arXiv:2603.02535v1 [cs.HC] 3 Mar 2026

理解交互对虚拟现实中情绪体验的影响

Zheyuan Kuang
悉尼大学，澳大利亚悉尼
zheyuan.kuang@sydney.edu.au

Tinghui Li
悉尼大学，澳大利亚悉尼
tinghui.li
@sydney.edu.au

Weiwei Jiang
南京信息工程大学 南京，中国
weiweijiangcn@gmail.com

Sven Mayer
多特蒙德工业大学 多特蒙德，德国 可信数据科学与安全研究中心 多特蒙德，德国
info@sven-mayer.com

Flora Salim
新南威尔士大学 悉尼，澳大利亚
flora.salim@unsw.edu.au

Benjamin Tag
新南威尔士大学计算机科学与工程学院，澳大利亚新南威尔士州悉尼
benjamin.tag@unsw.edu.au

Anusha Withana
悉尼大学计算机科学学院，澳大利亚新南威尔士州悉尼
anusha.withana
@sydney.edu.au

Zhanna Sarsenbayeva
悉尼大学，澳大利亚悉尼
zhanna.sarsenbayeva
@sydney.edu.au

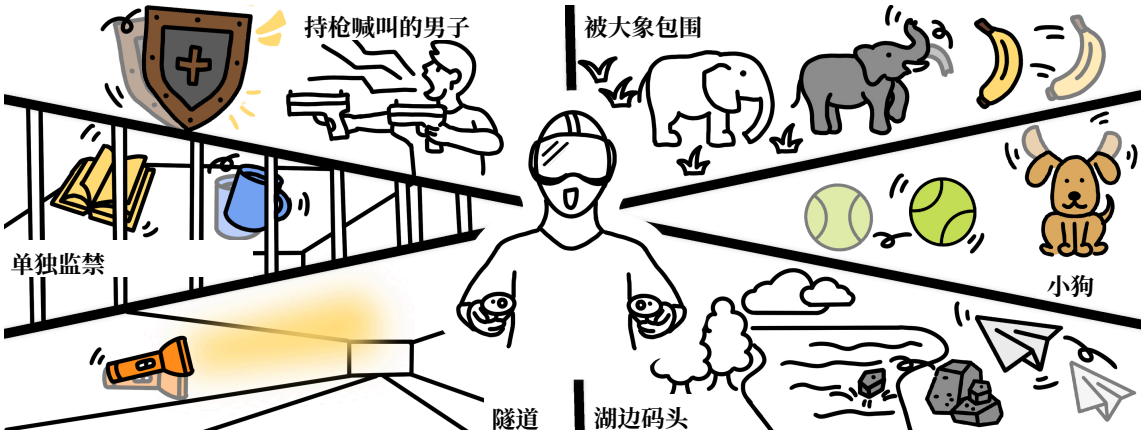


图1：参与者置身于六个可引发情绪的虚拟现实场景中的示意图，交互对象以彩色突出显示。

摘要

虚拟现实已被有效用于诱发情绪，但大多数研究关注的是情感反应的强度，而非交互如何影响这些体验。为弥补这一不足，我们通过两项重要扩展，进一步完善了一个经过验证的 VR 情绪诱发数据集。首先，我们新增了一种高唤醒、高情绪效价场景，并在一项被试内研究（N=24）中验证其效果。其次，我们将交互元素融入每个场景，创建交互式版本和非交互版本，以考察交互对情绪反应的影响。我们采用结合主观评分和生理信号的多模态方法评估交互，以捕捉有意识和无意识的情感反应。我们的评估研究（N=84）表明，交互不仅会放大情绪，还会根据情境调节情绪：在负面场景中支持应对，在正面场景中增强愉悦。这些发现凸显了场景定制交互在不同应用中的潜力，在这些应用中，情绪调节与引发情绪同等重要。

本作品采用知识共享署名—非商业性使用—禁止演绎 4.0 国际许可协议。*CHI'26*，西班牙巴塞罗那 ©2026 版权归所有者/作者所有。ACM ISBN 979-8-4007-2278-3/2026/04https://doi.org/10.1145/3772318.3790313

CCS 概念
• **以人为中心的计算** → **虚拟现实**；混合/增强现实。

关键词
人机交互、虚拟现实、情绪诱发、情感交互

ACM 参考格式：
Zheyuan Kuang、Tinghui Li、Weiwei Jiang、Sven Mayer、Flora Salim、Benjamin Tag、Anusha Withana和Zhanna Sarsenbayeva。2026。理解交互对虚拟现实中情绪体验的效果。载于*2026*年*CHI*人机交互系统中的人为因素大会论文集（*CHI '26*），*2026*年*4*月*13*日至*17*日，西班牙巴塞罗那。ACM，美国纽约，20 页。https://doi.org/10.1145/3772318.3790313

1 引言
情绪在塑造人类体验中发挥着核心作用，影响着感知、决策和行为 [45]。虚拟现实（VR）已成为诱发情绪的有力工具，可提供沉浸式且具有生态效度的环境，使情感状态易于被诱发，从而实现整合的情绪体验 [34]。已有研究成功使用沉浸式360°视频、照片级真实感环境和虚拟环境来唤起一系列情绪 [34, 47, 82]。然而，现有方法大多依赖视觉和听觉等被动刺激，对虚拟现实中交互式或主动形式的情绪诱发探索有限 [6]。作为虚拟现实的自然延伸，交互式虚拟现实环境有望通过让用户主动参与虚拟世界来增强情绪体验。

尽管先前利用虚拟环境的研究支持场景级交互（例如，瞬移），但对象级交互在调节情绪反应方面的具体作用仍未得到充分探索 [14, 34, 86]。尤其是，关于虚拟现实中情绪的研究主要聚焦于测量反应和设计情感可视化，但很少有研究系统地改变交互，以调节并可能增强其对情绪参与的效果。然而，先前的研究表明，对象级交互具有巨大潜力。例如，对象级交互使虚拟现实用户能够伸手触摸物体，从而比传统屏幕更能让他们沉浸于游戏世界之中 [36, 40]。触摸某一物体的机会会增强对该物体的感知所有权感受，而当触摸体验提供中性或积极的感官反馈时，该物体的价值评估也会提高 [72]。新颖的对象交互设计可以显著提升感知乐趣和用户满意度 [101]。此外，虚拟世界中的物体可以对用户决策施加不同程度的影响或控制感，因此对象级交互会通过提示或阻止用户完成动作来影响支配感，与环境缺乏交互的情况亦然 [20]。尽管已有这些顿悟，这些机制如何影响虚拟现实中的情绪体验仍不明确。探究这一关系可以阐明对象级交互的情感作用，并指导更具情绪参与性的虚拟现实环境设计，而这可应用于心理健康研究与实践 [7, 87]。在本研究中，我们聚焦于探索这一基本问题：在虚拟环境中启用对象级交互是否会增强情绪体验的诱发？

为探究这一问题，我们从两个方面扩展了Jiang等人的虚拟现实情绪诱发数据集 [34] 。首先，我们根据Jiang等人[34]为每个场景设计并融入了具有情感效应的交互元素。在实验比较中，每个场景均实现为两个版本：一个包含由用户触发的操作的交互版本（例如，抚摸小狗、投掷石块、使用盾牌），以及一个视听内容完全相同的非交互版本。此外，我们还通过添加一个新场景扩展了现有数据集 [34] 。作者指出，该数据集缺少Russell情感环形模型 [78], 中高唤醒高效价（HAHV）象限的场景，因此无法全面覆盖整个情感空间。为弥补这一不足，我们基于经过验证的360°视频 [47]开发了一个新场景：被大象包围。新增场景使四个象限均得到呈现，从而能够更均衡地诱发情绪。我们实现了该场景的交互式版本和非交互版本，以探究对象级交互对情绪诱发的效果。

为了评估交互带来的情绪影响，我们采用多模态方法，将主观自我报告与客观生理测量指标相结合。自我评估人偶（SAM）问卷能够提供有价值的效价和唤醒度主观评分，但也存在固有局限 [12]。它是一种离散的事后测量，容易受到认知偏差和回忆误差的影响，而且可能无法充分捕捉短暂高唤醒状态的强烈程度。相比之下，生理传感能够客观、连续且无意识地测量情感反应，尤其是与唤醒度相关的反应 [80]。这对我们的研究尤为重要，因为交互元素带来的直观、即时影响——例如大象反应引发的惊讶，或举起盾牌时产生的紧张感——可能在被有意识地处理和报告之前，就已在自主神经系统中显现。通过整合生理数据，我们旨在捕捉这些细腻的实时反应，从而更全面、更可靠地理解交互如何调节情绪体验。本研究旨在探讨以下研究问题：

RQ1 新增场景被大象包围 能否可靠且有效地诱发高唤醒、高效价的情绪？**RQ2** 与非交互式基线相比，对象级交互如何影响主观和生理情绪反应测量指标？**研究问题3** 在虚拟现实中，对情感交互的主观自我报告与生理唤醒之间有何关系？

总而言之，我们的工作为人机交互和情感计算领域作出了三项主要贡献：

- 我们扩展了虚拟现实数据集[1]，加入了一个新场景，填补了诱发高唤醒、高效价情绪方面的关键空白，从而支持更丰富、更均衡的情感研究。
- 我们采用受控实验设计，为每个场景设置交互式和非交互式版本，首次对对象级交互对情绪反应的影响开展了系统研究。

[1]https://github.com/ZHEYUANK/VR-Dataset-Emotions-Interaction.git

- 我们结合自我报告和生理数据进行实证分析，为情感过程提供了细致的洞见，并提出了设计具有情感共鸣的交互式虚拟现实体验的实用建议。

2 相关工作

在本节中，我们概述与本研究相关的关键领域：情绪测量方法、虚拟现实中的情绪诱发方法，以及情感交互技术。

2.1 情绪测量

广泛使用的情感环形模型 [78] 将情绪概念化为两个连续维度：效价和唤醒度。Ekman模型 [21] 将情绪划分为离散的基本类别；然而，其普遍性仍存在争议，例如由于文化差异 [9]。在这些理论框架的基础上，人机交互研究中的情绪通常使用心理测量自我报告量表进行主观测量。常见方法包括分类情绪量表 [18], 正性与负性情感量表（PANAS） [94],自我评估人形图（SAM） [12], 愉悦—唤醒—支配（PAD）量表 [66], 以及情感滑块 [9]

PANAS将效价与唤醒度整合为正性与负性情感分数，但可能会误判愉悦驱动的正性情感，尤其是在愤怒等高唤醒负性情境中，从而导致正性分数虚高 [16, 73, 95]。SAM引入了一种图示评估方法，涵盖愉悦（效价）、唤醒度和支配感维度，为自我报告情绪提供了一种直观而高效的工具 [12]。近期研究已表明其在虚拟现实环境验证中的稳健性与可靠性 [98]。鉴于其多维特性及基于图像的图标，SAM尤其适用于沉浸式虚拟现实情境，我们在本研究中采用它，以更全面地捕捉效价、唤醒度和支配感。

客观的情绪测量主要依赖可穿戴设备与生理传感器，因为它们通过测量与中枢神经系统和自主神经系统相关的多种信号，为估计情绪提供了便捷途径 [99],，包括脑电图（EEG） [88], 、心率（心率）和心率变异性（心率变异性） [93],、皮肤电活动（皮肤电活动） [4], 、面部行为 [79, 89, 100], 以及眨眼 [103]。然而，这些信号往往难以解读，因为相似的模式可能反映不同的情绪状态，并且常受噪声和用户运动的影响，尤其是在沉浸式虚拟现实环境中 [3, 90]。尽管能提供客观洞见，生理信号并不能完全捕捉情绪的主观体验，且需要仔细的预处理和针对具体情境的解读 [74]。为提高可靠性，结合多种生理信号可以提升情绪识别的准确性，并实现对情感状态更丰富的测量 [29]。此外，虚拟现实提供了高度可控且可重复的环境，使此类多模态测量能够被精确整合与验证 [52, 53], ，从而支持对情绪反应进行更全面的评估 [48, 49, 75, 97]。

2.2 在虚拟现实中诱发情绪

虚拟现实中的情绪诱发传统上依赖于简短且孤立的虚拟环境，这些环境旨在诱发特定的情感状态，通常通过仅持续几分钟的短暂暴露来实现 [23, 35, 63]。这些环境通常结合视觉刺激，例如国际情感图片系统（IAPS）中的图像 [42] 或360°视频 [82], ，以及富有情感表现力的音乐等听觉线索 [83]。除感知刺激外，近期研究已将自传式回忆引入虚拟现实，采用沉浸式基于线索的范式来触发情绪记忆及相关生理反应 [28]。

虽然这些方法适用于受控诱发，但往往缺乏交互和动态的情感进程。近期研究探索了更具沉浸感的体验，尤其是VR游戏。这类游戏持续时间较长，能引发不断演变的情绪轨迹 [26, 31]。这些体验涵盖不同的效价和唤醒度水平 [8, 68], ，并且可以通过虚拟化身表情 [37], 、环境照明与色彩 [5], 以及音乐 [39]等设计因素加以塑造。然而，VR游戏的复杂性和持续时间可能导致情绪反应出现变异性，从而降低其在严格受控的实验研究中的适用性 [44, 46]。

除了基本的情绪触发因素，近期研究开始设计沉浸式虚拟现实环境，以诱发敬畏等更复杂的状态 [14] ，并提供了证据，表明通过刻意的虚拟环境设计可以实现情绪响应体验 [86]。虚拟现实作为一种高度沉浸、交互且可定制的媒介，为研究特定设计因素如何塑造情绪体验提供了颇具前景的平台 [34]。

2.3 情感交互

情感交互是指用户与设计系统之间发生具有情感意义的交流方式 [57]。许多虚拟现实情绪研究依赖被动体验，而近期研究开始探讨交互元素如何塑造情绪体验。研究表明，触觉反馈 [22], 、听觉信号 [30, 50], 以及与虚拟物体 [54], 、虚拟代理 [32], 和虚拟宠物 [70] 的交互，都能调节情感反应。例如，在虚拟现实中投掷纸飞机可以帮助用户象征性地释放负性情绪 [92]。研究显示，这类交互设计能够让用户在沉浸式虚拟现实环境中自然地采取目标导向行动，从而增强情绪参与 [51, 86]。此外，研究人员发现，临场感与情绪在交互过程中会相互强化 [76], ，进一步印证了交互在情感体验中的作用。然而，现有研究大多针对特定应用设计，缺少可重复利用的资源，无法系统地研究虚拟现实中的交互设计如何影响情绪反应。我们的研究考察了情感交互如何影响基于虚拟现实的情绪诱发中的用户参与度和情感联结。

