEG 信号，可以在频域、时域或时频域空间中分析 EEG 信号，由于这项研究的核心是探索元宇宙沉浸式学习环境中学生的整个学习过程发生的认知变化，因此我们使用频域分析来探索该区间的连续 EEG 信号。

在基于频率的脑电图分析中，beta 和 gamma 频带的振荡神经元活动变化被证明与认知相关<sup>[154]</sup>。beta 波通常与活跃、繁忙或者交流的想法有关<sup>[155]</sup>。运动皮层 beta 波与肌肉收缩相关<sup>[156]</sup>。Orün 和 Akbulut 最近的一项研究结果初步表明 beta 节律波的活动与自我报告的心理努力显著相关<sup>[157]</sup>。gamma 节律波具有多重功能，被认为是脑信号传导中与认知处理相关的重要节律<sup>[158]</sup>。

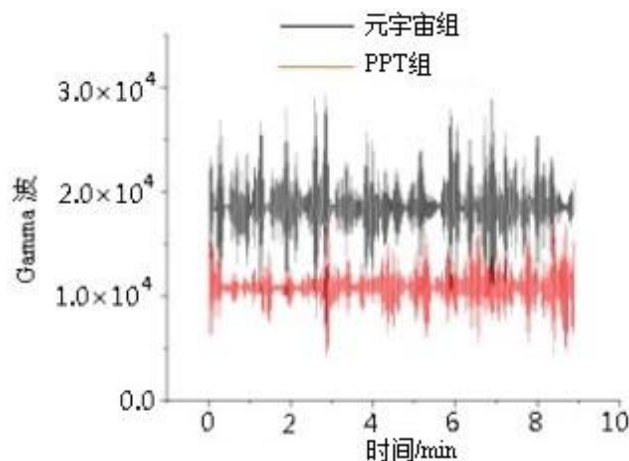
## (1) 元宇宙教学组与传统 PPT 教学组

通过对比传统 PPT 组和元宇宙教学组，我们可以从图 5.7 中进行观察。

Beta 波通常与活跃、积极交流的想法有关，由图 5.7a 可知，元宇宙教学组学生较 PPT 学生在学习过程中思维更加活跃繁忙；Gamma 波与认知处理相关，由图 5.7b 可知，元宇宙教学组学生在学习过程中的认知加工处理较 PPT 组更多，因此，在与认知相关的脑区投入方面，元宇宙教学组的学习投入较传统 PPT 组更多。综上所述，学生使用元宇宙进行学习，能激发更多的脑区功能，从 EEG 数据的分析来看，元宇宙有利于学生的认知建构。



a) PPT 组和元宇宙组的 Beta 波对比图

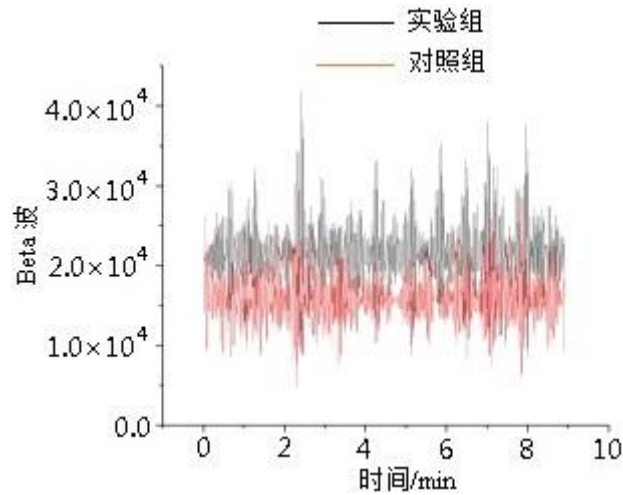


b) PPT 组和元宇宙组的 Gamma 波对比图

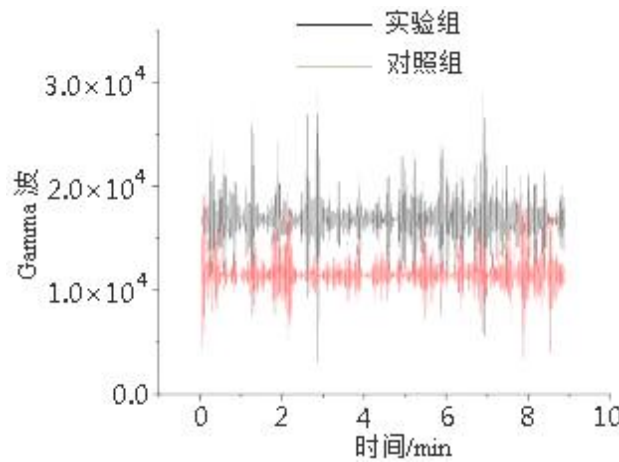
图 5.7 PPT 组和元宇宙组脑波分析图集

(2) 元宇宙实验组与元宇宙对照组

为了更好地探究元宇宙视域下不同教学设计对教学效果的影响，本研究设计了设置了完全教学设计的元宇宙实验组和缺失先验知识的不完全教学设计的元宇宙对照组。图 5.8 是两组在相同元宇宙中 EEG 信号 Beta 波、Gamma 波对比图集。



a) 实验组和对照组的 Beta 波对比图



b) 实验组和对照组的 Gamma 波对比图

图 5.8 元宇宙实验组和对照组脑波分析图集

由图 5.8 可知，实验组的 Beta 波、Gamma 波的振幅响应均比对照组的强烈，由此可见，实验组在学习过程中能激活更多与认知相关脑区，实验组学生在学习过程中学习投入更多。

### 5.3.2 基于 MKB0805 模块的动态心率监测的评价分析

根据心流理论，注意力的专注程度是鉴别心流体验有无发生或发生程度的有力证据。实验组和对照组的平均心率和最大心率无显著差异，Paas 等人发现使用心率监测仪并不会对学生学习过程造成影响<sup>[144]</sup>，Siennicka 等人通过实验研究发现心率变异性与注意表现相联系<sup>[159]</sup>，心率随注意力变化，二者呈现反比例函数的变化趋势<sup>[160]</sup>。

#### (1) 元宇宙教学组与传统 PPT 教学组

将两组的心率数据平滑、傅里叶变化等处理可以看出，如图 5.9 所示，传统 PPT 组的平均心率变化曲线高于元宇宙教学组，说明元宇宙教学组学生在学习过程中注意力较集中。基于心流体验的发生机制，可以推断出，元宇宙教学组学生在学习过程中更易发生心流体验，或者发生心流体验的程度较 PPT 组学生更深，元宇宙教学组学生学习投入更多。

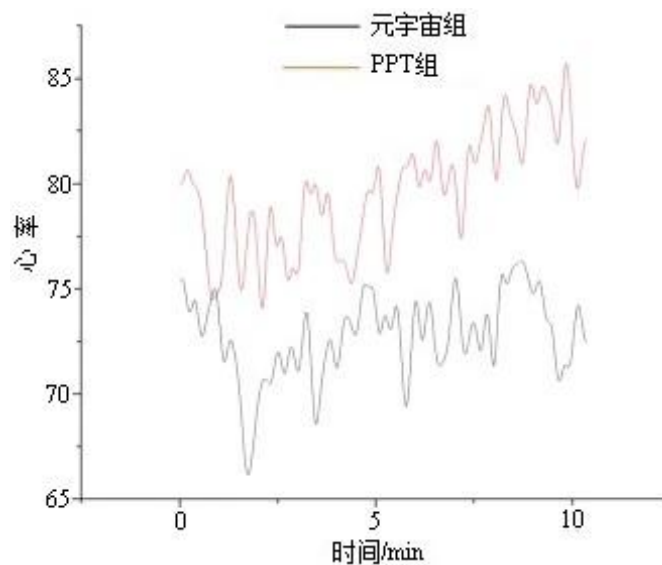


图 5.9 元宇宙教学组和传统 PPT 组心率变化图

#### (2) 元宇宙实验组与元宇宙对照组

通过分析元宇宙实验组与元宇宙对照组的心率数据，两组心率变化如图 5.10 所示。元宇宙对照组的平均心率变化曲线明显高于元宇宙实验组，说明元宇宙实验组的学生在学习过程中注意力更集中。基于心流体验的发生机制，可

