

虚拟现实情感脑机接口综述

蔡梓良 常 远 陈思彤 刘潇雅 刘 爽

天津大学医学工程与转化医学研究院 天津 300072

摘 要 情感脑机接口旨在实现对个体情绪状态的精准识别与有效调节。虚拟现实技术凭借高沉浸感和情境再现能力，为情绪诱发提供了自然可控的环境。虚拟现实情感脑机接口将 VR 的沉浸式诱发优势与 aBCI 的识别与调节功能融合，形成具跨模态闭环特性的新型人机交互系统，在推动情绪科学发展和临床转化方面具有重要意义。本文综述了其理论基础、系统架构、硬件组成与关键技术，总结了在情绪诱发强度、神经生理变化、识别准确率及调节情境一致性等方面的优势，并探讨了在多维建模与评估、多模态融合及诱发—识别—反馈一致性等方面的挑战，并提出了未来的研究方向。

关键词 情感脑机接口；虚拟现实；情绪识别

A Review of Virtual Reality-Based Affective Brain-Computer Interfaces

Cai Zi-liang, Chang Yuan, Chen Si-tong, Liu Xiao-ya, Liu Shuang

Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Affective brain-computer interfaces (aBCIs) aim to achieve precise recognition and effective regulation of individual emotional states. Virtual reality (VR) technology, with its high immersion and contextual reconstruction capabilities, offers a natural and controllable environment for emotion induction. Affective Brain-Computer Interface based Virtual Reality (aBCI-VR) combines the immersive induction advantages of VR with the recognition and regulation capabilities of aBCIs, forming a novel human-computer interaction system with cross-modal closed-loop features, and holds significant potential for advancing emotion science and clinical translation. This paper reviews its theoretical foundations, system architecture, hardware components, and key technologies, summarizes advantages in induction intensity, neurophysiological changes, recognition accuracy, and contextual consistency in regulation, and discusses challenges in multidimensional modeling and evaluation, multimodal fusion, and consistency across the induction-recognition-feedback loop, proposing directions for future research.

Keywords: Affective Brain-Computer Interfaces; Virtual Reality; Emotion Recognition

1 引言

情绪作为人类心理活动的核心要素，在日常生活中发挥着关键作用^[1]。研究表明积极的情绪状态有助于身心健康^[2-3]，反之，长期持续的消极情绪被证实与抑郁、焦虑等情绪障碍的发生发展密切相关^[4]，严重时甚至可能危及个体的生命安全^[5]。情感脑机接口（Affective Brain-Computer Interface, aBCI）作为脑接接口技术的重要分支，通过解码大脑神经活动信号，可实现对人类情绪状态的有效识别与调控，为实现人机情感交互，提升个体认知功能、增强心理稳定性，促进社会和谐发展提供了创新手段^[6]。

传统的情绪分析主要依赖于面部表情、语音特征和体态姿势等外显行为信号^[7]。尽管这些非生理指标具有直观性强、采集便利等优势，但由于其易受个体主观意识和社会情境因素的影响，在情绪识别的准确性和可靠性方面存在固有局限。相较而言，脑电图（Electroencephalography, EEG）、心电图（Electrocardiography, ECG）和皮电反应（Galvanic Skin Response, GSR）等生理信号，因其不易被主观意识操控，能够更客观、更可靠地反映情绪状态^[8-9]。例如，Potts等^[10]依托设计的虚拟现实健身游戏实验范式，发现皮肤电导水平与紧张情绪的唤醒度成正相关。Schoeller等^[11]构建了结合ECG信号监测与

*[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(973计划) 资助项目 (***)；国家高技术研究发展计划(863计划) 资助项目 (***)；国家自然科学基金资助项目 (***)；国家自然科学基金重大项目 (***)；国家自然科学基金重点项目 (***)；天津市应用基础与前沿技术研究计划重点资助项目 (***) ..

沉浸式VR场景的闭环调控系统，实现了情绪状态的有效调节。这些研究不仅证实了生理信号在情绪解码方面的优势，更凸显了其在情绪调节中的关键作用。

近年来，虚拟现实（Virtual Reality,VR）技术凭借其高度的沉浸性、交互性和可控性，成为新一代情绪诱发与调节的工具。VR技术通过构建多感官融合的数字环境，能够实现对视觉、听觉、触觉以及本体感觉的精确操控，可辅助研究者在高标准化、可重复性的实验条件下，有效诱发目标情绪状态^[12]。因此，研究者通过尝试整合VR环境的高效情绪诱发能力与aBCI的精准神经解码优势，构建了具备实时感知—决策—调控的人机情感交互新范式—基于虚拟现实的情感脑机接口（Affective Brain-Computer Interface based Virtual Reality,aBCI-VR）^[13]。其核心技术路径包含三个关键环节：①利用VR多感官刺激在标准化条件下诱发目标情绪状态；②通过EEG等大脑活动信号结合机器学习算法实时解码用户情绪特征；③基于解码结果动态调节虚拟场景参数/施加物理场干预，实现个性化情绪调节。

aBCI-VR的发展不仅涉及技术层面的集成创新，更在理论层面推动了对情绪计算建模方法、神经信号解码策略和人机共情机制的深入理解。尽管aBCI-VR已展现出显著优势，但当前研究仍缺乏对其技术体系与发展路径的系统性梳理。本文旨在全面梳理aBCI-VR系统的结构与硬件构成，从基于虚拟现实中的情绪诱发、情绪识别和情绪调节等多个方面出发，揭示aBCI-VR系统取得的成果进展、面临的技术挑战以及未来发展趋势，以期为该领域研究与临床应用提供理论支撑与方法参考。

2 aBCI-VR系统结构与硬件构成

本节主要介绍aBCI-VR系统结构与主要的硬件构成。aBCI-VR系统包括情绪诱发、情绪识别与情绪调节三个核心模块。其核心硬件主要由头戴显示设备（Head-Mounted Displays,HMD）、信号采集设备和反馈设备等。

