

# 虚拟现实技术在消防仿真实训中的应用

李 磊<sup>1,2</sup>

(1.中国石化青岛安全工程研究院,山东 青岛 266000;2.应急管理部化学品登记中心,山东 青岛 266000)

**摘 要:**为提高危险化学品事故应急救援装备仿真训练科学性 & 操作体验性,研究了火灾事故应急处置措施建模方法,开发了基于嵌入式的虚拟现实感知应急装备及仿真实训系统。首先对火灾事故应急处置进行建模,然后通过三维虚拟系统可视化对应急处置操作结果进行展示。实验结果表明,该仿真实训装备对提高应急处置操作水平有重要作用,实现了消防装备操作的实时模拟计算与反馈。

**关键词:**虚拟现实;感知;消防装备;仿真实训

**中图分类号:**X928.7;TP391.9 **文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0029(2021)02-0228-04

消防车辆作为危险化学品事故应急救援的核心装备,在应急处置过程中发挥着重要的作用,同时,随着车辆智能化程度的提高,特别是以三相射流泡沫、干粉联用消防车为代表的高精尖装备,具有科技含量高、灭火剂用量少、灭火效率高、灭火后抗复燃、环保节能等诸多优势,对使用人员要求也相对较高,现场操作展开速度等使用情况直接影响了应急救援的效率与效果。目前,消防装备仿真培训多利用真实的消防车采用传统的方式进行人员培训,存在培训成本高、效率低、可重复性差等问题。

随着计算机图形学软硬件技术的发展,消防车等应急装备仿真培训的研究成果也逐渐增多。ZHANG H 研究了基于头戴式显示器(HMD)的虚拟仿真训练系统;YOUNGHEE L 等以模拟事故情景和假设运行经验为基础,研发了1套交互式氢燃料站操作员教育系统;PAK K K 等基于信息和通信技术、虚拟现实和离散事件模拟技术,研究了能够再现大规模、多机构突发事件的危险模拟系统;顾浩炜设计与研究了直臂式高空作业车虚拟仿真教学培训系统;朱新平等研究了1种基于虚拟现实技术的机场消防应急救援虚拟演练平台。综上所述,现有研究成果中,缺少对基于虚拟现实感知的嵌入式消防装备仿真实训技术的研发,特别是缺少基于消防处置模型的仿真培训系统。针对此类问题,笔者研究基于虚拟现实感知的嵌入式消防装备仿真实训系统,对提升消防装备仿真训练的真实感、科学性和交互性有重要意义。

## 1 消防装备仿真实训的整体架构

消防装备仿真实训的整体架构如图1所示,制作与真实消防车操作台1:1复制的嵌入式操作面板,为消防车操作人员提供了与真实操作环境一致的操作平台,其操作手

柄的布置、操作规程都与真实设备完全相同。操作面板的动作通过计算机网络连接到虚拟现实系统,在虚拟现实系统中展示设备的工作状态,同时获得操作结果。虚拟现实系统与消防处置仿真模型通过计算机网络交换数据,操作结果发送给应急处置仿真模型,仿真模型进行数学计算后得到新的过程(事故)数据,这些数据对虚拟现实系统中展示的场景产生影响,让消防人员可以清楚地看到当前的操作对设备运行状态和事故演变情况的影响。

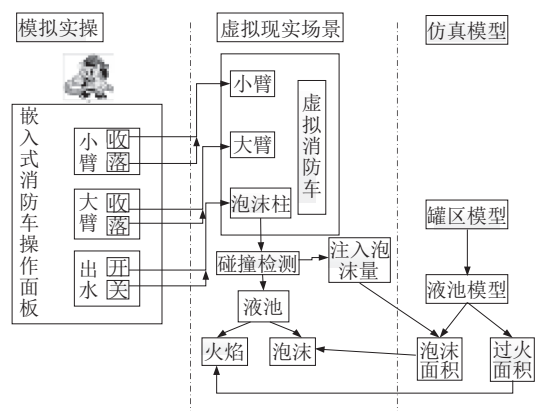


图1 消防装备仿真实训技术研究整体结构图

基于虚拟现实技术构建危险化学品事故灾害三维虚拟场景,通过操作面板给消防人员提供真实的操作感知体验。同时,结合事故及应急处置的仿真模型展示事故的动态变化情况,基于场景、事故、仿真装备实现虚拟现实感知的集成。

