

doi: 10.11731/j.issn.1673-493x.2021.08.019

基于VR的地铁基坑施工安全教育系统设计与应用*

何江¹ 蒙泳君¹ 赵庚亮² 张志龙² 汤德品² 黄彦³

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004;

2. 中铁交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530200;

3. 南宁增则科技有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要: 为解决地铁基坑施工事故应急演练存在的实际操作困难、场景复杂、成本高等问题,采用多人虚拟现实(VR)技术开发的地铁基坑施工安全教育系统,使受训人员可以身临其境地体验地铁基坑施工过程中常出现的典型安全事故(触电、物体打击、高空坠落、基坑坍塌),以满足演练需求。每个系统场景由多个环节组成,解决地铁基坑跨度大造成的场景数据庞大问题,并采用UE4级联粒子系统来实现复杂粒子动态变化,运用物理引擎PhysX来简化碰撞模型。同时,系统采用分角色互动演练,以培养施工员之间的协同性。结果表明:系统模拟符合实际地铁基坑施工事故应急演练要求,具有较高体验感和互动性,可快速提升施工员的安全意识和应急能力。

关键词: 地铁基坑施工; 应急救援; 安全教育; VR技术; 角色互动

中图分类号: X947 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-493X(2021)-08-0124-06

Design and application of safety education system for subway foundation pit construction based on VR

HE Jiang¹, MENG Yongjun¹, ZHAO Gengliang², ZHANG Zhilong², TANG Depin², HUANG Yan³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China;

2. China Railway Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning Guangxi 530200, China;

3. Nanning Zengze Technology Co., Ltd., Nanning Guangxi 530007, China)

Abstract: In order to solve the problems of difficult practical operation, complex scene and high cost in the emergency exercise of subway foundation pit construction accidents, a safety education system of subway foundation pit construction was developed by using the multiplayer virtual reality (VR) technology, which could immersively experience the typical safety accidents (electric shock, object strike, fall from high altitude, collapse of foundation pit) that often occur during the construction of subway foundation pit to meet the needs of exercise. Each system scene was composed of multiple links to solve the huge scene data problem caused by the large span of subway foundation pit, then the UE4 cascaded particle system was used to realize the dynamic change of complex particles, and the physics engine PhysX was used to simplify the collision model. Meanwhile, the system adopted the role-based interactive exercise to cultivate the synergy among the construction workers. The results showed that the system simulation met the actual emergency exercise requirements of subway foundation pit construction accidents and had high sense of experience and interaction, which can quickly improve the safety awareness and emergency response capabilities of the construction workers.

Key words: subway foundation pit construction; emergency rescue; safety education; virtual reality (VR) technology; role interaction

收稿日期: 2021-01-23

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51968003)

作者简介: 何江, 博士, 教授, 主要研究方向为地下工程施工安全。

0 引言

目前我国地铁工程建设正处于快速发展阶段,由于地铁基坑施工周期长且施工环境复杂等原因,施工过程中存在着各类安全事故频发的现象^[1],造成不同程度的人员伤亡和财产损失。在导致各类事故频发的事故原因中,施工员的不安全行为成为主要因素^[2-4]。为提高地铁基坑施工的安全性,国家住房和城乡建设部早在2011年颁布《地铁工程施工安全评价标准》,提出对地铁基坑施工员进行相关安全培训教育的要求^[5]。由此,为降低地铁基坑施工事故发生率,对地铁基坑施工员进行有效的安全教育及培训极为重要。然而,在现实中,地铁基坑施工安全教育是难以进行实际操作演练的,且实际操作演练的经济成本较高、耗时长,存在一定程度的危险,这就导致在培养地铁基坑施工员的安全意识与应急救援能力上存在着较大的缺失。