以推断元宇宙实验组学生更易发生心流体验，或者是发生心流体验的程度较元宇宙对照组更深，实验组学生在学习过程中学习投入更多。

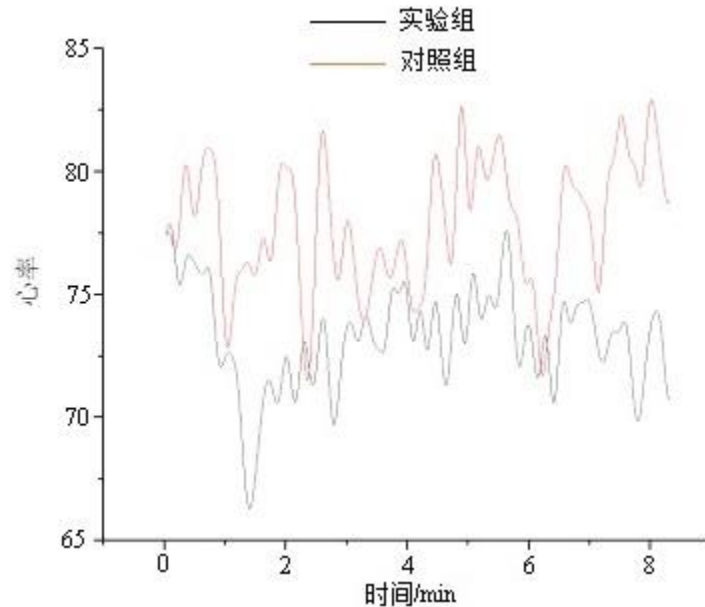


图 5.10 元宇宙实验组和对照组心率变化图

### 5.3.3 基于认知负荷理论的评价分析

根据认知负荷理论，Sweller 等人把认知负荷分为三大类，即主要受学习材料的复杂性和学习者先前知识的影响的内在认知负荷<sup>[161]</sup>；与学习材料的组织和呈现方式有关，比如教学媒体、教科书、讲学方式等称为外在认知负荷<sup>[162]</sup>。在进行认知建构的过程中，当学习者用于处理内在认知负荷、外在认知负荷之余，未用完的剩余认知资源用到与学习直接相关的加工，比如重组、分析、对比和推理等，就会产生相关认知负荷<sup>[163]</sup>。

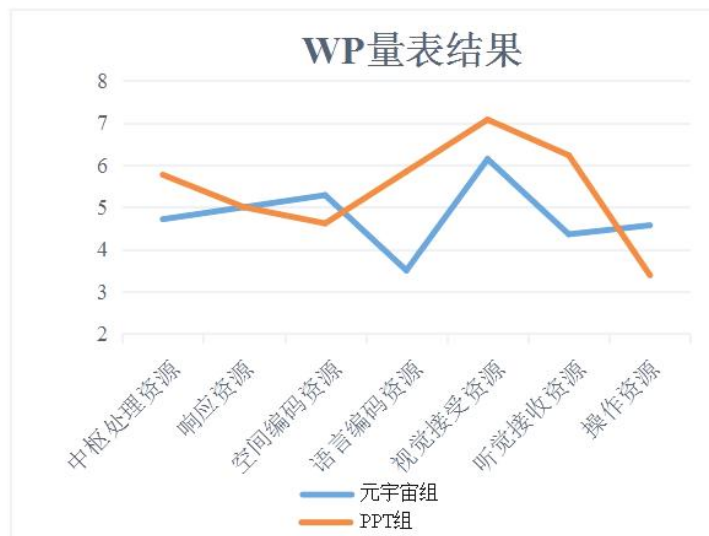
内在认知负荷（ICL）、外在认知负荷（ECL）以及相关认知负荷（GCL）相加就是认知负荷总量，即总的认知负荷。对于同一学习任务，学习者完成认知建构消耗的总认知负荷是一定的。元宇宙教学组和传统 PPT 组学习者均来自物电学院，对风力发电课程中风能利用系数所相关的专业知识储备并无差异，那么工作记忆所需加工的图示基本处于同一水平，由此两组的内在认知负荷可以近似相同。因此此时两组的 WP 量表反应的是两组间外在认知负荷的差异。

研究采用 Paas 编制的认知负荷自评量表（Paas 量表），其包括心理努力和任务难度两方面评价，均采用 9 级评分制，从 1 到 9 表示付出的心理努力和材

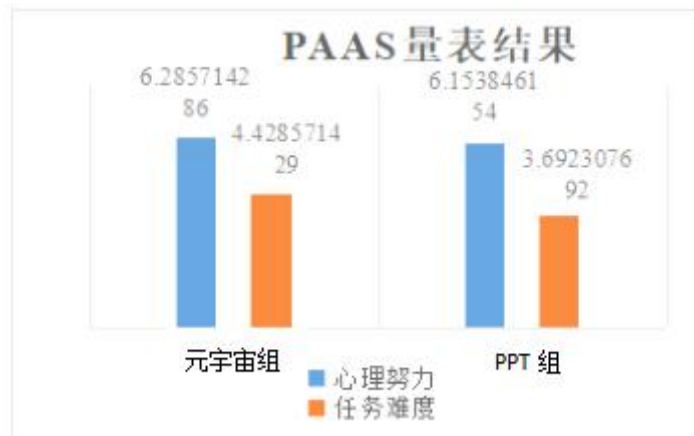
料难度程度依次递增，该量表的信度较高，内部一致性信度系数 $\alpha=0.74^{[144]}$ 。

(1) 元宇宙教学组与传统 PPT 教学组

如图 5.11 (a) 所示，PPT 组学生的中枢处理资源测量结果平均值为 5.769，而元宇宙教学组学生的中枢处理资源测量结果平均值为 4.714，造成的原因可能是由于元宇宙沉浸式环境通过视、听、触等多通道感知，再加之学生在元宇宙中有身临其境的体验，这无疑可以在一定程度上帮助学生更好地理解 and 建构知识。而使用传统 PPT 的学生通过平面式 2D 媒介学习概念性知识，身体和大脑并没有完全投入，学习起来可能相对吃力，因此消耗的中枢处理资源较多。



a) 元宇宙组和 PPT 组的 WP 量表结果对比图



b) 元宇宙组和 PPT 组的 Paas 量表结果对比图

图 5.11 元宇宙组和传统 PPT 组认知负荷对比图

对于该认知事件两组学生消耗的响应资源均为5，产生的原因可能是学习者认为两种学习媒介均能实现知识转移的功能。

PPT组学生的空间编码资源测量结果平均值为4.615，而元宇宙教学组学生的空间编码资源测量结果平均值为5.286，产生的原因可能是由于元宇宙所创设的是三维立体空间如同真实环境的场景，学生在虚拟空间中关注的内容较多，而传统PPT组只需观看投影仪所呈现的文本、图片、视频、音频等内容，视角较狭窄，无法使学生感受到另一个空间的临场体验。

元宇宙教学组学生的语言编码资源测量结果平均值为3.5，而PPT组学生的语言编码资源测量结果平均值为5.846，产生的原因可能是PPT组学生更加关注文本的内容，而元宇宙教学组需要实际操作，当然在消耗语言编码资源方面比PPT组更低。

PPT组学生的视觉接受资源测量结果平均值为7.077，元宇宙教学组学生的视觉接受资源测量结果平均值为6.143；PPT组学生的听觉接收资源测量结果平均值为6.231，元宇宙教学组4.357。由于PPT组的学生在学习过程中缺乏其他的锻炼，比如动手实际操作等训练，在视觉、听觉资源处理方面均高于元宇宙教学组学生。

PPT组学生的操作资源测量结果平均值为3.385，元宇宙教学组学生的操作资源测量结果平均值为4.571，产生的原因可能是PPT组学生最主要的操作是做笔记和做计算，而元宇宙教学组的学生除了控制手柄进行相应的操作，还要在实践的基础上进行认知加工，因而元宇宙教学组学生在学习过程消耗更多操作资源。

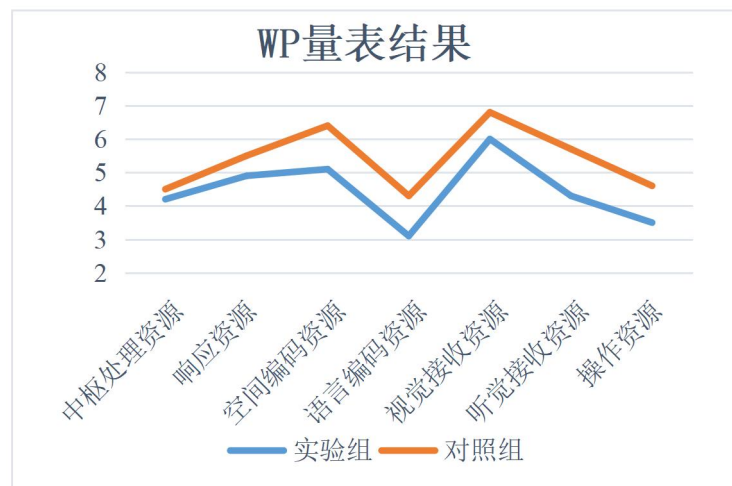
7个维度的均值即为认知负荷指数<sup>[90]</sup>。PPT组的认知负荷指数为5.418，元宇宙教学组的认知负荷指数为4.796，由此可知PPT组的外在认知负荷比元宇宙教学组的外在认知负荷高。根据认知负荷理论，PPT组的相关认知负荷比元宇宙教学组低，也就说明，元宇宙教学组学生的学习效果较好。