3 场景建模

为了了解交互如何影响虚拟现实中的情绪诱发，我们扩展了Jiang等人经过验证的数据集。 [34] 具体而言，我们在每个场景中都加入了交互元素（详情如下）。每个场景都旨在对应罗素情感环形模型的一个特定象限 [78] ，如图2所示：湖边码头和小狗属于低唤醒高效价（LAHV）象限，隧道和单独监禁属于低唤醒低效价（LALV）象限，而持枪喊叫的男子属于高唤醒低

效价（HALV）象限。此外，原始数据集没有针对高唤醒高效价（HAHV）象限的场景，作者指出这是该研究的局限之一，原因在于伦理考量和晕动症风险 [34]。为了解决这些问题，我们确保新增的HAHV场景符合伦理规范，旨在诱发强烈但积极的情绪，例如兴奋和敬畏，同时避免令人痛苦或引发恐惧的内容 [55]。

为弥补这一空白，我们采用 Jiang等人 [34]的方法，选取了 Li等人 [47] 由 73 个视频片段组成的一个高唤醒高效价视频片段——被大象包围[2] 。按照原视频的设置，用户会出现在明亮天空下的开阔草原中，看到七头大象群缓缓地一同走来。场景视野开阔、没有遮挡，仅远处的山丘构成视野边界。选择这段视频是为了尽可能降低晕动症风险，因为先前研究表明，具有强烈动态视觉运动的虚拟现实内容（例如，过山车模拟）通常会诱发晕动症 [13], ，而节奏舒缓、贴近自然的场景预计风险较低。这一考量对于减轻潜在不适并确保广大参与者都能使用至关重要 [34]。随后，我们使用 Blender 和 Unity 将这段 360°视频转换为三维模型，并据此重建了这一沉浸式虚拟现实环境。

交互场景设计。 为考察交互如何影响情绪反应，我们将交互元素设计得直观且具有情绪意义。在此，我们将交互定义为对场景中物体的直接操控（例如，拾起、投掷、触碰或使用物体）。每个场景均制作了两个版本：一个是可由用户触发动作的交互版本，另一个是视听内容相同但没有对象级交互的非交互版本。这样的设置有助于受控比较交互元素对情绪诱发的作用。

在交互场景中，玩家可以瞬移，并使用控制器与游戏对象进行交互。当玩家与交互元素的距离小于 2.5 米时，场景中的所有交互元素都会以黄色轮廓突出显示，从而清晰可见，并针对自然触及范围或瞬移范围内可能发生的交互提供直观反馈 [33, 43]。每个场景还配有相应的音效，详情见表1。如图2所示，六个建模场景中的交互对象均以黄色突出显示。六个场景中的交互详情见图17 ，位于A.2节，并在下文中说明。

隧道。 玩家发现自己身处一条很长的隧道中，隧道由昏暗灯光照亮，偶尔有行人经过。隧道地面上放着一支手电筒。玩家可以将它捡起。此动作会触发控制器轻微的振动触觉反馈。捡起手电筒后，它会亮起，可用于照亮隧道的各个区域。

小狗。 玩家会出现在一间宽敞且配有家具的房间里，三只小狗在房间中四处走动。桌上放着一个网球。玩家可以抚摸小狗，触发轻柔的振动触觉反馈，使它们转向玩家并坐下。玩家也可以拿起并扔出网球；小狗会追着球跑，并把球叼回来。如果玩家超过 15 秒没有与小狗互动，它们就会坐在地上一动不动。

[2]《被大象包围》原视频链接 https://www.youtube.com/watch?v=mlOiXMvMaZo

湖边码头。 玩家会出现在一座石屋前的栈桥上，石屋毗邻一片平静的湖，周围环绕着长满树木和草地的山丘。栈桥尽头放着两块石头和两架纸飞机。玩家可以抓起石头，触发短促的振动触觉反馈脉冲，再将它们扔进湖里，激起水花，并在水面上产生清晰可见的涟漪效果。玩家也可以拿起纸飞机，触发轻微的振动触觉反馈后将其扔出；纸飞机飞行时，尾部会显示其飞行轨迹。

单独监禁。 玩家出现在一间狭窄阴暗的囚室中，里面有一盏闪烁的灯光、一个马桶座圈和一张单人床。桌上放着一本书和一个金属杯。玩家可以敲击铁门，触发强烈的振动触觉反馈和响亮的敲门声。玩家可以拿起杯子和书，扔向门。

持枪叫喊的男子。 玩家出现在一间布置齐全的阁楼中。短暂延迟后，一名男子闯入房间，边大喊边用手枪瞄准玩家。墙边放着一面金属防暴盾牌，上面有一扇小小的防弹玻璃窗。玩家可以拿起盾牌保护自己。盾牌可以用来遮挡视线，玩家也可以透过窗户观察男子。

被大象包围。 玩家置身于一片绿色草原，远处有山丘，天空多云，一群大象正缓缓走来。草地上方漂浮着一根香蕉。玩家可以抓住香蕉，触发轻微的振动触觉反馈，并将其扔向大象。这会触发大象用象鼻捡起香蕉并吃掉它。当玩家触碰大象时，控制器会触发强烈的振动触觉反馈；大象向后退两步，抬起象鼻并发出叫声。

我们使用 Unity 6000.0.46f1 长期支持（LTS）版本开发场景，以确保与 Meta Quest 运行时环境以及本研究使用的软件开发工具包兼容。所有三维模型均来自采用知识共享署名-相同方式共享许可的开源资源库、从 Unity 资源商店依据其标准许可获取，或使用 Blender 创建。

4 研究1：验证被大象包围 场景的有效性

首先，我们采用被试内设计开展了一项用户研究，以评估虚拟现实场景 被大象包围 在诱发高唤醒积极情绪方面，是否与其原始 360°视频形式同样有效（RQ1）。本研究已获本校研究伦理委员会批准。

4.1 实验设备

研究在一间大学实验室内进行，该实验室设有一处无遮挡的房间尺度追踪区域，面积超过 3×3 米。研究使用 Meta Quest Pro VR头显。我们使用 Unity 渲染场景，并在一台台式电脑（Intel Core Ultra 9 285K、32GB DDR5内存、Nvidia RTX 4080 SUPER）上运行，通过 Quest Link线缆连接。

4.2 实验流程

参与者抵达我们的实验室后，我们为每位参与者分配了一个唯一的匿名标识符，以进行数据管理。此外，我们对参与者进行了筛查，以排查与VR使用相关的潜在健康风险，例如癫痫、行动不便或视力障碍，以及不良情绪反应。符合条件的参与者了解了研究概况，并提供了

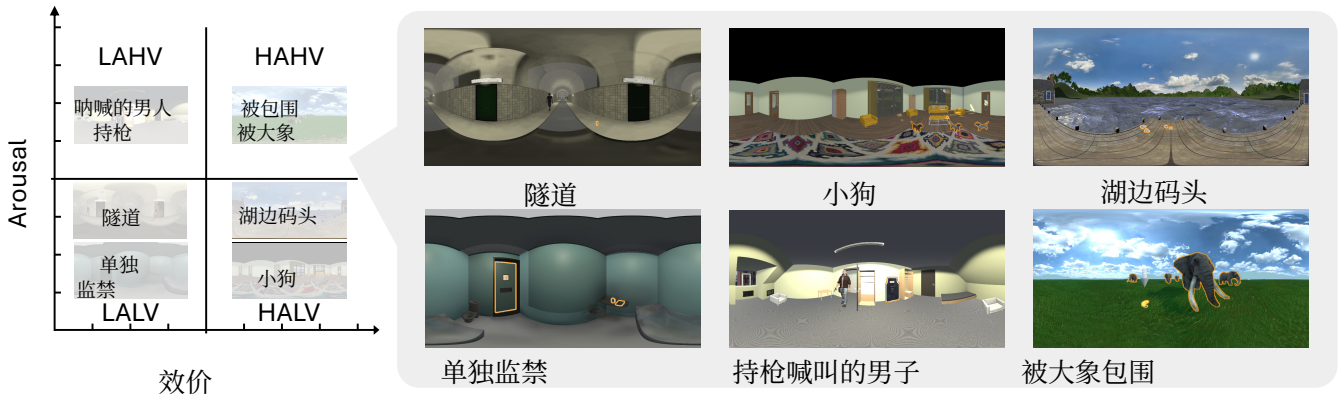


图 2：六个虚拟现实场景概览。左：场景在拉塞尔效价–唤醒环形模型中的位置，涵盖全部四个象限（LAHV、HAHV、LALV、HALV）。右：场景的全景视图，交互对象以黄色标出。

Tabl图 1：用于情绪诱发的建模交互场景详情。*V* – 效价，*A* – 唤醒度 ***l.***

场景名称	视觉描述	声音效果	交互式元素	目标《情绪》	Ref.
隧道	一条由昏暗灯光照亮的长隧道，有行人-偶尔经过。	脚步声	捡起一个手电筒。	V：中低 A：中低	[82]
小狗	一个宽敞且配有家具的房间，里面有几只小狗。	（安静）	抚摸小狗并扔球。	V：高 A：低	[47, 82]
湖边码头	湖边石屋前的一座栈桥，以及覆盖着树木和草地的山丘。	水流	投掷石块和纸飞机。	V：高 A：低	[82]
单独监禁	一间阴暗的囚室，里面有闪烁的灯光、马桶套件，还有一张单人床。	滴水声	敲门；拿起——起一本书和一个杯子。	V：低 A：低	[47]
呐喊的男人持枪	一间布置齐全的阁楼。一间布置齐全的阁楼里，有人一边大喊一边闯入，并举起手枪瞄准经过一段时间后，朝玩家	Man 大喊	使用盾牌格挡并观察。	V：中低 A：高	[82]
被大象包围	一片绿色草原，远处有山丘，还有一片多云的天空，大象朝这里走来。	Wind and elephant 象鸣	喂食和触摸大象	V：高 A：高	[47]

知情同意，并填写了一份关于人口统计学信息和先前VR经验的问卷。随后，参与者完成了一个教程场景，以熟悉VR系统；期间，他们填写了基线SAM问卷 [12]。之后，参与者以平衡的随机顺序体验了一段360° 视频和一个VR场景，每项体验至少持续30秒，参与者也可以选择继续探索，之后填写SAM量表（见图16）。场景之间，参与者通过头戴式设备的混合现实功能返回实验室环境，休息60秒。每位参与者的研究过程约持续10分钟。

4.3 参与者

我们招募了24名年龄在19至38岁之间的志愿者（12名女性、12名男性）参与研究（M = 25.63，标准差 = 3.70）。所有参与者均在研究开始前提供了知情同意。他们没有获得金钱报酬，但获得了零食。参与者报告的 VR 体验程度各不相同：8人每日使用 VR，7人每周使用，5人每月使用，4人从未使用过。

4.4 结果

我们首先评估了被大象包围VR场景引发情绪的效果。我们共收集了72份SAM测量数据（24名参与者 ×2条件 ×被大象包围）。这两个条件分别是原始 360° 视频 [47] 和相应建模的VR场景。

在检验正态性后，我们应用ART方差分析 [96]来分析非正态分布的数据（Shapiro-Wilk检验，$p < 0.05$）。对于效价，条件的主效应显著，$F(1, 23) = 15.597, p < 0.001, \eta^2 = 0.440$，表明被大象包围 VR场景诱发的评分显著高于 360° 视频。对于唤醒度，条件的主效应不显著，$F(1, 23) = 0.055, p = 0.817, \eta^2 = 0.004$，



图3：参与者体验虚拟现实场景时的实验设置示例。

表明VR场景与 360° 视频之间没有差异。对于支配感，主效应显著，$F(1, 23) = 9.015$, $p < 0.01$ $\eta^2 = 0.368$，VR场景的评分高于 360° 视频。总体而言，VR场景诱发了更高的效价和支配感，但唤醒度与 360° 视频版本相似，与先前研究结果一致。我们的结果表明，我们的被大象包围 VR场景能够诱发高效价、高唤醒情绪。表4 在A.3节 呈现了结果，表明VR场景诱发的情绪反应与 360° 视频相当，表明其在高唤醒、高效价情绪诱发方面的有效性。

5 研究2：理解交互对情绪诱发的效果

随后，我们开展了一项混合设计用户研究，以探究在虚拟现实中诱发情绪时情感交互的作用（研究问题2和研究问题3）。情感交互设计（交互式与非交互式）作为被试间因素，六个虚拟现实场景作为被试内因素。我们采用平衡拉丁方，以在参与者之间平衡场景顺序。全程收集了生理与自我报告测量数据，以考察交互元素如何影响情绪反应，以及这些反应如何体现在生理信号中。本用户研究已获得我校伦理批准。

5.1 实验设备

我们在所有虚拟现实场景中使用了Meta Quest Pro VR头显和两个Meta Quest Touch Pro控制器。本研究在大学实验室空间中进行，其中有一块无遮挡的房间规模追踪区域，面积超过 3 × 3 米，以支持全身交互。所有场景均在Unity中渲染，并通过Quest Link线缆连接在台式电脑（Intel Core Ultra 9 285K、32GB DDR5内存、Nvidia RTX 4080 SUPER）上运行。实验设置见图3。

5.2 测量

研究期间，我们使用SAM问卷评估参与者的情绪状态。此外，我们还在研究期间使用Empatica EmbracePlus 腕带收集他们的生理数据。我们记录了皮肤电活动（EDA）和血容量脉搏

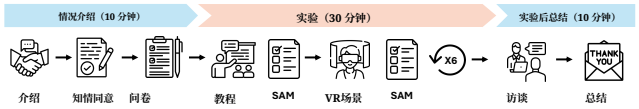


图4：研究流程：部分研究环节在虚拟现实环境之外进行（蓝色），而主要研究环节则在虚拟现实环境中进行，以避免打断参与者的沉浸感（橙色）。

（BVP）信号，并通过Empatica Care Lab 移动应用程序进行采集。皮肤电活动的采样频率为4 Hz，血容量脉搏为64 Hz。此外，我们还进行了半结构化访谈，请参与者指出他们认为情绪影响最大和最小的场景，并说明选择这些场景的原因。

5.3 参与者

我们招募了84名参与者（42名女性、42名男性），年龄在19至35岁之间（均值 = 24.05，标准差 = 3.03）。所有参与者均在研究开始前提供了知情同意，并因参与研究而获得一张礼品卡（$\approx 15 USD$）。为进行数据管理，我们为每位参与者分配了唯一的匿名标识符。参与者的VR使用经验各不相同，其中14人报告每日使用，21人每周使用，25人每月使用，24人从未使用。 表3 在A.3节 中列出了用户研究的人口统计信息。