对于难以进行实际操作演练的教育培训项目,国内外均有较多的研究案例,特别是采用多人VR(Virtual Reality)技术可应用于多类行业的教育培训,并达到有效节省时间、节约成本、演练安全的效果,同时可快速达到教育目的^[6-7],如:火灾消防的应急演练^[8];教育施工员针对在预制/预应力混凝土生产作业中常出现事故的VR培训^[9];对建筑工地安全教育进行施工安全评估的系统^[10];在土木建筑的施工培训上采用VR技术,可让新工人学习得更快且记得更牢固^[11];为快速提升学员在建筑工地上的危险识别和风险管理的能力,采用VR技术开发了立体全景环境的安全培训系统^[12]。这些采用VR技术的教育培训系统均显示出较好的效益。在地铁安全教育方面,王朔等^[13]采用VR技术模拟地铁在运营时出现火灾爆炸、恐怖袭击、水淹等突发事件时的应急预案,提高地铁运营时紧急情况的预案应对水平;唐维等^[14]运用BIM结合VR技术在地铁基坑施工上的运用,让施工员更直观地感受施工场景和了解施工的关键技术;方恩权等^[15]采用VR技术从自动考勤建档、组织培训、设备管理等方向开展培训,来提高地铁基坑施工的安全性,但没有针对性地开发常见的各类安全事故。由于地铁基坑施工安全事故类型较多,且现实中难以进行实际演练操作,因此直接针对不同地铁基坑施工安全隐患而开发的事故应急演练教育系统是目前地铁建设施工行业所急需的。

本文通过分析地铁基坑施工中常见的安全隐患类型,采用多人VR技术构建地铁基坑施工常见安全事故教育培训系统,以满足地铁基坑施工人员的安全教育培训需求,让受训者快速认知地铁基坑施工存在的安全隐患,从而提高施工过程中的安全意识,培养在事故发生

时能够做出正确判断的能力。

1 常见的地铁基坑施工安全隐患

地铁基坑施工的跨度区域一般较大,如某一地铁工程,其基坑长214.8 m,宽29.5 m,深15.7 m,分为4个施工段,作业人员有50余人,在这4个地铁基坑施工段常见的事故类型,如图1所示。在第1施工段,主要作业为混凝土底板垫层浇筑,此时经常需要操作振捣棒等用电设备,而由于操作磨损频繁而容易发生电缆破皮现象,如不注意会导致触电事故。第2施工段的主要作业为基地清理、物料吊装等,此时物料吊装过程中若出现不规范操作,则会发生物体高空散落打击事故。第3施工段的主要作业为安装钢支撑进行基坑支护,此时施工员需进行高空作业以完成基坑支护工作,施工员需要时刻注意安全防护服的穿戴,以防高空坠落事故。第4施工段的主要作业为基坑开挖,该施工段属于工程完成度最低,危险性、不确定性最大的施工段,会因自身超挖情况或周围基坑环境的影响而发生土方坍塌事故。

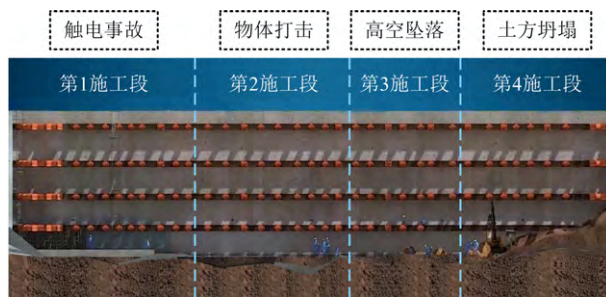


图1 地铁基坑施工段常见的事故类型

Fig. 1 Common accident types in subway foundation pit construction sections

综上所述,各个施工段主要作业内容存在着较大差异,而使各施工段的可能事故类型各有不同。因此,需要有针对性地根据不同事故类型进行培训教育。

2 地铁基坑施工安全教育系统构建

2.1 系统的构建技术及运行模式

由于地铁基坑施工跨度较长,且在不同施工段的安全隐患差异较大,系统采用按施工段来运行演练的方式,使施工人员更好地认识在相应施工段应时常关注的事项,地铁基坑施工安全教育系统的流程架构,如图2所示。同时,各个施工段的安全事故演练均包含救援演练模式,当A角色进行错误的操作导致事故发生时,第2角色B就需要立即进行救援演练,从而快速培养施工人员的应急救援能力,以最大程度地减少事故的发生与事故发生时的伤害。

