

中文引用格式:侯晓梅,范乐,程玥,等.基于虚拟现实技术的地震应急救援实训系统设计[J].中国安全科学学报,2026,36(1):199-207.

英文引用格式:HOU Xiaomei, FAN Le, CHENG Yue, et al. Design of earthquake emergency rescue training system based on virtual reality technology[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1):199-207.

基于虚拟现实技术的地震应急救援实训系统设计*

侯晓梅¹工程师,范乐^{**2}高级建筑师,程玥²,王燕语³,赵秀杰²高级建筑师

(1 中华人民共和国应急管理部 紧急救援促进中心,北京 100053; 2 中国建筑科学研究院有限公司,北京 100013; 3 西南交通大学 建筑学院,四川 成都 610031)

中图分类号:X924.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0117

基金项目:国家自然科学基金资助(52208035)。

【摘要】 为化解传统地震救援训练实训灾场仿真性程度低、安全性差、成本高和量化监测的局限,运用虚拟现实(VR)技术,基于 Unity 3D 引擎研发一套标准化、全流程的地震应急救援实训系统,构建地震灾场虚拟实训情境。在系统性提升救援人员战术水平和实战能力的同时,量化测度培训效能;一方面,阐述地震应急救援实训系统的模型建立、场景设计、功能模块及交互设计过程;另一方面,通过预测试与后测试对照试验,评估被试在地震灾害救援理论认知、操作技能及救援策略上的表现。结果表明:接受该系统训练的被试在即时知识掌握度与2周后知识迁移效能指标上均显著优于传统训练组(显著性 $P<0.05^*$,效应量 $d=1.0$),尤其在技能与策略方面的学习成效更为突出($P<0.05^*$, $d=1.23$)。同时,主观体验评估证实被试对该系统满意度评价较高,证明系统在知识迁移效能表现上的实用性和高效性($P<0.01^{**}$, $1.1\leq d\leq 3.9$)。

【关键词】 虚拟现实(VR); 地震灾害; 应急救援; 灾场仿真; 实训系统

Design of earthquake emergency rescue training system based on virtual reality technology

HOU Xiaomei¹, FAN Le², CHENG Yue², WANG Yanyu³, ZHAO Xiujie²

(1 Emergency Rescue Promotion Center, Ministry of Emergency Management, Beijing 100053, China;

2 China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

3 School of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: In order to address the limitations of traditional earthquake rescue training disaster site, including low simulation fidelity, poor safety, high costs and inadequate quantitative monitoring, this study developed a standardized, full-process earthquake emergency rescue training system using VR technology based on the Unity 3D engine, creating a virtual training scenario for earthquake disaster scenes. While systematically improving rescuers' tactical skills and practical abilities, the system enables quantitative measurement of training effectiveness. On one hand, this paper describes the model building, scene design, functional modules, and interactive design process of the earthquake emergency rescue training

* 文章编号:1003-3033(2026)01-0199-09; 收稿日期:2025-09-10; 修稿日期:2025-11-12

** 通信作者:范乐(1987—),男,安徽颍上人,博士,高级建筑师,主要从事城市防灾与建筑安全、应急仿真实训设施建设方面的研究。E-mail:fanlerain@126.com。

system. On the other hand, through pre-test and post-test control experiments, participants' performance is evaluated in terms of theoretical knowledge of earthquake disaster rescue, operational skills, and rescue strategies. The results show that subjects receiving training through this system significantly outperformed the traditional training group in both immediate knowledge acquisition and two-week knowledge transfer efficiency ($P < 0.05^*$, Cohen's $d = 1.0$), particularly in skill and strategy learning outcomes ($P < 0.05^*$, $d = 1.23$). Meanwhile, subjective experience evaluations confirmed high satisfaction ratings from subjects, corroborating the system's practical efficiency in knowledge transfer performance ($P < 0.01^{**}$, $1.1 \leq d \leq 3.9$).

Keywords: virtual reality (VR); earthquake disaster; emergency rescue; disaster field simulation; practical training system

0 引言

我国作为全球地震灾害最为严重的国家之一,其地震活动具有分布广、类型多、灾损大的突出特点^[1]。地震常引发次生灾害链式反应,如伴生火灾、山体滑坡、泥石流、堰塞湖等,其灾损程度甚至超过了原生灾害本身,其叠加效应进一步加剧了经济损失与社会动荡^[2]。

国外学者探索了虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术在高危特种行业中的实训应用^[3],以沉浸式的虚拟情境训练了高风险、高成本的险情处置技能。针对城市突发公共安全事件^[4]、应急医疗现场处置^[5]等情境开展了虚拟灾场仿真实训。面向特大自然灾害的巨大灾损和传统地震应急救援实训模式创新的紧迫需求,国内学者也尝试研究了以灾场图片为线索,用问答或情境模拟的形式训练救援人员行动流程和处置措施^[6-7],虽然在实训功效和经验传递上取得了良好效果,但行动流程和操作细节的缺失、灾场复杂信息收集、分析和处理环节的省略、协同训练的缺位仍然导致实训成效提升有限。