5.4 研究流程

研究流程如 图4所示。参与者抵达我们的实验室后，我们首先通过问卷筛查其是否存在与VR使用相关的潜在健康风险，包括癫痫、行动障碍、严重视力障碍，以及焦虑障碍或创伤后应激障碍等不良情绪反应史。随后，我们向符合条件的参与者介绍研究目的。确认他们理解研究内容后，参与者提供书面知情同意，并填写一份收集人口统计信息的问卷，包括性别、年龄和先前VR经验。接着，我们为参与者佩戴EmbracePlus腕带，以记录生理数据。参与者在整个研究期间（每位约50至60分钟）均佩戴该腕带。之后，我们请参与者完成一项教程，介绍VR系统，并确保他们熟悉头戴式设备和控制方式，包括用于导航的瞬移，以及与指定虚拟物体进行交互。

教程场景分为两个版本，以帮助参与者熟悉 VR系统。两个版本都设置在开阔、无遮挡的虚拟空间中，参与者面前有一个文本面板，用于说明研究流程和操作方式。在非交互版本中，参与者练习瞬移，移动到出口点，然后完成 SAM问卷 [12]。在交互版本中，参与者面前放置了两个蓝色立方体，参与者练习拿起并投掷它们，然后瞬移到出口点完成 SAM问卷。在此场景中，我们还使用 SAM问卷收集了参与者情绪状态的基线测量。

熟悉设备设置后，参与者按照平衡顺序，采用拉丁方设计依次体验全部六个虚拟现实场景

。每个场景至少持续 30 秒，之后会出现一个出口点。不过，参与者可以选择继续留在场景中进行探索，也可以传送到出口点离开场景。离开后，他们会被传送回该场景的初始位置，以完成 SAM 问卷。随后，他们退出场景并返回实验室的混合现实环境，休息 60 秒，以减少可能的情绪延续效应。

完成所有场景后，参与者退出虚拟现实应用，并参加了半结构化访谈。此最后阶段旨在收集参与者对各个场景的情绪反应和整体体验的定性见解。

6 评估结果

为了了解对象级交互如何塑造虚拟现实中的情绪体验，本节将详细介绍研究结果，并对场景中的交互进行全面评估。具体而言，我们首先比较了交互版本与非交互版本的自我评估人偶结果，以考察情绪诱发方面的差异。为了揭示这些评分背后的行为和情境机制，并更全面地了解情绪诱发过程，我们进一步分析了参与者与虚拟环境的交互，包括参与每个场景的时间 、虚拟位置 和朝向，以及通过主题建模提取的情绪相关描述。此外，我们还分析了血容量脉搏和皮肤电活动等生理数据，以补充对情绪反应的评估。

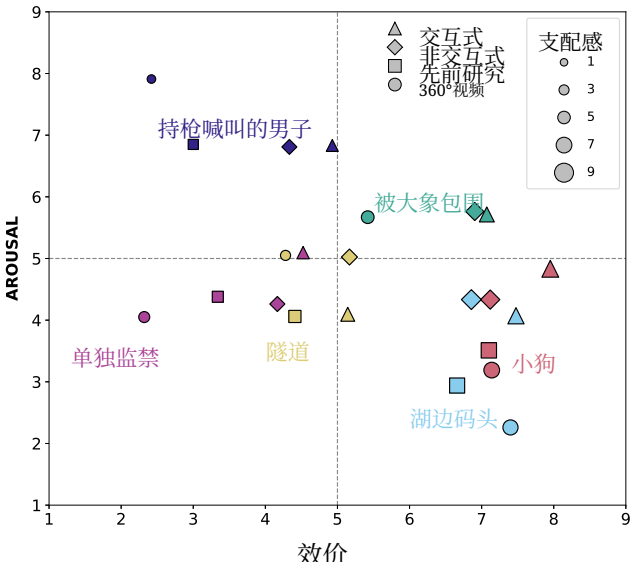


图5：效价—唤醒度空间中所有情绪反应的示意图。x轴表示效价，y轴表示唤醒度，标记大小表示支配感。交互式和非交互式结果来自本研究，先前研究结果来自Jiang等人，[34]，和360°结果来自既有数据集[47, 82]。先前研究中未包含被大象包围场景。

6.1 情绪诱发测量

我们分析了588项SAM测量（每组42名参与者× 2 情感交互设计 × 场景（6个场景，并以教程作为基线））。情感交互设计是指虚拟现实场景的交互式版本和非交互版本。由于数据偏离正态（夏皮罗–威尔克检验，$p < .05$），且本研究采用跨场景重复测量的混合设计，我们使用线性混合效果模型分析SAM评分，重点关注组间效果。该模型将情感交互设计与场景及其交互指定为固定效果，纳入性别、年龄和XR经验作为控制变量，并为参与者添加随机截距，以

解释被试内依赖。固定效应估计值汇总于表2。

效价—唤醒度空间中的情绪反应如图5、图6和图7所示。结果表明，情绪反应会因是否存在交互元素而有所不同。例如，在小狗场景中，交互版本引发的效价、唤醒度和支配度评分均高于非交互版本。在持枪喊叫的男子场景中，交互使效价和支配感提高，而两个版本中的唤醒度都保持在相近的高水平。

6.1.1 交互的效果。 如表2所示，在所有场景中，交互的主效应均不显著：效价（估计值 = -0.01，标准误 = 0.36，95%置信区间 = [-0.70，0.71]），唤醒度（估计值 = 0.06，标准误 = 0.47，95%置信区间 = [-0.87，0.98]），以及支配感（估计值 = -0.29，标准误 = 0.44，95%置信区间 = [-1.15，0.57]）。相比之下，场景的效果稳健，诱发了目标情绪，

例如，在持枪喊叫的男子中效价降低、唤醒度升高，或在单独监禁中效价和支配感降低。

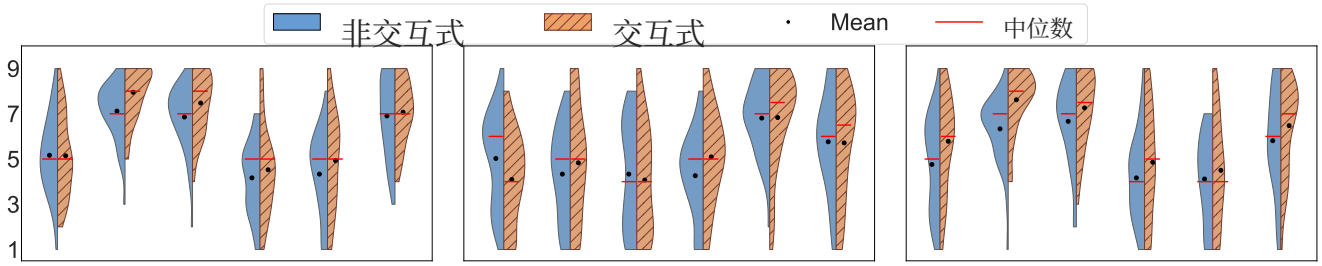
情感交互设计与场景之间的交互作用揭示了情感交互如何影响特定情境下的体验。在小狗场景中，效价有所提高（估计值 = 0.88，标准误 = 0.42，95%置信区间 = [0.05，1.71]）；当参与者可以抚摸小狗并和它们玩球时，他们给出的评分更高。在隧道场景中，当参与者可以使用手电筒时，唤醒度有所降低（估计值 = -1.14，标准误 = 0.55，95%置信区间 = [-2.23，-0.06]）。在小狗场景（估计值 = 1.74，标准误 = 0.51，95%置信区间 = [0 73, 2 74] = 1 48, = 0 51, 95 = [0 . .）、隧道场景（估计值 . 标准误 . % CI .2 48] = 1 14, = 0 51, 95 . ）、单独监禁场景（估计值 . 标准误 . % CI = [0 14, 2 15] = 1 05, = 0 51, 95 . .）、湖边码头场景（估计值 . 标准误 . % CI = [0 04, 2 05] = 1 12, . .）和被大象包围场景（估计值 . 标准误 0 51, 95 = [0 11, 2 12] = 8 . % CI . .）中，支配感均有所提高。图中展示了这些差异，表明交互并未一致地改变参与者的反应，而是产生了场景依赖效应；这种效应最明显地体现在支配感测量上，即用户在情绪体验过程中对情境感受到的控制感。协变量分析还显示，男性参与者报告的唤醒度低于女性参与者（估计值 = = 0 29, 95 = [1 43, 0 27] -0.85，标准误 . % CI - . - . ）。

图5 显示了特定场景的差异。交互通常在小狗、被大象包围、湖边码头 场景中带来更高的效价和支配感。在这些场景中，参与者的参与度更高，包括抚摸小狗并与它们接飞盘、喂食大象，以及投掷石头或纸飞机。在持枪喊叫的男子 和单独监禁中，差异很小或没有差异。

表2：效价、唤醒度和支配感的线性混合效应模型固定效应估计值。每个结果变量均建模为 结果变量 ~ 情感交互设计 * 场景 + 性别 + 年龄 + XR经验 + (1|参与者)，其中情感交互设计 指交互式与非交互式，场景 包含一个教程（基线）和六个VR场景。数值以估计值（标准误）及95%置信区间的形式报告。

参数	效价			唤醒度			支配感		
	估计值			估计值			估计值		
	M	SE	95%置信区间	M	SE	95%置信区间	M	SE	95%置信区间
截距	***6.37	0.92	[4.54, 8.20]	***5.80	1.21	[3.39, 8.20]	***7.58	1.13	[5.33, 9.83]
交互式	-0.01	0.36	[-0.71, 0.70]	0.06	0.47	[-0.87, 0.98]	-0.29	0.44	[-1.15, 0.57]
性别（男性）	0.26	0.22	[-0.18, 0.70]	**-0.85	0.29	[-1.43, -0.27]	0.46	0.27	[-0.09, 1.00]
Age	0.02	0.04	[-0.05, 0.09]	-0.04	0.05	[-0.13, 0.06]	-0.02	0.05	[-0.11, 0.07]
VR体验	-0.07	0.11	[-0.28, 0.14]	0.26	0.14	[-0.02, 0.53]	-0.24	0.13	[-0.50, 0.01]
隧道	***-1.76	0.3	[-2.35, -1.17]	0.26	0.39	[-0.51, 1.03]	***-2.21	0.36	[-2.93, -1.50]
小狗	0.19	0.3	[-0.40, 0.78]	-0.43	0.39	[-1.20, 0.34]	-0.64	0.36	[-1.35, 0.07]
湖边码头	-0.07	0.3	[-0.66, 0.52]	-0.43	0.39	[-1.20, 0.34]	-0.31	0.36	[-1.02, 0.40]
单独监禁	***-2.76	0.3	[-3.35, -2.17]	-0.50	0.39	[-1.27, 0.27]	***-2.81	0.36	[-3.52, -2.10]
持枪喊叫的男子	***-2.60	0.3	[-3.18, -2.01]	***2.05	0.39	[1.28, 2.81]	***-2.86	0.36	[-3.57, -2.15]
被大象包围	-0.02	0.3	[-0.61, 0.56]	*1.00	0.39	[0.23, 1.77]	**-1.17	0.36	[-1.88, -0.46]
交互式 ×隧道	0.02	0.42	[-0.81, 0.86]	*-1.14	0.55	[-2.23, -0.06]	**1.48	0.51	[0.47, 2.48]
交互式 ×小狗	*0.88	0.42	[0.05, 1.71]	0.29	0.55	[-0.80, 1.37]	***1.74	0.51	[0.73, 2.74]
交互式 ×湖边码头	0.67	0.42	[-0.17, 1.50]	-0.48	0.55	[-1.56, 0.61]	*1.05	0.51	[0.04, 2.05]
交互式 ×单独监禁	0.40	0.42	[-0.43, 1.24]	0.62	0.55	[-0.47, 1.70]	*1.14	0.51	[0.14, 2.15]
交互式 × 持枪喊叫的男子	0.64	0.42	[-0.19, 1.47]	-0.19	0.55	[-1.28, 0.89]	0.83	0.51	[-0.17, 1.84]
交互式 ×被大象包围	0.21	0.42	[-0.62, 1.05]	-0.26	0.55	[-1.35, 0.82]	*1.12	0.51	[0.11, 2.12]

注释。 星号表示显著性：$^{*}p < .05$, $^{**}p < .01$, $^{***}p < .001$。



(a) 效价 (b) 唤醒度 (c) 支配感

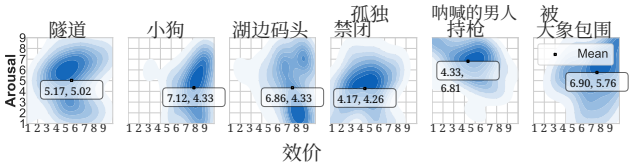
图6：体验每个场景后，SAM问卷中效价、唤醒度和支配感的结果。

就唤醒度而言，交互的效果并不一致，在隧道中数值较低，但在其他场景中变化很小或没有变化。

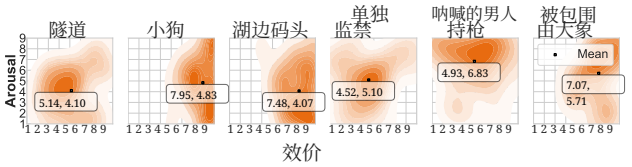
综合来看，这些模式表明，情感交互设计在不同情境下始终能够提升支配感，使参与者感到自己更能掌控情绪体验，而不是被动地接受体验。相比之下，它对效价和唤醒度的影响因场景而异，这表明交互并非简单地统一增强情绪，而是以依赖情境的方式塑造用户体验。

6.2 虚拟现实场景中的参与时长

基于自我评估人偶结果，我们评估用户参与时长，以了解交互如何影响情绪诱发过程。我们比较了参与者在交互与非交互条件下停留在各个场景中的时间（详情见 图 9 ）。参与时长（秒，误差： ±0.1 s）从参与者进入场景时开始计时，直至其离开场景。按照 Jiang等人 [34]的方法，我们将最短参与时间设为 30 秒，以确保参与者在各场景中的体验时长一致



(a) 非交互式虚拟现实场景



(b) 交互式虚拟现实场景

图7：效价和唤醒度数值的核密度估计图。

参与者才能离开。夏皮罗–威尔克检验表明，参与时长分布偏离正态分布（$p < 0.05$）。因此，我们采用以参与者为随机截距的线性混合效应模型，对两种条件下的场景进行比较，发现平均参与时长存在显著差异。

线性混合效应模型显示，交互具有显著的主效应（$p < 0.001$），参与者在交互场景中的停留时间长于非交互场景。这种效果在小狗 场景中最为明显（交互式： $M = 133.58 \pm 89.92$ s， $Med = 113.87$ s；非交互式： $M = 49.73 \pm 21.46$ s， $Med = 42.92$ s），启用交互后，参与者的平均停留时间超过原来的两倍。在湖边码头 （$M = 73.39$ s 对比 41.10 s）、被大象包围 （$M = 89.77$ s 对比 52.66 s）和单独监禁 （$M = 75.05$ s 对比 39.93 s）场景中也发现了显著差异，这表明与非交互场景相比，交互延长了参与时间。