系统基于 Unreal Engine 4 引擎,在虚拟的三维环境

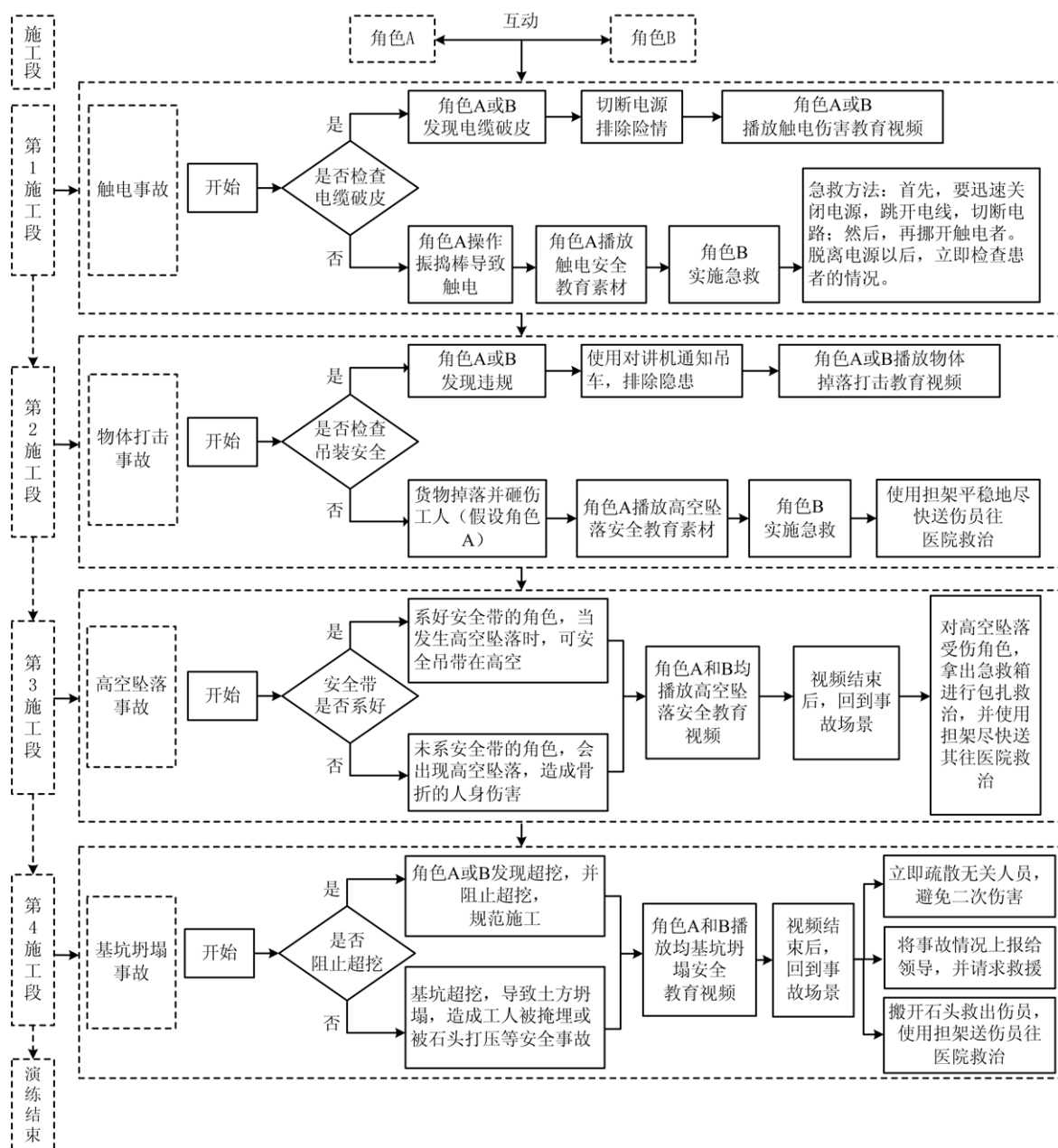


图2 地铁基坑施工安全教育系统的流程架构

Fig. 2 Process framework of safety education system for subway foundation pit construction

下再现地铁基坑施工出现频繁或危害极大的事故场景, 可通过人机交互操作, 有效呈现地铁基坑施工事故及应急救援演练场景。主要有以下特点: 1) 真实性, 即地铁基坑施工事故场景及应急救援指导场景具有强烈的真实现场感, 客观仿真了事故的各个环节; 2) 多人实时反馈性, 多个角色均可以在各个地铁基坑施工段事故的演练中, 实现实时人机交互的各种指令, 即时完成各项演练操作; 3) 科学性, 通过科学算法完成无法进行实地演练的地铁基坑施工事故场景(如触电、高空坠落), 帮助施工人员提升应急救援能力。