因此,笔者拟基于VR技术架构,通过高仿真、高自由度的地震灾场情境建构,研发面向特大地震灾情的应急救援实训系统;通过预测试与后测试对照试验,评估被试在地震灾害救援理论认知、操作技能及救援策略应用等3方面的表现,以期突破传统实训危险性大、成本高和难以量化的局限,提升整体救援队伍的专业化水平、行动效率和决策的精准化程度。

1 地震应急救援实训系统设计

1.1 实训系统框架搭建

采用3D Max建模,基于Unity 3D开发引擎研

发高仿真灾场情境,通过环境建模、行为设定和人机交互算法研发,实现地震灾害认知强化、实训演练和操作评估等功能^[8-10]。实训系统架构逻辑和层级设定如图1所示。

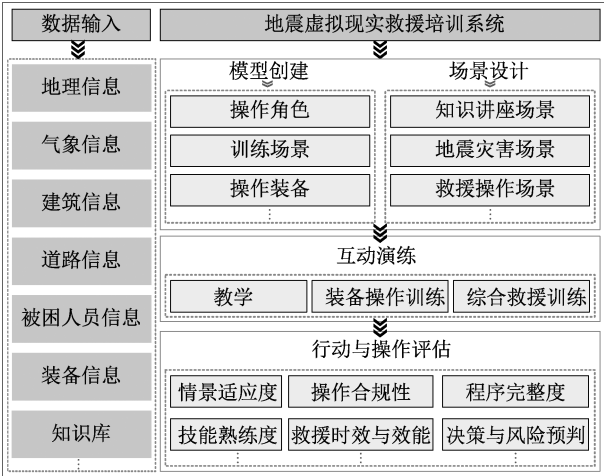


图1 整体系统架构

Fig. 1 Overall system architecture

1.2 实训系统场景设计与模型建立

实训系统场景设计要求操作逻辑的一致性与信息层级的清晰性,所有交互控件均按照装备的参数性能和操作规范设定,灾害信息的可视化遵循《图形符号 安全色和安全标志》(GB/T 2893.4—2013)要求。模型建构采用3D Max的高精度场景模型纹理、Unity引擎的光照粒子系统引擎进行集成、渲染和交互逻辑设定,通过设计多层级的复合场景,实现灾场认知-方案解析-决策执行的全链路应急救援实训目的。核心训练场景包括以下3个方面:

1) 知识讲学场景。采取图文、视频结合3D全景互动形式,讲习结构损伤识别、灾情研判和应急救援行动理论等,将抽象知识理论转化为可交互的动态知识模型。

2) 地震灾害场景。包括原生灾害与次生灾害场景, 实现地震致灾机制和灾场表征的精准表达。

3) 救援行动全流程交互场景。通过不同人物角色设定, 涵盖了从应急响应程序启动开始到行动结束的全流程交互情境。较大程度还原了突发灾情的时效性和基于灾场表征研判的行动逻辑设定。

室内外地震灾场情境设定如图 2 所示。城市地理信息模型的建构包括城市区域建筑物、道路、市政设施、绿地等主要空间元素和地震灾场的建筑倒塌废墟、结构坠物等。通过运用 Abacus 有限元分析工具开展一系列典型算例的地震作用下连续倒塌模拟试验, 从倒塌试验结果中甄选典型的结构倒塌形态及其结构破坏特征作为场景建构母本, 生成高仿真度的三维模型动画场景。墙体开裂、楼梯坍塌等 12 种涉及到操作互动的特殊灾场节点, 通过 Shader Graph 材质破碎系统和预烘焙物理破坏动画预置, 实现了不同处置方式对应的多样化场景结果链路。

实训系统中预设的救援装备库参考了当前主流装备的真实参数和特性, 如红外生命探测仪的低穿透性、电磁波探测仪在实验室特殊空间的电磁屏蔽

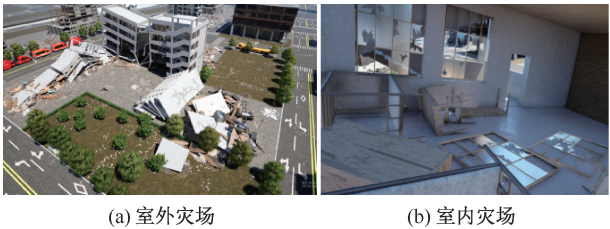


图 2 地震灾场情境设定

Fig. 2 Earthquake disaster scene setting

效果、液压顶撑装置的荷载参数等。人物角色设定则集成标准动作数据, 通过骨骼动画状态机实现攀爬、匍匐、托举等 23 种救援姿态的平滑切换。粒子系统生成尘土弥漫、管道爆裂等效果。音效库整合余震轰鸣、求救呼喊、救援机械声等经典采样音频, 结合空间音频技术实现声源定向定位。通过启用 NVIDIA PhysX 物理引擎, 设置建筑构件的刚体关节约束与破碎阈值, 当操作失误时可能触发渐进式坍塌, 并构建“主震-次生灾害”事件触发器, 设定有毒物质泄漏、漏电、火灾等链生或次生灾害触发场景。此外, 还有天气、照度、风向、降雨、能见度等环境条件自定义设置模块, 系统场景设计如图 3 所示。



图 3 系统场景设计

Fig. 3 System scene design illustration

1.3 实训系统功能模块设计

1.3.1 地震灾场仿真模块

地震灾场仿真模块涵盖灾场情境仿真、行动模块仿真以及人员装备参数仿真 3 项核心内容。

灾场情境仿真根据目标场景的致灾机制及其灾场表征, 设定灾场空间的视觉效果和物理联动逻辑。文献[11-12]通过钢筋混凝土结构连续倒塌试验, 研究了建筑结构在地震动作用下失效倒塌过程及倒塌后的空间形变规律和稳定性特征, 提出不同倒塌模式、存活空间分布形式与决策行为的过程关联要素及其机制。其中, 建筑倒塌场景模型的构建包括基本完好、倾斜式倒塌、正向倾覆、侧向倾覆和楼梯间解体等结构倒塌的经典类型, 利用 3D Max 预设关键承重构件的断裂动画关键帧, 在 Unity 中关联 Havok 物理引擎废墟堆叠的接触参数与稳定性阈

值; 地表破裂场景融合地理信息系统地质断层数据生成道路错位、地裂缝渐进扩展过程及土壤液化现象的黏滞流体特效。次生火灾场景建构则基于流体动力学算法计算火势蔓延路径与速率, 通过 Unity 粒子系统动态渲染火焰高度与烟雾扩散浓度。所有灾害情境均内置动态事件触发器, 形成原生破坏-次生衍生-灾害叠加的闭环演化^[13]。

行动仿真模块提取人员的关键生理指标, 实现高危险性救援行动的标准化流程约束与实时容错反馈。如不同天气和环境设定下的行走和跑动速率、步幅影响, 离火源过近时的烫伤影响、低氧毒害环境下行动失调等。系统采用双层交互架构, 从教练监管层面提供可调取的三维电子沙盘界面, 动态标注救援人员的位置、伤员分布热力图、单兵行为状态; 微观操作层则通过第一人称视角还原真实作业环

境,通过设立物理容差与时效阈值为教练评估提供量化参考。如液压顶撑作业需在虚拟装置界面监控顶升角度与支撑力均衡指数,违规操作触发残骸二次坍塌的预制动动画;破拆救援集成设备振动反馈算法与残渣飞溅粒子效果等。

人员装备参数构建了人-装备-环境状态联动的动态演算模型。人员生理参数系统依据虚拟角色运动状态实时计算生命值;基础代谢按时间线性衰减、负重奔跑按装备重量加速消耗、高温/毒气环境触发生命值非线性下降。防护装备效能与操作规程深度绑定;氧气呼吸器界面动态显示余量占比(常规作业消耗为1.2%/min),深呼吸操作触发消耗速率倍增(峰值达3%/min)并激活声光警报。救援装备参数强调物理反馈真实性;生命探测仪界面将声波/红外信号转化为频谱图与热源定位坐标(精度受手持端稳定性约束,晃动幅度>30°时定位误差增加40%);液压剪操作时依据3D Max模型定义的钢筋物理属性实时计算油压阻力,通过力反馈手套输出对应震颤强度。阈值设定与算法编写中,根据钢筋模型的横截面积、材料强度等物理属性,结合剪切位置 P_s 和钢筋剪切力 P_l 计算油压阻力 P_y ,计算公式为 $P_y = P_l/P_s$ 。将油压阻力 P_y 线性映射为力反馈手套执行器的输出强度和振动模式,手套感知上限设定为100 MPa,超过时设定为最大输出强度。装备损耗机制深度关联训练成本控制:破拆工具连续作业超过额定时长(如液压扩张器持续15 min)触发设备过热报警,强制进入冷却等待期。

1.3.2 教学与培训模块

采用 Visual Studio 集成开发环境下的 C# 语言架构动态内容编译系统,定制化开发地震救援 VR 培训课程。实训系统将 VR 培训定位为传统实操训练的战略性补充载体,其课程体系通过三维强化机制——强化知识迁移效能、支持技能转化路径、提升认知负荷管理——深度融入现有培训生态,确保教学内容与《应急救援员国家职业技能标准》(GB/T 29645—2019)、《国家地震应急救援培训大纲(GB/T 38215—2019)》等标准的能力矩阵无缝衔接。教学与培训模块分为3个部分,即政策与理论学习、专业装备操作培训和综合救援操作培训科目安排见表1。

政策与理论学习课程旨在为参训人员提供地震灾害相关知识,包括地震灾害的特点、地震应急救援的基本原则、救援安全策略、建筑结构知识、卫生防疫常识、心理健康知识等内容。教学内容通过文本

表 1 系统教学与培训科目

Table 1 Teaching and training subjects of the system			
训练场景	科目分类	具体科目	
知识讲学场景	政策与理论教学	地震灾害的特点、地震应急救援的基本原则、救援安全策略、建筑结构知识、卫生防疫常识、心理健康知识	
地震灾害场景	装备操作与技能训练	个人防护装备的使用、救援工具的操作、障碍物移除技术、支撑技术、破拆技术、顶撑技术、绳索救援技术等	
全流程救援操作场景	综合救援训练	侦察	建筑物破坏情况侦察、结构构件破坏侦察、环境侦察
		搜索	人工搜索、搜救犬搜索
		营救	营救方案制定、营救工具使用、不同场景营救 医疗救助:检伤分类、止血包扎、伤员转运

形式(如对话框)呈现,并结合互动式问答环节,将地震灾害相关知识融入3D情境化学习场景中,克服了传统教学模式中常见的单调性问题,使参训人员以更高参与度和接受度掌握专业知识内容。专业装备操作与技能课程针对常见及新型专用救援装备的使用原理及具体操作技术开展培训,为综合救援进阶训练做能力储备。专业装备操作培训场景如图4所示。综合救援训练科目实现了全过程、全要素的训练场景,分为灾场侦察、搜索行动、营救行动3部分。灾场侦察侧重于利用技术装备收集灾场危险源信息、灾场环境信息、建筑损坏情况、标记进入撤出路径等;灾场搜索则通过人工、搜救犬及仪器等方式快速定位并标记被困人员位置;营救人员根据被困者位置及灾场情况,合理制定营救方案,并通过钻孔、破拆、顶撑、重物牵引等适用技术,与结构技术人员、医护人员等其他分队协同,在不引发次生灾害的情况下维持幸存者生命体征、救援脱困。为适配初级参训者的认知负荷与技能习得曲线,部分科目嵌入了标准化操作流程及灾害情境信息导引系统,通过人机交互界面的实时指令推送与分步操作指引,推动新手能力的快速建构。鉴于初级参训者在高仿真灾场场景及高强度救援任务中出现感官过载性焦虑,教学模块中还植入了渐进式应激脱敏训练,包含3个递进维度:①多轮次场景复现强化灾难环境适应性;②基于认知行为疗法原理设计恐惧抑制训练模块;③聚焦地震灾场特有情境的心理-行为耦合训练模式,模拟余震、结构二次坍塌等动态风险下,锤炼应激决策能力与操作肌肉记忆。

1.3.3 行动与操作评估模块

行动与操作评估模块旨在通过系统性、多维度

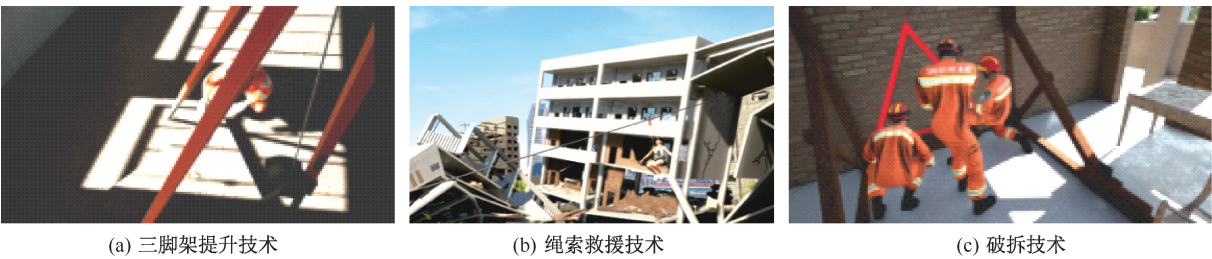


图 4 专业装备操作培训场景

Fig. 4 Professional equipment operation training scene

的检验机制全面评估培训成效,涵盖了理论安全知识测评与实操技能评估 2 大核心版块。理论知识考核采用自动化判分机制完成,实现对地震成因、预警原理、建筑结构风险认知及安全规程等内容的量化评分。操作能力评估则采用双重路径:①系统通过人机交互界面实时捕获学员操作数据,基于预设逻辑进行动作正确性分析;②培训教员结合直接观察或回放记录,依据标准化评估量表人工评分。

评估标准体系构建了多层级指标,充分考量了救援角色职能差异和场景差异性要素。具体标准包括:①情境适应度:针对不同震级、建筑坍塌类型及次生灾害的动态响应能力;①操作合规性:对标国际地震救援操作标准的合规性;③程序完整度:关键流程执行完整性;④技能熟练度:工具操作精度、团队协作时效性;⑤救援时效与效能:结合响应时间、决策优化度及任务达成率综合量;⑥决策与风险预判能力:灾害演变全流程和动态过程的风险评估准确性。

实训系统通过全流程数字化归档,记录受训者的决策逻辑链与操作行为轨迹。多视角回溯机制支持演练导演端(全局态势视角)与系统控制端(第一人称操作视角)的协同复现,回放数据包括分秒级事件时序日志、空间位移路径及环境交互记录。进一步引入动态权重调整算法,依据灾害场景复杂度自动校准评分权重,并基于机器学习模型对历史数据挖掘,生成个人能力短板分析报告,实现评估结果对后续训练的精准反馈。

2 人机交互设计

地震应急救援作业因涉及异构化装备协同及多模态场景迁移,界面架构需严格遵循人机工效学准则,确保操作逻辑的直观性并兼容交互路径的鲁棒性^[6,14]。该系统采用下一代用户界面(Next-Gen User Interface, NGUI)框架(基于 Unity 引擎的 UI 插件)构建交互界面,通过模块化组件集成实现核心

功能,如画布、文本、图像和按钮,分别支撑创建通知提示、交互式问答、按钮控制和场景切换功能。交互界面如图 5 所示。



图 5 部分交互界面示例

Fig. 5 Some interactive interfaces

技能培训依托交互式情景化学习机制实现,通过集成 VR 硬件设备构建沉浸式训练环境。空间定位系统实时捕捉受训者空间坐标,头戴式显示器同步解析头部六自由度位姿数据并动态调整视觉呈现视角。当培训人员选定训练科目进入灾害情境后,系统依据界面导引启动交互协议,典型操作包含:①地震废墟现场灾情勘测;②受困目标定位与生命状态评估;③适配性救援装备调用及实施营救行动。操作过程中,手持控制器输入指令触发系统碰撞检测算法,实时采集救援工具的空间指向精度、作用速度与操作频次等关键参数。系统通过比对装备操作规范阈值判定救援成败,达标判定成功;未达标则触发失败警示并推送修正策略。为确保多装备协同操作、跨场景转换及复杂流程的逻辑一致性,系统开发了结构化动作规则库并嵌入核心数据库,实现协议执行的标准化管

3 实训系统可使用性评估试验设计

系统架构完毕后,需执行系统性验证与优化流程以识别潜在缺陷,保障系统稳定高效运行。系统的可使用性评估聚焦于效能与满意度,二者共同构成衡量系统质量的关键指标。既往研究表明:效能指标可通过控制变量法量化分析对照试验,而满意度则需依托试验后结构化问卷实施评估^[15-17]。采

用 2×2 准试验设计框架,将 VR 培训系统与传统多媒体课件培训方法对比,其中试验组/对照组设置为组间变量,预测试/后测试时间节点作为组内变量。在此基础上,通过多维度的主观反馈问卷探究被试体验,具体涵盖 2 方面:

- 1) 检验被试知识水平提升效能及知识迁移效率是否显著优于传统的教材培训模式。
- 2) 分析用户操作过程的主观体验维度及其对培训效果的满意度评价,据此形成系统迭代优化的实证依据。

3.1 被试招募

在专业应急救援训练中心开展试验,被试经由公开招募程序征募,其纳入标准涵盖:①健康状况良好且无重大疾病史;②未接受过地震灾害救援系统化培训;③缺乏实际灾害救援经验。最终入选的 20 名志愿者(男性 14 人,女性 6 人)年龄跨度为 22~35 周岁(26.0±3.3),经体检确认无晕动症、低血糖及抑郁焦虑等身心疾患,符合试验安全要求。基于人口学特征均衡原则,通过性别与年龄的匹配将被试随机分配至试验组及对照组(各组 10 人),确保组间基线可比性。

3.2 试验测评工具

培训后被试的知识获取与迁移成果,可以评估 VR 实训系统作为教学工具的有效性。同步采集被试对系统交互体验的主观感知及其培训价值认同度,以综合评估用户满意度。所用测评工具体系包含 3 类结构化方案:

- 1) 知识掌握度评测采用预测-后测标准化试卷。其编制依据《国家地震应急预案》《应急管理部地震救援培训大纲》及《应急救援术语》(GB/T 38565—2020)等文件,并经领域专家完成信效度检验。试卷设计为政策理论(40%)与技能策略(60%)双模块,其中技能策略模块涵盖个人操作技能与指挥决策能力子维度。包括 15 道单选题(2 分/题)、10 道多选题(3 分/题,错误选项不扣分但部分正确扣 1 分)和 20 道判断题(2 分/题),总分 100 分且限时 60 min 完成。预测试、后测试卷考试内容通过试题顺序随机化与题干表述方式差异化消除偏差,最终以得分率体现被试能力变化。
- 2) 知识迁移考察被试在地震救援实战情境中的知识应用与团队协作能力。通过 7 段标准化救援流程视频构建生态效度测试环境,由主试团队投影播放并同步提出 28 项情境决策问题,如后续处置流

程、救援策略/位置/工具选择依据及团队协作与资源配置方案等。所有问题均映射培训模块核心知识,被试书面应答后由专家盲评正误,按正确率转换为百分制成绩。

3) 用户体验与满意度量采用事后问卷调查方法。鉴于现有 VR 专用量表因研究对象异质性难以直接移植,问卷基于 VR 体验的重要影响因素,采用五级李克特量表(1=强烈反对,5=强烈同意)捕获系统易操作性、沉浸感及培训价值认同等维度,其结构化反馈为系统优化提供实证依据,见表 2。

表 2 调查问卷题目设计

Table 2 Questionnaire design

题号	问题	调查因素
Q1	我认为我眼中的 3D 画面真实感很强	真实感
Q2	我沉浸、融入于虚拟环境中	存在感
Q3	对比课件培训,我更喜欢使用 VR 系统进行训练	动机
Q4	对比课件培训,我认为使用 VR 系统进行训练更有趣	趣味性
Q5	对比课件培训,我认为使用 VR 系统进行训练更有助于提高认知、技能水平	感知实用性
Q6	学会操作和使用这个 VR 系统对于我来说并不困难	感知易操作性
Q7	总体来说,我对本次 VR 训练体验成效感到满意	满意度(感知训练价值)

3.3 实训系统可使用性评估试验过程

被试经随机分组形成试验组(VR 组,被试人数 $n=10$)与对照组(教材组,被试人数 $n=10$)后,首先完成预测试基础评估。随后进入第 1 阶段干预:试验组依托沉浸式 VR 训练系统开展自主学习,被试通过人机交互界面自主操控课程模块完成技能训练;对照组则采用基于培训大纲设计的同质化教材方案,通过多媒体数字课件(含真实案例视频库)进行标准化学习。为确保培训内容等量性,2 组课程均参照《国家地震应急预案》《应急管理部地震救援培训大纲》及《应急救援术语》(GB/T 38565—2020)构建知识体系。培训周期设置为 5 天(每天 30 min),时长设计既满足内容承载需求,亦预留 VR 设备适应性缓冲期。阶段培训结束后同步实施即时后测,而知识迁移测试则延迟至 2 周后执行以考察记忆巩固效果。

第 2 阶段采用交叉干预设计:原对照组转换为 VR 训练模式,试验组则切换至教材学习模式。双

阶段培训全部完成后,所有被试统一提交 VR 系统体验量表。需特别说明的是,VR 组介入前均需完成标准化准备流程:①观看设备操作指南视频;②进行≤5 min 的场景试练;③若试练中出现晕动症等显著生理不适(按照 VR 疾病量表≥3 级)则终止 VR 介入;④近视被试可自主选择是否佩戴眼镜以保证视觉清晰度^[18-19]。

3.4 试验数据分析

运用 SPSS 25.0 软件对所收集的数据作系统的统计学处理。分析前进行数据方差齐性检验及正态性检验(采用 Shapiro-Wilk 检验法),以确保数据的有效性。通过重复测量方差分析训练方式对知识获取效果的影响。根据采集的满意度问卷调研数据,对量表得分分布状况进行频数统计分析,并利用单样本 T 检验来评估得分与中立态度(设定为 3 分)的差异性。采用 2 独立样本 T 检验方法比较 2 组数据在知识基线水平、知识迁移测试结果、二分变量(性别、组别)下的量表得分等数据均值上的差异。依据 Cohen's *d* 值来计算效应量,0.2~0.5 为小效应,0.5~0.8 为中等效应,0.8 以上为大效应。当统计检验的显著性水平取 0.05 或 0.01 时,置信区间分别为 95%和 99%。

4 系统可使用性评估试验结果分析

4.1 VR 实训系统培训成果

所有被试均在规定时间内完成预测试、后测试及知识迁移测试。培训结束后,通过预测试和后测试卷的分数以及知识迁移测试结果衡量被试的培训效果。图 6 显示了试验组(VR)和对照组(教材)在预测试、后测试卷中不同类型考试内容的总得分和分项得分,图 7 显示了知识迁移测试结果。

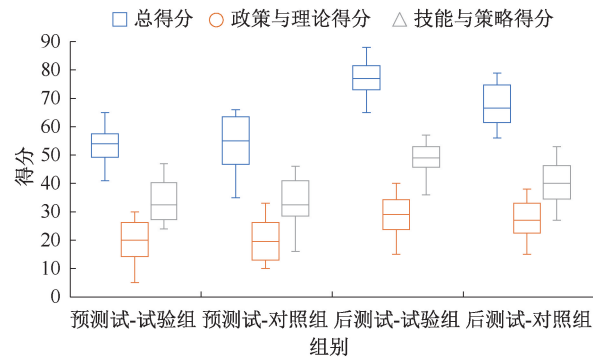


图 6 试卷分析结果

Fig. 6 Test paper analysis results

从图 6 看出,试验组与对照组在预测试、后测试

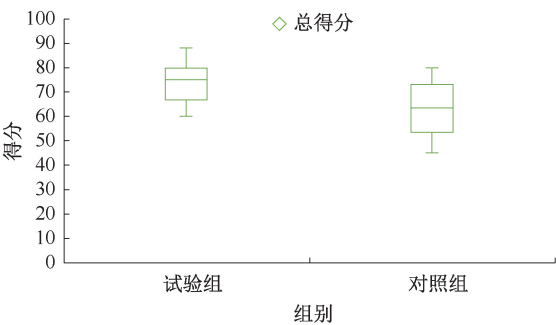


图 7 知识迁移测试结果

Fig. 7 Knowledge transfer test results

的得分变化趋势相似,后测试分数相比于预测试均有明显提升。根据 2 独立样本 T 检验,结果表明:2 组被试在预测试阶段的成绩均值未呈现出显著性差异,进一步证实了 2 组被试在接受训练之前具备相当的基线水平,即 2 组在初始状态下具有同质性。重复测量方差分析结果中时间主效应结果显著(组间方差与组内方差比值 $F = 62.605$, 显著性 $P < 0.01^{**}$, 效应强度 $\eta_p^2 = 0.777$), 组间效应结果不显著($F = 2.709$, $P = 0.117$, $\eta_p^2 = 0.131$), 时间与组别交互作用不显著($F = 4.081$, $P = 0.059$, $\eta_p^2 = 0.185$)。表明试验组、对照组的预测、后测成绩均有显著差异,可推断 2 种训练方式均有效提升了被试的知识水平。基于预测、后测成绩的差异,试验组的提升效应量(Cohen's *d* 效应量 $d = 3.43$) 高于对照组($d = 1.47$),说明试验组在经过 VR 训练后的知识水平提升效果优于对照组。进一步分析试卷中政策与理论、技能与策略 2 项考察内容的得分率。经过重复测量方差分析,发现时间与考查内容交互效应显著,后测试相比于预测试 2 项考察内容的得分均显著提升($P < 0.01^{**}$)。为研究组别之间的差别,通过 Cohen's *d* 值算得试验组在技能与策略方面的提升效应($d = 2.16$) 高于政策与理论($d = 1.09$);而对照组则相反,在技能与策略方面的提升效应($d = 0.81$), 低于政策与理论($d = 0.95$)。通过 2 独立样本 T 检验分析结果表明:后测试中试验组在技能与策略方面的得分显著高于对照组($P < 0.05^{*}$, $d = 1.23$),而在政策与理论方面的得分不显著高于对照组($P = 0.72$, $d = 0.20$)。对于知识迁移测试结果(图 7),根据 2 独立样本 T 检验,试验组的分数(74.2 ± 9.6) 显著高于对照组(63.3 ± 11.8) ($P < 0.05^{*}$, $d = 1.0$),即经过 VR 系统训练后,被试在知识迁移方面的表现更好。进一步进行相关性分析,发现 2 组知识迁移的结果与后测成绩、技能与策略

的得分率显著相关($P<0.01^{**}$)。由此推断被试对测技能与策略类程序性知识的掌握程度会影响知识迁移表现。

实证数据表明:试验组接受 VR 干预后,其在技能与策略维度的后测得分率呈现显著增益($P<0.05^{*}$),表明 VR 训练对程序性知识内化具有正向促进作用。这种提升可归因于 VR 训练的 3 重认知优势:沉浸式人机交互通过多模态感官通道降低认知负荷,加速操作规则的理解;团队协作任务设计强化了救援流程的协调逻辑记忆;复杂情境模拟则推动陈述性知识向程序性知识的转化,从而优化迁移效能。尽管当前干预周期较短(总学时 150 min),但纵向推演表明:持续实施 VR 训练可通过高频次

场景复现,促使救援技能形成肌肉记忆与自动化响应模式。这意味着当面临真实地震救援任务时,可更迅速地做出反应,进一步提高处置效率和准确性。值得注意的是,VR 组在训练参与度上较传统训练组更高,内在机制在于:团队实时互动通过分布式角色任务增强责任绑定效应(如多人联机救援系统)激活深度参与行为。鉴于地震救援本质为高复杂性团队作业,这种高参与度训练模式经证实可提升危险情境下的处置效能,印证了沉浸式协作训练对应急响应能力的结构性优化价值。

4.2 VR 实训系统主观评价

统计 20 位被试对问卷中 7 个问题的态度反馈,结果见表 3。

表 3 调查问卷频数统计
Table 3 Frequency statistics of survey questionnaires

题目	频数统计(被试总数 $N=20$)					均分
	非常同意	同意	一般	不同意	非常不同意	
Q1	7	10	2	1	0	4.15±0.81
Q2	10	7	3	0	0	4.35±0.74
Q3	12	7	1	0	0	4.55±0.60
Q4	15	5	0	0	0	4.75±0.45
Q5	8	10	2	0	0	4.30±0.66
Q6	7	7	5	1	0	4.00±0.92
Q7	10	9	1	0	0	4.45±0.60

评价结果表明:被试对 7 个问题的整体态度积极、正向,显著高于中立态度(3 分)($P<0.01^{**}$, $1.1\leq d\leq 3.9$)。不同组别、性别的问卷得分无显著性差异。存在感 Q2 是评价 VR 体验中最重要的因素之一,且不同人在 VR 体验中对存在感的评价差异较大。它与控制的直接性、画面真实感、虚拟环境中的移动感等多个因素有关,较强的存在感能增强 VR 训练过程的趣味性 & 训练动力,进而产生更好的训练效果。通过计算累计频率(同意、非常同意),85%的问卷表示该系统具有较强的存在感、沉浸感(Q2)。Q3、Q4、Q5 为对比式提问,分别有 95%、100%、90%的问卷反馈相比传统方式,该 VR 系统具有更强的训练动机、趣味性 & 实用性,且试验组的 10 名成员在预测试-后测试卷、知识迁移测试中证实了经过 VR 训练后,认知、技能水平具有显著提升,且效果比对照组更好。70%的问卷表示该 VR 系统易于使用 & 操控(Q6)。最终,95%的问卷反馈对该 VR 系统训练的整体成效感到满意(Q7)。对于部分被试认为该系统的感知易操作性不高(Q6),主要由于手柄容易误触、硬件设备沉重等。操作难

度大会降低使用趣味性,进而影响训练效果、用户体验感 & 满意度。故未来工作可相应提升系统画面的沉浸感、操作的流畅性以及硬件装备的舒适度。

5 结 论

- 1) 该实训系统从地震灾场仿真、教学与培训与行动 & 操作评估模块 3 方面,提供了“沉浸式技能内化-多场景决策训练”一体化解决方案,可为地震应急救援训练提供可迁移的技术范式。
- 2) 针对传统训练模式 & VR 训练模式,开展了知识水平提升效能 & 知识迁移效率对比试验,实证研究表明:接受该系统训练的被试在即时知识掌握度 & 2 周后知识迁移效能指标上均显著优于传统训练组($P<0.05^{*}$, $d=1.0$);主观体验评估同时证实被试对于该系统满意度较高,印证了系统的适用性($P<0.01^{**}$, $1.1\leq d\leq 3.9$)。
- 3) 研究重点在于提出地震应急救援实训系统的建构逻辑 & 实训应用的知识迁移成效分析,而在针对专业救援人员职业技能提升效果 & 长期成果保留方面未来还需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] 李文渊, 冯博. 中国地震灾害救援研究的可视化计量分析与展望: 基于 CiteSpace 知识图谱[J]. 地震工程学报, 2025, 47(6): 1435-1446.
LI Wenyuan, FENG Bo. Visual bibliometric analysis and prospects of research on earthquake disaster rescue in China: a knowledge mapping study based on CiteSpace[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(6): 1435-1446.
- [2] 陆新征, 岳清瑞, 许镇, 等. 城市密集建筑区新型地震次生灾害研究进展[J]. 工业建筑, 2024, 54(2): 25-34.
LU Xinzhen, YUE Qingrui, XU Zhen, et al. A review on novel seismic secondary disasters in urban dense building areas[J]. 2024, 54(2): 25-34.
- [3] BORGERS F, VAN BOXSTAEL S, SABBE M. Is tactical combat casualty care in terrorist attacks suitable for civilian first responders? [J]. Trauma Acute Care Surg, 2021, 91(4): DOI:10.1097/TA.0000000000003337.
- [4] JACOBSEN N, LARSEN J D, FALSTER C, et al. Using immersive virtual reality simulation to ensure competence in contrast-enhanced ultrasound[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2022, 48(5): 912-923.
- [5] NIU Aifang, MA Huijuan, ZHANG Suofei, et al. The effectiveness of simulation-based training on the competency of military nurses: a systematic review[J]. Nurse Educ Today, 2022, 119: DOI:10.1016/j.nedt.2022.105536.
- [6] 杨文阳, 徐可欣, 闫辰祥. 基于 VR 的校园地震逃生沉浸式交互体验系统构建[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(5): 407-413.
YANG Wenyang, XU Kexin, YAN Chenxiang. Construction on VR-based campus earthquake escape immersive interactive experience system[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2023, 18(5): 407-413.
- [7] 王丽, 陈文涛, 关文玲, 等. 面向国家需求的应急技术与管理专业人才培养体系研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 9-16.
WANG Li, CHEN Wentao, GUAN Wenling, et al. Research on talent development systems for emergency technology and management majors to meet national needs[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 9-16.
- [8] 郭茂坤. 基于 VR 的特种灾害事故救援模拟训练模块及功能探析[J]. 消防界, 2021, 7(21): 53-54.
- [9] WANG Jing, LIU Tingting, LIU Zhen, et al. Exploring the influencing factors of wall-following behavior in a virtual reality fire evacuation game[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2022, 34(1): 1-15.
- [10] 李敏, 张世逊, 钱珣. 基于虚拟现实技术的地震演练系统设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2020(19): 26-30.
- [11] 孙澄, 范乐. 基于强震破坏模拟的中学教学区灾损信息模型建构研究[J]. 建筑学报, 2017(增1): 88-93.
SUN Cheng, FAN Le. Research on the development of the damage information model of teaching area in high school based on strong earthquake simulation[J]. Architectural Journal, 2017(S1): 88-93.
- [12] 范乐, 王燕语, 张靖岩, 等. 基于安全韧性分析的地震应急救援实训功能设计策略[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2020, 60(1): 9-17.
FAN Le, WANG Yanyu, ZHANG Jingyan, et al. Earthquake emergency rescue training function design strategies based on safety resilience evaluation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2020, 60(1): 9-17.
- [13] 文政, 张健钦, 田傲, 等. 基于热传递的 VR 粒子灭火算法及消防培训系统构建[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 157-165.
WEN Zheng, ZHANG Jianqin, TIAN Ao, et al. A VR particle fire-extinguishing algorithm based on heat transfer and firefighting training system construction[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 157-165.
- [14] FENG Zhenan, VICENTE A G, SPEARPOINT M, et al. A sequence analysis of behaviors in immersive virtual reality for indoor earthquake and post-earthquake evacuation[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022: DOI: 10.1016/j.ijdr.2022.102978.
- [15] CHANG Shaochen, HSU T C, CHEN Yenni, et al. The effects of spherical video-based virtual reality implementation on students' natural science learning effectiveness[J]. Interactive Learning Environments, 2020, 28(7): 915-929.
- [16] OU KL, CHU Shunting, TARNG W. Development of a virtual wetland ecological system using VR 360° panoramic technology for environmental education[J]. Land, 2021, 10(8): DOI:10.3390/land10080829.
- [17] LAN Gongjin, LAI Qiangqiang, BAI Bing, et al. A virtual reality training system for automotive engines assembly and disassembly[J]. IEEE Transactions on Learning Technologies, 2024, 17: 754-764.
- [18] 诸伟, 景臣. 虚拟仿真技术在消防员心理训练中的应用[J]. 消防界, 2021, 7(2): 41-42, 44.
- [19] 汤华清, 辛勃呈, 赵金道, 等. 基于 VR 技术的心理适应性训练系统设计与实现[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(4): 541-544.
TANG Huaqing, XIN Bocheng, ZHAO Jindao, et al. Design and implementation of psychological adaptability training system based on VR technology[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(4): 541-544.

作者简介: 侯晓梅 (1973—), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 工程师, 主要从事应急救援资源平台建设和管理, 应急救援队伍指挥与调度、应急救援人员能力建设等方面的工作。E-mail: 648435492@qq.com。