总体而言，这些结果表明，交互显著延长了用户接触刺激的时间，说明采取行动的机会会鼓励参与者维持其参与度，而不是提前退出。这表明，情感交互设计为参与者提供了更多机会，使其能够在虚拟环境中充分体验预期的情感语境。

6.3 对虚拟环境的参与度

为探究交互如何影响参与者的空间参与，以及这些行为模式如何与情绪反应相关，我们比较了参与者在交互与非交互条件下的虚拟位置和朝向，以分析他们在虚拟环境中的参与情况。对于每个场景，我们确定了参与者停留时间最长的区域。分析聚焦于 XZ 平面，该平面表示虚拟空间中位置的俯视图（在 Unity 中，Y 维度对应高度）。图10 展示了各场景中每种条件下采样的位置数据。通过结合主题建模结果考察这些空间参与模式，我们发现两种条件之间存在以下差异：

隧道。 在非交互条件下，参与者大多停留在走廊入口附近。启用交互后，参与者拿起手电筒后会深入隧道，并探索侧门，因此其空间分布范围更为狭长。这些行为与交互条件下较高的支配感评分和较低的唤醒度评分相关。

小狗. 非交互条件下的参与者主要聚集在入口附近观察小狗。在交互条件下，他们在房间内的移动范围更广，通过抚摸小狗或用网球玩接飞盘来与环境互动。这种更广泛的探索与更高的效价、唤醒度和支配度评分相对应。

湖边码头. 交互条件下的移动延伸至栈桥末端，即石头和纸飞机所在之处，并在那里形成聚集。与非交互条件下有限的探索相比，这些行为与更高的效价和支配感以及降低的唤醒度相关。

单独监禁。 在两种条件下，由于场景本身的性质，参与者的移动都受到严格限制，并密集聚集在生成点附近。在交互条件下，参与者略微朝桌子和门的方向移动，以与书、杯子交互或敲门，因此空间分布范围略有扩大。这些行为伴随着更高的支配感和唤醒度，而效价仍然较低。

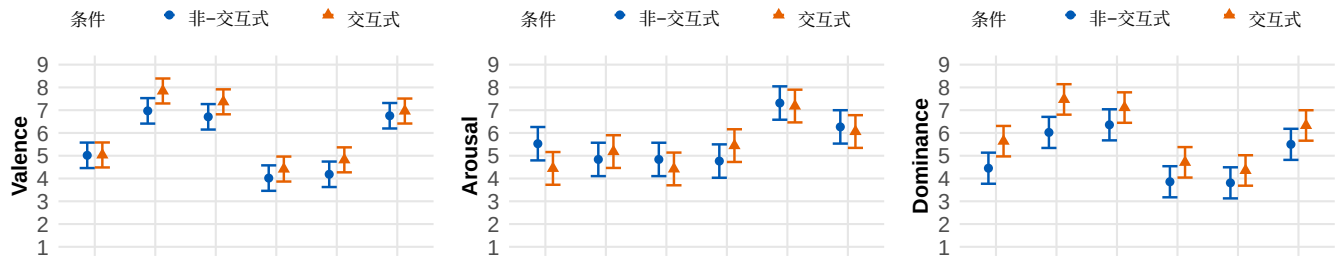
持枪喊叫的男子。 在非交互条件下，参与者通常会朝房间后方的窗户移动。相比之下，交互条件下，参与者更频繁地靠近左侧墙边的防暴盾牌以及持枪男子本人。这表明参与者采取了更积极的应对行为，对应着更高的支配感；而两种条件下的效价都较低，唤醒度都较高。

被大象包围。 在非交互条件下，参与者分散到象群外围，形成了更广的空间分布范围。在交互条件下，参与者的移动集中在象群活动范围内，主要进行喂香蕉或触摸大象等行为。这些交互带来了更高的效价、更低的唤醒度和更强的支配感，反映出更积极且更受控的情绪体验。

总体而言，空间参与度分析表明，交互元素促使参与者离开生成点，并与环境中的显著特征进行互动。这种探索的增加最一致地与更高的支配感相关，而效价和唤醒度的变化则因各场景的情绪特征而异。综合来看，这些空间模式表明，交互元素发挥着注意力锚点的作用，有效引导用户的身体移动和注意力，使其聚焦于场景中的关键情绪特征。

6.4 生理测量指标

除上述测量指标外，我们还分析了使用 EmbracePlus 腕带记录的生理反应，并使用 NeuroKit2 [60]处理信号。根据原始 BVP 数据，我们计算了心率变异性 (HRV) 和心率 (HR)。根据原始 EDA 数据，我们提取了相位成分（皮肤



(a) 效价 (b) 唤醒度 (c) 支配感

图8：混合效应模型预测的交互效果：(a) 效价、(b) 唤醒度和 (c) 支配感在交互与非交互条件下的变化。每个点表示特定场景的估计边际均值，误差线表示 95%置信区间。

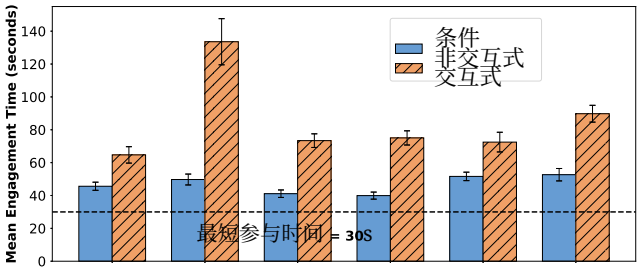


图9：交互与非交互条件下各场景的平均参与时长。

电导反应、皮肤电反应、皮肤电反应频率和平均皮肤电反应幅度，作为唤醒度的指标 [3, 11]。

根据血容量脉搏，我们检测了收缩峰，并据此计算心搏间期 (IBI)，作为计算心率变异性和心率的基础 [65]。按照一般的心率变异性分析流程 [65, 80],，我们对心搏间期数据进行插值，并以 4 Hz 的频率重新采样，使信号在统一的时间间隔上对齐，同时通过去趋势处理去除长期趋势。随后，我们对去趋势处理后的心搏间期数据应用窗长为 64 的滑动窗短时傅里叶变换 (STFT)，得到心率变异性功率谱。在每个窗内，我们计算心率变异性的高频分量（HF：0.15–0.40 Hz），并进行自然对数变换以使分布正态化。我们还计算了每个片段内的平均心率。较高的高频心率变异性通常被解释为较强的副交感神经激活，表明生理唤醒度较低 [2]。同样，较低的心率也表明唤醒度较低 [2]。

我们对从血容量脉搏波信号中提取的测量值应用了线性混合效应模型，结果显示交互具有显著效果。估计值见表5 的A.3节，以及图 11 和 12. 交互条件下的高频心率变异性显著更高（估计值 = 0.69，标准误 = 0.17，95%置信区间 [0.36，1.02]），而平均心率显著更低（估计值 = -9.25，标准误 = 2.82，95%置信区间 [-14.80，-3.70]）。场景对比进一步显示，小狗（估计值 = 0.31，标准误 = 0.12，95%置信区间 [0.06，0.55]）、单独监禁（估计值 = 0.44，标准误 = 0.13，95%置信区间 [0.19，0.69]）以及持枪喊叫的男子（估计值 = 0.30，标准误 = 0.13，95%置信区间 [0.05，0.55]）场景中的高频心率变异性有所增加。值得注意的是，在持枪喊叫的男子场景中，与交互相关的高频心率变异性增幅显著减弱（估计值 = 0 49, = 0 18, - . 标准误 . % 95 CI - . - . [0 84, 0 14]），这表明在强烈负面的情境中，交互的调节益处可能有限。这一模式与这些场景的SAM评分一致。

我们分析了皮肤电导反应（SCR）的相位成分。按照既定的皮肤电活动（EDA）分析实验流程， [11], 我们对原始信号进行了滤波和反卷积，以分离相位活动与紧张性基线。对于每个片段，我们量化了两个特征：皮肤电反应次数（SCR Count），即反应总次数；以及平均皮肤电反应幅度，即反应幅度的平均值。通常认为，较高的皮肤电反应次数和幅度代表更强的交感神经激活，反映出更高的生理唤醒 [11]。

SCR次数和SCR幅度的线性混合效应模型结果见表6中的A.3节和图13和14。虽然交互的主效应或场景级交互均未达到统计显著性，但仍呈现出一致的方向性趋势，表明交互条件下交感神经激活增强。具体而言，在大多数场景中，SCR次数均略有增加，其中差异最大的是隧道、小狗、单独监禁和被大象包围。SCR幅度也呈现类似趋势：启用场景交互时，反应更强烈，其中以湖边码头和被大象包围最为明显。这些观察结果表明，交互会引发更频繁、更强烈的交感神经反应。

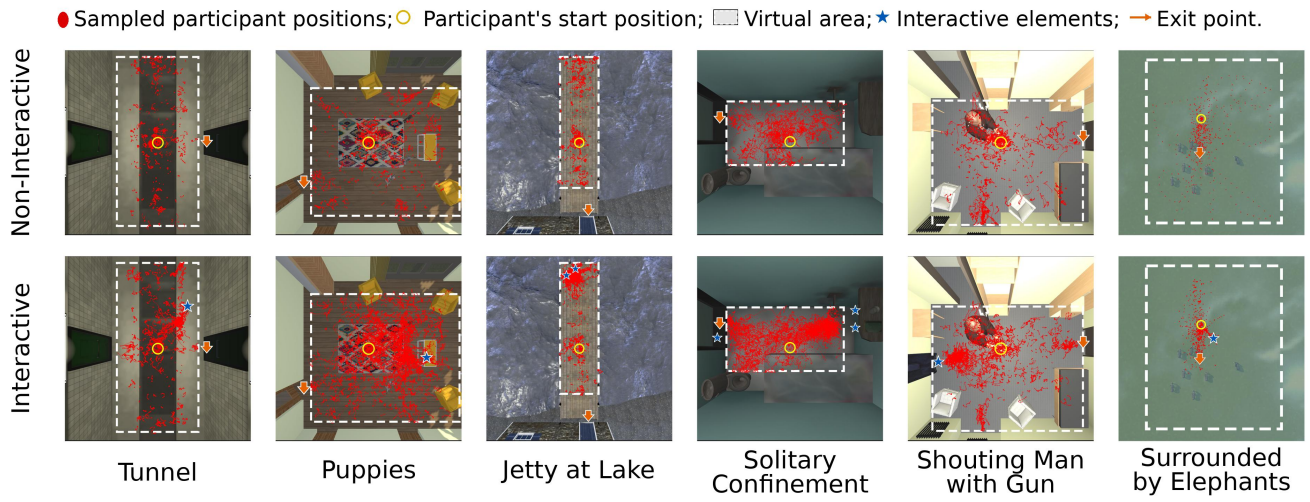


图10：非交互式和交互式条件下六个虚拟现实场景中的空间参与模式。每0.1秒采样一次位置（采样频率 = 10 Hz）。

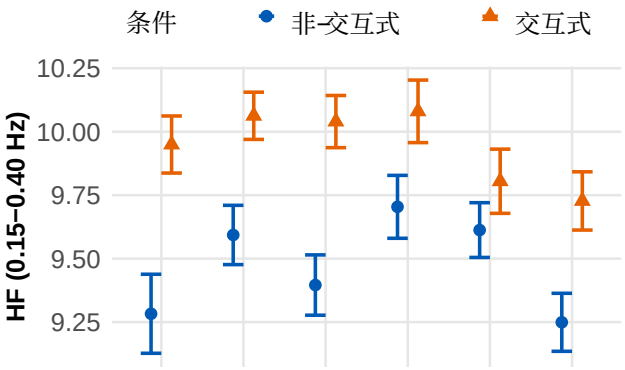


图11：高频心率变异性（HF）的固定效应估计值。

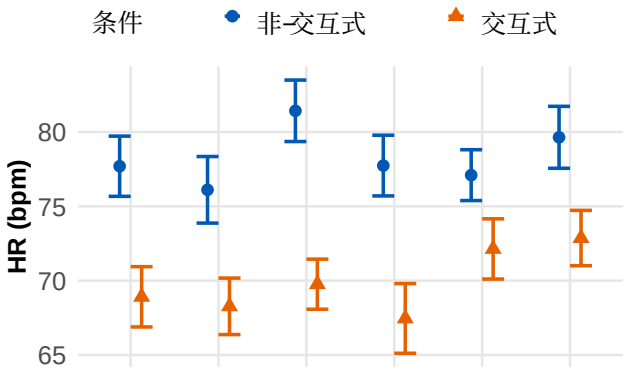


图12：心率（HR）的固定效应估计值。

总之，生理结果显示，与非交互场景相比，交互使高频心率变异性显著升高、心率显著降低，同时也呈现出SCR更频繁、反应更强烈的一致趋势。这表明，交互会形成一种复合生理状态，其特征是整体放松，间或出现高度反应时刻。

6.5 主题建模

我们进一步通过半结构化访谈中收集的参与者定性描述，考察了情绪诱发过程。由于情绪本质上具有主观性，该分析通过捕捉参与者自身如何表述其情感状态，补充了我们的定量结果。具体而言，我们关注这些叙述在交互场景与非交互场景之间有何不同，从而为交互在塑造情绪体验中的作用提供更丰富的顿悟。

分析访谈数据时，我们采用了主题模型 [34, 59]。首先对访谈文本进行预处理，保留名词

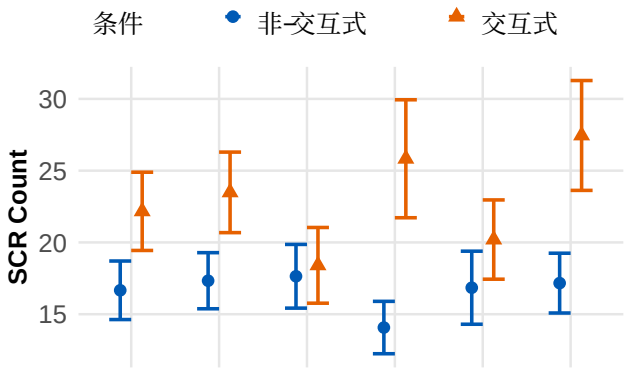


图13：皮肤电反应次数的固定效应估计值。

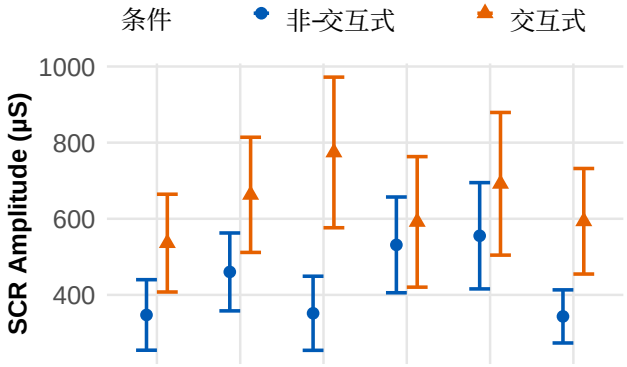


图14：皮肤电反应幅度的固定效应估计值。

和与情绪特质相关的形容词，同时删除停用词和信息量较低的词语（例如“感觉”“场景”“一点”）。我们对所有文本进行词形还原，以统一不同的词形变化（例如将复数形式转换为单数形式）。随后，我们使用潜在狄利克雷分配（LDA）[10]为每个场景提取三个潜在主题，每个主题由一组共同出现的词语表示，反映参与者叙事中的常见主题 [59]。为便于解读，我们人工考察了每个主题中最具代表性的五个词，并通过词云将整体词语分布可视化，以展示交互元素如何塑造不同场景中的情绪表达。