系统分服务器、管理端、客户端3个模块进行同场

景协同运行与管理。服务器可管控演练进程、维护及管理数据、实现管理员端和客户端的数据交互; 在管理端, 可进行场景设置和预案推演。在场景设置界面里, 主要是对不同施工段事故的演练选择和场景关键点的选择(如事故发生点、救援点等)。在预案推演设置界面里, 可设置演练时间、事态发生计划和删除计划等。在客户端中, 各演练者登录后, 进入模式选择, 将置身于基坑场景中。系统可进行多角色互动演习, 以提高相互间的救援协调性。

2.2 地铁基坑施工事故场景构建

由于地铁基坑施工的基坑场景较大且事故类型较

多,为更科学、更真实地实现各施工段的事故场景,采用以下构建方法。

1) 由于地铁基坑施工的基坑场景跨度较大,为保证场景和设备实时显示的同时,能确保系统画面的帧率,系统场景构建时采用细节分层模型方法(Level of Detail, LOD)来进行绘制,以3~4层不同细节度方案来实现大跨度三维场景的建模,极大地优化了大场景的模型载荷。该构建方式可根据演练角色视点的远近、视点主方向及物体在画面上投影区域的大小等因素,对各个场景展现的侧重点物体进行高质量绘制,然后距离较远的场景模型依次降低绘制的三角面及图形质量,这样可以在不降低画面质量的情况下,降低系统运行负荷,提高画面帧率。

2) 在触电事故中,需要对电弧粒子进行模拟。除了要考虑生成其外观效果外,还需考虑其发展过程,即电弧从突然增大到逐渐缩小或熄灭的过程,电弧粒子的构建参见图3。为能模拟出更加具有真实感的电弧场景,通过UE4级联粒子系统中的事件子系统动态驱动实现,把电弧抽象成粒子运动,最后量化地描述出其属性,并生成目标对象(电弧)的粒子。在本粒子系统的控制机制中,实现了粒子层次化细分、粒子消亡及随机变化、产生新粒子等,准确模拟了电弧的运动状态,该运动状态公式如式(1)~(2)所示:

$$\nu = \nu(t_0) + \kappa \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \alpha(t) dt \quad (1)$$

$$s = s(t_0) + \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \nu(t) dt \quad (2)$$

式中: ν 为电弧粒子运动速度, μ/s ; $\nu(t_0)$ 为电弧粒子初始速度, μ/s ; κ 为电弧速度, μ/s ; $\alpha(t)$ 为电弧粒子的运动加速度, μ/s^2 ; s 为电弧粒子的位置, μ ; $s(t_0)$ 为电弧粒子的初始位置, μ ; $s(t)$ 为电弧粒子在 t 时刻的运动速度, μ/s ; t_0 为电弧粒子的初始时刻; Δt 为电弧粒子产生后的时间变量, s 。

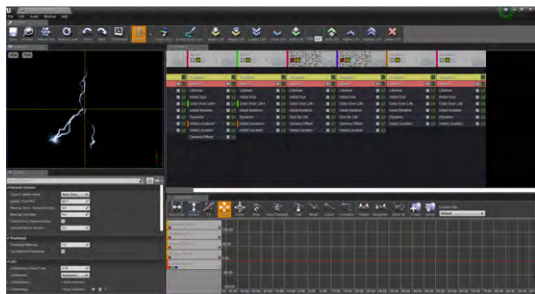


图3 电弧粒子的构建

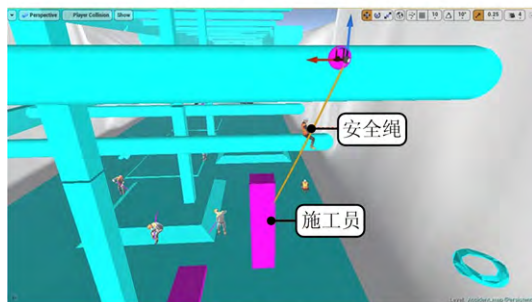
Fig. 3 Construction of arc particles

3) 地铁基坑施工事故的场景需应用到许多不同形

态的物体碰撞,如果全部执行复杂碰撞,会使碰撞检测非常繁重,降低系统效率。而通过采用物理引擎 PhysX 进行物理模拟,将执行的碰撞检测及碰撞对象之间进行物理互动,使物理模拟高效化。高空坠落时物理碰撞模拟如图4所示。由图4可知,高空坠落时安全绳牵制施工员的碰撞模拟,是通过采用物理引擎 PhysX 中的物理约束,来驱动仿真角色坠落时安全绳牵制下的摆动、旋转等所有动态碰撞的计算,达到高效的物理缆绳模拟效果。



