

基于虚拟现实技术的隧道火灾应急培训系统构建和研究*

刘敦文^{1,2}, 贾昊燃^{1,2}, 翦英骅^{1,2}, 邱丰恺^{1,2}, 颜辉³

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 安全理论创新与促进研究中心, 湖南 长沙 410083;
3. 衡阳市城市建设投资有限公司, 湖南 衡阳 421000)

摘要: 为了解决现实中隧道火灾应急救援演练成本高、危险性大、适应能力弱的问题, 基于建构主义安全培训理论, 以3Dmax和Unity3D为技术手段, 构建隧道火灾应急救援培训系统。系统功能下设计划模式、训练模式和底层模式, 对应开发6个培训模块和15个场景科目, 实现在高沉浸性的虚拟环境中对隧道救援人员、管理人员进行火灾应急培训。研究表明: 该系统可以提高人员参加应急救援演练的积极性, 降低应急演练成本, 使学员在安全真实的虚拟环境中熟悉救援设备使用方法, 增强学员处理事故场景的能力。

关键词: 建构主义; 应急救援; 火灾; 虚拟现实; 培训系统

中图分类号: X937; TU714

文献标志码: A

文章编号: 1673-493X(2019)-02-0131-07

Construction and research of emergency training system for tunnel fire based on virtual reality technology

LIU Dunwen^{1,2}, JIA Haoran^{1,2}, JIAN Yinghua^{1,2}, QIU Fengkai^{1,2}, YAN Hui³

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. Safety & Security Theory Innovation and Promotion Center (STIPC) of CSU, Changsha Hunan 410083, China;

3. Hengyang Urban Construction Investment Limited Company, Hengyang Hunan 421000, China)

Abstract: In order to solve the problems of high cost, high risk, poor authenticity and weak adaptability of emergency rescue drills on the tunnel fire in reality, a training system for the emergency rescue of tunnel fire was constructed by using the technical means of 3Dmax and Unity 3D based on the safety training theory of constructivism. The system functions included the experience mode and training mode, and six training modules and fifteen scene subjects were developed accordingly, so as to realize the fire emergency training for the tunnel rescuers and managers in a highly immersive virtual environment. The results showed that the system could effectively improve the enthusiasm of people to participate in the emergency rescue drills, reduce the cost of emergency drills, enable people to familiarize themselves with the usage methods of rescue equipments in a safe and realistic virtual environment, and enhance their ability to handle the emergency accident scenes.

Key words: constructivism; emergency rescue; fire; virtual reality; training system

0 引言

随着我国隧道事业的发展, 事故数量逐渐增加。2011年, 甘肃省某公路隧道中, 2辆重型油罐车发生追尾事故, 车内近40 t的化学易燃品发生爆炸, 造成4人死亡; 2014年, 山西省晋城某高速公路隧道内, 2辆甲醇运输车相撞引发隧道内部大火, 造成直接经济损失8197万元^[1]; 2015年, 上海外环隧道发生1起5车连续

追尾事故, 导致1辆轿车起火, 2人死亡。有关资料表明, 国内隧道1 km里程每经过5 000万辆车就会发生1场火灾。隧道火灾形势严峻, 针对火灾的应急救援培训刻不容缓。

近几年各类应急培训基地建设工作不断推进, 例如: 2008年, 四川电力公司创建电力应急培训基地; 2015年, 天津市应急培训基地初步实现应急救援指挥协调仿真模拟^[2]; 2017年, 新疆电力公司完成我国首例高空救

收稿日期: 2018-05-10

* 基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项(2017zzts629)