6.5.1 主题：隧道。 隧道场景将参与者置于一条光线昏暗、呈淡黄色、偶尔有行人的长廊中。在非交互条件下，它引发了中等效价（$M = 5.17 \pm 1.71$, $Med = 5.00$）、中等唤醒度（$M = 5.02 \pm 2.05$，中位数 6 00 $M = 4\ 76 \pm 2\ 08$, = 5 00 .），以及中性支配感（. . 中位数 . ）。通过参与者的描述，如图15所示，我们观察到混合情绪，被描述为“压抑”（N = 3）、“诡异”（N 2 = 2 = 2 = 2 ）、“可怕”（N）、“奇怪”（N）以及“令人恐惧”（N）。潜在狄利克雷分配进一步突出了恐惧、压迫以及路人令人不安的临场感等主题。这些模式通常与隧道的封闭结构相关，正如一位参与者所述：“有一种诡异的感觉，而且环境昏暗，这让我感到有点害怕。”（P67）。其他人则强调了行人带来的不安效果，例如：“路人让我感到有点害怕。”（*P55*）以及“感觉令人恐惧，那些人似乎很奇怪。”（P65）。

在交互版本中，参与者拿到手电筒后，场景引发了中等效价（$M = 5.14 \pm 1.79$，中位数 = 5.00）、较低的唤醒度（$M = 4.10 \pm 2.06$，中位数 = 4.00）和较高的支配感（$M = 5.79 \pm 2.19$，中位数 = 6.00）。主题建模发现了一些显著词语，例如“人”（N = 6）、“手电筒”（N = 4）、“害怕”（N = 4）和“诡异”（N = 2）。主题建模（潜在狄利克雷分配）表明，尽管诡异感依然存在，参与者仍将手电筒视为能动性和安心感的来源，从而减少了对他人行为的不确定感。例如，一位参与者表示：“狭窄的空间和昏暗的色彩让我担心人们的行为。我想离开。用手电筒看清楚后，我发现人们只是在正常行走，而且他们穿着休闲服，这减轻了压迫感。”（P9）。另一位参与者解释道：“环境很暗，用手电筒照亮脸部后，感觉就没那么可怕了。”（P17）。

总体而言，隧道场景通过狭窄的结构和行人的移动引发了不安。在非交互条件下，参与者强调了恐惧、陌生感和缺乏控制感。在交互条件下，参与者则表示，手电筒赋予了他们能动性，通过降低唤醒度、增强支配感，使体验不再那么令人感到威胁。

6.5.2 主题：小狗。 该小狗场景在非交互条件下引发了高效价（$M = 7\ 12 \pm 1\ 25$, = 7 00 $M = 4\ 33$ . . 中位数 . ）、± 2 02, = 5 00 $M = 6\ 33 \pm 1\ 48$, 低唤醒度（. . 中位数 . ）和高支配感（. . 中位数 = 7 00 15, . ）。如图所示，参与者经常将这段体验描述为放松且令人愉悦，并常使用“puppy”（N = 8）、“温暖”（N = 4）、“房间”（N = 3）和“愉快”（N = 3）等词语。潜在狄利克雷分配显示，这些回答围绕熟悉感、舒适和平静等主题聚集；小狗和室内环境增强了安全感和温暖感：“小狗让我感到愉快，室内环境也让我觉得很熟悉，就像日常生活中的环境一样”（P67）。

启用交互后，参与者可以抚摸狗并与它们玩耍，从而增强了情感投入。在这种条件下，场景的效价评分更高（$M = 7\ 95 \pm 1\ 17$, = 8 00 $M = 4\ 83 \pm 2\ 62$, . . 中位数 . ），唤醒度略高（. . 中位数 = 5.00），支配感也更强（$M = 7.62 \pm 1.43$，中位数 = 8.00）。主题建模突显了“幼犬”（N = 16）、“球”（N = 12 = 8 = 8 = 6 ）、“狗”（N ）、“愉快”（N ）和“可爱”（N ）等词语。潜在狄利克雷分配显示出喜悦、趣味性和舒适感等主题，突显了与小狗主动互动如何同时带来兴奋与温暖。

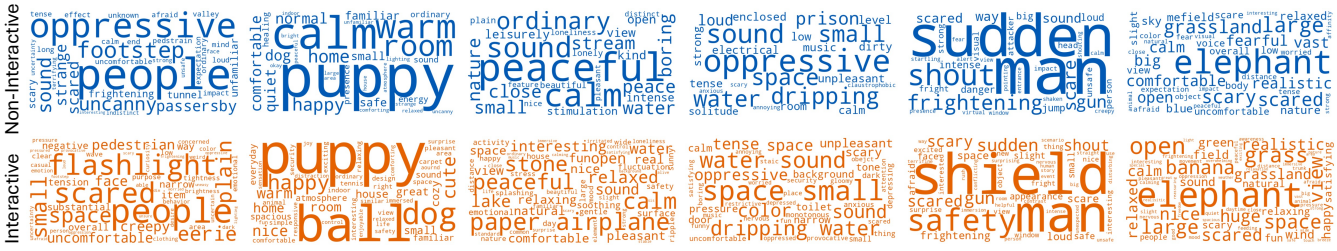


图15：词语　　参与者对六个虚拟现实场景的描述词云（上：非交互式，下：交互式）　　).

参与者强调了沉浸式参与带来的愉悦："我很喜欢我把球扔出去后，狗狗会把它叼回来。"（P7）。其他人则着重提到了温暖与舒适："用球逗狗玩很有趣。小狗很可爱，触觉感受也很舒服。"（P35）。对与小狗主动互动的重视，也与第6.2节中的观察结果一致：参与者在交互场景中停留的时间更长，这表明与小狗直接互动既延长了参与者在场景中的参与时间，也增强了情感反应。

尽管两种条件都引发了强烈的积极情绪，交互版本通过增添趣味性和触觉参与，强化了这些反应，从而带来更强的沉浸感、喜悦和控制感。

6.5.3 主题：湖边码头。湖边码头场景在非交互条件下引发了高效价（$M = 6.86 \pm 1.42$，中位数 $= 7.00$）、低唤醒度（$M = 4\,33 \pm 2\,41$，$= 4\,00$；$M = 6\,67 \pm . .$ 中位数 . ）$1\,88$，$= 7\,00$）和高支配感（. . 中位数 . ）的情绪。参与者经常将该场景与平静和宁静联系起来，使用了"宁静"（N = 6）、"平静"（N = 4）和"声音"（N 3）等词语。潜在狄利克雷分配证实了这些印象，凸显了平静、恢复性自然和安静等主题，偶尔也提及孤独或平凡。几位参与者指出，自然环境具有恢复作用："这里让人感到宁静，也贴近自然。"（P55）；"水声让我感到越来越平静。"（P52）。

在交互版本中，参与者可以向湖中投掷纸飞机和石头，从而改变体验的性质。在此条件下，效价提高了（$M = 7\,48 \pm . .$ 中位数 .），$1\,35$，$= 8\,00$；唤醒度略微降低（. . 中位数 $M = 4\,07 \pm 2\,42$，$= 4\,00$；$M = 7\,26 \pm 1\,65$，$= 7\,50$.），支配感评分则更高（. . 中位数 .）。正如我们在图15中观察到的，参与者经常提到"纸飞机"（N = 9）、"石头"（N = 7）、"平和"（N = 7）、"平静"（N = 8）和"放松"（N = 4）。潜在狄利克雷分配结果表明，尽管平和与自然的主题仍处于核心地位，但交互元素的加入带来了乐趣、放松和控制感。参与者形容这些元素令人愉悦且令人舒缓："感觉开阔、舒适又有趣。纸飞机和投掷石块让我感到平静"（P6）；"纸飞机和石头帮助我释放压力，投掷石头产生的涟漪让人感到平和"（P9）。

在各个条件下，参与者始终将湖边码头 与放松联系起来。交互式功能通过将自然景色与简单动作相结合，加深了这一效果，使体验既宁静又引人入胜。纸飞机的加入以及石头因此强化了该场景的平静特质，同时增强了参与者的参与感与控制感。

6.5.4 主题：单独监禁。单独监禁场景在非交互条件下引发了低效价（$M = 3.74 \pm 1.89$，中位数 $= 4.00$）、中等唤醒度（$M = 5\,17 \pm 2\,12$，$= 5\,00$；$M = 3\,69 . .$ 中位数 . ）$\pm 1\,98$，$= 3\,50$）和低支配感（. . 中位数 . ）的情绪。参与者经常提到"压抑"（N = 6）、"声音"（N = 4）、"空间"（N = 3）、"狭小"（N = 3）和"滴水声"（N = 3）。潜在狄利克雷分配揭示了有关狭小空间、扰人的声音和监狱场景的主题。参与者常将空间描述为狭窄且令人不适："感觉很压抑，房间也很小。"（P53）。其他人则指出，音频设计尤其令人不安："滴水声很大，令人烦躁，让我感到焦虑。"（P79）。

在交互条件下，参与者可以与杯子、书和门进行交互。该场景引发的效价略高（$M = 4\,52 \pm 2\,02$，$= 5\,00$；$M = 5\,10 . .$ 中位数 . ）$\pm 2\,09$，$= 5\,00$），唤醒度相近（. . 中位数 . ），支配感则更高（. . 中位数 = 5. 00）。经常被提及的词语包括"空间"（N = 13）、"狭小"（N = 11）、"声音"（N = 10）、"滴水声"（N = 5）和"压抑"（N = 3）。潜在狄利克雷分配分析表明，尽管参与者仍将空间描述为局促且令人不快，但与环境交互的可能性带来了一种宽慰感或趣味性。例如，一位参与者指出："感觉很受限制，空间非常狭小，滴水声让我感到紧张和担忧。"（P36）。其他参与者则强调了交互中有趣的一面："把东西扔向门并听到声音，感觉既挑衅又令人满足。"（P7）。

总体而言，尽管两种条件都突出了空间压抑的特质和令人不安的声景，但交互版本让参与者得以宣泄情绪并获得一定的控制感，使体验不那么消极。

6.5.5 主题：呐喊的男人与枪。非交互条件下的呐喊的男人与枪场景旨在诱发低效价（$M = 4\,33 \pm 1\,86$，$= 5\,00$；$M = 6\,81 \pm . .$ Med . ）、高唤醒度（. . Med . ）和低支配感（. . Med . ）的情绪。最常被提及的词包括"男人"（N = 14）、"突然"（N = 14）、"喊叫"（N = 13）、"令人恐惧"（N = 6）和"枪"（N 4）。潜在狄利克雷分配突出了突然出现、喊叫和危险等主题，强化了恐惧与惊讶的感受。参与者将该场景描述为令人惊吓且恐怖："那个男人和他的 $1\,61$，$= 7\,00$；$M = 4\,12 \pm 1\,98$，$= 4\,00$

突然的喊叫令人恐惧”(P63)；“窗外的景色很平静，但那个男人突然出现，令人恐惧”(P72)。

在交互条件下，参与者的效价评分更高（$M = 4.93$ ± 2.15，中位数 = 5.00），唤醒度评分相同（$M = 6.83$ ± 2.14，中位数 = 7.50），支配感评分更高（$M = 4.50$ ± 2.44，中位数 = 4.00）。参与者经常提到“盾牌”（N = 15）、“男性”（N = 13）、“安全感”（N = 8）、“突然”（N = 5）和“枪”（N = 4）。潜在狄利克雷分配（LDA）表明，尽管男性突然出现并大喊大叫仍会引发恐惧，但盾牌被视为一种保护，减轻了无助感。一位参与者解释道：“在封闭空间里，那个男性大喊大叫，他的表情以及他用枪指着我的样子让我感到害怕。相比之下，盾牌让我感到安全和沉浸”（P12）。另一位参与者描述道：“突发事件出乎意料，非常吓人，但盾牌让我稍微有了一些安全感”（P33）。

总之，持枪喊叫的男子 场景引发了高度唤醒、负效价的体验，主要情绪是恐惧和惊讶。尽管两种条件产生的反应相似，交互式盾牌仍带来了一定的安全感，恢复了部分能动性。

6.5.6 主题：被大象包围。在非交互式条件下，被大象包围场景的效价评分较高（$M = 6.90$ ± 1.76，中位数 = 7.00），唤醒度较高（$M = 5.76$ ± 2.21，中位数 = 6.00），支配感居中（$M = 5.81$ ± 2.30，中位数 = 6.00）。参与者经常提到“大象”（N = 15）、“害怕”（N = 6）、“大”（N = 4）、“草原”（N = 3）和“舒适”（N = 2）。潜在狄利克雷分配识别出开阔感、真实感和恐惧等主题。一位参与者强调了广阔的自然环境：“整个场景视野开阔，符合我的预期。”(P51)。其他参与者则描述了复杂的感受：“感觉很真实，而且那头大象似乎要攻击我。我感到害怕、恐惧和紧张。”(P57)。

有交互时，评分仍然高度积极，效价更高（$M = 7.07$ ± 1.44，中位数 = 7.00），唤醒度略低（$M = 6.48$ ± 2.03，中位数 = 7.00），支配感更强（$M = 7.17$ ± 1.44，中位数 = 6.50）。参与者经常提到“大象”（N = 8）、“草原”（N = 8）、“香蕉”（N = 4）、“大”（N = 4）和“放松”（N = 3）。潜在狄利克雷分配揭示了敬畏和紧张的主题，同时也指出喂食和触摸大象带来了宽慰与愉悦的时刻。正如一位参与者所观察到的：“巨大的大象带来了一丝压迫感，让我有点紧张。喂香蕉互动让我有所觉察，也让我感觉心情平静了些。”（P9）。P17也表达了恐惧与愉悦交织的感受：“大象有点吓人，因为它们实在太大了，但看着它们吃香蕉让我感觉放松了一些。”

总之，被大象包围 场景诱发了高效价和高唤醒，参与者在描述放松的同时，也提到了片刻的恐惧。根据我们的结果，在交互条件下，喂食和触摸大象常被描述为令人平静且愉快，既能缓解紧张感，又能促进乐趣与投入。