## 2 消防处置措施仿真建模方法

传统的危险化学品工艺仿真建模关注的重点问题是流程的工艺参数计算,此类模型多用于设计从业人员操作技能培训。笔者建立的危险化学品仿真模型应用目标是讨论事故发生后的应急处置措施,对应急处置措施的建模是其重要组成部分。

事故现场的应急处置措施包括多方面的内容,如人员疏散、灭火、稀释泄漏气体等。泡沫灭火剂在危险化学品行业的油品灭火中发挥着十分重要的作用,笔者以危险化学品罐区油品发生池火后用泡沫灭火剂进行灭火的过程为例,建立了灭火过程模型及应急处置措施模型。

对罐区进行灭火的过程中,建模做了如下假设:

- (1)罐内液体泄漏后进入围堰中,形成池火;
- (2)注入的灭火剂在没有完全覆盖液表面只保持

设定厚度分布;

(3)注入的灭火剂在完全覆盖池液表面后才有可能从围堰顶部溢出。

池液表面积标记为  $S_{\text{池}}$ 。基于上述的简化,池液灭火建模过程如下:

步骤 1:计算泡沫总量。

池液表面存留的泡沫的总量标记为体积  $V(\text{m}^3)$ ,新注入的泡沫量为  $V_{\text{增}}$ 。则当前池液表面存有的泡沫总量  $V_{\text{总}}$  见式(1)。

$$V_{\text{总}} = V + V_{\text{增}} \quad (1)$$

步骤 2:计算泡沫面积。

设定在没有完全覆盖液池表面前,泡沫平均高度为  $h$ 。可以计算出泡沫面积  $S_{\text{泡}}$  见式(2)。

$$S_{\text{泡}} = \frac{V_{\text{总}}}{h} \quad (2)$$

如果  $S_{\text{泡}}$  的值大于  $S_{\text{池}}$ ,说明泡沫已经完全覆盖了液池,故修正泡沫面积见式(3)。

$$S_{\text{泡}} = S_{\text{池}} \quad (3)$$

步骤 3:计算泡沫损失。

如果  $S_{\text{泡}}$  的值等于  $S_{\text{池}}$  的值,则说明泡沫已经将液池表面全部覆盖,火已经扑灭,不用再计算泡沫损失;否则,继续计算泡沫损失。

根据泡沫面积计算泡沫半径  $R$  见式(4)。

$$R = \sqrt{\frac{S_{\text{泡}}}{\pi}} \quad (4)$$

根据当前火焰的温度  $T_{\text{火}}$  不同,则影响的泡沫层前沿范围不同。泡沫损失速率设为  $K$ (根据灭火剂种类不同,损失速率需要根据经验确定),折算受火焰影响的泡沫前沿深度  $R_{\text{损}}$  见式(5)。