作者简介: 刘敦文, 博士, 教授, 主要研究方向为隧道安全管理。

援应急培训。但应急基地存在辐射范围有限、建设成本高等问题,迫切需要辐射范围广、成本低的“新型应急救援基地”。虚拟现实技术^[3-4](以下简称VR)可以创造出高沉浸性、交互性、联想性的虚拟环境,具有互联网传播性、低成本演练、高效信息交互能力和趣味性的演练模式等特点,满足安全应急救援知识、技能的学习和培训要求。目前国内外已有相关研究,美国海军使用虚拟游戏实现化学气体攻击的战术培训^[5]; Backlund^[6]认为虚拟培训的协作模式利于队员高效把握自己在整个救援过程中的任务和角色;刘晓双^[7]搭建液氨泄漏虚拟应急培训系统,通过改变风向等参数实现对不同事故场景的模拟;黄仁东等^[8]基于虚拟技术构建了非煤矿山的虚拟安全培训系统。但虚拟现实技术应用于隧道火灾应急救援培训研究较少,虽有学者对火灾人群疏散演练进行情境化的展示^[9-10],但未能发挥该技术在培训中的交互能力。

基于此,本文从全新视角研究隧道火灾应急救援培训活动,依据虚拟现实技术在安全培训领域的6大优化

维度,提出隧道火灾应急救援培训系统的优化模型,借助VR虚拟现实技术开发隧道火灾应急救援培训系统,实现对“知识技能深化层”的虚拟现实化表达,即由3Dmax、Unity3D等关键技术完成场景元素建模、场景动画设定、虚拟平台第一人称控制、虚拟漫游、火灾场景虚拟再现,完成隧道火灾应急救援培训系统功能开发。

1 隧道火灾应急救援培训系统的优化模型

1.1 “VR+”建构主义安全培训模型定义

“VR+”建构主义安全培训的含义为:在建构主义^[11]理论的指导下,以安全培训知识技能的情境化为直接目的,以受训者为培训活动的中心对象,以受训者与受训者、受训者与培训者交互协作为主要培训途径,以现代计算机虚拟技术为培训实现手段,丰富受训者的安全知识,提高受训者的安全技能,增强受训者的安全意识,培养受训者良好的安全习惯,从而减少安全事故、人员伤亡与财产损失,保障企业生产安全的1种安全培训模式。建构主义安全培训的概念模型如图1所示。

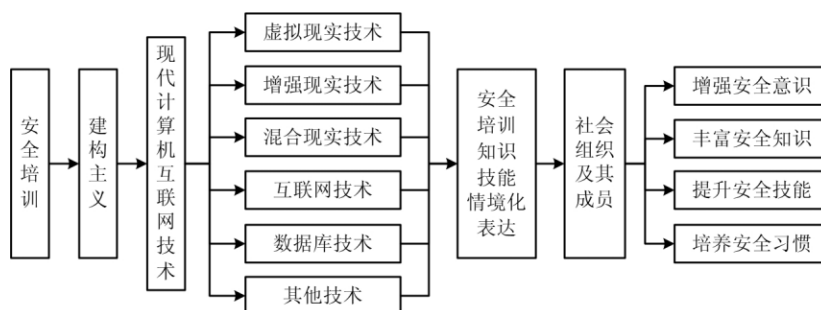


图1 建构主义安全培训的概念模型

Fig.1 Conceptual model of constructivist safety training

1.2 隧道火灾应急救援培训系统的优化模型

“VR+”建构主义安全培训模式强调受训者个体思维在情境化知识环境中的自我建构和发展,知识的同化离不开个体在知识环境中的实践活动,因此将隧道火灾应急救援培训活动抽象表达为3级“知识技能深化

层”^[12]:火灾事故情境设定层、学习实践层、意义建构层。利用VR的技术优势实现对每个层级逐步深入优化,得到隧道火灾应急救援培训活动的优化模型,并以此模型为基础,完成对隧道火灾应急救援培训系统模块的构建,如图2所示。