在Paas量表中，如图5.11(b)所示，元宇宙教学组学生的心理努力测量结果平均值为6.286，较PPT组学生的心理努力测量结果平均值6.154稍高，说明元宇宙教学组学生在学习该内容时付出更多心理努力。元宇宙组学生的任务难度测量平均值较PPT更高，该数据反映元宇宙组学生对完成该项学习任务的难度感知较对照组也更困难。

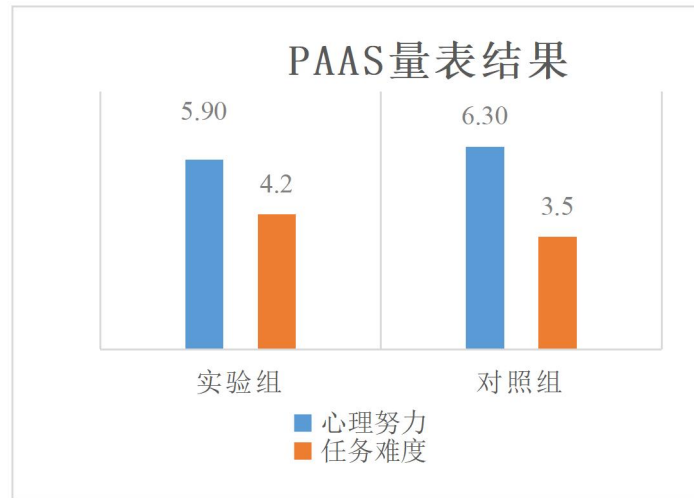
## (2) 元宇宙实验组与元宇宙对照组

在 WP 量表中, 学习者学习相同的学习材料, 使用相同的学习媒介, 两组内在认知负荷相同, 然而教学设计的不同决定了两组的外在认知负荷的差异。如图 5.12(a)所示, WP 量表中对照组的量表值均大于实验组的数值, 即对照组的外在认知负荷高于实验组的外在认知负荷, 根据相关认知负荷理论, 可以得出实验组的相关认知负荷高于对照组, 实验组的学习效果较对照组更好。

如图 5.12(a)所示, 元宇宙实验组学生的中枢处理资源测量结果平均值为 4.2, 而元宇宙对照组学生的中枢处理资源测量结果平均值为 4.5, 造成的原因可能是由于元宇宙沉浸式环境通过视、听、触等多通道感知, 再加之实验组学生进行了先验知识的回顾, 这无疑可以在一定程度上帮助学生更轻松的学习知识。元宇宙对照组的学生没有进行先验知识的回顾, 知识的转移和建构存在一定难度, 学习起来相对吃力, 因此消耗的中枢处理资源较多。



a) 元宇宙实验组和对照组的 WP 量表结果对比图



b) 元宇宙实验组和对照组的 Paas 量表结果对比图

图 5.12 元宇宙实验组和对照组认知负荷对比图

对于该认知事件，元宇宙实验组学生的响应资源测量结果平均值为 4.9，元宇宙对照组学生的响应资源测量结果平均值为 5.5，产生的原因可能是元宇宙实验组采用的教学设计包含先验知识回顾阶段，起到了更好的进行知识转移的奠基作用。

元宇宙实验组学生的空间编码资源测量结果平均值为 5.1，元宇宙对照组学生的空间编码资源测量结果平均值为 6.4，产生的原因可能是由于创设的是元宇宙三维立体空间如同真实环境的场景，学生在虚拟空间中关注的内容较多，而元宇宙对照组由于没有先验知识的铺垫，对于场景所呈现的文本、图片、视频、音频等内容，需要投入更多空间编码资源进行资源综合，从而形成新的认知。

元宇宙实验组学生的语言编码资源测量结果平均值为 3.1，元宇宙对照组学生的语言编码资源测量结果平均值为 4.3，产生的原因可能是元宇宙实验组经过了先验知识的回顾和复习，对于场景中的语言类学习资源，理解更快，而对照组则需要耗费更多资源才能帮助理解。

元宇宙实验组学生的视觉接受资源测量结果平均值为 6，元宇宙对照组学生的视觉接受资源测量结果平均值为 6.8。元宇宙实验组学生的听觉接受资源测量结果平均值为 4.3，元宇宙对照组学生的听觉接受资源测量结果平均值为 5.7；元宇宙实验组学生的操作资源测量结果平均值为 3.5，元宇宙对照组学生的操作资源测量结果平均值为 4.6，以上产生的原因可能是元宇宙对照组在教学

设计中缺失的先验知识教学环节，导致了元宇宙对照组学生在学习过程需要消耗更多资源。

元宇宙实验组的认知负荷指数为 3.886，元宇宙对照组的认知负荷指数为 5.4，由此可知元宇宙对照组的内在认知负荷比元宇宙实验组的内在认知负荷高。根据认知负荷理论，两组使用相同的学习媒体，不同的教学设计，两组内在认知负荷相同，元宇宙对照组的相关认知负荷比元宇宙实验组低，也就说明，元宇宙实验组学生的学习效果较好。

在 Paas 量表中，如图 5.12(b)所示，实验组的心理努力指数为 5.9，较对照组的心理努力指数 6.3 更低，说明对照组学生在学习该内容时投入更多心理努力。由于对照组没有先验知识回顾阶段，因此学习材料与大脑中储存的图示之间缺少关联，需要额外的心理努力构建图示之间的关联，因此对照组感受到较大学习压力。实验组则感觉更轻松，而实验组的学生反映该学习任务难度较对照组更难。

根据本章的第一小节关于脑波的分析，元宇宙教学组较 PPT 组能激活更多与认知相关的脑区，且 PPT 组反映出低层次唤醒状态，学生注意力不集中。而在本章关于心率的分析中 PPT 组学生心率较快、注意力不集中，也验证了脑波分析的结论。在本章关于认知负荷的分析中，可以看出元宇宙教学组的相关认知负荷较 PPT 组更高，但是元宇宙教学组学生也反应完成任务难度较 PPT 组更大，也就是元宇宙教学组学生的学习效果更好，但学生反应任务难度大、且需要付出更多心理努力，这个结果也与当即测试的成绩形成了相互论证的关系。

根据本章关于脑波的分析，元宇宙实验组较元宇宙对照组能激活更多与认知相关的脑区。在本章关于认知负荷的分析中，可以看出两组使用相同的学习媒介，外在认知负荷几乎相同。WP 量表的结果说明元宇宙对照组的内在认知负荷较元宇宙实验组更高，根据认知负荷总量的计算公式，说明元宇宙实验组的相关认知负荷较元宇宙对照组更高。Paas 量表结果表明，元宇宙实验组学生在学习过程中付出的心理努力较对照组更小，也就是实验组学生学习更轻松。

## 5.4 本章小结

本章主要围绕脑电、心率、认知负荷、成绩等方面展开效果分析，进而构建多维立体的论证结构，使效果分析的结论更具客观性。首先是分析元宇宙教

学组和传统教学 PPT 组在学习过程中采集的脑电信号，通过平滑、滤波、傅立叶变化等操作，分析了 Beta、Gamma 节律波在不同学习阶段的振荡情况。

研究结果表明传统 PPT 组反映出低层次的脑区响应，元宇宙教学组能够激活更多与认知相关的脑区功能。其次分析了元宇宙教学组和传统教学 PPT 组在学习过程中采集的心率信号，结果显示元宇宙教学组学生的心率变化幅度较低，说明元宇宙教学组学生在学习过程中注意力更集中。其三以认知负荷理论为研究基础测量两组学生在实验过程中的认知负荷情况，结果显示元宇宙教学组的外在认知负荷较传统教学 PPT 组更低，也就说明元宇宙教学组的相关认知负荷较传统教学 PPT 组更高，元宇宙教学组学生的学习效果更好。

在第一组实验结论的基础上设计了第二组实验，即元宇宙实验组和元宇宙对照组，两组均使用元宇宙作为学习媒介，但是教学设计有差异。元宇宙实验组采用本论文第四章的教学设计，而元宇宙对照组在第四章教学设计上缺失了先验知识回顾和测试的环节，以此来探究不同教学设计在元宇宙视域下是否对学习结果产生影响。从脑电、心率、认知负荷、成绩等方面的研究结果显示，先验知识对于元宇宙教学媒介的教学活动具有显著影响。