$$R_{\text{损}} = K \times T_{\text{火}} \quad (5)$$

实际的泡沫半径  $R$  见式(6)。

$$R = R - R_{\text{损}} \quad (6)$$

折算泡沫损失后,泡沫覆盖面积变更为式(7)。

$$S_{\text{泡}} = \pi \times R^2 \quad (7)$$

液池表面的泡沫残留量见式(8)。

$$V = S_{\text{泡}} \times h \quad (8)$$

步骤 4:计算过火面积。

液池已处于燃烧状态,故过火面积见式(9)。

$$S_{\text{火}} = S_{\text{池}} - S_{\text{泡}} \quad (9)$$

步骤 5:返回步骤 1,开始下一轮计算。

由上述计算过程可知,只要有新的泡沫注入,池液表面的泡沫面积会蔓延,最终达到灭火的目标。

### 3 基于虚拟现实感知技术的消防装备仿真实训系统

#### 3.1 虚拟现实感知消防装备仿真实训系统总体设计

虚拟现实感知消防装备仿真实训系统主要包括操作层、驱动层、平台层和应用层 4 层结构,系统整体框架如图 2 所示。

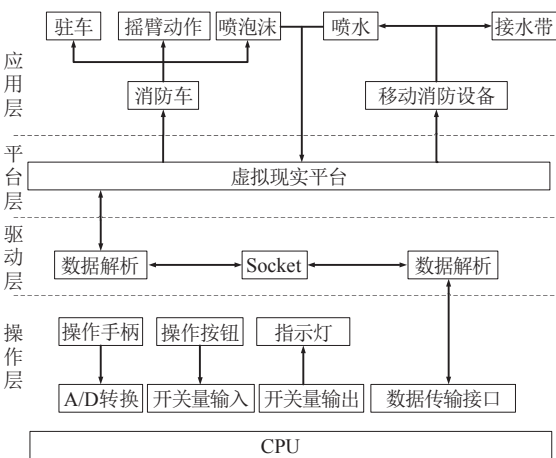


图 2 虚拟现实感知消防装备仿真实训系统整体框架

(1)操作层外在表现为一套硬件设备,为应急人员提供实操训练环境。主要包括操作手柄、操作按钮和指示灯等可操作设备。

(2)驱动层是操作层与平台层的协调者,完成平台层和操作层之间的数据转换与传输工作,使得平台层和操作层之间可以协同工作,成为一个整体。

(3)平台层基于自主研发的虚拟现实平台实现事故灾害场景的三维仿真,真实反映事故应急处置现场。三维场景中的应急处置装备的动作来自于操作层可操作设备的动作,平台将虚拟现实动作按照通信协议传递到驱动层解析,从而实现人机交互。

(4)应用层是各类消防装备的虚拟现实驱动。

#### 3.2 消防处置过程数据交互方法

处置过程中,消防处置措施仿真模型实时和虚拟现实系统进行数据交互,获得数据会影响仿真模型的运行,运行的结果又会影响虚拟现实系统的显示。

如图 3 所示,箭头表示数据流,火灾事故应急处置时,开启仿真模拟控制面板泡沫开关,操作泡沫喷射口的位置,保证泡沫能喷射在合理的区域;虚拟现实系统根据碰撞检测的结果确定有效喷射的泡沫量,并将该数值传送给仿真模型进行运算;在虚拟现实系统中需要显示液池被泡沫覆盖的场景,仿真模型计算得到泡沫覆盖面积,并把这个数值传送给虚拟现实系统。同样,仿真模型还要计算当前的过火面积及火焰的相关数据,虚拟现实场景也是根据获得的相关参数来显示火焰的。

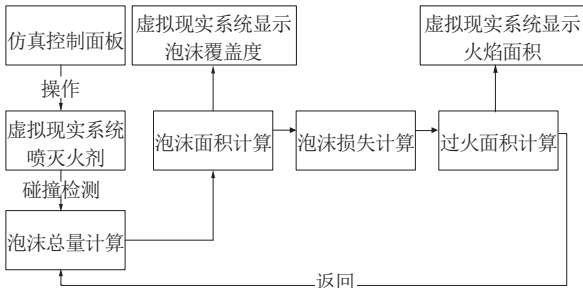


图 3 火灾事故应急处置过程数据交互

## 4 应用与实现

以 56 m 高喷消防车为应用对象,消防车操作面板主要有上车操作、下车操作、驾驶室操作等,需要将各个操作面板进行系统性模拟,使整个仿真系统应用达到更好效果。

### 4.1 操作感知面板实现

操作感知面板根据消防车真实的操作面板进行设计,模拟操作消防车的动作执行及响应情况。控制面板是一个小型的单片机系统,包括交互用户操作面板、嵌入式开发板、电路板、电源线、串口线等,设计原理如图 4 所示。

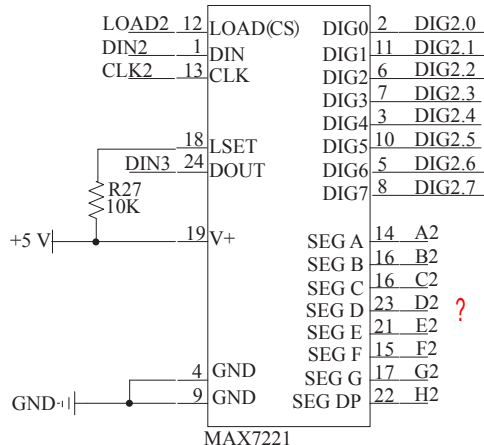


图 4 设计原理图(局部)

核心部分 CPU 采用 STM32F407VGT6,设计 CPU 外围电路、串行通信电路、无线通信电路、模拟量输入、开关量输入/出等硬件电路。选用 STM32F407VGT6 高速芯片是因为该芯片具有体积小、性能高、可维护、可兼容等特性,符合硬件设备的需求。