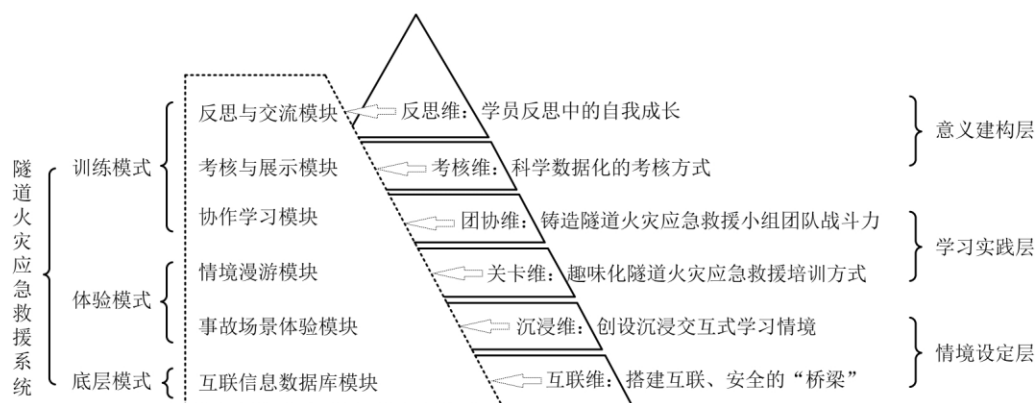


图2 隧道火灾应急救援培训系统的优化模型

Fig.2 Optimization model of tunnel fire emergency rescue training system

1) 互联维度: 搭建互联与安全的“桥梁”。桥梁一: 搭建安全培训者与受训者间的桥梁关系, 借助互联网扩大虚拟化安全培训平台的辐射范围, 满足对经济欠发达地区安全培训资源的优化配置; 桥梁二: 搭建高危性火灾应急演练中安全性与真实性的桥梁关系, 虚拟现实技术可以兼顾隧道火灾应急救援演练中受训成员自身安全感和体验真实感的双重需求, 解决了高危火灾救援培训中新学员对人身安全的顾虑。

2) 沉浸维度: 创设沉浸交互式学习情境。虚拟技术借助传感技术、计算机技术、3D 仿真模拟技术等, 生成集视觉、听觉、触觉、嗅觉等感觉一体化的虚拟环境, 依靠感官接触信息积累还原隧道火灾现场事故发生的起因、经过、结果, 实现学员对火灾现场的直观化认识, 进行事故隐患识别、事故原因分析、事故应急措施决策, 使抽象的隧道火灾应急救援应对预案转为应用情境, 提升安全培训的趣味性, 实现隧道火灾的虚拟化实操性培训, 提高学员的事故应对能力。

3) 关卡维度: 趣味化隧道火灾应急救援培训方式。以游戏关卡形式将学员带入火灾事故情境中, 引导学员主动思考特定应急场景中隧道火灾发生原因、处置措施和应急手段, 激励学员的安全应急思维能力。在指示性训练监督系统的帮助下, 学员通过实体设备如头戴式显示器、运动传感器与虚拟火灾场景中的火源、NPC 人群、车辆等对象交互, 主动寻求在隧道火灾现场的自救、救他方法, 确保火灾应急培训任务的成功完成。

4) 团协维度: 提升隧道火灾应急救援小组团队协作能力。虚拟技术为学员提供 1 个虚拟化的信息交流平台, 将个体学习模式转变为协作学习模式, 使得隧道火灾应急救援培训不再是单兵消防知识、技能学习, 而是

转化为协作学习环境中学员通过交流和协作实践共同进行的群体安全知识与技能建构, 提高小组成员的分工合作能力与团队协作能力。

5) 考核维度: 科学数据化的考核方式。基于虚拟技术的培训平台拥有强大的数据收集整理能力, 通过各类传感器实时收集学员训练数据, 存入场景学时记录数据库、集体训练环节小队评级数据库以及队长名单数据库, 优化训练成果的展示方式, 考核成绩作为学员训练成果的测评手段并设立荣誉嘉奖作为对学员认真学习的回馈和鼓励, 增强对学员的荣誉激励作用, 提高学员学习积极性和竞争性。

6) 反思维度: 有助于学员自我成长。相较于传统火灾应急救援培训形式单一所导致的被动性、灌输性等缺点, 借助 VR 技术实现的情景化训练让学员在虚拟的隧道火灾事故情境中真切体验到各项应急救援技能的重要性, 这种心理状态^[13]是对认知结构、学习过程的反省, 可持续重复学习, 实现自身定位由客体向主体的本质变化。

2 VR 关键实现技术

为具体实现隧道火灾应急救援培训系统的优化模型, 对 3Dmax 建模技术和 Unity3D 游戏引擎技术关键点进行阐述。

2.1 3Dmax 建模技术

3Dmax 是专业的三维建模软件, 内置几何体建模技术、多边形建模技术、平面图形挤压建模技术、面片建模技术、NURBS 建模技术。利用该技术对山体、隧道、应急火灾场景设备、人物角色进行建模, 结果如图 3 所示。



图3 3Dmax 建模示例

Fig.3 Modeling example of 3Dmax

2.2 Unity3D 关键技术

Unity3D 是一款三维渲染代码集合体,自带完备的粒子生成系统,可以模拟粒子的发射、运动和效果渲染。利用与其兼容的 Javascript 语言进行二次开发可以实现友好的交互效果^[14-15],系统通过 Javascript 语言编程控制实现粒子系统同物理设备的碰撞来反向控制粒子系统的发射,从而模拟对隧道内着火车辆的灭火过程,图 4 为车辆着火效果。



图 4 车辆着火效果

Fig.4 Vehicle fire effect

本系统为实现受训学员在虚拟世界中的漫游功能,调取 Unity3D 内置的角色交互控制代码序列,设置第一人称的交互角色预设体,通过键盘“w,s,a,d”4 个功能键实现对虚拟世界里交互角色的移动和旋转控制,并以代码编写植入方式实现鼠标^[16-18]对交互角色与目标物

体间距离的控制,同时为了避免出现物体彼此穿透的错误,在场景构建时虚拟物体均被赋予相应类型的碰撞器来模拟物体相互碰撞后的自然反应。

3 隧道火灾应急培训系统设计

本系统架构下分 3 大模式:体验模式、训练模式和底层模式。依据上述隧道火灾应急救援培训系统的优化模型框架中 6 大优化维度设定 6 大培训模块:情境漫游模块、互联信息数据库模块、事故场景体验模块、协作学习模块、考核与展示模块、反思与交流模块。体验模式帮助学员快速、真实、高效地认识隧道周边和内部环境,缺乏救援经验的新学员可体验高混乱、低能见度、高噪声的火灾施救现场;训练模式以趣味性的团体救援情节模拟作为训练形式,强化救援人员对救援设备使用的熟练程度,增强救援人员应对各种救援任务的反应能力,缩短应急反应时间,提高救援队伍的整体应急能力。

3.1 主要内容和系统架构

构建的隧道火灾应急培训系统对象为隧道管理人员、隧道应急救援人员,隧道火灾应急救援是 1 种实操性强的活动,单纯对受训者进行文件型的应急预案培训效果一般。因此,在建构主义培训思想的指导下,构建了基于虚拟技术的隧道火灾应急救援培训系统,致力于提高受训学员的环境熟悉度、设备熟练度、救援技能有效度。系统功能设计见表 1,系统程序运行框架如图 5 所示。

表 1 系统功能
Table 1 System functions

系统	模式	模块	科目或场景	功能
隧道火灾应急培训系统	体验模式	情境漫游模块	隧道周边环境漫游科目	熟悉隧道结构、环境和组成,增强决策系统观
			隧道内部结构漫游科目	
			隧道通风系统漫游科目	
		事故场景体验模块	人流拥挤体验科目	切身体验火灾现场,制定合理高效的应急救援预案
			烟雾环境逃生科目	
			爆炸冲击体验科目	
	训练模式	协作学习模块	消防设备操作场景	熟悉应急救援设备使用,掌握常见的应急救援技能,提高处理一般性应急场景的反应能力
			消防设备穿戴场景	
			医疗急救场景	
			隧道结构坍塌场景	
		考核与展示模块	人流疏散场景	
			爆炸源识别场景	
	底层模式	反思与交流模块	隧道火灾应急考核情节设定	对学员协作学习成果进行考核检验和成果展示
		互联信息数据库模块	心得体会大讲堂	学员根据自己训练成果进行心得体会分享和安全技能竞技,促进企业安全文化氛围建立
			安全技能竞技场	
				实现培训结果数据保存和共享

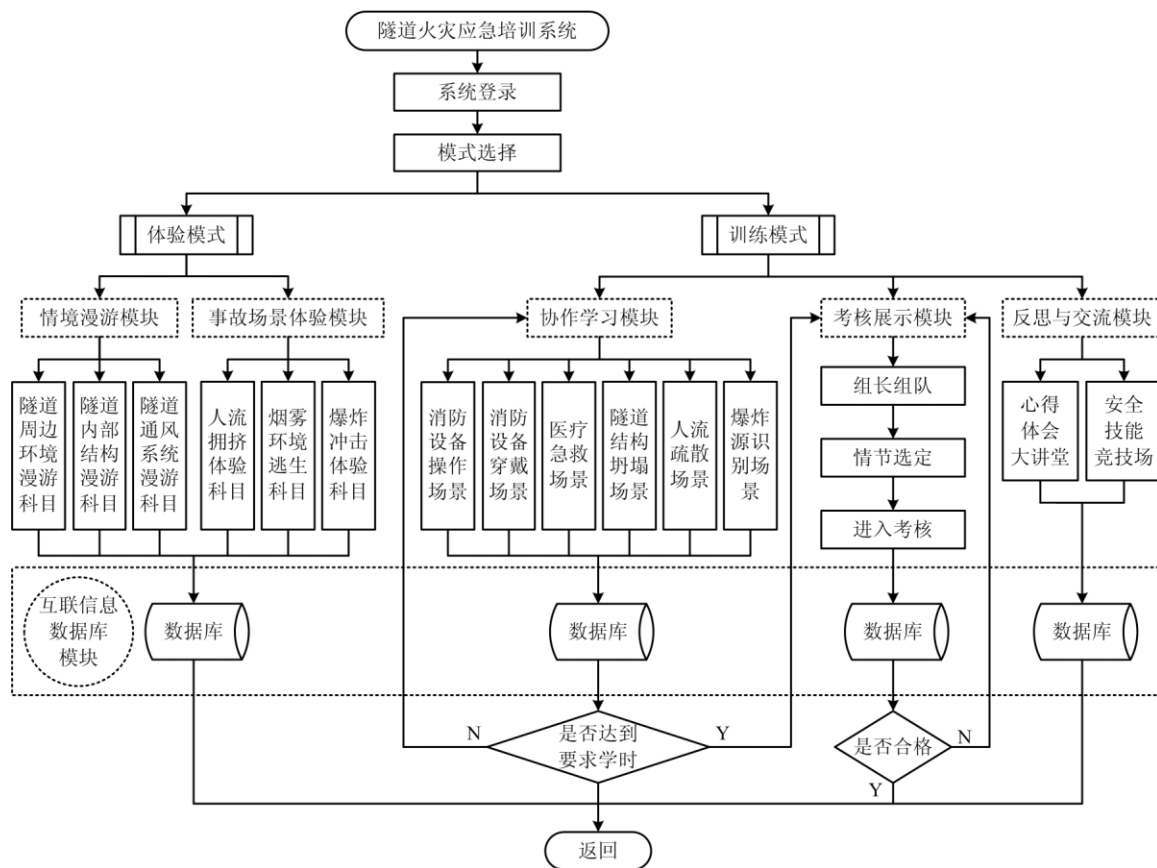


图5 系统构建框架

Fig. 5 System construction framework

3.2 体验模式

体验模式帮助学员建立全局性、系统性、适用性的决策观念,学员在虚拟情境化的学习环境中主动发现场景中存在的安全问题并做出应急救援决策。该模式由情境漫游模块和事故场景体验模块组成,情境漫游模块下设隧道环境漫游项目、隧道内部结构漫游项目、隧道通风系统漫游项目;事故场景体验模块下设人流拥挤体验科目、烟雾环境逃生科目、爆炸冲击体验科目。

1) 在情境漫游模块中,学员以第一人称交互角色操作键盘方向控制键进行漫游体验,熟悉隧道在正常运行状态下内外部环境布置,例如周边建筑物的位置、距离、道路设施的分布、隧道走向、常年的自然风向、隧道通风系统位置、人行横洞位置等。在漫游学习过程中,系统界面上会出现文字介绍和语音教学提示,培养学员主动发现安全隐患问题和从整个环境系统出发做出合理、高效救援决策的能力。

2) 事故场景体验模块中设定针对特定安全培训领域的事故类型场景体验科目,设定了隧道火灾现场的典型事故场景科目:①烟雾逃生科目中,虚拟环境生成的烟雾能制造出低能见度的火灾现场环境效果,帮助经验不足的学员建立真实火灾场景下的视野直观感受,该科

目的训练解决了学员自身安全保障与火灾救援现场出勤的矛盾;②人流拥挤体验科目借助 Unity3D 的碰撞器设定、检测功能,完成交互角色模型碰撞器类型的赋予过程,使学员以第一人称进行奔跑逃生时能感受来自人流、车辆的阻碍碰撞效果,真实感受逃生路线的随机性、障碍性、拥挤性,为隧道管理者预估逃生时间提供直观的认识;③爆炸冲击体验科目通过对虚拟环境添加震动效果以及伴随的爆炸巨响完成科目设定,爆炸声和隧道主体结构震动会营造出危险、紧急、混乱的感受,培训学员的应急心理素质,锻炼学员在高压、高噪声环境中集中精力冷静处理事故的能力。图6为爆炸的场景特效。



图6 车辆爆炸场景

Fig. 6 Vehicle explosion scene

3.3 训练模式

训练模式中设定了3个模块:协作学习模块、考核与展示模块、反思与交流模块。

1) 协作学习模块:系统采用 Unity3D 兼容的 Itween 插件设定一系列学习场景,每个场景会自动讲解相关设备的操作方法和注意事项,提出操作要求并检测学员操作是否正确,当系统捕捉到学员正确的操作反馈后,自动跳转下一个学习场景。本系统现有开发的学习场景有消防设备操作场景、消防设备穿戴场景、医疗急救场景、人流疏散场景、爆炸源识别场景、隧道结构坍塌场景,图7为医疗急救场景。

2) 考核与展示模块:为模拟真实隧道火灾救援行动,本系统以3人为一队进行集中考核训练。队员利用学习到的应急救援知识与操作,依靠合作完成系统考核。



图7 医疗急救场景

Fig.7 Medical first aid scene

系统对小队整体救援效果做出“优秀、良好、不合格”3个等级的评价,将训练考核数据保存到底层信息模块的数据库,提示不合格的小队重新考核,具体情节设定如图8所示。

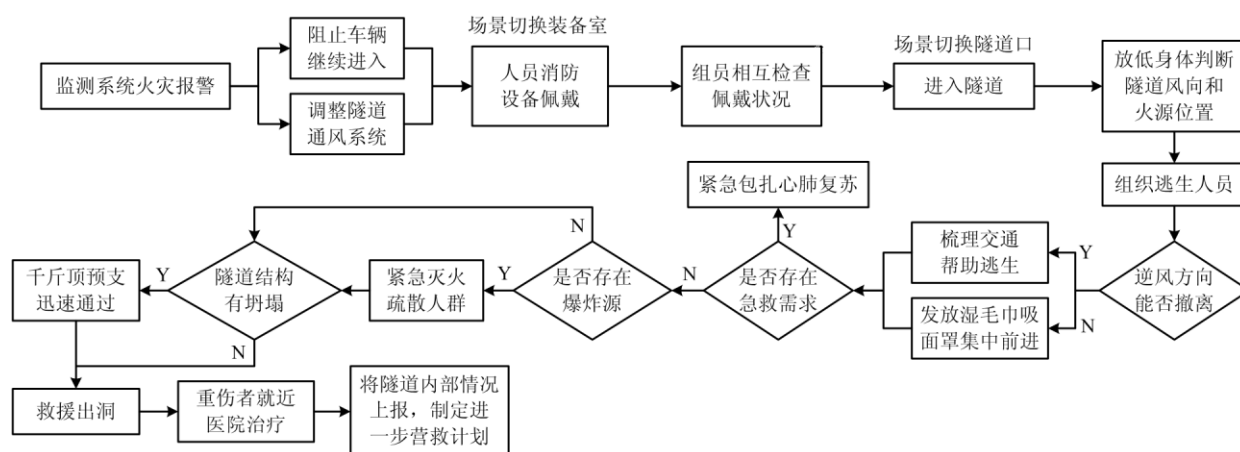


图8 考核情节设定

Fig.8 Assessment plot settings

3) 反思与交流模块:心得体会大讲堂和安全技能竞技场是学习交流的安全社区平台,促使学员在心得体会交流和安全技能竞技的过程中熟练专业安全设备的操作,正确、高效地处理各类应急场景的安全救援问题,提高应对真实火灾现场的能力,实现安全知识技能的强化和企业、社会安全文化氛围的培养。

3.4 底层模式

底层模式下设互联信息数据库模块来实现对整个应急救援培训系统数据的收集,其存储的内容包括:体验模式类数据和训练模式类数据,分别来源于对应的培训模式。作为底层的数据结构,互联信息数据库模块可以为上述的5个模块各自的训练科目提供数据服务支持功能,例如可以为不同学员记录其训练时间、训练进度、训练成绩等,定期将学员训练结果进行学时与技能熟练度考核,并根据个性化的训练数据为每个学员反馈其训练中存在的不足。

4 结论

1) 基于VR技术手段和建构主义理论核心的“VR+”建构主义安全培训模型框架,为安全虚拟化培训系统构建提供了方法论,在此基础上建构的隧道火灾应急救援培训系统具有良好的互动性和实际可操作性,让学员在游戏闯关般的应急场景中学习火灾应急的技能和知识,体验模式帮助经验不足的学员快速建立对火灾现场的直观感受,克服学员心理层次中对未知事物的恐惧。

2) 隧道火灾应急救援培训系统相较于传统的应急救援基地培训,可以突破空间、时间、基地建设成本的束缚,高效地在全国各地实现大规模的应急救援培训。

3) 在火灾救援场景方面的设定尚不完善,在下一步的研究中将致力于开发更丰富的学习场景,力求应急救援培训系统和科目的多元化。

参考文献

- [1] 陈晶. 甲醇运输为何成“高爆炸弹”——晋济高速公路山西晋城段岩后隧道“3·1”特别重大道路交通事故危化品燃爆事故分析[J]. 湖南安全与防灾, 2014(7): 44-45.
CHEN Jing. Why Methanol transport becomes a “high explosive bomb”——analysis on the accident of traffic hazardous chemical products on the “3.1” major road in the yanhouhou tunnel of shanxi jincheng expressway [J]. Hunan Security & Disaster Prevention, 2014(7): 44-45.
- [2] 李靖. 应急培训“真枪实弹”[J]. 劳动保护, 2015(6): 46-47.
LI Jing. Emergency training “real guns” [J]. Labor Protection, 2015(6): 46-47.
- [3] YU P Q. Application of virtual reality technology in civil engineering [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2748 (427): 110-111.
- [4] 杨江涛. 虚拟现实技术的国内外研究现状与发展[J]. 信息通信, 2015(1): 138.
YANG Jiangtao. Research status and development of virtual reality technology at home and abroad [J]. Information and Communications, 2015(1): 138.
- [5] MOSES A, OBENSCHAIN K, BORIS J, et al. Using real-time chemical plume models in virtual training systems[C]// IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security, IEEE, 2015: 1-6.
- [6] BACKLUND P, HELDAL I, ENGSTROM H, et al. Collaboration patterns in mixed reality environments for a new emergency training center[C]// Modelling Symposium, IEEE, 2014: 483-488.
- [7] 刘晓双. 液氨泄漏事故应急救援虚拟演练与培训系统研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- [8] 黄仁东, 吴同刚. 非煤矿山虚拟现实安全培训系统的研究与构建[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(8): 36-41.
HUANG Rendong, WU Tonggang. Research and construction of virtual reality safety training system for non-coal mines [J]. China Safety Science and Technology, 2017, 13(8): 36-41.
- [9] 康盛, 孟静, 田忠旭. 等. 隧道火灾、消防虚拟再现方法研究[J]. 电气自动化, 2009, 31(1): 25-27.
KANG Sheng, MENG Jing, TIAN Zhongxu, et al. Study on virtual reproduction method of tunnel fire and fire fighting [J]. Electric Automation, 2009, 31(1): 25-27.
- [10] 毛军, 郝艳红, 吕华. 等. 数值模拟与仿真在地铁火灾防灾减灾中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2008(4): 52-57.
MAO Jun, GENG Yanhong, LYU Hua, et al. Application of numerical simulation and simulation in disaster prevention and mitigation of subway fires [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008(4): 52-57.
- [11] 杨维东, 贾楠. 建构主义学习理论述评[J]. 理论导刊, 2011(5): 77-80.
YANG Weidong, JIA Nan. A review of constructivist learning theory [J]. Theory's Guide, 2011(5): 77-80.
- [12] 秦亚青. 建构主义: 思想渊源、理论流派与学术理念[J]. 国际政治研究, 2006(3): 1-23.
QIN Yaqing. Constructivism: Ideological origins, theoretical schools and academic ideas [J]. International Politics Research, 2006(3): 1-23.
- [13] 吴秀娟, 张浩, 倪厂清. 基于反思的深度学习: 内涵与过程[J]. 电化教育研究, 2014, 35(12): 23-28, 33.
WU Xiujian, ZHANG Hao, NI Changqing. Deep learning based on reflection: Connotation and process [J]. Research on Electronic Education, 2014, 35(12): 23-28, 33.
- [14] 赵春霞, 张艳, 战守义. 基于粒子系统方法的三维火焰模拟[J]. 计算机工程与应用, 2004(28): 73-75.
ZHAO Chunxia, ZHANG Yan, ZHAN Shouyi. Three-dimensional flame simulation based on particle system method [J]. Computer Engineering and Applications, 2004(28): 73-75.
- [15] 吴继承, 江南. 虚拟现实系统中粒子系统的设计与应用[J]. 计算机仿真, 2004(11): 137-140.
WU Jicheng, JIANG Nan. Design and application of particle system in virtual reality [J]. Computer Simulation, 2004(11): 137-140.
- [16] 刘永立, 杨虎. 煤矿火灾应急救援演练虚拟现实系统研究[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(6): 22-25.
LIU Yongli, YANG Hu. Research on virtual reality system of coal mine fire emergency rescue drill [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2013, 40(6): 22-25.
- [17] 陶瑞, 朱耀辉, 任鸿翔. 等. 基于虚拟现实技术的船舶消防培训系统[J]. 上海海事大学学报, 2017, 38(1): 74-78, 94.
TAO Rui, ZHU Yaohui, REN Hongxiang, et al. Marine fire training system based on virtual reality technology [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2017, 38(1): 74-78, 94.
- [18] 郭仁春, 霍西宝, 玉锦宏. 等. 基于 3D Max 及 Unity3D 技术实现数字化虚拟校园的网络建设[J]. 信息系统工程, 2017(5): 121-122.
GUO Renchun, HUO Xibao, YU Jinhong, et al. Network construction of digital virtual campus based on 3D Max and Unity3D technology [J]. Information Systems Engineering, 2017(5): 121-122.

(责任编辑: 纪 婧)