2.1 aBCI-VR系统结构

图1展示了aBCI-VR系统结构的示意图，包括情绪诱发、情绪识别与情绪调节三个核心模块，各个模块呈现以下特征。

（1）精准化情绪诱发模块：aBCI-VR系统可通过VR场景载体设计，包括场景类型、情境属性、感官通道与交互性，以

及多模态刺激参数（强度、频率、语义意义等），构建高生态效度的主动或被动诱发范式，实现目标情绪的精准诱发。

（2）多模态情绪识别模块：aBCI-VR系统可通过整合脑电以及行为信号等多源数据，利用信号处理、特征提取（时域、频域等）与多模态融合分类，实时解码/识别用户的情绪状态。

（3）自适应情绪调节模块：aBCI-VR系统可根据情绪识别结果设定调节目标（如效价、唤醒度等），利用情境一致性的调节方式实现反馈调节。例如，可通过直接修改VR场景的光影效果、物理属性或非玩家角色（Non-player character, NPC）行为，靶向调节用户的情感体验。

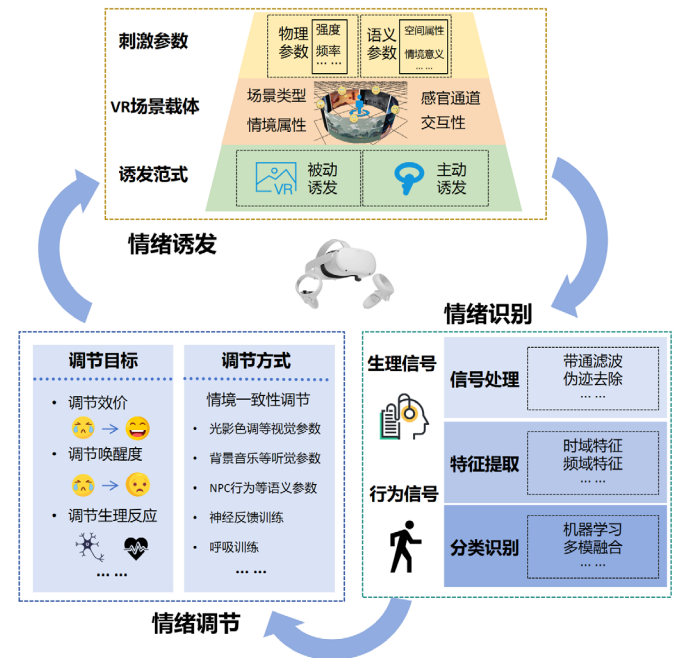


图1 aBCI-VR系统结构示意图

Fig.1 Architectural Schematic of the aBCI-VR System

2.2 aBCI-VR硬件构成

本节主要介绍aBCI-VR系统的主要硬件设备，包括头戴显示设备、信号采集设备和刺激设备。

2.2.1 头戴显示设备

HMD是aBCI-VR系统的硬件核心，可为用户提供沉浸式视听体验^[14]。目前，市场上有多家制造商研发了不同类型HMD设备，表1对比分析了主流HMD设备在功能、规格和成本等指标上的差异。可见，现有的HMD设备通过多项技术来提升虚拟环境的沉浸感，包括①优化显示技术，如采用高动态范围OLED/

LCD显示屏、提升刷新率（如120Hz）；②增强视觉沉浸，如视场角（Field of View FoV）扩展至110°–200°以拓宽视野并增强舒适度；③提升空间定位，如通过位置追踪以检测和跟踪用户头部与四肢的位置与动作，提供空间信息。常见的追踪方式分为内部追踪和外部追踪，分别由内置传感器或摄像头等硬件，及安置在设备以外的基站实现追踪。

表1 VR头戴设备汇总表

Tab.1 Summary of VR Head-Mounted Displays (HMDs)

型号	分辨率	位置追踪	最大刷新率	视场角	参考价格
HTC VIVE Focus Vision	2448 × 2448	内部追踪	120	120	¥9888
HTC VIVE Pro 2	2448 × 2448	外部基站	120	120	¥13688
HTC VIVE Pro	1440 × 1600	外部基站	90	110	¥7888
HTC VIVE Cosmos Elite	1440 × 1700	外部基站	90	110	¥7988
Meta Quest 3	2064 × 2208	内部追踪	120	110	¥4628
Meta Quest 3S	1832 × 1920	内部追踪	120	96	¥3702
Pico 4	2160 × 2160	内部追踪	90	105	¥4800
DPVR E4	1832 × 1920	内部追踪	120	116	¥3799

当前，VR-aBCI研究中使用最广泛的HMD设备为HTC VIVE系列^[15-31]和Oculus/Meta系列^[32-38]。其次包含HP^[39]、Google Cardboard^[40]、OSVR HDK2^[41]等商用设备，以及自主研发设备^[42]。

2.2.2 信号采集设备

脑电图EEG技术因其毫秒级时间分辨率、良好的便携性及相对较低的成本优势，在aBCI-VR系统中被广泛应用^[43-44]。值得注意的是，EEG信号采集的电极数量及其空间布局，显著影响着情绪识别效果。多数研究依据国际10~20或10~10系统部署电极以覆盖关键脑区^[45]。相关研究表明，即使采用少量导联的便携式BCI，仍能实现可靠的情绪识别性能^[27,30,36,42]。

在aBCI-VR系统中，HMD在提供沉浸体验的同时可能引入信号干扰，包括来自内部组件的电磁噪声（如50Hz及其谐波、90Hz刷新率）和与脑电帽接触产生的物理伪迹（如电极移位、线缆拉扯）^[46-48]。已有研究评估HMD对50Hz以下的脑电信号影响有限，但在aBCI-VR系统部署前仍应进行信号质量测试，以确保数据可靠性^[46]。

2.2.3 反馈设备

除了HMD和信号采集设备，aBCI-VR系统还需配合多种反馈设备以构建完整的沉浸式交互体验^[14]。其中，控制器作为常见的输入设备，用于实现抓取、点击、指向等动作交互，通常配备加速度计、陀螺仪等模块。随着感官反馈技术的不断发展，例如触觉、嗅觉和味觉等^[14]，多感官整合有望增强aBCI-VR的沉浸

感^[49]。现有触觉反馈设备包括震动手套、带力反馈的控制器、超声波阵列及肌肉电刺激等，可在VR环境中提供风感、热感与湿感。嗅觉与味觉反馈装置如气味盒与味蕾电刺激器等正被陆续开发。随着传感与驱动技术的进步，这些多感官反馈设备正朝着更高的可穿戴性、精细化和实时响应能力发展，为aBCI-VR系统实现更加逼真、自然的沉浸式交互提供了重要支撑。