串行通信模块选用了 FT232RL USB 转串口芯片,该单元主要由两部分组成,分别是 MiniUSB 接头和数据收发芯片。无线通信模块选用 HLK-RM04 无线模块连接 WiFi 信号完成无线通信,该组件提供 RS 232 串行接口,通过该接口连接 CPU。主控面板及制作完成的实体操控面板如图 5 所示。

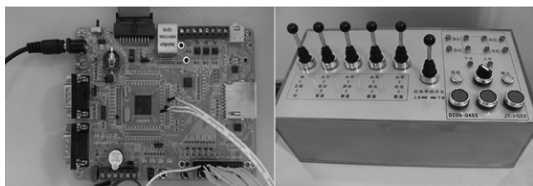


图 5 主控面板及实体操控面板

### 4.2 操作感知仿真实训系统实现

操作感知应急装备仿真实训系统需要和硬件操控面板进行多种交互操作,从而完成多个控制功能,如信号的采集与传输过程、动作发起、信号处理等,操作感知应急装备仿真实训系统和操作面板交互时序图如图 6 所示。

当操作者按下操纵面板上的按钮或扳动操作手柄时,电路解析模块对操纵按钮发出的信号进行监控采集,并进行信号处理,处理后的信号传递到计算机实时渲染的虚拟

场景中进行二次解析,转化为场景中消防车可接受的指令,以此对虚拟消防车进行控制操作。同时,当消防车执行相应的行为后,根据通信协议,将执行完毕的消息转变为电信号返回到实体操纵面板的主控板,电路解析单元监控到相应信号并交付给信号处理单元进行信号处理。最终,操纵面板上对应的信号灯亮起,以响应虚拟消防车行为执行完毕。

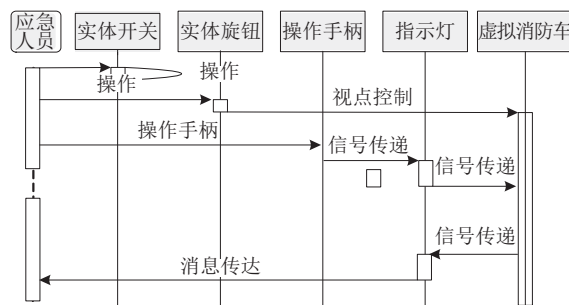


图 6 操作感知实体操作面板时序图

## 5 结束语

结合火灾三维虚拟场景和消防应急处置仿真模型,开发了基于虚拟现实多感知技术的消防装备仿真实训系统。在视觉、触觉方面为消防人员生成 1 个逼真的虚拟现实多感知环境,实现仿真操作面板与虚拟现实系统深度融合,使消防人员最大限度地贴近实际操作和实战演练,有利于提升消防人员对消防装备的操作能力及突发事件的应对能力。

### 参考文献:

- [1] ZHANG H.Head-mounted display-based intuitive virtual reality training system for the mining industry[J].International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(4):717-722.
- [2] YOUNGHEE L,JINKYUNG K,JUNGHWAN K,et al.Development of a web-based 3D virtual reality program for hydrogen station[J].International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 35(5): 2112-2118.
- [3] PAK K K,MIAN Y,BILL K P,et al.Crisis management training using discrete-event simulation and virtual reality techniques[J].Computers & Industrial Engineering, 2019, 135:711-722.
- [4] 顾浩伟.直臂式高空作业车虚拟现实教学培训系统设计与研究[D].上海:华东理工大学, 2017.
- [5] 朱新平,徐海瑶,万健.基于虚拟现实的机场消防救援虚拟演练平台[J].计算机仿真, 2020, 37(2):102-105.
- [6] 顾天雄,吴志敏,于军.电网企业消防安全管理创新与实践[J].消防科学与技术, 2020, 39(3):407-409.
- [7] SYKAM K,MEKA K K R,DONEMPUDI S.Intumescent phosphorus and triazole-based flame-retardant polyurethane foams from castor oil[J].Acs Omega, 2019, 4(1):1086-1094.
- [8] 王宝伟.泡沫灭火模拟装置关键技术研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2019.
- [9] 王文俊,张迎军,金雪松,等.基于GIS的机场应急救援演练系统开发与应用研究[J].中国安全生产科学技术, 2017, 13(3):169-173.