## 第6章 结论与展望

课堂是教学实践和教育改革的场所，但是教育发展的进程中也出现了一些难以在短期内克服的问题，而元宇宙的出现将为解决教育实践中突出的难题提供新的解决方案。

### 6.1 研究结论

研究表明，在第一组元宇宙教学组与传统 PPT 组的实验中，我们论证了元宇宙教学组能够激活学生更多与认知相关的脑区功能，同时能获得更好的学习效果。在第一轮元宇宙教学组与传统 PPT 教学组的实验基础上，第二轮元宇宙实验组采用的教学设计使元宇宙学习支架起到了帮助学生理解、促进认知建构的学习效果；而元宇宙对照组采用教学设计，忽略了先验知识测试的环节，两组后测成绩大相径庭，根据脑波检测、心率检测、认知负荷测量的分析，得出以下结论：

(1) 第一轮实验将元宇宙教学组与传统 PPT 教学组进行对比，观察到与认知相关的脑波频率振荡两组有较大差异，元宇宙教学组的脑波响应幅度明显强于传统 PPT 组，说明元宇宙教学组学生被激活了更多与认知相关的脑区。从认知负荷量表中可以得出，元宇宙教学组能获得更高的相关认知负荷，但是在学习过程中，元宇宙教学组学生付出更多心里努力，元宇宙教学组的学生在完成该认知事件的难度感知较传统 PPT 组更困难。通过心率方面的分析得出，元宇宙教学组的心率变化较传统组更低更平稳，表明元宇宙教学组学生在学习过程中注意力更集中，发生心流体验的程度更深。综上，元宇宙教学组学生在学习过程中，学习者可以借助风力发电元宇宙学习空间对学习材料建立更好的整体理解，可以利用周围的环境来锚定和帮助编码他们的认知图示，同时交互式的环境也可以刺激他们的想象推理，使他们能够更容易地访问先前建立的心理表征和图式，从而促进学生的学习投入，元宇宙沉浸式的学习环境有利于学习者学习。

(2) 第二轮实验结果显示,元宇宙实验组和元宇宙对照组在相同元宇宙学习支架下,与空间记忆、情感加工、认知建构相关的 Gamma 波、Beta 波的对比分析中,实验组的 Gamma 波、Beta 波的振幅响应均大于对照组,可见实验组的学习者被激活了更多与认知相关的脑区。从实验组和对照组学习者的认知负荷测评 WP 量表可以看出,实验组能获得更大的相关认知负荷从而促进认知建构和知识内化。相反从 Paas 量表中可以看出,实验组投入的心理努力小于对照组,而实验组反映任务难度较对照组更大。根据实验组和对照组的心率分析得出,实验组总体心率变化较对照组更低、更平稳,说明实验组学生的注意力更集中,学生发生心流体验的程度更深。综上,先验知识在元宇宙学习空间起着重要的支架作用,可以促进学生对图示的深度加工,以及促进学生的学习投入和心流体验的发生。这也表明教学设计才是教育的精髓所在,任何媒体都不能逾越教学的基本原理进行教育实践活动。

教育元宇宙创设的学习环境打破了教与学在时间和空间的限制,突破了师生交流的扁平化局限,从某种程度上说,教育元宇宙是现实教育的扩充,包含了师生行为、思想、情感等非语言符号的立体化虚拟空间。元宇宙是高度集成现实和想象的综合体,且能够同现实世界保持互动、同步运行的虚拟空间,可以创造近乎真实的体验和“存在感”。

对于学生的学习方面,元宇宙融合了多种智能技术,可以创建比较真实或者超现实的场景。学生可以穿越到恐龙时代近距离感受恐龙的生活和气息,可以穿梭在太空感受宇宙的浩瀚,也可以去埃及的金字塔感受埃及文化的魅力,还可以畅游微观世界感受不一样的生命历程。

对于教师的教学方面,元宇宙能够帮助教师实现教学设计中的相关教学情境,可以更好的帮助教师完成教学活动,提高知识传递的效率,也有助于学生对相关概念的理解和认知。其次师生同时在场的参与方式使教师能够突破时空限制陪伴和监督学生的学习过程。比如,在元宇宙中,学习者在教师的指导下,可以尝试做现实环境无法实现的危险实验,观看爆炸现场,医学生还能够动手进行手术操作等。

认知是基于身体的,也是植根于环境的,认知不并是单独的语言文字的传递和接收,而是身体与环境的相互作用的结果,身体的感知觉运动和环境融合关联的过程是完整学习过程的有机组成部分。元宇宙极大地拓展与融合了身体

的感知维度,丰富了师生的教与学方式,元宇宙能够帮助他们在“真实”的虚拟场景中实现知识的建构。

## 6.2 研究建议

通过对元宇宙赋能教育的调研和分析,对元宇宙在促进学生的学习能力和提升元宇宙课程设计方面,提出以下建议:

### (1) 鼓励教师探索适合元宇宙教学环境的课程体系

随着数字化和智能化的不断发展,教育元宇宙基建设备也不断完善,教师教学软实力相应也应随之得到提高,在先进技术和创新应用的加持下,使用教育元宇宙开展教学活动就需提升教师信息技术的能力,才能实现教育改革的进步和创新。通过该实验的研究结论得出,教育工作应以教学设计为重,应该鼓励一线教师积极探索适合元宇宙教学的课程,倡导以学生为主体、教师为主导的教学理念,将课堂还给学生。在创设元宇宙学习环境时,在以教学设计为教学前提的基础上,将其融入复杂任务场景中,使其能更多的激发学生学习兴趣,进一步激发学生进行自我探索。

元宇宙学习空间能给人带来身临其境的临场体验,为避免学生被与学习无关的环境所吸引,元宇宙空间应给予其明确的引导信息,帮助学生完成教学任务,实现教学目标。由于元宇宙具有沉浸和交互的特征,且与传统学习方式不同,因此在真实世界难以实现的场景以及抽象化的概念能够被可视化呈现,这将有利于学生对这些概念的深度加工。

### (2) 加强校企合作

一线教师探索适合开发的元宇宙课程,企业根据教学任务和教学目标开发元宇宙,优化教学设计,将课堂还给学生,激发学生创新和探索精神。在目前VR/AR/MR/XR的部分教学实验中,学生所反映出的沉浸感、学习兴趣较传统教学更高,课堂气氛更活跃,生生协作、交流和互动很热烈,但是教学环节缺少“以学为主”的设计理念,依然停留在展示、讲解的层面,没有开拓学生创新思维,无法满足学生探究式学习的意愿。因此,我们要以轻量的技术和设备、优秀的教学设计、技术赋能教育的设计来规划元宇宙个性化学习空间的设计,规避炫技式教学、技术主宰课堂、教与学完全脱节的的教学形式。

### (3) 探索元宇宙在远程教育中的应用

元宇宙的出现,通过沉浸式的远程体验模式,使虚拟课堂的学生参与度、临场感、探索欲等大幅度提升,这将极大地提升教育的生产率。根据元宇宙的特征开发基于任务解决和操作训练的综合课程,运用于远程教育中,实现多人同一场域、同一空间的有效学习。我国地域辽阔,各地区经济发展存在差异,教学方面硬件和软件资源的配置也存在巨大的悬殊。

发达地区师资雄厚、技术前沿、资源丰富、设备先进,可以大力培养综合素质高的创新型人才;而经济落后的地区,学生无法接受到先进的教育信息技术,只能接受传统的九年义务教育,科学思维和计算机思维比较欠缺。随着互联网和智能终端的普及,元宇宙将来在远程教育中的运用,将在一定程度上缓解教育资源两极分化。

传统的教育需要面对面的方式进行,这使教育的生产率在过去一百多年并没有获得教大的提升,因为教育活动中的“言传身教”更加注重师生的情感交流,且学习内容中的诸多元素是不能单纯通过语言、文字、音视频来传递,教师与学生面当面对面进行交流有助于升华文字信息背后的软影响。教育作为社会的重要组成部分,在每一个时代都发挥了重要作用,是每一个时代都不能缺少的。元宇宙与现代教育相结合,将会使现代教育迎来重大的机遇与挑战,元宇宙教育将会创造新的教育理念、教育方式,现代教育将会发生重大变革。

虽然元宇宙赋能教育有很多优点,但它并不能完全取代传统的教育方式。例如,人与人之间的交流和合作,以及对现实世界的直接观察和体验,仍然是非常重要的学习方式。因此,我们需要在使用元宇宙进行教学的同时,也要注意保持教育的多样性和平衡性,在实际的教学中,我们应该根据学生的实际情况,结合多种教学方式,以达到最佳的教学效果。