3 基于虚拟现实的情绪诱发策略

在aBCI-VR系统中，情绪诱发模块通常需设计主动诱发（如任务驱动、情境决策、社交互动）与被动诱发（如影片观看、环境暴露）两类范式^[12,50]，亦可根据研究目的进行组合以增强效果。在构建aBCI-VR系统的情绪诱发模块时，场景载体的选择与设计至关重要。例如，虚拟城市、自然景观、社交空间或特定事件情境，需要兼顾生态效度与实验控制的双重要求^[21,34]。

大量研究表明，相较于图片、视频等传统情绪诱发方法，VR技术凭借其高沉浸感特性展现显著优势。该技术通过视听多通道模拟真实情感交互场景，其沉浸感—即系统以逼真方式再现现实环境的能力^[51-53]—可有效提升用户感知丰富度与刺激真实性，从而显著增强情绪唤醒效能^[54-55]。例如，田丰^[25]指出立体视觉可增强情绪激活，VR-3D条件下 β 波段能量显著增强；与此一致，Zhang等^[16]进一步比较VR-2D与VR-3D模式，发现VR-3D下情绪唤醒度显著提升，VR-3D模式下额叶、颞叶与枕叶EEG能量均显著高于VR-2D；与此同时，张进等^[37]在VR结合音乐教学中也观察到愉悦度与激活度显著提高；此外，Carpio等^[36]在VR电影与2D电影对比中发现，VR环境中积极效价、唤醒度与优势度均显著提高，且沉浸感评分更高。

任务交互性和感官输入丰富度同样影响情绪诱发效果。例如，Cheng等^[19]发现主动交互（即涂鸦和评论等）可显著提升积极情绪效价与唤醒度，且自由漫游优于受限漫游；Zhong等^[22]在使用VR视频进行情绪诱发中引入嗅觉刺激，发现积极情绪的效价提升、消极情绪的效价降低、唤醒度上升，额叶、颞叶、枕叶多频段激活与积极情绪正相关；Amores等^[58]报告VR结合嗅觉输入条件下主观放松评分提升26.1%，生理反应特征提升25.0%；Li等^[18]的结果进一步表明，高唤醒情绪中临场感与唤醒度呈强正相关，表明用户在虚拟情境中“心理在场”可能是提升情绪诱发效果的关键因素^[56-57]。由此可见，多感官融合与高交互性不仅能增强沉浸感，还能进一步延伸为用户对虚拟自我形象的认同与控制，即本体感（Sense of Embodiment）。

本体感是提升用户情绪反应自然性的重要感官之一，包括自我定位、代理感和所有权三个方面^[51,59-60]。aBCI技术能够使用户的意念直接驱动虚拟身体动作，从而显著增强其对虚拟身体的认同感与控制感^[61-63]。当用户将虚拟身体视为“自我”的延伸时，对虚拟疼痛、惊吓或奖励等情境的情绪反应将更趋真实，并表现出更强的生理耦合性。这一特性不仅能够改善虚拟动作控制体验，还为情绪诱发模块提供了更高的个性化与交互性优势。

综上，aBCI-VR的情绪诱发模块能够在安全、可重复的条件下灵活选择主动或被动范式，并依托虚拟场景实现高生态效度与变量可控性。VR的沉浸感、任务交互性及多感官整合显著增强了情绪诱发的效果，而临场感和本体感的增强则进一步提升了用户在虚拟情境中诱发情绪的强度与真实性。

目前，相关研究逐步建立了基于aBCI-VR技术的公开EEG

数据集，为情绪识别模型的训练与验证提供了重要数据支撑。如表2所示，目前公开的VR-EEG情绪数据集包括OVRPD、VRSDEED、VREEG、VREED和DER-VREEG。不同数据集在参与人数、情绪诱发方式、EEG采集通道数及采用的情绪模型等方面存在较大差异，即有些研究采用128通道高密度系统采集的高精度EEG（如OVRPD、VRSDEED），也有的采用面向便携化应用的低成本4通道EEG（如DER-VREEG）；诱发方式涵盖了被动观看VR视频、嗅觉刺激增强等；情绪模型则包括效价-唤醒（Valence-Arousal, VA）二维模型、离散情绪模型（如快乐、悲伤、恐惧、厌恶、愤怒和惊讶等）及基于VA模型的四象限分类（如高唤醒—积极、高唤醒—消极、低唤醒—积极和低唤醒—消极）。总体而言，多数数据集仍以EEG单模态、被动诱发方式为主，少量结合了运动信息。多模态数据资源仍相对稀缺，尚未有完整闭环调控的公开数据。

表2 虚拟现实情绪脑电公开数据集
Tab.2 Publicly Available Virtual Reality Emotional EEG Datasets

数据集	人数	诱发方式	记录方式	情绪模型
OVRPD ^[22] (Olfactory-Enhanced VR Elicited Physiological Signal Database)	65 (男29, 女36, 平均20.78 ± 1.53 岁)	呈现积极和消极情绪视；VR、OVR被动诱发	128通道BioSemiActive Two高密度EEG	VA模型（四象限分类）
VRSDEED ^[17] (VR six discrete emotional EEG data)	50 (女35, 男15, 平均 19.6 ± 0.9 岁)	6 个 3D VR 视频 (分快乐、悲伤、恐惧、厌恶、愤怒、惊讶六类)	采用 128 通道 BioSemiActiveTwo 系统高密度 EEG	离散情绪模型, 快乐、悲伤、恐惧、厌恶、愤怒、惊讶
VREEG ^[39] (包括 VREEG03 和 VREEG04)	70 (男 50, 女 20, 男 19–36 岁, 中位 26.5 岁; 女 18–30 岁, 中位 27 岁)	基于 VR 环境呈现音视频刺激; 被动诱发	Emotiv EPOC Flex 采集的32导EEG	VA模型; VREEG03: 消极、中性、积极; VREEG04: 快乐、悲伤、中性、恐惧
VREED ^[15] (Virtual Reality Emotional EEG Dataset)	19 (男13, 女6, 平均 22.84 ± 1.50 岁)	HTC Vive 呈现 60 个 3D VR 视频 (正性、中性、负性)	59通道EEG	VA模型; 分成正、中、负性三类
DER-VREEG ^[64] (A Dataset for Emotion Recognition Using Virtual Reality and EEG)	32 (男25, 女7, 23–45 岁)	VR 呈现 16 个 3D 视频 (快乐、恐惧、平静、无聊)	4 通道 EEG (AF7、AF8、TP9、TP10) + 惯性传感器 (加速度计、陀螺仪)	VA模型（四象限分类）