6.5.7 主题建模概述。总而言之，在全部六个场景中，虚拟环境有效地引发了预期的情绪，而我们与这些环境的交互进一步塑造了参与者的反应。在**非交互条件**下，参与者强调了环境氛围和被动体验，往往反映出缺乏控制感。相比之下，**交互条件**突出了能动性和参与度。在负面场景中（例如单独监禁和持枪喊叫的男子），我们的交互设计为参与者提供了应对和宽慰的途径，而在积极或中性场景中（例如小狗和湖边码头），则增强了愉悦感和沉浸感。总体而言，这些结果表明，我们与场景的交互并非只是增强情绪，而是根据具体情境对情绪进行调节，凸显了针对场景设计的交互在虚拟现实中营造丰富情绪体验的效果。

7 讨论

接下来，我们回答研究问题，将本研究置于现有工作之中，并阐述其启示与局限性。

7.1 RQ1：新增的场景被大象包围 能否可靠且有效地诱发高唤醒和高效价情绪?

我们扩展了情绪诱发数据集 [34]，通过新增一个VR场景“被大象包围”，填补了高唤醒高效价象限的空白。我们遵循Jiang等人的方法，通过用户研究验证了这一新的VR场景。 [34]。研究结果表明，与360° 视频相比，该VR场景诱发的情绪在效价和支配感上显著更高。较高的效价评分可能表明，参与者在虚拟现实条件下体验到了更多积极情绪，这与先前关于积极情绪诱发的研究一致；该研究表明，虚拟现实中增强的临场感能够强化情感反应 [71]。较高的支配度评分进一步表明，参与者感到更加投入，并能够通过在虚拟现实环境中自发发起的行为主动塑造并控制自己的体验，这与将虚拟现实中的临场感和控制感与更高感知支配感相联系的研究相一致 [76, 84]。相比之下，唤醒度差异并不显著，表明我们未发现该VR场景与360° 视频在这一维度上存在差异。

总体而言，我们的场景表明，被大象包围这一VR场景凭借其沉浸特性，能够可靠且有效地诱发高唤醒积极情绪，因为参与者能够例如接近或观察大象。

7.2 RQ2：与非交互式基线相比，对象级交互如何影响情绪反应的主观测量指标与生理测量指标?

我们进一步扩展了情绪诱发数据集 [34]，为各场景添加了交互。研究结果表明，相对于非交互式基线，对象级交互对自我报告的效价、唤醒度或支配感并未表现出一致的主效应，差异主要表现为场景依赖效应。然而，交互模式表明，情感交互设计在特定情境中持续提升了支配感，使参与者对情绪体验更有掌控，而非被动接受。

交互式版本的参与时长更长，空间探索范围也更广，表明参与者在获得交互选项后，更愿意停留并进行探索。参与时间的延长为情绪反应创造了更多机会，这体现在更高的效价和支配度评分，以及更高的高频心率变异性和更低的心率等生理模式上。

此外，我们的研究结果与先前的研究一致，并表明对象级交互 会将被动体验转变为以目标为导向的探索 [15]。交互对象提供明确的行动目标和反馈，促使参与者主动感知虚拟环境。一旦参与者知道场景中存在交互对象，他们就更愿意留在场景中并进行探索。在效价较低或令人紧张的场景中，例如隧道、单独监禁和持枪喊叫的男子，工具性或防御性互动提供了应对和调节情绪的方式，降低了参与者因不适而迅速退出的倾向。同样，在效价较高的场景中，例如小狗、湖边码头和被大象包围，交互似乎能够维持参与度和愉悦感，从而延长参与时间。

同样，我们的研究结果表明，对象级交互 会改变参与者在虚拟场景中的空间探索模式。与非交互版本相比，空间参与从简单的观察转变为以目标为导向、与交互对象进行互动。我们发现，即使某些对象未被设置为可交互，参与者仍会尝试与其互动，并将移动集中在有限活动区域内可能存在的交互热点周围。在小狗 场景中，由于球和小狗的位置可以改变，参与者会更广泛地参与环境中的空间探索。研究表明，这种以目标为导向的参与与情绪反应有关 [25]：在主观层面，它会增强支配感，而效价和唤醒度的变化方向则取决于场景的情感特征 [67]；在生理层面，它与整体上较高的高频心率变异性和较低的心率 [41], , 以及皮肤电反应次数和幅度增加 [17]相一致。未来的研究可以通过考察关键交互事件前后的瞬时皮肤电反应波动，进一步分析这一现象，从而捕捉更精细的生理唤醒动态 [11]。

总体而言，我们的研究结果表明，交互并不仅仅增强情绪诱发；通过提供具体目标、可预测的反馈和可见信息，它降低了不确定性，并以可控、对情境敏感的方式塑造情绪体验，而非仅仅依赖被动暴露。

7.3 研究问题3：主观自我报告与对虚拟现实中情感交互的生理唤醒之间有何关系?

在交互条件下，在所有场景中，我们观察到生理唤醒的变化反映了两个互补的维度。较高的高频心率变异性和较低的心率表明紧张性唤醒强度较低，指向生理唤醒降低 [2, 41], 而较高的皮肤电反应次数和幅度则反映出更频繁、更强的时相性激活，指向瞬时的交感神经反应，例如心率加速、皮肤电反应 [11, 17]。这些生理模式始终伴随着更高的主观效价和支配感，表明参与者感到更加积极并处于掌控之中，从而使他们能够保持整体的生理放松，并间或出现对交互刺激的高反应时刻。

主观唤醒与生理唤醒之间的关系表现出对场景的依赖性。例如，在 LALV 场景隧道中，交互降低了紧张感和不确定性，从而导致较低的主观唤醒，这与更高的可预测性和控制感一致。在单独监禁中，交互引入了可执行目标和即时反馈，使体验从被动的低激活转变为以物体为导向的参与；主观唤醒和效价均有所提高，而生理测量指标表明，这种激活仍处于可控制范围内，并未引发压力。在 LAHV 场景中，效果取决于具体情境：在湖畔栈桥中，以放松为导向的交互降低了主观唤醒，而在小狗中，以游戏为导向的交互则提高了主观唤醒。对于高唤醒场景，被大象包围 （HAHV）仅表现出主观唤醒的小幅下降，而持枪喊叫的男子 （HALV）尽管 HF HRV 的升幅较弱，仍引发了更高的唤醒度，这表明警觉性与逐渐增强的控制感同时存在。

总而言之，交互与效价和支配感的持续提升相关，而生理唤醒则呈现出紧张性放松和时相性激活并存的双重特征 [2, 17, 41]。相比之下，主观唤醒更易变化，会随场景情境而异：在以放松为导向的情境中降低，在受到威胁或积极参与时升高 [56, 58, 91]。主观唤醒与生理唤醒之间的这种部分分离，与更广泛的证据相符：自我报告会受到对可控性和意义的认知评估影响 [27], , 而生理测量指标则反映紧张性反应与时相性反应的时间动态 [3], , 两者未必总能与主观体验直接对应 [63, 64]。

7.4 在现有文献中的定位

与使用原始360° 视频的既往研究相比 [47, 82]以及虚拟现实场景 [34], , 我们的发现总体上与先前研究一致，但也呈现出一些系统性偏差。如图5所示，在唤醒度相近时，LALV和HALV场景引发了更高的效价；而在效价相近时，HAHV和LAHV场景引发了更高的唤醒度。这些偏差可能由方法因素导致。Jiang等人 [34] 招募Prolific参与者，让他们在不同环境中体验虚拟现实；在这种情况下，实验控制有限，个体差异可能削弱结果的一致性 [69]。相比之下，我们在受控的实验室环境中确保了设备和实验流程的标准化，而研究表明，这些条件有助于提升虚拟现实中的沉浸感和临场感 [19, 85]。总而言之，我们的发现与先前研究一致 [34], , 但也揭示了情绪反应方面的系统性偏差，这可能是由于与控制程度较低的环境相比，实验室环境能够提供更强的实验控制和沉浸感。

7.5 对研究与设计的启示

我们的研究结果表明，应重新审视虚拟现实中的交互：它不仅是引发情绪的方法，也是调节情绪的媒介。具体而言，我们观察到，在轻松愉快的情境中，例如小狗和被大象包围，交互会增强积极情感；而在令人紧张的场景中，例如隧道或单独监禁，交互则会减轻感知威胁并增强支配感。这表明，能动性有望成为虚拟现实中情绪调节的一种机制，进一步说明沉浸式系统能够塑造应对方式和情绪轨迹，而不只是强化反应 [54, 77]。为推动此类研究，我们的

经验证的数据集为人机交互社区提供了基础，使其能够探究不同对象级交互如何影响虚拟现实中的情绪体验。除数据集外，我们的研究结果还为心理健康研究奠定了理论基础，具体而言，支持从被动暴露转向主动应对范式，在这一范式中，情感交互能够增强控制感和安全感 [7, 87]。因此，未来的研究应超越效价—唤醒模型，开发能够衡量应对、宽慰和持续沉浸感的指标。这类视角将使虚拟现实不仅成为一种情感刺激，也成为理解和支持各领域情绪调节的研究工具，例如心理健康 [62], 培训 [38], 和教育 [61]。

对于设计实践，我们的结果凸显了根据场景的特定情感特质量身定制交互的重要性。在具有威胁性的情境中，赋予用户采取行动的能动性（例如，控制黑暗隧道中的灯光）可能有助于缓解痛苦并恢复平衡；而在积极情境中，趣味性或探索性的行动则能提升愉悦感并维持参与度。这些见解可推广至多种应用领域。在虚拟现实游戏设计中，开发者可以根据玩家的情绪状态适时调整游戏难度或机制，在焦虑过高时提供能增强能动性的工具，或在参与度下降时提供趣味性交互对象 [24]。在社交虚拟现实中，设计对象级交互能够提供共同焦点，并促进群体协作与联系 [81]。在虚拟现实学习中，趣味性交互设计能够促进主动参与并增强支配感，从而提升学习成果 [81]。然而，有效的设计需要仔细校准。关于虚拟现实情绪诱发的先前研究警示，校准不当的交互可能导致过度刺激或加剧焦虑 [77], ，而我们的结果也证实了这一点。因此，虚拟现实中的有效交互设计需要在环境氛围与用户能动性之间取得平衡，确保交互有助于适应性调节并带来有意义的情绪体验。

7.6 局限性与未来工作

我们的研究表明，对象级交互能够调节情绪，增强积极情感，同时缓和负面情绪的强度，从而拓展了虚拟现实领域的交互研究。与此同时，我们也发现了若干局限性，并由此指出了未来的研究方向。首先，我们关注的是对象级交互；社交互动或动态环境反馈等更复杂的形式不在本研究范围之内。部分设计的动作也可能类似于游戏机制，进而影响不同组别的用户如何归因并调节其情绪反应。其次，我们采用自我报告（SAM）和基础生理信号（皮肤电活动和血容量脉搏）作为测量指标。虽然这些指标具有参考价值，但它们属于间接指标，且受到显著的个体变异性影响，因此限制了我们对所观察到的调节过程进行细致解读的能力。

未来的研究应拓展交互形式与评估方法。近期调查显示，多模态情感识别将生理信号与面部表情、语音和眼动追踪相结合，相较于单模态方法，能够更丰富地呈现情绪动态 [1]。同样，研究者指出，情感触觉和具身感知是推动沉浸式情境下情绪研究发展的关键 [102]。这些观点超越了效价—唤醒—支配模型，转向能够捕捉应对、宽慰和持续参与度的框架。因此，纳入包括触觉反馈在内的多模态诱发，可能促成虚拟现实中更具身体性的情绪体验，并加深我们对交互如何影响情绪诱发与情绪调节的理解。

8 结论

我们扩展了一个公开的虚拟现实情绪诱发数据集 [34]，为其创建并验证了一个高唤醒、高效价场景，并在六个虚拟现实场景中系统地融入了对象级交互。我们通过自我报告和生理测量，对交互式与非交互式版本进行了比较。结果表明，交互是一种情境性情绪调节机制：它能帮助用户应对紧张环境（例如低效价场景），并通过平衡氛围、能动性和投入度，提升用户在充满趣味的场景中的愉悦感（例如高效价场景）。这些发现为交互能够塑造虚拟现实中的情绪反应提供了实证依据，推动了情感计算研究，为心理健康、教育、培训和交互媒体领域的人机交互应用提供了设计见解，同时也通过沉浸式环境加速了情绪研究。

致谢

Weiwei Jiang 获得国家自然科学基金项目（62402229）及 NUIST 人才引进启动基金的资助。Anusha Withana 获得澳大利亚政府资助的澳大利亚研究委员会发现早期职业奖（DECRA）——DE200100479。Flora Salim 谨此感谢 ARC 自动化决策与社会卓越中心（CE200100005）的支持。我们感谢参与者付出的宝贵时间，也感谢 AID-LAB 成员在各方面给予的协助。

参考文献

[1] Sharmeen M Saleem Abdullah Abdullah, Siddeeq Y Ameen Ameen, Mo- hammed AM Sadeeq, and Subhi Zeebaree。2021年。基于深度学习的多模态情绪识别。《应用科学与技术趋势杂志》2, 01（2021年），73–79。[2] Bradley M Appelhans and Linda J Luecken。2006年。心率变异性作为调节情绪反应的指标。《普通心理学评论》10, 3（2006），229–240。[3] Ebrahim Babaei, Benjamin Tag, Tilman Dingler, and Eduardo Velloso。2021年。对 CHI 会议中皮肤电活动实践的批判。在*2021*年 *CHI*人机交互系统中的人为因素大会论文集。1–14。[4] Soumya C Barathi, Michael Proulx, Eamonn O'Neill, and Christof Lutteroth。2020年。基于高强度虚拟现实体感游戏中心理生理学相关指标的情绪识别。在*2020*年 *CHI*人机交互系统中的人为因素大会论文集。1–15。[5] Lyn Bartram, Abhisekh Patra, and Maureen Stone。2017年。可视化中的情感色彩。在*2017*年 *CHI*人机交互系统中的人为因素大会论文集。1364–1374。[6] Allison Bayro and Heejin Jeong。2025年。实验方案的系统综述：迈向虚拟现实情感研究的统一框架。*IEEE* 情感计算汇刊（2025年）。[7] Imogen H Bell, Jennifer Nicholas, Mario Alvarez-Jimenez, Andrew Thompson, and Lucia Valmaggia。2020年。虚拟现实作为心理健康研究与实践中的临床工具。《临床神经科学对话》22, 2（2020年），169–177。[8] Stuart M Bender and Billy Sung。2021年。在虚拟现实中击杀僵尸时的惊恐、注意与喜悦：对 VR 用户体验的心理生理学分析。《心理学与营销》38, 6（2021年），937–947。[9] Alberto Betella and Paul FMJ Verschure。2016年。情感滑块：一种用于测量人类情绪的数字自我评估量表。《公共科学图书馆·综合》11, 2（2016年），e0148037。