### 6.3 研究展望

本研究借助虚拟现实设备 Oculus Quest2 眼镜,利用 Unity 3D 引擎软件设计开发了基于虚拟现实的风力发电丛书关于风能利用系数的学习空间,采用 3DS MAX 建模软件完成模型构建和动画设计,完成风力发电元宇宙学习空间的开发。

借助智能穿戴设备,在未来的教育发展中,元宇宙将学习者的行为、生理、心理变化等进行数字表征,将历史数据与实时数据进行有机结合,并及时反馈给教师与学习者自身,该信息通道将有助于教学过程的动态优化。元宇宙将创

造让学习者产生身份认同和功能依赖以及维系情感，满足学习者社会性的心理需求的虚拟空间。

元宇宙与教育的融合将极大的推动学生学习效果评价的多元化。元宇宙的教学应用探究以具身认知为内核，聚焦学习者的内部变化过程的身—心—脑相协调的学习新理论。但是，如何在元宇宙多通道场景中帮助学生获得最佳心流体验，主动增大学习投入，这是实现学生深度学习的基础和进行教学设计的关键，也是后续研究的方向。

然而，元宇宙设备因为操作的难度，并且在佩戴使用过程中，部分学生会产生眩晕感、甚至呕吐等不适症状，这在一定程度上影响参与者的沉浸感和体验感。因此，针对不同学科如何设计适合的元宇宙学习资源，以及如何规避场景的变化带来的身体不适感，仍需要不断探索并开展实证研究，这也是今后进一步探索的方向。

## 参考文献

- [1] 《“十四五”特殊教育发展提升行动计划》[EB/OL].[2022-1-25].  
[http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/25/content\\_5670341.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/25/content_5670341.htm).
- [2] 《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）》.[OB/OL].[2006-2-9].  
[https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_240244.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm).
- [3] 谢洵.新媒体联盟发布 2016 高等教育版《地平线报告》[J]. 中国远程教育,2016(3):78.
- [4] 兰国帅,郭倩,吕彩杰等.“智能+”时代智能技术构筑智能教育——《地平线报告（2019 高等教育版）》要点与思考[J].开放教育研究,2019(3):22-35.
- [5] 何文涛,杨开城,王亚萍.智慧教室的媒体产品功能在协作学习中的适用性研究[J].中国电化教育,2018(2):73-83.
- [6] 闫志明.学习媒体效能的评价维度分析[J].电化教育研究,2010(5):103-107.
- [7] 张利钊,杜旭,李浩,等.基于多模态数据的学习投入评估方法分析[J].电化教育研究,2022,43(10):72-78.
- [8] 王玉琼.虚拟实验在中学物理教学中的应用研究[D].成都:四川师范大学,2008.
- [9] Zhao Q. A survey on virtual reality[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(3):348-400.
- [10] 罗珽,冷伟.沉浸式虚拟现实技术在地球科学中的应用[J].中国科学技术大学学报,2021,51(6):431-440.
- [11] 潘志庚,姜晓红,张明敏等.分布式虚拟环境综述[J].软件学报,2000,(4):461-467.
- [12] 谢建华,马剑,禹海全,张建茂.基于分布式虚拟现实技术的某型导弹模拟训练仓整体设计[J].科学技术与工程,2007(12):3008-3010.
- [13] 陈永东.远程呈现:真正的身临其境[J].科学画报,2013,(3):28-29.
- [14] D.J.Roberts,A.J.Fairchild, S.P. Campion, et al. Withyou-An Experimental End-to-End Telepresence System Using Video-Based Reconstruction[J], IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING,2015, 9(3): 562-574.
- [15] MUNAKATA Y. Graded representations in behavioral dis-sociations[J]. Trends in Cognitive Sciences, 2001, 5(7): 309-315.
- [16] 李刚,吕立杰,杨曼.教育神经科学在深化教育改革中的应用——以阅读素养提升为例[J].中国教育学刊,2020,(6):83-88.
- [17] 韩继宁,刘革平,王思玉.元宇宙中社会化交互学习的特征与发展路向[J/OL].现代远程教育研究:1-10[2023-04-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1580.G4.20230321.1553.002.html>
- [18] Murray.J.H. (1997). Hamlet on the holodeck. New York, NY: The Free Press.
- [19] Sherman, W. R, Craig, A. B. (2018). Understanding virtual reality: Interface, application, and design. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann.
- [20] Brooks, F. P. (1999). What’s real about virtual reality? IEEE Computer graphics and applications,

19(6): 16–27.

[21] 闫克明,田磊,刘宝.基于 VR 的航空飞行适航保障模拟训练系统设计[J].现代电子技术,2019,42(01): 134-138..

[22] Seymour. N. E, Gallagher. A. G., Roman. S. A, et al.Virtual reality training improves operating room performance: Results of a randomized, double-blinded study[J]. Annals of Surgery, 236(4): 458–464.

[23] Raditanti. J, Majchrzak. T. A., Fromm. J. , et al. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda[J]. Computers & Education, 147: 1-29.

[24] Buttussi Fabio,Chittaro Luca. Effects of Different Types of Virtual Reality Display on Presence and Learning in a Safety Training Scenario.[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2018, 24(2): 1063-1076.

[25] Makransky Guido, Andreassen Niels K, Baceviciute Sarune, et al. Immersive virtual reality increases liking but not learning with a science simulation and generative learning strategies promote learning in immersive virtual reality[J]. Journal of Educational Psychology, 2020,113(4): 1-37.

[26] Matt C. Howard, Melissa B. Gutworth. A meta-analysis of virtual reality training programs for social skill development[J]. Computers & Education, 2020, 144(C): 103707.

[27] Bellamy M, Warren A. Using Online Practicals to Support Lab Sessions[EB/OL]. [2021-06-07]. <http://edshare.soton.ac.uk/id/document/243301>.

[28] A•弗里曼, S•亚当斯贝克尔, M•卡明斯等.新媒体联盟地平线报告:2017 基础教育版[R].白晓晶,张春华,李国云等译.新媒体联盟,2017.

[29] Wang Chen,Tang Yutong, Kassem Mukhtar ALi,et al. Application of VR technology in civil engineering education[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2021, 30(2): 335-348.

[30] Aspiotis Vasileios, Miltiadous Andreas, Kalafatakis Konstantinos, et al. Assessing Electroencephalography as a Stress Indicator: A VR High-Altitude Scenario Monitored through EEG and ECG[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5792.

[31] Behnam M Tehrani, Jun Wang, Dennis Truax. Assessment of mental fatigue using electroencephalography (EEG) and virtual reality (VR) for construction fall hazard prevention[J]. Engineering Construction and Architectural Management, 2022, 29(9): 3593-3616.

[32] Suh Woong, Ahn Seongjin. Utilizing the Metaverse for Learner-Centered Constructivist Education in the Post-Pandemic Era: An Analysis of Elementary School Students[J]. Journal of Intelligence, 2022, 10(1): 17.

[33] 清华大学新媒体研究中心.2020-2021 年元宇宙发展研究报告[EB/OL].[2021-9-21]. [https://blog.csdn.net/weixin\\_45727359/article/details/120398058](https://blog.csdn.net/weixin_45727359/article/details/120398058).

[34] 刘妍,胡碧皓,尹欢欢等.虚拟现实(VR)沉浸式环境如何实现深度取向的学习投入?——复杂任务情境中的学习效果研究[J].远程教育杂志,2021,39(4):72-82.

[35] 蔡苏,张晗,薛晓茹等.增强现实(AR)在教学中的应用案例评述[J].中国电化教育,2017,(3):1-9.

[36] 王树祎,毛亮亮,吴新阳等.基于虚拟现实的灾害场景应激反应诱发方法[J].清华大学学报(自然科学版),2023,63(6):960-967.