4 基于虚拟现实的情绪识别技术

在aBCI-VR系统中，情绪诱发模块通常包含信号处理、特征提取和分类三个步骤。常见的信号处理方法包括滤波、重参考和伪迹去除等。特征提取阶段通常从时域、频域、时频域和非线性等多个维度提取EEG特征，用于情绪解码。例如，余绍黔^[24]等在提取VR环境下诱发情绪EEG的ERP波形，发现其N1和P2成分对情绪效价敏感，具有作为分类的神经标志物的潜力。频域分析通过傅里叶变换将时域EEG信号转换至频域，进一步分解为多个子频段，提取功率谱密度（Power Spectral Density, PSD）和高阶谱等特征。李海宝^[26]等发现，VR正性与中性素材刺激下，全脑各频带PSD能量显著高于负性素材刺激下，并呈现脑区及半球能量偏侧化。Li^[18]发现VR环境中诱发的高唤

醒情绪中枕叶α波存在半球不对称性，而高效价情绪中颞叶β与γ功率增强；Koržel^[65]观察到VR环境中诱发的高唤醒情绪与静息态相比顶颞区α功率显著降低；Xie^[17]与Babu^[39]均强调θ与γ频段在VR情绪分类中的重要作用。时频域分析结合时域与频域优势，利用短时傅里叶变换、小波变换等方法在保留时序信息的同时分析频谱分布，如Zhao^[66]等利用离散小波变换将EEG转化为虚拟情绪图像，实现了行走过程中的高精度情绪识别。非线性特征分析基于混沌理论和信息论，包括相关维数、李雅普诺夫指数、赫斯特指数，以及排列熵、功率谱熵、样本熵等。Amores^[58]等计算EEG α与θ频段功率的瑞丽熵，证实其在VR多感官刺激中可能是放松状态的潜在指标。由于情绪状态的表征具有复杂性，通过多源特征融合可有效提升情绪

识别的区分度与鲁棒性, Xie^[17]等将PSD、微分熵(Differential Entropy, DE)等四种特征融合, 显著提升了六类离散情绪的识别性能。多模态信号特征融合进一步提升了VR情绪识别的准确率。例如, Gupta^[21]等将EEG、皮肤电活动(Electrodermal Activity, EDA)与心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)结合, 发现其不仅与情绪唤醒和调节相关, 还受情绪适应与移情过程影响; Salminen^[35]等在社交VR冥想中融合呼吸信号与前额叶EEG不对称性这两种特征进行生物反馈, 实现了比单一特征反馈更显著的同理心唤起效果。

aBCI-VR系统的情绪识别方法主要包括机器学习、深度学习及混合架构。如Suhaimi等^[64, 67]使用支持向量机实现了基于可穿戴脑电设备的四类情绪识别, 准确率达85.01%; Pei^[68]结合主成分分析和随机森林在VR视频情绪正、中、负三分类识别中达95.6%平均准确率。深度学习方法利用大规模数据和复杂模型可进一步提升分类性能, 并支持更复杂的情绪识别任务。如Hofmann等^[29]基于长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)在VR场景下连续预测情绪唤醒度, 平均准确率达75%。针对aBCI-VR的跨模态和动态特性, 混合模型融合多特征、多结构网络以捕捉时域、频域与时空域的耦合特性, 如Zhang^[16]等提出差分熵卷积递归神经网络结合差分熵、卷积神经网络和LSTM, 在VR-3D中实现了效价和唤醒度二分类, 准确率为93.45%和94.53%; Xie^[20]等设计基于频带空间注意力网络, 通过频段注意力与空间注意力模块级联融合, 在VR场景下实现了六类情绪识别, 准确率达96.53%。

多项研究表明, VR环境下的情绪识别准确率高于非VR环境。如Babu^[39]对比非VR环境和VR环境下正、中、负三类情绪的识别性能, 发现分类准确率由57.60%提升至77.75%; Pinar Bilgin^[41]等设计交叉实验比较2D屏幕与3D头戴式VR进行情绪诱发下的分类性能, 结果显示在多个场景VR-3D诱发条件下的平均识别准确率由59.27%提升至66.88% ($p < 0.05$), 验证了VR-3D在情绪识别中的优势。

aBCI-VR中的情绪识别模块正呈现向小型化、可穿戴化及实时化发展的趋势。例如, Ding^[28]提出的TSception框架利用低成本4通道EEG结合多尺度时间卷积与半球不对称特征, 在高低唤醒度分类中达86.03%的准确率, 显著优于多种对比方法; Teo^[40]则利用低成本4通道EEG结合360° VR视频与深度神经网络构建aBCI-VR, 实现了96.32%的二分类情绪识别准确率, 并提出额叶与颞叶电极对情绪识别具有关键作用, 以上研究验证了可穿戴设备在情绪唤醒识别中的应用潜力。Wan^[42]进一步基

于自研HMD构建aBCI-VR, 仅使用2通道EEG与3通道外周生理信号构建实时情绪识别模型, 通过特征优化实现情绪准确识别的同时将识别时间缩短了5倍, 验证了少通道多模态信号在可穿戴设备中应用的可行性, 并体现了其在实时情绪识别中的性能优势。

总体而言, 得益于虚拟现实的高沉浸性、强交互性和可控性, aBCI-VR的情绪识别模块在特征表示能力和分类性能上普遍优于非VR场景。当前研究正向少通道可穿戴化、实时在线识别、多模态融合方向发展, 为构建低成本、高性能、可广泛部署的aBCI-VR系统奠定了技术基础。

5 基于虚拟现实的情绪调节技术

aBCI-VR系统利用EEG及其他生理信号实时识别情绪状态, 调整VR场景中的多感官刺激元素, 引导情绪向目标状态变化, 从而实现诱发-识别-反馈的闭环情绪调节。其独特优势在于反馈环节可直接作用于诱发情绪的情境本身, 实现情绪诱发与调节在同一语境下的自然衔接, 使调节过程自然融入情感体验。例如在VR场景中动态调整画面色调、背景音乐节奏和虚拟人物表情等。这种“情境一致性”使调节过程与用户的沉浸式体验在语义和交互上保持连贯, 减少外部刺激引入的割裂感, 从而提升沉浸感, 进而提升情感共鸣和调节依从性^[69]。

这一优势在多个研究中得到了验证。例如在神经反馈方面, Li^[70]等将EEG微分熵特征映射到NPC表情与参考指示器, 构建神经反馈训练, 将诱发情绪的识别准确率由65.4%提升至87.6%; Benlamine^[33]提出BARGAIN框架在VR道德困境场景中使用参与度(Engagement)和分心指数(Distraction)等EEG特征动态调整NPC表情、手势动画与背景音乐, 显著提升了玩家的情感交互体验。在多模态生理信号反馈方面, Gupta^[21]构建CAEVR系统结合EEG、EDA和HRV等生理信号动态改变VR环境颜色和虚拟助手反馈, 显著提升积极情绪与共情水平。此外aBCI-VR还支持多种反馈方式相结合, 如视觉和呼吸反馈等。Salminen^[35]提出DYNECOM系统在社交VR场景中通过EEG额叶不对称性与呼吸频率进行生物反馈, 提升了用户的共情水平。Mazgelytė等^[71]在结合呼吸反馈的VR场景中, 基于腹部张力带监测的呼吸节奏实时生成蓝色正弦波, 同步显示红色心率波, 引导受试者进行缓慢均匀的横膈膜呼吸, 使呼吸波趋于平缓且与心率波协同, 使受试者更加放松。Lange等^[72]在VR场景中通过扭曲景物、动态分形等方法构建了类似致幻的视觉效果, 有

效地调节了受试者的积极情绪。Wang等^[73]在VR正念冥想场景中,基于EEG信号实时计算情绪得分,通过三阶段反馈机制动态调节VR场景元素,初始阶段以语音提示引导呼吸聚焦注意力,中期通过花朵绽放或光斑聚合反馈当前放松程度,后期触发鸟鸣、阳光等新刺激强化积极情绪,显著提升用户沉浸感与情绪调节效果。

综上,aBCI-VR在闭环情绪调节中可融合多源生理信号与多样化反馈策略,适用于从正念冥想、共情训练到复杂情绪交互等多类场景,并显著提升调节的有效性与依从性。

6 aBCI-VR系统面临的挑战与未来展望

aBCI-VR系统在情绪诱发、识别与调节等方面显示出良好的应用前景,但相关技术和应用仍处于探索阶段,尚存在多方面的限制与瓶颈。本节系统地分析其面临的主要挑战,并结合挑战对应地探讨未来可能的突破方向。

6.1 aBCI-VR系统面临的挑战

本节聚焦当前研究中的若干关键方向,概括出三项在构建稳定、可解释且具生态效度的aBCI-VR系统中亟需深入探讨的问题。

(1) VR情绪诱发效果的评估不足;

(2) 多模态数据的识别挑战;

(3) 诱发—识别—反馈失配:闭环一致性挑战。这些问题的提出,旨在为未来aBCI-VR系统的广泛应用提供理论指引与研究方向。

6.1.1 VR情绪诱发效果的评估不足

aBCI-VR依托沉浸感、临场感和多感官整合,被广泛认为能更自然地诱发情绪。然而,这种“自然性”目前主要依赖主观问卷或沉浸感评分等间接方式进行评价,缺乏统一、量化的客观评估标准。现有研究常使用单一指标(如EEG功率变化或皮肤电反应)来衡量诱发效果,但难以全面反映情绪的强度、持续时间以及与情境的匹配程度。这不仅使不同研究之间的结果难以直接比较,也为系统优化和跨场景应用带来不确定性。因此,如何在VR情绪诱发中建立科学、系统且可重复的评估方法,仍是未来需要重点解决的问题。

6.1.2 多模态数据的识别挑战

aBCI-VR系统往往同时采集EEG、ECG、GSR、眼动、语音和面部表情等多源生理与行为数据。这些数据不仅在采样率、时间延迟、信噪比等方面差异显著,还具有跨时间尺度、

多层次语义等特征,给统一建模与实时识别带来显著挑战。

当前常用的特征融合策略虽具一定可行性,但在面对高维异构数据时,其在实时性、鲁棒性与语义对齐方面仍存在瓶颈。同时,情绪标签的主观性强、标注成本高,进一步限制了多模态大规模训练数据的获取,影响模型的泛化能力。

6.1.3 闭环一致性诱发—识别—反馈匹配难题

理想的aBCI-VR应实现“情绪诱发—识别—反馈调节”的无缝闭环,即反馈在时间、语义与用户感知上均与诱发情境高度一致。然而现有系统的闭环一致性往往受限于识别延迟、语义偏差与多通道反馈的不协调。例如,识别延迟可能导致干预策略滞后于真实情绪状态^[74];反馈内容若与用户主观体验或场景情绪氛围不符^[75-76],可能削弱系统信任度;多模态反馈通道(视觉、听觉、触觉等)若缺乏统一协调,不仅无法增强沉浸感与本体感,反而可能引发晕动症等生理不适^[77-78],甚至导致过度反馈引发负性情绪反刍的心理风险^[79],这些问题直接关系到aBCI-VR系统长期稳定性与干预效果。

6.2 展望

针对前述aBCI-VR系统在情绪诱发、识别与调节等环节的不足,未来研究需要在理论框架、算法设计与系统构建等多层面持续探索与优化,重点围绕情绪诱发效果评估、多模态情绪识别以及闭环一致性三个方向开展工作。

6.2.1 情绪诱发效果的多维建模与客观评估

针对VR情绪诱发效果评估不足的问题,未来可在主观量表之外,发展结合EEG、EDA、HRV、眼动等多源数据的客观、多维度建模方法,综合考量情绪的强度、持续时间、情境匹配度与多感官一致性等指标。可探索基于多模态融合的情绪反应画像构建方法,并建立标准化的评估流程与跨研究可比的指标体系。同时,应关注诱发过程的时间动态特性,结合事件标注与生理信号时序对齐技术,提升情绪反应测量的精确性与可重复性。这将为aBCI-VR情绪诱发机制的优化和跨平台性能验证提供可靠依据。

6.2.2 多模态情绪识别的融合与泛化策略

针对多模态数据融合与识别的挑战,未来研究可引入跨模态时空对齐与统一语义表示学习框架,结合自监督、多任务与迁移学习等方法提升模型在不同人群、场景和设备条件下的泛化能力与鲁棒性。在系统实现层面,应利用采集设备的小型化、低功耗化和边缘计算能力,将EEG、ECG、GSR、眼动等多源信号在本地实时处理与特征提取,减少传输延迟并降低隐私风险。此外,多中心分布式部署与联邦学习可在保护数据隐

私的前提下,实现跨机构模型协同优化,推动aBCI-VR在医疗康复、情绪障碍干预及沉浸式教育等领域的规模化应用。

6.2.3 闭环诱发-识别-反馈一致性优化

针对闭环一致性不足的问题,未来应从时延控制、策略适配与多通道协调三方面入手:首先,优化信号处理流程并结合边缘计算与高效算法,将诱发-识别-反馈链路的延迟降低至用户可感知的同步范围;其次,在反馈策略中引入个体化适配机制,结合历史情绪反应模式、用户舒适度与接受性评估,动态调整反馈的强度、时机与表现形式,提前优化可能引发不适(如晕动症)的反馈模式,使其更贴合用户主观期望的体验;最后,建立多模态反馈一致性标准,对视觉、听觉、触觉等通道进行统一的节奏与语义规划,避免信息冲突削弱沉浸感和本体感。这些改进有望逐步形成一套可推广的闭环一致性优化范式,提升aBCI-VR在真实应用场景中的稳定性与用户信任度。

7 结语

参考文献:

- [1] DOLAN R J. Emotion, cognition, and behavior[J]. *Science*, 2002, 298(5596): 1191-1194.
- [2] STRAUB V J, MILLS M C. The interplay between male fertility, mental health and sexual function[J]. *Nature Reviews Urology*, 2024, 22(1): 1-2.
- [3] CARL J R, SOSKIN D P, KERNS C, et al. Positive emotion regulation in emotional disorders: A theoretical review[J]. *Clinical Psychology Review*, 2013, 33(3): 343-360.
- [4] VANDERLIND W M, MILLGRAM Y, BASKIN-SOMMERS A R, et al. Understanding positive emotion deficits in depression: From emotion preferences to emotion regulation[J]. *Clinical Psychology Review*, 2020, 76: 101826.
- [5] RIGUCCI S, SARUBBI S, ERBUTO D, et al. Negative emotion dysregulation is linked to the intensity of suicidal ideation in a mixed inpatient sample[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2021, 281: 605-608.
- [6] CHEN Y, PENG Y, TANG J, et al. EEG-based affective brain-computer interfaces: recent advancements and future challenges[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2025, 22: 031004.
- [7] SCHERER K R, MOORS A. The emotion process: Event appraisal and component differentiation[J]. *Annual Review of Psychology*, 2019, 70(1): 719-745.
- [8] LI Q, LIU Y, YAN F, et al. Emotion recognition based on multiple physiological signals[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023, 85: 104989.

本文围绕aBCI-VR的系统结构与硬件构成、典型应用场景与现有研究进展进行了综述,并在梳理相关文献的基础上,系统地总结了aBCI-VR具有情绪诱发强、情绪相关神经生理明显、情绪识别准确率高以及具有闭环调节的情境一致性等方面的优势。同时,我们也讨论了其存在缺乏有效的情绪诱发效果评估方法、多模态数据识别不足、诱发-识别-反馈一致性差等挑战,并提出了相应的未来展望。

总体而言,aBCI-VR作为虚拟现实与情感脑机接口技术的交叉融合方向,在沉浸式情感交互、心理健康干预以及多模态人机融合等方面展现出重要潜力。然而,该领域整体仍处于发展早期,未来的研究需要在确保技术可解释性和用户体验的前提下,进一步推动情绪诱发效果的多维建模与客观评估、多模态情绪识别的融合与泛化策略、以及闭环诱发-识别-反馈一致性优化等方向的研究。随着虚拟现实硬件、小型化传感器、边缘计算及人工智能技术的不断发展,aBCI-VR有望在更多应用场景中实现落地。

- [9] LI J, CHEN N, ZHU H, et al. Incongruity-aware multimodal physiology signals fusion for emotion recognition[J]. *Information Fusion*, 2024, 105: 102220.
- [10] POTTS D, BROAD Z, SEHGAL T, et al. Sweating the details: Emotion recognition and the influence of physical exertion in virtual reality exergaming[C]//*Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2024: 1-21.
- [11] SCHOELLER F, BERTRAND P, GERRY L J, et al. Combining virtual reality and biofeedback to foster empathic abilities in humans[J]. *Frontiers in Psychology*, 2019, 9: 2741.
- [12] KHARE S K, BLANES-VIDAL V, NADIMI E S, et al. Emotion recognition and artificial intelligence: A systematic review (2014 - 2023) and research recommendations[J]. *Information Fusion*, 2024, 102: 102019.
- [13] CASTIBLANCO JIMENEZ I A, OLIVETTI E C, VEZZETTI E, et al. Effective affective EEG-based indicators in emotion-evoking VR environments: An evidence from machine learning[J]. *Neural Computing and Applications*, 2024, 36(35): 22245-22263.
- [14] MARTIN D, MALPICA S, GUTIERREZ D, et al. Multimodality in VR: A survey[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 54(10s): 1-36.
- [15] YU M, XIAO S, HUA M, et al. EEG-based emotion recognition in an immersive virtual reality environment: From local activity to brain network features[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, 72: 103349.
- [16] ZHANG C, SU L, LI S, et al. Differential brain activation for

four emotions in VR-2D and VR-3D modes[J]. *Brain Sciences*, 2024, 14(4): 326.

[17] XIE J, LUO Y, WANG S, et al. Electroencephalography-based recognition of six basic emotions in virtual reality environments[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2024, 93: 106189.

[18] LI M, PAN J, GAO Y, et al. Neurophysiological and subjective analysis of VR emotion induction paradigm[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2022, 28(11): 3832-3842.

[19] CHENG S, SHENG D, GAO Y, et al. Enhancing positive emotions through interactive virtual reality experiences: An EEG-based investigation[C]//2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2024: 189-199.

[20] XIE J, LUO Y, LAN P, et al. FBSA-Net: A novel model based on attention mechanisms for emotion recognition in VR and 2D scenes[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2024, 302: 112287.

[21] GUPTA K, ZHANG Y, GUNASEKARAN T S, et al. CAEVR: Biosignals-driven context-aware empathy in virtual reality[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2024, 30(5): 2671-2681.

[22] ZHONG X, LIU W, XIE J, et al. Olfactory-enhanced VR: What's the difference in brain activation compared to traditional VR for emotion induction?[J]. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2023, 15(3): 1331-1342.

[23] PINILLA A, VOIGT-ANTONS J N, GARCIA J, et al. Real-time affect detection in virtual reality: A technique based on a three-dimensional model of affect and EEG signals[J]. *Frontiers in Virtual Reality*, 2023, 3: 964754.

[24] 余绍黔, 贾泽光, 李闯. 基于快速独立分量分析算法的不同情绪下事件相关电位差异性分析[J]. *计算机应用与软件*, 2024, 41(11): 131-137+167.

[25] 田丰, 张文睿, 李颖洁. 立体与非立体虚拟现实影片情绪唤醒差异的电生理特性[J]. *生物医学工程学杂志*, 2022, 39(01): 56-66.

[26] 李海宝, 李颖洁, 华旻磊, 等. 基于虚拟现实的不同情绪视频下的脑电谱特性[J]. *北京生物医学工程*, 2021, 40(05): 478-486.

[27] XU T, YIN R, SHU L, et al. Emotion recognition using frontal EEG in VR affective scenes[C]//2019 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC). IEEE, 2019, 1: 1-4.

[28] DING Y, ROBINSON N, ZENG Q, et al. TSception: A deep learning framework for emotion detection using EEG[C]//2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE, 2020: 1-7.

[29] HOFMANN S M, KLOTZSCHE F, MARIOLA A, et al. Decoding subjective emotional arousal during a naturalistic VR experience from EEG using LSTMs[C]//2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR). IEEE, 2018: 128-131.

[30] HORVAT M, DOBRINIĆ M, NOVOSEL M, et al. Assessing emotional responses induced in virtual reality using a consumer EEG headset: A preliminary report[C]//2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). IEEE, 2018: 1006-1010.

[31] KLOTZSCHE F, MARIOLA A, HOFMANN S, et al. Using EEG to decode subjective levels of emotional arousal during an immersive VR roller coaster ride[C]//2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2018: 605-606.

[32] ALHARBI H. Explainable feature selection and deep learning based emotion recognition in virtual reality using eye tracker and physiological data[J]. *Frontiers in Medicine*, 2024, 11: 1438720.

[33] BENLAMINE M S, DUFRESNE A, BEAUCHAMP M H, et al. BARGAIN: Behavioral affective rule-based games adaptation interface - towards emotionally intelligent games: Application on a virtual reality environment for socio-moral development[J]. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 2021, 31(2): 287-321.

[34] MARCOLIN F, OLIVETTI E C, JIMENEZ I A C, et al. Stress assessment with EEG and machine learning in affective VR environments[J]. *Neurocomputing*, 2025, 638: 130185.

[35] SALMINEN M, JÄRVELÄ S, RUONALA A, et al. Evoking physiological synchrony and empathy using social VR with biofeedback[J]. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2019, 13(2): 746-755.

[36] CARPIO R, BAUMANN O, BIRT J. Evaluating the viewer experience of interactive virtual reality movies[J]. *Virtual Reality*, 2023, 27(4): 3181-3190.

[37] 张进, 许子明, 周月莹, 等. 基于脑电的虚拟现实诱发下情绪状态分类[J]. *数据采集与处理*, 2021, 36(06): 1226-1236.

[38] 蓝文威, 陈晨, 张金, 等. 联合脑电信号与虚拟技术的大脑情绪状态的半球不对称性研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2021, 40(03): 266-271.

[39] BABU N, SATUA U, MATHEW J, et al. Emotion recognition in virtual and non-virtual environments using EEG signals: Dataset and evaluation[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2025, 106: 107674.

[40] TEO J, CHIA J T. Deep neural classifiers for EEG-based emotion recognition in immersive environments[C]//2018 International Conference on Smart Computing and Electronic

- Enterprise (ICSCEE). IEEE, 2018: 1–6.
- [41] BILGIN P, AGRES K, ROBINSON N, et al. A comparative study of mental states in 2D and 3D virtual environments using EEG[C]//2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). IEEE, 2019: 2833–2838.
- [42] WAN C, XU C, CHEN D, et al. Emotion recognition based on a limited number of multimodal physiological signals channels[J]. Measurement, 2025, 242: 115940.
- [43] WU D, LU B L, HU B, et al. Affective brain – computer interfaces (aBCIs): A tutorial[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(10): 1314–1332.
- [44] GU X, CAO Z, JOLFAEI A, et al. EEG-based brain-computer interfaces (BCIs): A survey of recent studies on signal sensing technologies and computational intelligence approaches and their applications[J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2021, 18(5): 1645–1666.
- [45] YUAN H, LI Y, YANG J, et al. State of the art of non-invasive electrode materials for brain – computer interface[J]. Micromachines, 2021, 12(12): 1521.
- [46] WEBER D, HERTWECK S, ALWANNI H, et al. A structured approach to test the signal quality of electroencephalography measurements during use of head-mounted displays for virtual reality applications[J]. Frontiers in Neuroscience, 2021, 15: 733673.
- [47] HERTWECK S, WEBER D, ALWANNI H, et al. Brain activity in virtual reality: Assessing signal quality of high-resolution EEG while using head-mounted displays[C]//2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2019: 970–971.
- [48] TAUSCHER J P, SCHOTTKY F W, GROGORICK S, et al. Immersive EEG: Evaluating electroencephalography in virtual reality[C]//2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2019: 1794–1800.
- [49] MAGALHÃES E, JACOB J, NILSSON N, et al. Physics-based concatenative sound synthesis of photogrammetric models for aural and haptic feedback in virtual environments[C]//2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW). IEEE, 2020: 376–379.
- [50] WANG J, WANG M. Review of the emotional feature extraction and classification using EEG signals[J]. Cognitive Robotics, 2021, 1: 29–40.
- [51] KILTENI K, GROTEN R, SLATER M. The sense of embodiment in virtual reality[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2012, 21(4): 373–387.
- [52] SLATER M. Immersion and the illusion of presence in virtual reality[J]. British Journal of Psychology, 2018, 109(3): 431–433.
- [53] WILKINSON M, BRANTLEY S, FENG J. A mini review of presence and immersion in virtual reality[C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2021, 65(1): 1099–1103.
- [54] TANG Q, WANG Y, LIU H, et al. Experiencing an art education program through immersive virtual reality or iPad: Examining the mediating effects of sense of presence and extraneous cognitive load on enjoyment, attention, and retention[J]. Frontiers in Psychology, 2022, 13: 957037.
- [55] PERUZZINI M, CAVALLARO S, GRANDI F, et al. Exploring how to use virtual tours to create an interactive customer remote experience[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2023, 35: 100509.
- [56] CALDAS O I, AVILES O F, RODRIGUEZ-GUERRERO C. Effects of presence and challenge variations on emotional engagement in immersive virtual environments[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2020, 28(5): 1109–1116.
- [57] CALDAS O I, MAULEDOUX M, AVILES O F, et al. Breaking presence in immersive virtual reality toward behavioral and emotional engagement[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2024, 248: 108124.
- [58] AMORES J, RICHER R, ZHAO N, et al. Promoting relaxation using virtual reality, olfactory interfaces and wearable EEG[C]//2018 IEEE 15th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN). IEEE, 2018: 98–101.
- [59] MOURA J M, BARROS N, FERREIRA-LOPES P. Embodiment in virtual reality: The body, thought, present, and felt in the space of virtuality[J]. International Journal of Creative Interfaces and Computer Graphics (UCICG), 2021, 12(1): 27–45.
- [60] CRUZ S V, DE CASTRO QUINTINO G, TORRES A B B, et al. Providing sense of embodiment with mobile virtual reality devices: A case study using the “Lamp-Head’s Laboratory” animation[C]//2019 21st Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). IEEE, 2019: 1–9.
- [61] JULIANO J M, SPICER R P, VOURVOPOULOS A, et al. Embodiment is related to better performance on an immersive brain computer interface in head-mounted virtual reality: A pilot study[J]. bioRxiv, 2019: 578682.
- [62] VAGAJA K, LINKENKAER-HANSEN K, VOURVOPOULOS A. Avatar embodiment prior to motor imagery training in VR does not

- affect the induced event-related desynchronization: a pilot study[J]. *Frontiers in Virtual Reality*, 2024, 4: 1265010.
- [63] RAMACHANDRAN V S, ROGERS-RAMACHANDRAN D. Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 1996, 263(1369): 377-386.
- [64] SUHAIMI N S, MOUNTSTEPHENS J, TEO J. A dataset for emotion recognition using virtual reality and EEG (DER-VREEG): Emotional state classification using low-cost wearable VR-EEG headsets[J]. *Big Data and Cognitive Computing*, 2022, 6(1): 16.
- [65] KORŻEL K, ŁUPKOWSKI P. The phenomenon of presence in virtual reality is mistakenly equated with immersion[J]. *PRESENCE: Virtual and Augmented Reality*, 2023, 32: 117-127.
- [66] ZHAO Y, GUO M, CHEN X, et al. Attention-based CNN fusion model for emotion recognition during walking using discrete wavelet transform on EEG and inertial signals[J]. *Big Data Mining and Analytics*, 2023, 7(1): 188-204.
- [67] SUHAIMI N S, MOUNTSTEPHENS J, TEO J. Parameter tuning for enhancing inter-subject emotion classification in four classes for VR-EEG predictive analytics[J]. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2020, 29(6s): 1483-1491.
- [68] PEI G, SHANG Q, HUA S, et al. EEG-based affective computing in virtual reality with a balancing of the computational efficiency and recognition accuracy[J]. *Computers in Human Behavior*, 2024, 152: 108085.
- [69] KOGLER W, WOOD G, KOBER S E. Effects of electrical brain stimulation on brain indices and presence experience in immersive, interactive virtual reality[J]. *Virtual Reality*, 2022, 26(3): 1019-1029.
- [70] LI K, HUANG W, GAO W, et al. An electroencephalography-based brain-computer interface for emotion regulation with virtual reality neurofeedback[J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2024, 16(4): 1405-1417.
- [71] MAZGELYTĖ E, REKIENĖ V, DEREŠKEVIČIŪTĖ E, et al. Effects of virtual reality-based relaxation techniques on psychological, physiological, and biochemical stress indicators[C]//*Healthcare*. MDPI, 2021, 9(12): 1729.
- [72] LANGE L, YENNEY J, WU Y C. Bridging psychedelic VR and BCI: Enhancing user experience through adaptive EEG-guided neural modulation[C]//*Proceedings of the Nineteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. 2025: 1-7.
- [73] WANG Q, LIU F, YANG B, et al. An EEG-based positive feedback mechanism for VR mindfulness meditation to improve emotion regulation[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2025.
- [74] LU A, HUANG M, TANG L, et al. Enhancing usability with virtual imagery: Insights into feedback mechanism from a BCI-VR integrated system[C]//*2024 10th International Conference on Virtual Reality (ICVR)*. IEEE, 2024: 121-126.
- [75] TSERENCHIMED T, KIM H. Sharing method with reduced motion sickness in object-based VR/AR collaborative virtual environment[J]. *Virtual Reality*, 2024, 28(3): 122.
- [76] AVOLA D, CINQUE L, FORESTI G L, et al. A novel low cybersickness dynamic rotation gain enhancer based on spatial position and orientation in virtual environments[J]. *Virtual Reality*, 2023, 27(4): 3191-3209.
- [77] BERGER L M, WOOD G, KOBER S E. Manipulating cybersickness in virtual reality-based neurofeedback and its effects on training performance[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2025, 22(2): 026014.
- [78] DUŽMAŃSKA N, STROJNY P, STROJNY A. Can simulator sickness be avoided? A review on temporal aspects of simulator sickness[J]. *Frontiers in Psychology*, 2018, 9: 1-14.
- [79] LAVOIE R, MAIN K, KING C, et al. Virtual experience, real consequences: the potential negative emotional consequences of virtual reality gameplay[J]. *Virtual Reality*, 2021, 25(1): 69-81.