(a) 高空坠落时场景模型



(b) 高空坠落时物理碰撞参数模型

图4 高空坠落时物理碰撞模拟

Fig. 4 Simulation of physical collision when falling from high altitude

4) 场景中各类人物角色的肢体动作和机械设备运行时的动态变化的模拟,均需要启用骨架高级动画系统进行构建。人物和机械等本体均由基本网格体和骨架网格体组件构成。基本网格体和骨架网格体组件可用来启用骨架高级动画。骨架高级动画系统可基于网格顶点的变形与骨架的变形,通过多个动画工具和编辑器构建出真实复杂的动画场景(如肢体运动、挖掘机施工等复杂动画)。演练角色可同时接受程序中 AI(Artificial Intelligence)模块的控制。AI角色在不同场景下可实现沿路径行走或自动寻路、躲避障碍物及人员疏散等过程。动态 AI 角色的构建,如图5所示。

通过以上的构建方法,可让用户端任意角色在不同的施工条件下触发不同的事故流程,各角色会依据自身对应的突发事件展开相应的应急救援过程,来体验不同的事故应急演练场景。

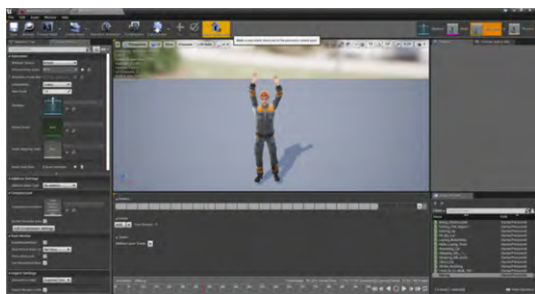


图 5 动态 AI 角色的构建

Fig. 5 Construction of dynamic AI roles

3 地铁基坑施工事故演练

以基坑超挖导致的土方坍塌紧急救援为例,基于所建立的平台开展事故应急人员的虚拟演练。救援组员通过账号登录后,选择双人演练模式并点击确定,进入下一步等待界面,等待系统分配角色,即开始演习。基坑超挖、坍塌、救援场景如图 6 所示。在基坑进行超挖的施工时,根据角色的行动,会产生以下 2 种不同的结果:



(a) 基坑超挖场景



(b) 基坑坍塌事故场景



(c) 基坑坍塌救援场景

图 6 基坑超挖、坍塌、救援场景

Fig. 6 Scenes of foundation pit over-excavation, collapse and rescue

1) 如果角色 A 选择阻止超挖,现场正在进行土方挖掘的挖掘机会立即停止施工,排除了险情,所以土方坍塌事故就不会发生。

2) 如果角色 B 选择不阻止超挖,现场土方挖掘继续进行,但不久就发生土方坍塌事故,造成挖掘机被坍塌的土方压倒掩埋,驾驶员掉出挖掘机并被石头压住。

随后开展土方坍塌救援演练,并按照系统给出的指示完成救援工作。救援演练过程表明,系统中的场景设置合理,各个模块设计科学,有助于提升现场人员处置能力。通过本虚拟演练平台,借助于虚拟头盔和手柄,对于单双人的虚拟训练支持度较高,并可扩展应用于不同场景的多人协同训练。

由此,通过以地铁基坑施工中实际存在的安全隐患为背景,采用多人 VR 技术,打造出上述事故场景进行虚拟演练,可较好地解决因实际演练困难、演练成本较高等因素而难以实施的安全教育。该类型的虚拟演练还可以从传统被动演习的方式转变成沉浸式主动体验,使施工人员更具体地理解相关事故的发生缘由,从而提升其事故防范意识及应急救援能力。此外,构建的虚拟演练平台不局限于单一场景,还可以根据训练需要扩展导入不同的灾害场景。

4 结论

1) 按不同地铁基坑施工段设置相应的事故场景,演练人员可通过这些虚拟场景完成人机交互,实现地铁基坑施工全过程的应急虚拟演练。

2) 通过本文构建的应急虚拟演练系统平台,可使地铁基坑施工员及时发现不同施工段常出现的安全隐患,快速提升其应急处置能力,使地铁基坑施工人员的教育应急演练效果得到显著提升。