- [37] 马婧,姜萌,董艳.虚拟现实环境中基于多维传感系统的学习投入综合模型研究[J].电化教育研究,2023,44(2):107-113.
- [38] 高楠,刘革平,谢涛等.沉浸式虚拟现实对学习者的知识迁移效果及效率的影响研究[J].远程教育杂志,2023,41(1):91-101.
- [39] 王浩,唐爱民.虚拟现实更能引发学生共情? ——基于 19 项随机对照实验的元分析[J].开放教育研究,2023,29(1):60-69.
- [40] Penelope L. Peterson, Susan R. Swing, Kevin D. Stark, et al. Students' Cognitions and Time on Task during Mathematics Instruction[J]. American Educational Research Journal, 1984, 21(3): 487-515.
- [41] Glen I. Earthman. Varia: The Quality of School Buildings, Student Achievement, and Student Behavior[J]. Bildung und Erziehung, 1999, 52(3): 353-372.
- [42] Astin A. W. Student involvement: a developmental theory for higher education[J]. Journal of College Student Personnel, 1984, (25):297-308.
- [43] Natriello G. Problems in the Evaluation of Studentents and Student Disengagement from Secondary Schools[J]. Journal of Research and Development in Education, 1984, 17(4): 14-24.
- [44] Lavoie P, Lapiere A , Cadotte M A M , et al.Nursing Students' Engagement in Virtual Reality and Hybrid Simulations: A Quasi-Experimental Study[J].Clinical Simulation in Nursing,2024,87101496-.
- [45] Hamish Coates. A model of online and general campus-based student engagement[J]. Assessment & Evaluation in Higher Education, 2007, 32(2): 121-141.
- [46] Zelda F. Gamson. A brief history of the seven principles for good practice in undergraduate education[J]. New Directions for Teaching and Learning, 1991, (47): 5-12.
- [47] 胡敏.在线学习中中学生参与度模型及应用研究[D].武汉:华中师范大学,2015.
- [48] Jeremy D. Finn, Kristin E. Voelkl. School Characteristics Related to Student Engagement[J]. The Journal of Negro Education, 1993, 62(3): 249-268.
- [49] Schaufeli W B, Martinez I. M, Pinto A. M, et al. Burnout and engagement in university students: a cross-national study[J]. Journal of Cross-Cultural Psychology, 2002, 33(5), 464-481.
- [50] 孔企平.“学生投入”的概念内涵与结构[J].外国教育资料,2000,(2):72-76.
- [51] 倪士光,伍新春.学习投入:概念、测量与相关变量[J].心理研究,2011,4(1):81-87.
- [52] 李娜,任新成.国外学生投入及相关理论综述[J].上海教育科研,2013,(12):22-26.
- [53] 李新,李艳燕.基于系统性文献综述的国外学习投入实证研究分析[J].现代远程教育研究,2021,33(2):73-83+95.
- [54] 袁琳,郑家福,侯永青.师范生职业使命感对学习投入的影响:职业认同的中介作用和心理资本的调节作用[J].西南大学学报(社会科学版),2022,48(6):218-227.
- [55] 刘在花.成就目标定向对中学生学习满意度的影响机制——学业自我效能感和学习投入的链式中介作用[J].教育研究与实验,2022(5):98-103.
- [56] 李嘉欣,雒瑞帆,封洪敏等.初中生感知到的同伴支持与数学学习投入——基于变量为中心和个体为中心的分析[J].心理与行为研究,2022,20(5):629-636.
- [57] 李新,李艳燕.协作学习情境中学习投入数字化表征模型的构建与应用[J].中国远程教育,2022(8):70-77.

- [58] 十二届全国人大四次会议.《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》[EB/OL].[2016-3-18].[http://www.wenming.cn/specials/zxdj/2016lianghui/fb/201603/t20160318\\_3220825.shtml](http://www.wenming.cn/specials/zxdj/2016lianghui/fb/201603/t20160318_3220825.shtml).
- [59] 郑潜.自适应时频分析及脑电信号处理应用研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- [60] Jones E. G, Mendell L. M. Assessing the Decade of the Brain[J]. Science, 1999, 284(5): 739.
- [61] Spector J. M, Merrill M. D, Elen J, et al. Handbook of Research on Educational Communications and Technology[M]. New York: Springer, 2014. 62-63.
- [62] KLIMESCH W, DOPPELMAYR M, YONELINAS A, et al. Theta synchronization during episodic retrieval: neural correlates of conscious awareness[J]. Cognitive Brain Research, 2001, 12(1) : 33-38.
- [63] Khader P. H, Jost K., Ranganath C, et al. Theta and Alpha Oscillations During Working Memory Maintenance Predict Successful Long-Term Memory Encoding[J]. Neuroscience Letters, 2010, 468(3): 339-343.
- [64] Baumeister J, Barthel T, Geiss K. R, et al. Influence of phosphatidylserine on cognitive performance and cortical activity after induced stress[J]. Nutritional Neuroscience, 2008, 11(3), 103-110.
- [65] Rodriguez E, George N, Lachaux J. P, et al. Perception's shadow: Long-distance synchronization of human brain activity[J]. Nature, 1999, 397(6718), 430-433.
- [66] 朱丽,杨青,吴涛等.基于 CNN 和 Bi-LSTM 的脑电波情感分析[J].应用科学报,2022,40(1):1-12.
- [67] Addante Richard J, Yousif Mairy, Valencia Rosemarie, et al. Boosting Brain Waves Improves Memory[J]. Frontiers Young Minds, 2021,(9): 605677.
- [68] 郑梅琴,许瑞,刘硕等.基于 Web of Science 和中国知网的临床药理学教学模式文献研究热点分析[J].中国初级卫生保健,2023,37(12):32-35.
- [69] 高巍,周嘉腾,经湛等.后疫情时代的高等教育技术转向:实践反思与未来图景——《2021 地平线报告(教与学版)》要点分析[J].现代远程教育研究,2021,33(3):63-72.
- [70] 王文喜,周芳,万月亮等.元宇宙技术综述[J].工程科学学报,2022,44(4):744-756.
- [71] 刘革平,王星,高楠等.从虚拟现实到元宇宙:在线教育的新方向[J].现代远程教育研究, 2021,33(6):12-22.
- [72] 左鹏飞.最近大火的元宇宙到底是什么?[N].科技日报,2021-9-13(6).
- [73] 唐雯谦,覃成海,向艳等.智慧教育与个性化学习理论与实践研究[J].中国电化教育,2021(5):124-137.
- [74] 陈林生,赵星,明文彪等.元宇宙技术本质、演进机制与其产业发展逻辑[J/OL].科学学研究:1-14.[2023-04-23].
- [75] 李鸿磊,刘建丽.基于用户体验的商业模式场景研究:价值创造与传递视角[J].外国经济与管理,2020,42(6):20-37.
- [76] 奚路阳.链接与体验:移动互联时代的场景营销传播[J].新闻知识,2019,(10):7-11.
- [77] Nijholt A, Contreras-Vidal J. L, Jeunet C, et al. Editorial: Brain-computer interfaces for non-clinical( home, sports, art, entertainment, education, well-being) applications[J]. Frontiers in Computer Science, 2022, 4: 860619.

- [78] DeBettencourt M. T, Cohen J. D, Lee R. F, et al. Closed-loop training of attention with real-time brain imaging[J]. *Nature Neuroscience*, 2015, 18(3): 470-475.
- [79] 梁明霞.脑机接口技术在特殊儿童随班就读教育中的应用研究[J].*电脑知识与技术*,2020,16(18): 200-201.
- [80] 蔡苏,李江旭,柳昌灏等.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*,2023,29(1):81-90.
- [81] 王朋利,柯清超,张洁琪.脑机接口的智能化课堂教学应用研究[J].*开放教育研究*,2020,26(1): 72-81.
- [82] 林玲,刘国良.闪光刺激对大鼠初级视皮层脑电波的影响及机制研究[J].*中国现代医学杂志*,2011,21(35):4383-4387.
- [83] Csikszentmihalyi M. Flow: The Psychology of Optimal Experience[J]. *Australian Occupational Therapy Journal*, 2004, 51(1): 3-12.
- [84] Ulrich Martin, Niemann Johannes, Boland Markus, et al. The neural correlates of flow experience explored with transcranial direct current stimulation[J]. *Experimental brain research*, 2018, 236(12): 3223-3237.
- [85] Daehwan Kim, Yong Jae Ko. The impact of virtual reality (VR) technology on sport spectators' flow experience and satisfaction[J]. *Computers in Human Behavior*, 2019, 93(C): 346-356.
- [86] Chongsan Kwon. The Effect of the Degree of Anxiety of Learners during the Use of VR on the Flow and Learning Effect[J]. *Applied Sciences*, 2020, (14): 4932.
- [87] Lackey S J, Salcedo J N, Szalma J L, et al. The stress and workload of virtual reality training: the effects of presence, immersion and flow[J]. *Ergonomics*, 2016, 59(8):1060-1072.
- [88] F.瓦雷拉,E.汤普森,E.罗施.具身心智:认知科学和人类经验[M].杭州:浙江大学出版社,2010.139.
- [89] 孙崇勇.认知负荷的理论与实证研究[M].沈阳:辽宁人民出版社,2014.4-7
- [90] 孙崇勇.认知负荷的测量及其在多媒体学习中的应用[J].*高等教育研究*,2015,36(12):86.
- [91] 苏秀峰.基于认知负荷的 ATS 界面轨道图元编码研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [92] Tina Seufert, Inge Jaenen, Roland Bruenken. The impact of intrinsic cognitive load on the effectiveness of graphical help for coherence formation[J]. *Computers in human behavior*, 2007, 23(3): 1055-1071.
- [93] 宋艳玲,孟昭鹏,闰雅娟.从认知负荷视角探究翻转课堂——兼及翻转课堂的典型模式分析[J].*远程教育杂志*,2014,32(1):105-112.
- [94] 赵俊峰.解密学业负担:学习过程中的人支付恶化研究[M].北京:科学出版社,2011.25-27.
- [95] Cole M, Engestrom Y. *Distributed Cognitions: Psychological and Educational Considerations*[M]. USA: Cambridge University Press, 1993. 2-35.
- [96] 李翠白.西方情境学习理论的发展与应用反思[J].*电化教育研究*,2006,(9):20-24.
- [97] 方海光,孔新梅,李海芸等.人工智能时代的人机协同教育理论研究[J].*现代教育技术*,2022,32(07):5-13.
- [98] 陈锦昌,刘菲,陈亮等.基于分布式认知理论的移动学习游戏设计原则研究[J].*电化教育研究*,2016,37(11):60-66.