# 特高压换流站阀厅新型防火防爆封堵系统研究

钟 波<sup>1</sup>, 蒋亚强<sup>1</sup>, 张佳庆<sup>2</sup>, 刘晓圣<sup>3</sup>

(1. 应急管理部四川消防研究所, 四川 成都 610036;

2. 国网安徽省电力有限公司 电力科学研究院, 安徽 合肥 230022;

3. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102211)

**摘 要:** 为了提升新建特高压换流站阀厅的安全性能, 提出了 1 种兼顾防火与抗爆的新型封堵系统, 在碳氢升温曲线下对 5 m×5.2 m 封堵系统真型样品进行了耐火试验, 建立了封堵结构的抗爆性能数值分析模型, 计算了典型爆炸工况下新型封堵结构的动力响应过程。结果表明, 新型防火抗爆封堵系统在碳氢升温曲线下耐火极限大于 3 h, 在设计爆炸荷载作用下处于弹性状态, 不影响系统防火性能。

**关键词:** 消防; 换流站; 封堵系统; 防火抗爆; 耐火极限

**中图分类号:** X932; TU375.2 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0029(2021)02-0231-04

目前, 特高压换流站中换流变压器与阀厅通过 PAROC 板(1 种轻质岩棉夹层板, 0.5 mm 消磁不锈钢板+150 mm 岩棉+0.6 mm 消磁不锈钢板)组成的防火封堵系统进行分隔, PAROC 板材在 ISO 834 标准升温曲线下耐火极限大于 3 h, 但由 PAROC 板组成的防火封堵系统还未通过有资质测试机构的检测, 封堵系统真实防火能力仍存在较大的不确定性。一方面, 换流变压器内部使用了大量的绝缘油, 其着火燃烧的情形接近烃类火灾, 与纤维素类火灾(ISO 834 标准升温曲线)相比, 烃类火燃烧具有升温速率高的特点, 可在极短的时间内达到 1 100 ℃, 极易造

成防火封堵材料性能快速衰减; 另一方面, 此种防火封堵系统结构未考虑爆炸作用, 一旦换流变压器发生爆炸燃烧事故, 防火封堵系统结构可能直接被爆炸破坏而完全丧失防火功能, 导致火灾蔓延至阀厅。

国内外在结构抗爆与结构防火方面已开展了大量的研究, 在结构抗爆方面, 对爆炸波的传播、爆炸作用下结构构件损伤破坏机理、结构抗爆防护技术等方面已有较深入的认识; 在结构防火方面, 对材料在火灾高温下的力学性能、火灾作用下结构构件损伤破坏机理、结构防火保护技术等方面也有大量的研究成果。然而, 对于特高压能源系统潜在的油类火灾与爆炸联合作用的新问题, 现有技术储备仍然无法有效解决。

因此, 基于抗爆与防火一体化的思想, 通过引入不锈钢龙骨抗爆结构体系, 兼顾防火性能提升, 提出 1 种新型的防火防爆封堵系统。并对真型封堵样品进行耐火试验, 验证其系统的防火性能, 采用有限元数值计算方法验证系统的防爆性能, 为防火封堵系统的改进设计、提升封堵系统的火灾防控能力、避免换流变压器故障导致的火灾或爆炸引起阀厅内部设施的破坏提供参考。

## 1 新型防火防爆封堵方案

针对特高压换流站阀厅原有 PAROC 板封堵系统防

**基金项目:** 国家电网有限公司资助科技项目(5455DW180023)

## Application of virtual reality perception technology in fire simulation training

LI Lei<sup>1, 2</sup>

(1. SINOPEC Safety Engineering Institute, Shandong Qingdao 266000, China; 2. The National Registration Center for Chemicals, Shandong Qingdao 266000, China)

**Abstract:** In order to realize the emergency rescue of dangerous chemical accidents and improve the scientificity and operation experience of fire equipment simulation training, the paper proposed a modeling method of fire accident emergency and developed a virtual reality emergency equipment training system based on embedded virtual reality. Firstly, the model of fire accident is built, then the operation results are displayed by 3D virtual system. The experimental results show that the simula-

tion training plays an important role in improving the operation level of emergency disposal. The real-time simulation calculation and feedback of fire equipment operation are realized.

**Key words:** virtual reality; perception; fire-fighting equipment; simulation training

**作者简介:** 李 磊(1983—), 男, 中国石化青岛安全工程研究院事故应急救援研究室高级工程师, 博士, 主要从事虚拟现实、数字化、应急管理等方面的研究, 山东省青岛市松岭路 339 号, 266000。

收稿日期: 2020-10-30