[10] David M Blei, Andrew Y Ng, and Michael I Jordan。2003年。潜在狄利克雷分配。《机器学习研究杂志》3, Jan（2003年），993–1022。[11] Wolfram Boucsein。2012年。皮肤电活动。Springer Science & Business Media。[12] Margaret M Bradley and Peter J Lang。1994年。情绪测量：自我评估人形图与语义差异量表。《行为疗法与实验精神病学杂志》25, 1（1994年），49–59。[13] Polona Caserman, Augusto Garcia-Agundez, Alvar Gámez Zerban, and Stefan Göbel。2021年。当前一代虚拟现实头戴式显示器中的晕动症：系统综述与展望。《虚拟现实》25, 4（2021年），1153–1170。[14] Alice Chirico, Francesco Ferrise, Lorenzo Cordella, and Andrea Gaggioli。2018年。在虚拟现实中营造敬畏感：一项实验研究。《心理学前沿》8（2018年），2351。[15] Athanasios Christopoulos, Marc Conrad, and Mitul Shukla。2018年。如何通过虚拟交互提高学生参与度？《虚拟现实》22, 4（2018年），353–369。[16] John R Crawford and Julie D Henry。2004年。积极与消极情感量表（PANAS）：大型非临床样本中的构念效度、测量特性与常模数据。《英国临床心理学杂志》43, 3（2004年），245–265。[17] Hugo D Critchley。2002年。皮肤电反应：大脑中发生了什么。《神经科学家》8, 2（2002年），132–142。[18] Mihaly Csikszentmihalyi and Reed Larson。1987年。经验抽样法的效度与信度。《神经与精神疾病杂志》175, 9（1987年），526–536。[19] James J Cummings and Jeremy N Bailenson。2016年。沉浸感达到什么程度才足够？沉浸式技术对用户临场感影响的荟萃分析。《媒介心理学》19, 2（2016年），272–309。[20] Nicoló Dozio, Federica Marcolin, Giulia Wally Scurati, Luca Ulrich, Francesca Nonis, Enrico Vezzetti, Gabriele Marsocci, Alba La Rosa, and Francesco Ferrise。2022年。情感虚拟现实的设计方法。《国际人机研究杂志》162（2022年），102791。[21] Paul Ekman。1992年。关于基本情绪的论证。《认知与情绪》6, 3-4（1992年），169–200。[22] Aviv Elor, Asiiah Song, and Sri Kurniawan。2021年。通过触觉反馈背心模式与沉浸式虚拟现实理解情绪表达。在2021年 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议摘要与研讨会（VRW）。183–188。[23] Sergio Estupiñán, Francisco Rebelo, Paulo Noriega, Carlos Ferreira, and Emília Duarte。2014年。虚拟现实能否增强情绪反应（唤醒度与效价）？一项初步研究。在国际设计、用户体验与可用性会议。541–549。[24] Stephen H Fairclough。2009年。生理计算基础。《与计算机交互》21, 1-2（2009年），133–145。[25] Yu-Min Fang。2024年。探索虚拟现实中的可用性、情绪反应、心流体验与技术接受度：自由创意与目标导向训练的比较分析。《应用科学》14, 15（2024年），6737。[26] Marco Granato, Davide Gadia, Dario Maggiorini, and Laura A Ripamonti。2020年。基于生理数据集的虚拟现实赛车游戏玩家情绪实证研究。《多媒体工具与应用》79, 45（2020年），33657–33686。[27] James J Gross。2015年。情绪调节：现状与未来展望。《心理学探究》26, 1（2015年），1–26。[28] Kunal Gupta, Sam WT Chan, Yun Suen Pai, Nicholas Strachan, John Su, Alexan- der Sumich, Suranga Nanayakkara, and Mark Billinghurst。2022年。Total vrecall：利用生物信号识别虚拟现实中的情绪性自传体记忆。《ACM交互、移动、可穿戴与泛在技术论文集》6, 2（2022年），1–21。[29] Kunal Gupta, Yuewei Zhang, Tamil Selvan Gunasekaran, Nanditha Krishna, Yun Suen Pai, and Mark Billinghurst。2024年。Caevr：由生物信号驱动的虚拟现实情境感知共情。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》30, 5（2024年），2671–2681。[30] Martin Halvey, Michael Henderson, Stephen A Brewster, Graham Wilson, and Stephen A Hughes。2012年。通过热刺激增强媒体体验。在国际触觉与音频交互设计会议。91–100。[31] Syem Ishaque, Alice Rueda, Binh Nguyen, Naimul Khan, and Sridhar Krishnan。2020年。虚拟现实电子游戏中的压力生理信号分析与分类。在2020年第42届 IEEE医学与生物学工程学会国际年会（EMBC）。867–870。[32] Giulio Jacucci, Andrea Bellucci, Imtiaj Ahmed, Ville Harjunen, Michiel Spape, and Niklas Ravaja。2024年。虚拟现实中与智能体和虚拟化身进行社交互动时的触觉技术：系统综述。《虚拟现实》28, 4（2024年），170。[33] Jason Jerald。2015年。《虚拟现实之书：以人为中心的虚拟现实设计》。Morgan & Claypool。[34] Weiwei Jiang, Maximiliane Windl, Benjamin Tag, Zhanna Sarsenbayeva, and Sven Mayer。2024年。用于诱发情绪的沉浸式交互虚拟现实数据集。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》（2024年）。[35] Crescent Jicol, Chun Hin Wan, Benjamin Doling, Caitlin H Illingworth, Jinha Yoon, Charlotte Headey, Christof Lutteroth, Michael J Proulx, Karin Petrini, and Nelli Ranc。2021年。情绪与能动性对虚拟现实临场感的影响。载于《2021年CHI人机交互系统中的人为因素大会论文集》。1–13。[36] Sarah Jones。2017年。打破叙事：虚拟现实中的沉浸式新闻。《媒体实践杂志》18，2-3（2017年），171–185。[37] Joohee Jun、Myeongul Jung、So-Yeon Kim 和 Kwanguk Kim。2018年。全身所有权错觉能够改变我们的情绪。载于《2018年CHI人机交互系统中的人为因素大会论文集》。1–11。[38] Margaret E Kemeny、Carol Foltz、James F Cavanagh、Margaret Cullen、Janine Giese-Davis、Patricia Jennings、Erika L Rosenberg、Omri Gillath、Phillip R Shaver、B Alan Wallace 等。2012年。静观/情绪训练可减少负面情绪行为并促进亲社会反应。《情绪》12，2（2012年），338。[39] Angelika C Kern、Wolfgang Ellermeier 和 Lina Jost。2020年。通过音乐或声景诱导情绪对虚拟现实公园场景中的临场感和情绪的影响。载于《第15届Audio Mostly国际会议论文集》。233–236。[40] Jassin Kessing、Tim Tutenel 和 Rafael Bidarra。2009年。游戏世界中的服务：一种改善对象交互的语义方法。载于《国际娱乐计算会议》。Springer，276–281。[41] Hye-Geum Kim、Eun-Jin Cheon、Dai-Seg Bai、Young Hwan Lee 和 Bon-Hoon Koo。2018年。压力与心率变异性：荟萃分析与文献综述。《精神病学研究》15，3（2018年），235。[42] Peter J Lang。1995年。情绪探针：关于动机和注意的研究。《美国心理学家》50，5（1995年），372。[43] Joseph J LaViola Jr、Ernst Kruijff、Ryan P McMahan、Doug Bowman 和 Ivan P Poupyrev。2017年。三维用户界面：理论与实践。Addison-Wesley Professional。[44] Raymond Lavoie、Kelley Main、Corey King 和 Danielle King。2021年。虚拟体验，现实后果：虚拟现实游戏可能带来的负面情绪后果。《虚拟现实》25，1（2021年），69–81。[45] Richard S Lazarus。1991年。《情绪与适应》。[46] Jeroen S Lemmens、Monika Simon 和 Sindy R Sumter。2022年。虚拟现实中的恐惧与厌恶：沉浸式游戏的情绪和生理效应。《虚拟现实》26，1（2022年），223–234。[47] Benjamin J Li、Jeremy N Bailenson、Adam Pines、Walter J Greenleaf 和 Leanne M Williams。2017年。一个沉浸式虚拟现实视频公共数据库，包含相应的唤醒度、效价评分，以及头部运动与自我报告测量之间的相关性。《心理学前沿》8（2017年），2116。[48] Ming Li、Junjun Pan、Yang Gao、Yang Shen、Fang Luo、Ju Dai、Aimin Hao 和 Hong Qin。2022年。虚拟现实情绪诱导范式的神经生理与主观分析。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》28，11（2022年），3832–3842。[49] Ming Li、Junjun Pan、Yu Li、Yang Gao、Hong Qin 和 Yang Shen。2024年。情绪对虚拟现实中认知控制影响的多模态生理分析。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》30，5（2024年），2044–2054。[50] Tinghui Li、Danyang Peng、Eduardo Velloso、Anusha Withana、Kouta Minamizawa 和 Zhanna Sarsenbayeva。2025年。评估环境噪声对混合现实交互的影响。《ACM交互、移动、可穿戴与泛在技术论文集》9，4（2025年），1–34。[51] Tinghui Li、Brandon Victor Syiem、Niels Van Berkel、Juno Kim、Anusha Withana 和 Zhanna Sarsenbayeva。2025年。人机交互领域扩展现实研究的趋势与方向：共词分析。载于《第37届澳大利亚人机交互会议论文集》。720–731。[52] Tinghui Li、Eduardo Velloso、Anusha Withana 和 Zhanna Sarsenbayeva。2025年。评估负重和行走对混合现实交互的影响。载于《2025年CHI计算系统人因会议论文集》（日本横滨）（CHI '25）。计算机协会，纽约，NY，美国，文章1153，24页。[53] Tinghui Li、Eduardo Velloso、Anusha Withana 和 Zhanna Sarsenbayeva。2025年。负重诱发的耐力消耗（WICE）：一种量化加重物体导致肩部疲劳的模型。载于《第38届ACM用户界面软件与技术年会》（韩国釜山）（UIST '25）。计算机协会，纽约，NY，美国。[54] Huiyi Liang、Yi Li 和 Benjamin Tag。2025年。MindfulReframer：通过认知重评管理考试焦虑的虚拟现实系统。载于《CHI人机交互系统中的人为因素大会扩展摘要论文集》（CHI EA '25）。计算机协会，纽约，NY，美国，文章398，9页。[55] Benjamin GP Linares-Vargas 和 Segundo E Cieza-Mostacero。2024年。交互式虚拟现实环境与情绪：系统综述。《虚拟现实》29，1（2024年），3。[56] Stefan Liszio 和 Maic Masuch。2019年。交互式沉浸式虚拟环境可使人放松并增强对急性压力的抵抗力。《网络治疗与远程医疗年评》17（2019年），65–71。[57] Danielle Lottridge、Mark Chignell 和 Aleksandra Jovicic。2011年。情感交互：理解、评估并为人类情绪进行设计。《人因与工效学评论》