- [99] Peggy A.Ertmer, Timothy J.Newby, 盛群力.行为主义、认知主义和建构主义(下)——从教学设计的视角比较其关键特征[J].电化教育研究, 2004,(3):30.
- [100] 原晓春,陈俊.建构主义对教学设计理论研究与应用的影响[J].教育理论与实践, 2005,(18):49-50.
- [101] 张春华,吴莎莎.沉浸式学习背景下虚拟现实技术的教育应用[J].中国现代教育装备,2018,(20):68-72.
- [102] 埃德加·戴尔,张伟民.经验之塔[J].外语电化教学,1985,(1、2)
- [103] 胡家诚.基于增强现实技术的高中地理可视化教学实践研究[D].沈阳:沈阳师范大学,2021.
- [104] 张良.论素养本位的知识教学——从“惰性知识”到“有活力的知识”[J].课程、教材·教法, 2018,38(3):50-55.
- [105] 张春莉,高民.布卢姆认知领域教育目标分类学在中国十年的回顾与反思[J].华东师范大学学报(教育科学版),1996(1):57-70.
- [106] 丁海燕.布鲁姆“认知领域”教育目标分类法在大学英语教学中的运用[J].课程教育研究, 2013(32):87-88.
- [107] 蔡苏,焦新月,杨阳等.5G 环境下的多模态智慧课堂实践[J].现代远程教育研究,2021,33(5): 103-112.
- [108] IMT-2030(6G)推进组.6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书[EB/OL].[2021-9-23].  
<https://www.vzkoo.com/read/9ee42b90ebbd0654431d756580e04186.html>.
- [109] ITU-R. IMT Vision-Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond[R]. Geneva: ITU-R M.2083,2015.
- [110] 张剑平,许玮,杨进中等.虚实融合学习环境:概念、特征与应用[J].远程教育杂志,2013,31(3): 3-9.
- [111] 蔡连玉,刘家玲,周跃良.人机协同化与学生发展核心素养——基于社会智能三维模型的分析[J].开放教育研究,2021,27(1):24-31.
- [112] 林崇德,黄四林.以培养“四有”好老师为目标涵养高尚师德修养——《中小学教师培训课程指导标准(师德修养)》有效实施的关键问题[J].人民教育,2022,(01):45-47.
- [113] 周琪琪.基于虚拟现实技术的风电仿真系统[D].北京:华北电力大学,2019.
- [114] Chun Jie Li. Development and Design of Virtual Experiment System based on 3ds Max and Virtools Technology[C]. Shenyang: 2018 Chinese Control and Decision Conference, 2018.
- [115] WANG Z Q. Virtual package design based on 3D visualization technology [J]. Procedia Engineering,2017,17(4):1336-1339.
- [116] 王佩玉,陈振中.一种基于 Unity 3D 的生产线跨平台虚拟调试系统设计方法[J].东华大学学报(自然科学版),2022,48(2):69-74+80.
- [117] 贺保卫,马志宇,崔海朋等.基于 Unity 3D 的可燃冰开采环境监测模拟系统设计[J].计算机应用与软件,2023,40(8):121-125+154.
- [118] 蔡苏,王沛文,杨阳等.增强现实(AR)技术的教育应用综述[J].远程教育杂志, 2016, 34(5):27-40.
- [119] 李东.VR 技术在专科临床解剖学教学中的应用[J].内江科技, 2020,41(9):62+27.
- [120] 高媛,刘德建,黄真真等.虚拟现实技术促进学习的核心要素及其挑战[J].电化教育研究, 2016,

37(10):77-87+103.

- [121] 李艳飞.当代大学生人生观的现状分析与教育对策[J].思想理论教育,2021(12):96-101.
- [122] 袁凡,陈卫东,徐铷忆等.场景赋能:场景化设计及其教育应用展望——兼论元宇宙时代全场景学习的实现机制[J].远程教育杂志,2022,40(1):15-25.
- [123] 祝智庭.智慧教育新发展:从翻转课堂到智慧课堂及智慧学习空间[J].开放教育研究,2016,22(1):18-26+49.
- [124] 曹培杰.智慧教育:人工智能时代的教育变革[J].教育研究,2018,39(8):121-128.
- [125] 王星,刘革平,农李巧等.智慧课堂赋能学生智慧的培育机制:内在机理、结构要素与联通路径[J].电化教育研究,2021,42(8):26-34.
- [126] Nonaka I, Takeuchi H. The Knowledge-Creating Company[M]. USA: Oxford University Press, 1995. 98.
- [127] 刘哲雨,刘畅,许博宇.计划调节学习支架对在线深度学习的影响机制研究[J].电化教育研究,2022,43(08):77-84+100.
- [128] 夏颖.基于多模态话语分析理论的大学生自主学习模式研究——以大学英语课程为例[J].黑龙江高教研究,2016,(9):138-141.
- [129] 李新房,刘名卓,祝智庭.新兴技术在高等教育中的应用分析与对策思考——《2016地平线报告(高等教育版)》解读[J].教育发展研究,2016,36(07):31-38+51.
- [130] 黄荣怀,杨俊锋,胡永斌.从数字学习环境到智慧学习环境——学习环境的变革与趋势[J].开放教育研究,2012,18(1):75-84.
- [131] 祝智庭.智慧教育:引领教育信息化走向人本主义情怀[J].现代教育,2016,(07):25-27.
- [132] 祝智庭.智慧教育引领未来学校教育创变[J].基础教育,2021,18(02):5-20.
- [133] 陈靓影,张凯,杨宗凯.人机交互式孤独症儿童语言能力动态评估研究[J].电化教育研究,2023,44(10):48-53+86.DOI:10.13811/j.cnki.eer.2023.10.007.
- [134] Barry J. Zimmerman. Academic studying and the development of personal skill: A self-regulatory perspective[J]. Educational Psychologist, 1998, 33(2): 73-86.
- [135] Vygotsky L. S. The Development of Higher Forms of Attention in Childhood[J]. Soviet Psychology, 1979, 18(1): 67-115.
- [136] L. Yin, C. Zhang, Z. Cui. Experimental research on real-time acquisition and monitoring of wearable EEG based on TGAM module[J]. Computer Communications, 2020, 151: 76-85.
- [137] 张沛航,栾昱霖,杨帆等.基于 Arduino 脑控排爆机器人设计应用[J].制造业自动化,2023,45(8):104-107.
- [138] Garcia L N, Guerreromosquera C, Colomer M, et al. Evoked and oscillatory EEG activity differentiates language discrimination in young monolingual and bilingual infants[J]. Scientific Reports. 2018, 8(1):2770.
- [139] Maiorana E, Campisi P. Longitudinal Evaluation of EEG-Based Biometric Recognition[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security. 2018, 13(5): 1123-1138.
- [140] Zhang D, Yao L, Chen K, et al. A Convolutional Recurrent Attention Model for SubjectIndependent EEG Signal Analysis[J]. IEEE Signal Processing Letters. 2019, 26(5): 715-719.
- [141] 张爱华,王亮.基于时变图像序列的脉搏信息提取[J].仪器仪表学报,2007,(5):820-825.