3) 在所搭建的虚拟演练系统平台中,呈现了触电事故、物体打击、高空坠落、基坑坍塌这 4 种地铁基坑施工时最常见的事故类型,可满足目前教育培训的演练需求。下一步,可结合更多的培训要求开发更多类型地铁基坑施工事故场景。

参考文献

- [1] CRDENAS I, AL-JIBOURI S, HALMAN J, et al. Capturing and integrating knowledge for managing risks in tunnel works [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 160-166.
- [2] 王志强, 刘硕, 马婷婷, 等. 风险偏好视角下地铁基坑施工安全群体行为博弈研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 138-144.
- WANG Zhiqiang, LIU Shuo, MA Tingting, et al. Study on behavioral game of metro construction safety groups under perspective of risk preference [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(3): 138-144.

- [3] 陈伟珂,王炳淳. 基于 SEM 的地铁基坑施工不安全行为与认知关系的研究[J]. 中国安全生产科学技术 2015, 11(3): 154-160.
CHEN Weike, WANG Bingchun. Study on relationship between unsafe behaviors and cognition in subway construction based on SEM [J]. Journal of Safety Science and Technology 2015, 11(3): 154-160.
- [4] 郭圣煜, 骆汉宾, 滕哲, 等. 地铁基坑施工工人不安全行为关联规则研究[J]. 中国安全生产科学技术 2015, 11(10): 185-190.
GUO Shengyu, LUO Hanbin, TENG Zhe, et al. Research on association rules of unsafe behavior for metro construction workers [J]. Journal of Safety Science and Technology 2015, 11(10): 185-190.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁工程施工安全评价标准: GB/T 50715—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社 2011.
- [6] WANG P, WU P, CHI H L, et al. Adopting lean thinking in virtual reality-based personalized operation training using value stream mapping[J]. Automation in Construction 2020, 119: 103355.
- [7] GETULI V, CAPONE P, BRUTTINI A, et al. BIM-based immersive virtual reality for construction workspace planning: a safety-oriented approach[J]. Automation in Construction 2020, 114: 103160.
- [8] 潘卫军, 徐海瑶, 朱新平. 基于 VR 技术的机场应急救援虚拟演练平台[J]. 中国安全生产科学技术 2020, 16(2): 136-141.
PAN Weijun, XU Haiyao, ZHU Xinping. Virtual drilling platform for emergency rescue of airport based on VR technology [J]. Journal of Safety Science and Technology 2020, 16(2): 136-141.
- [9] JOSHI S, HAMILTON M, WARREN R, et al. Implementing virtual reality technology for safety training in the precast/prestressed concrete industry[J]. Applied Ergonomics 2021, 90: 103286.
- [10] PEDRO A, PHAM H C, KIM J U, et al. Development and evaluation of context-based assessment system for visualization-enhanced construction safety education[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics: JOSE 2018, 26: 1-33.
- [11] OSTI F, AMICIS R D, SANCHEZ C A, et al. A VR training system for learning and skills development for construction workers [J]. Virtual Reality 2021, 25(2): 523-538.
- [12] JEELANI I, HAN K, ALBERT A. Development of virtual reality and stereo-panoramic environments for construction safety training[J]. Engineering Construction & Architectural Management, 2020, 27(8): 1853-1876.
- [13] 王翔, 朱士友, 俞军燕, 等. 地铁车站应急预案 VR 模拟与情景设计[J]. 中国安全科学学报 2019, 29(7): 183-188.
WANG Shuo, ZHU Shiyao, YU Junyan, et al. VR based simulation and scenario design of emergency response plans for metro stations [J]. China Safety Science Journal 2019, 29(7): 183-188.
- [14] 唐维, 张永攀, 陈贤国. BIM + VR 技术在地铁基坑施工过程中的应用研究[J]. 公路 2018, 63(4): 190-194.
TANG Wei, ZHANG Yongpan, CHEN Xianguo. Application of BIM + VR technology in subway construction [J]. Highway, 2018, 63(4): 190-194.
- [15] 方恩权, 郭杰, 张伟. 基于 VR 虚拟现实技术的地铁基坑施工多人 VR 安全体验系统研究与应用[J]. 工业安全与环保 2019, 45(12): 58-61.
FANG Enquan, GUO Jie, ZHANG Wei. Research and application of multi-person VR safety experience system in metro construction based on VR virtual reality technology [J]. Industrial Safety and Environmental Protection 2019, 45(12): 58-61.

(责任编辑: 刘贵丽)