《人因与工效学评论》7，1（2011年），197–217。[58] Tiffany Luong 和 Christian Holz。2022年。虚拟现实中对恐惧、挫折感和顿悟的生理反应特征。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》28，11（2022年），3917–3927。[59] Ying Ma、Qiushi Zhou、Benjamin Tag、Zhanna Sarsenbayeva、Jarrod Knibbe 和 Jorge Goncalves。2023年。“你好，邻居！”：在微博上展示用户位置的感知与影响。载于《IFIP人机交互会议》。Springer，511–532。[60] Dominique Makowski、Tam Pham、Zen J Lau、Jan C Brammer、François Lespinasse、Hung Pham、Christopher Schölzel 和 SH Annabel Chen。2021年。NeuroKit2：用于神经生理信号处理的 Python 工具箱。《行为研究方法》53，4（2021年），1689–1696。[61] Guido Makransky 和 Lau Lilleholt。2018年。沉浸式虚拟现实在教育中的情感价值：一项结构方程模型研究。《教育技术研究与发展》66，5（2018年），1141–1164。[62] Jessica L Maples-Keller、Brian E Bunnell、Sae-Jin Kim 和 Barbara O Rothbaum。2017年。虚拟现实技术在治疗焦虑和其他精神障碍中的应用。《哈佛精神病学评论》25，3（2017年），103–113。[63] Javier Marín-Morales、Carmen Llinares、Jaime Guixeres 和 Mariano Alcañiz。2020年。沉浸式虚拟现实中的情绪识别：从统计学到情感计算。《传感器》20，18（2020年），5163。[64] Iris B Mauss 和 Michael D Robinson。2009年。情绪测量：综述。《认知与情绪》23，2（2009年），209–237。[65] Daniel J McDuff、Javier Hernandez、Sarah Gontarek 和 Rosalind W Picard。2016年。Cogcam：利用数码相机在计算机任务中进行认知压力的非接触式测量。载于《2016年CHI人机交互系统中的人为因素大会论文集》。4000–4004。[66] Albert Mehrabian。1996年。愉悦—唤醒—支配：描述和测量个体气质差异的通用框架。《当代心理学》14（1996年），261–292。[67] Albert Mehrabian 和 James A Russell。1974年。《一种环境心理学研究方法》。[68] Ben Meuleman 和 David Rudrauf。2018年。虚拟现实中强烈多成分情绪的诱发与特征描绘。《IEEE情感计算汇刊》12，1（2018年），189–202。[69] Aske Mottelson、Gustav Bøg Petersen、Klemen Lilija 和 Guido Makransky。2021年。在线开展无监督虚拟现实用户研究。《虚拟现实前沿》2（2021年），681482。[70] James Andrew Oxley、Kristof Santa、Georg Meyer 和 Carri Westgarth。2022年。虚拟现实与增强现实中的人犬互动：虚拟犬模型与沉浸式设备应用的系统范围综述。《虚拟现实前沿》3（2022年），782023。[71] Katarina Pavic、Laurence Chaby、Thierry Gricourt 和 Dorine Vergilino-Perez。2023年。感到身处虚拟环境让我更快乐：沉浸感、临场感和视频内容对积极情绪诱发的影响。《网络心理学、行为与社交网络》26，4（2023年），238–245。[72] Joann Peck 和 Suzanne B Shu。2009年。单纯触摸对感知所有权的影响。《消费者研究杂志》36，3（2009年），434–447。[73] John P Pollak、Phil Adams 和 Geri Gay。2011年。PAM：用于频繁现场情感测量的照片情感测量仪。载于《人机交互特别兴趣小组人机交互系统中的人为因素大会论文集》。725–734。[74] Dominic Potts、Zoe Broad、Tarini Sehgal、Joseph Hartley、Eamonn O’Neill、Crescent Jicol、Christopher Clarke 和 Christof Lutteroth。2024年。关注细节：虚拟现实运动游戏中的情绪识别及体力消耗的影响。载于《2024年CHI人机交互系统中的人为因素大会论文集》。1–21。[75] Dominic Potts、Miloni Gada、Aastha Gupta、Kavya Goel、Klaus Philipp Krzok、Genevieve Pate、Joseph Hartley、Mark Weston-Arnold、Jakob Aylott、Christopher Clarke 等。2025年。RetroSketch：一种回顾式虚拟现实情绪与临场感测量方法。载于《2025年CHI人机交互系统中的人为因素大会论文集》。1–25。[76] Giuseppe Riva、Fabrizia Mantovani、Claret Samantha Capideville、Alessandra Preziosa、Francesca Morganti、Daniela Villani、Andrea Gaggioli、Cristina Botella 和 Mariano Alcañiz。2007年。运用虚拟现实进行情感交互：临场感与情绪之间的联系。《网络心理学与行为》10，1（2007年），45–56。[77] Giuseppe Riva、Brenda K Wiederhold 和 Fabrizia Mantovani。2019年。虚拟现实神经科学：从虚拟暴露到具身医学。《网络心理学、行为与社交网络》22，1（2019年），82–96。[78] James A Russell。1980年。情感环形模型。《人格与社会心理学杂志》39，6（1980年），1161。[79] Zhanna Sarsenbayeva、Gabriele Marini、Niels van Berkel、Chu Luo、Weiwei Jiang、Kangning Yang、Greg Wadley、Tilman Dingler、Vassilis Kostakos 和 Jorge Goncalves。2020年。是智能手机使用驱动情绪，还是反之？因果分析。载于《2020年CHI人机交互系统中的人为因素大会论文集》。1–15。[80] Zhanna Sarsenbayeva、Niels van Berkel、Danula Hettiachchi、Weiwei Jiang、Tilman Dingler、Eduardo Velloso、Vassilis Kostakos 和 Jorge Goncalves。2019年。测量压力对移动交互的影响。《ACM交互、移动、可穿戴与泛在技术论文集》3, 1 (2019年), 1–18。[81] Anthony Scavarelli、Ali Arya和Robert J Teather。2021年。社交学习空间中的虚拟现实与增强现实：文献综述。《虚拟现实》25, 1 (2021年), 257–277。[82] Benjamin Schöne、Joanna Kisker、Rebecca Sophia Sylvester、Elise Leila Radtke和Thomas Gruber。2023年。通用虚拟现实实验库（luVRe）：面向基于虚拟现实的研究的标准化沉浸式3D/360度图片与视频数据库。《当代心理学》42, 7 (2023年), 5366–5384。[83] Ewa Siedlecka和Thomas F Denson。2019年。诱发基本情绪的实验方法：定性综述。《情绪评论》11, 1 (2019年), 87–97。[84] Richard Skarbez、Frederick P Brooks和Mary C Whitton。2020年。沉浸感与连贯性：研究议程与早期结果。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》27, 10 (2020年), 3839–3850。[85] Mel Slater和Maria V Sanchez-Vives。2016年。以沉浸式虚拟现实改善我们的生活。《机器人学与人工智能前沿》3 (2016年), 236866。[86] Rukshani Somarathna、Tomasz Bednarz和Gelareh Mohammadi。2022年。用于情绪诱发的虚拟现实——综述。IEEE 情感计算汇刊14, 4 (2022年), 2626–2645。[87] Liana Spytska。2024年。虚拟现实在恐惧症和创伤后应激障碍等精神障碍治疗中的应用。《SSM-心理健康》6 (2024年), 100351。[88] Nazmi Sofian Suhaimi 、 James Mountstephens 和 Jason Teo。2020年。基于脑电图的情绪识别：当前趋势与机遇的前沿综述。《计算智能与神经科学》2020, 1 (2020年), 8875426。[89] Benjamin Tag、Zhanna Sarsenbayeva、Anna L Cox、Greg Wadley、Jorge Goncalves和Vassilis Kostakos。2022年。智能手机使用中的情绪轨迹：迈向识别真实环境中的情绪调节。《国际人机研究杂志》166 (2022年), 102872。[90] Jan-Philipp Tauscher、Fabian Wolf Schottky、Steve Grogorick、Paul Maximilian Bittner、Maryam Mustafa和Marcus Magnor。2019年。沉浸式脑电图：评估虚拟现实中的脑电图。见2019年IEEE虚拟现实与三维用户界面会议（虚拟现实）。1794–1800。[91] Deltcho Valtchanov和Colin Ellard。2010年。沉浸于虚拟现实的生理与情感反应：自然与城市环境的影响。《网络治疗与康复杂志》（JCR）3, 4 (2010年)。[92] Nadine Wagener、Arne Kiesewetter、Leon Reicherts、Paweł W Woźniak、Johannes Schöning、Yvonne Rogers和Jasmin Niess。2024年。MoodShaper：支持管理负性情绪的虚拟现实体验。见2024年ACM交互系统设计会议论文集。2286–2304。[93] Claudia AF Wascher。2021年。心率作为进化生物学中情绪唤醒的度量。《英国皇家学会哲学汇刊B辑》376, 1831 (2021年)。[94] David Watson、Lee Anna Clark和Auke Tellegen。1988年。正性与负性情感简式测量的开发与验证：PANAS量表。《人格与社会心理学杂志》54, 6 (1988年), 1063。[95] David Watson、David Wiese、Jatin Vaidya和Auke Tellegen。1999年。情感的两种一般激活系统：结构发现、进化考量与心理生物学证据。《人格与社会心理学杂志》76, 5 (1999年), 820。[96] Jacob O Wobbrock、Leah Findlater、Darren Gergle和James J Higgins。2011年。仅使用方差分析实验流程进行非参数析因分析的对齐秩变换。见人机交互特别兴趣小组计算系统中的人因会议论文集。143–146。[97] Jialan Xie、Yutong Luo、Shiyuan Wang和Guangyuan Liu。2024年。基于脑电图的虚拟现实环境中六种基本情绪识别。《生物医学信号处理与控制》93 (2024年), 106189。[98] Tianhua Xie、Mingliang Cao和Zhigeng Pan。2020年。应用自我评估人形图（SAM）评估VR游戏的情感唤醒效果。见2020年第3届国际图像与图形处理会议论文集。134–138。[99] Kangning Yang、Chaofan Wang、Yue Gu、Zhanna Sarsenbayeva、Benjamin Tag、Tilman Dingler、Greg Wadley和Jorge Goncalves。2021年。基于行为与生理信号的移动情绪识别深度多模态方法。IEEE 情感计算汇刊14, 2 (2021年), 1082–1097。[100] Kangning Yang、Chaofan Wang、Zhanna Sarsenbayeva、Benjamin Tag、Tilman Dingler、Greg Wadley和Jorge Goncalves。2021年。利用面部图像数据集的真实失真对商业情绪检测系统进行基准测试。《视觉计算机》37, 6 (2021年), 1447–1466。[101] Difeng Yu、Tilman Dingler、Eduardo Velloso和Jorge Goncalves。2024年。虚拟现实头显中的对象选择与操作：研究挑战、解决方案与成功度量。《计算综述》57, 4 (2024年), 1–34。[102] Emma Yann Zhang、Zhigeng Pan和Adrian David Cheok。2025年。利用情感触觉的情绪识别：综述。IEEE 情感计算汇刊 (2025年)。[103] Haiwei Zhang、Jiqing Zhang、Bo Dong、Pieter Peers、Wenwei Wu、Xiaopeng Wei、Felix Heide和Xin Yang。2023年。眨眼之间：基于事件的情绪识别。见ACM计算机图形学特别兴趣小组2023年会议论文集。1–11。

A 附录

A.1 问卷和访谈

A.1.1 问卷。

- 您的性别认同是什么？□ 女性 □ 男性 □ 非二元性别／多元性别 □ 我的性别认同不在以上选项中
- 您目前的年龄是多少（岁）？
- 您多久使用一次VR头显？□ 从不 □ 每日 □每周 □ 每月

A.1.2 访谈。

- 您如何评价自己在虚拟现实场景中的整体体验？（完全不愉快）01 2 3 4 5（中性）6 789 10（极其愉快）
- 您在虚拟现实体验期间或之后是否感到不适或头晕?
- 你觉得哪个虚拟现实场景最能引发情绪反应？□隧道 □ 小狗 □ 湖边码头□ 单独监禁 □ 持枪喊叫的男子 □ 被大象包围
- 你为什么认为这个场景最能引发情绪反应?
- 你觉得哪个虚拟现实场景最不能引发情绪反应？□隧道 □ 小狗 □ 湖边码头□ 单独监禁 □ 持枪喊叫的男子 □ 被大象包围
- 你为什么认为这个场景不像其他场景那样能引发情绪反应?

A.1.3 自我评估人形图（*SAM*）。

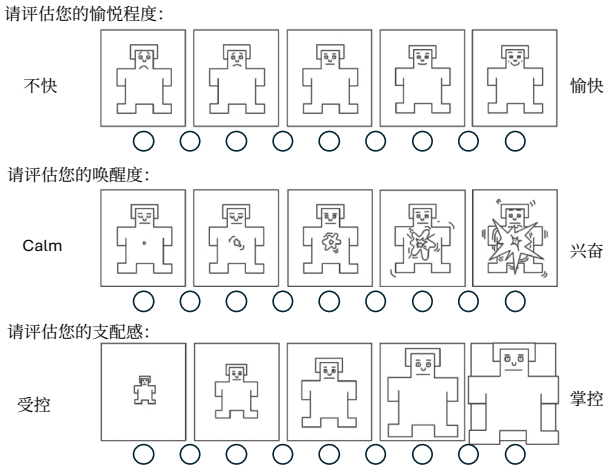


图16：自我评估人偶（SAM）问卷。

A.2 交互对象

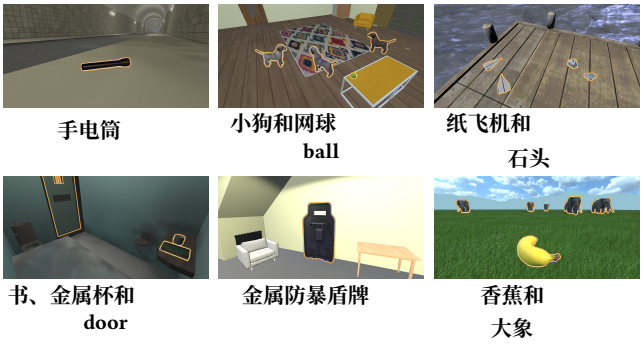


图17：六个虚拟现实场景中带有黄色轮廓的交互对象。

A.3 补充表格

表3：交互式和非交互式条件下参与者的人口统计信息和虚拟现实体验。

指标	类别	条件	
		非交互式	交互式
性别	Male	21	21
	女性	21	21
Age	Mean	23.79	24.31
	SD	3.21	2.87
虚拟现实经验	从不	13	11
	每日	7	7
	每周	10	11
	每月	12	13

表 4：被大象包围 虚拟现实场景的 SAM 评分均值和中位数。

条件	效价		唤醒度		支配感	
	M	Med	M	Med	M	Med
先前研究 [47]	5.94	NR	5.56	NR	NR	NR
360° 视频	5.42	5.50	5.67	6.00	5.08	4.50
VR场景	6.71	7.00	5.54	6.00	6.29	7.00

未报告 =先前研究中未报告。

表5：高频心率变异性（HF）和心率（HR）的线性混合效应模型固定效应估计值。每个结果变量均建模为结果变量 ~ 条件 * 场景 +(1|参与者)。数值以估计值（标准误）和95%置信区间表示。

参数	HF			HR		
	估计值	SE	95%置信区间	估计值	SE	95%置信区间
截距	***9.29	0.12	[9.06, 9.52]	***77.67	1.99	[73.74, 81.59]
交互式	***0.69	0.17	[0.36, 1.02]	**-9.25	2.82	[-14.80, -3.70]
小狗	*0.31	0.12	[0.06, 0.55]	-1.55	1.93	[-5.36, 2.25]
湖边码头	0.13	0.13	[-0.12, 0.38]	3.55	1.99	[-0.37, 7.47]
单独监禁	***0.44	0.13	[0.19, 0.69]	-0.32	1.96	[-4.18, 3.54]
持枪喊叫的男子	*0.30	0.13	[0.05, 0.55]	0.09	1.98	[-3.79, 3.98]
被大象包围	-0.01	0.13	[-0.26, 0.23]	1.74	1.96	[-2.11, 5.59]
交互式 ×小狗	-0.22	0.18	[-0.56, 0.13]	1.46	2.75	[-3.94, 6.86]
交互式 ×湖边码头	-0.04	0.18	[-0.39, 0.31]	-2.74	2.79	[-8.22, 2.74]
交互式 ×单独监禁	-0.34	0.18	[-0.69, 0.01]	-0.39	2.78	[-5.84, 5.07]
交互式 × 持枪喊叫的男子	**-0.49	0.18	[-0.84, -0.14]	3.87	2.79	[-1.60, 9.35]
交互式 ×被大象包围	-0.24	0.18	[-0.58, 0.11]	2.71	2.75	[-2.70, 8.12]

注：星号表示显著性：*$p < .05$，** $p < .01$，*** $p < .001$。

表6：SCR 反应次数和皮肤电反应幅度的线性混合效应模型固定效应估计值。每个结果变量均建模为结果变量 ~ 条件 * 场景 + (1|参与者)。数值以估计值（标准误）及 95%置信区间表示。

参数	皮肤电反应次数			皮肤电反应幅度		
	估计值	SE	95%置信区间	估计值	SE	95%置信区间
截距	***16.67	2.69	[11.35, 21.98]	*347.31	136.68	[77.05, 617.57]
交互式	5.50	3.81	[-2.01, 13.01]	188.73	193.29	[-193.48, 570.93]
小狗	0.67	2.58	[-4.40, 5.74]	113.03	102.73	[-88.92, 314.98]
湖边码头	0.98	2.58	[-4.10, 6.05]	4.39	102.73	[-197.56, 206.34]
单独监禁	-2.60	2.58	[-7.67, 2.48]	184.08	102.73	[-17.87, 386.03]
持枪喊叫的男子	0.28	2.64	[-4.90, 5.47]	187.77	105.04	[-18.73, 394.27]
被大象包围	0.50	2.58	[-4.57, 5.57]	-3.87	102.73	[-205.82, 198.08]
交互式 ×小狗	0.77	3.66	[-6.43, 7.96]	1.02	145.82	[-285.65, 287.68]
交互式 ×湖边码头	-4.74	3.65	[-11.91, 2.43]	233.83	145.28	[-51.77, 519.43]
交互式 ×单独监禁	6.37	3.66	[-0.83, 13.57]	-141.12	145.82	[-427.78, 145.55]
交互式 × 持枪喊叫的男子	-1.57	3.72	[-8.88, 5.73]	-47.73	147.99	[-338.65, 243.19]
交互式 ×被大象包围	4.79	3.65	[-2.39, 11.96]	61.25	145.28	[-224.35, 346.85]

注：星号表示显著性：*$p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$。