- [142] Alian A A, Shelley K H. Photoplethysmography[J]. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 2014, 28(4): 395-406.
- [143] Veltman J. A. A comparative study of psychophysiological reactions during simulator and real flight[J]. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2002, 12(1): 33-48.
- [144] Paas F, Van Merriënboer J.J.G. Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills[J]. A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 1994, 86(1): 122-133.
- [145] Gribbin B, Steptoe A, Sleight P. Pulse-Wave Velocity as a Measure of Blood Pressure Change[J]. *Psychophysiology*, 1976, 13(1): 86-90.
- [146] Berntson G G, Bigger J T, Eckberg D L, et al. Heart rate variability: Origins, methods, and interpretive caveats[J]. *Psychophysiology*, 1997, 34(6):623-648.
- [147] Pendleton D M, Sakalik M L, Moore M L, et al. Mental engagement during cognitive and psychomotor tasks: Effects of task type, processing demands, and practice[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2016, 109: 124-131.
- [148] Tsang P. S, Velazquez V. L. Diagnosticity and multidimensional subjective workload ratings[J]. *Ergonomics*, 1996, 39(3): 358-381.
- [149] Sweller J. Cognitive load during problem solving, effects on learning[J]. *Cognitive Science*, 1988, 12(2): 257-285.
- [150] 孙崇勇. 认知负荷的测量及其在多媒体学习中的应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- [151] Paas F, Van Merriënboer J. J. G. Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks[J]. *Educational Psychology Review*, 1994, 6(4): 351-371.
- [152] Baceviciute S, Mottelson A, Terkildsen T, et al. Investigating Representation of Text and Audio in Educational VR using Learning Outcomes and EEG[C]. In *CHI2020: ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Hawaii, USA: ACM Digital Library, 2020.
- [153] 谢松云, 雷凌俊, 孙江等. 基于 IWOA-ELM 算法的脑电情绪识别方法研究[J/OL]. *生物医学工程学报*, 1-8[2024-01-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1258.R.20240126.1751.026.html>.
- [154] Antonenko P, Paas F, Grabner R, et al. Using electroencephalography to measure cognitive load[J]. *Educational Psychology Review*, 2010, 22(4), 425-438.
- [155] Lalo Elodie, Gilbertson Thomas, Doyle Louise, et al. Phasic increases in cortical beta activity are associated with alterations in sensory processing in the human[J]. *Experimental brain research*, 2007, 177: 137-145.
- [156] Stuart N Baker. Oscillatory interactions between sensorimotor cortex and the periphery[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2007, 17(6): 649-655.
- [157] Orün Ö, Akbulut Y. Effect of multitasking, physical environment and electroencephalography use on cognitive load and retention[J]. *Computers in Human Behavior*, 2019, 92: 216-229.
- [158] W Singer, C M Gray. Visual Feature Integration and the Temporal Correlation Hypothesis[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 1995, 18: 555-586.
- [159] A. Siennicka, D.S. Quintana, P. Fedurek, et al. Resting heart rate variability, attention and attention maintenance in young adults[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2019, 143:

126-131.

[160] Billings Leroy M, Shepard J. F. The change of heart rate with attention[J]. Psychological Review, 1910, 17(3): 217-228.

[161] Sweller J, Van Merriënboer J. J. G, Paas F. Cognitive architecture and instructional design[J]. Educational Psychology Review, 1998, 10(3): 251-296.

[162] Sweller J. Element nteractivity and intrinsic, extraneous and germane cognitive load[J]. Educational Psychology Review, 2010, 22(3): 123-138.

[163] Sweller J. Cognitive load theory, learning difficulty, an instructional design[J]. Learning and Instruction, 1994, 4(3): 295-312.

## 附录 A 元宇宙赋能教育问卷调查

(1) 请问您的学历是?

- A. 初中          B. 高中          C. 本科          D. 研究生

(2) 请问您的专业大类属于?

- A. 自然科学、理学、工学、医学、农学  
B. 人文社科、文学、历史学、哲学、经济学、管理学、法学、教育学、艺术学  
C. 其他

(3) 您对元宇宙的了解程度?

- A. 我正在研究元宇宙相关技术          B. 我关注元宇宙相关新闻  
C. 我偶尔听过元宇宙          D. 不了解

(4) 请问您对元宇宙教育的发展持何态度?

- A. 元宇宙教育是无稽之谈          B. 有待商榷, 发展形势不明朗  
C. 形势向好, 但还需改进          D. 元宇宙教育是大势所趋, 前途光明

(5) 请问您觉得传统理论课上, 您的学习投入如何?

- A. 非常投入          B. 投入          C. 一般          D. 非常差

(6) 请问您期待怎样的理论课?

- A. 教师的 PPT 设计  
B. 以多做练习题为主  
C. 精彩的理论讲解+亲身实践操作  
D. 坐着听教师的讲解就好

(7) 如果您可以坐在教室里, 通过 VR 眼镜进入到近乎真实的风力发电厂, 跟着虚拟形象的教师, 一边参观高大雄伟的风力发电机, 一边学习发电原理并亲自动手操作设备, 您是否愿意接受在这样的虚拟教室中上课呢?

- A. 十分愿意          B. 有点兴趣          C. 感觉一般          D. 没兴趣

(8) 请问您期望通过何种方式参与元宇宙教育?

- A. 学校提供设备          B. 自己购买设备          C. 其他

(9) 请问您期望的课堂教学形式是?

- A. 讲授型          B. 讨论型          C. 情境型          D. 其他

(10) 请问您更希望在元宇宙中学到哪类知识? (多选)

- A. 陈述性知识 (概念性知识)
- B. 感性知识
- C. 理性知识
- D. 程序性知识 (方法类知识)
- E. 其他

(11) 请问您期望在元宇宙中学习何种类型的课程?

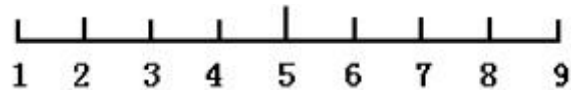
- A. 讲授类专业课程教学
- C. 安全知识、实践操作等情景体验教学
- D. 其他

问卷结束, 感谢您的配合!

## 附录 B 认知负荷测评量表

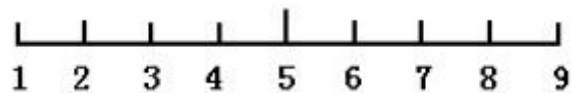
### I. Paas 的自我评定量表

(1) 在刚才的任务当中，你投入了多少心理努力？请从以下 9 个数字中选择适合你的数字，并在相应的位置作一标记。其中，1—最少努力，5—中等努力，9—最大努力。



1 2 3 4 5 6 7 8 9

(2) 你认为刚才的任务难度如何？请从以下 9 个数字中选择适合你的数字，并在相应的位置作一标记。其中，1—非常容易，5—中等难度，9—非常困难。



1 2 3 4 5 6 7 8 9

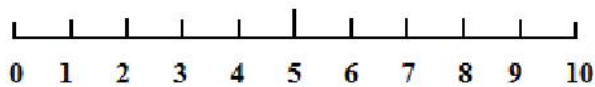
## II. WP 自我评定量表

该量表共有 7 个维度，以下是各个维度的操作性定义：

| 维度名称   | 维度含义                         |
|--------|------------------------------|
| 中枢处理资源 | 你在任务选择与执行过程中所消耗的心理资源         |
| 响应资源   | 你感觉要对任务作出反应所消耗的心理资源          |
| 空间编码资源 | 你完成任务过程中大脑空间活动所消耗的心理资源       |
| 语言编码资源 | 你完成任务过程中大脑语言活动所消耗的心理资源       |
| 视觉接收资源 | 你完成任务过程中从视觉通道获取信息所消耗的心理资源    |
| 听觉接收资源 | 你完成任务过程中从听觉通道获取信息所消耗的心理资源    |
| 操作资源   | 你完成任务过程中你感觉操作自己的肢体对认知负荷造成的影响 |

在刚才的任务中，你投入了多少心理资源？请根据自己的实际情况，在相应的心理资源后选择适合你的数字，并在相应的位置作一标记。其中，“0”代表完全没有占用该资源，“10”代表该资源被全部占用。

中枢处理资源：



响应资源：



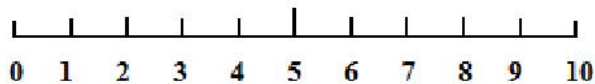
空间编码资源：



语言编码资源：



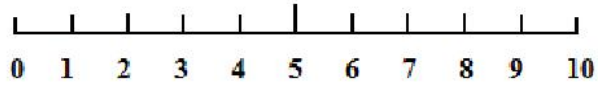
视觉接收资源：



听觉接收资源：

附录 B 认知负荷测量表

---



操作资源:

