

5G与VR技术融合的机舱火灾应变平台开发

魏旻, 王永坚

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为开展船舶大型CO₂灭火系统、机舱灭火操作的训练,以集美大学教学实习船“育德”轮(载重吨6.4万t)为仿真对象,采用B/S架构,融合5G与虚拟现实(VR)技术优势,运用3DMax建模软件仿真“育德”轮大型CO₂灭火系统及机舱火灾场景,开发了船舶机舱火灾应急应变虚拟仿真平台。经2年多的教学实践情况,证实了该平台的适用性和成效性。

[关键词] 大型CO₂灭火系统; 船舶机舱; 机舱火灾应急应变; 虚拟仿真; 5G技术; VR技术

[中图分类号] TK 427

Development of Virtual Simulation Platform for Marine Engine Room Fire Emergency Response Based on 5G and VR Technology

WEI Min, WANG Yongjian

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to carry out the training of large CO₂ fire extinguishing system and E/R fire extinguishing operation of the ship, M. V. Yude owned by Jimei University for teaching and practicing was selected as the object for simulations. Simulations were conducted under the B/S framework by integrating the advantages of 5G and virtual reality(VR) technologies, which were then employed to develop a virtual simulation platform via 3DMax for emergency response to E/R fire on ships. More than two years of teaching practice have confirmed the applicability and effectiveness of the platform developed.

Keywords: large CO₂ fire extinguishing system; ship engine room; fire emergency response; virtual simulation; 5G technology; VR technology

0 引言

2019年5月25日,福建省海运集团有限责任公司“金海翔”号货轮在船厂修船期间,进行大型CO₂灭火系统功能效用测试时,由于该船CO₂灭火系统设计单位指导船员的失误以及该船CO₂灭火系统主管船员(三副)的操作失误,造成现场修船人员和船员中10人中毒窒息死亡、19人受伤、经济损失1903万的特大安全事故。同期,浙江舟山海岛船舶修造领域也发生数起船舶大型CO₂灭火系统泄漏,造成了巨大人员伤亡和经济损失^[1]。此类事件的发生,突显出船舶大型CO₂灭火系统设计与释放、火灾应急应变演练的重要性,但航运企业、航海院校开展与之对应的实操训练比较少。究其原因

[收稿日期] 2023-02-06

[基金项目] 福建省教育厅科技项目(JAT200279)

[作者简介] 第一作者:魏旻,主要从事船舶轮机仿真技术与船舶防污染技术方向研究。通信作者:王永坚,教授/高级轮机长,主要从事船舶轮机仿真技术与船舶动力装置智能故障诊断技术研究。E-mail:wangyongjian@jmu.edu.cn

有: 实物式船用灭火设施实操训练存在成本高、难度大、风险性高以及受训人员人数、场地和设备台套数有限等不利因素, 使得训练质量和效果大打折扣。因此, 有必要采用虚拟仿真技术完成此类训练。

虚拟现实技术(也称 VR 技术)是一种高度逼真地模拟人在自然环境中视、听、动等行为的人机界面技术, 具有真实感高、沉浸感强以及交互性好的特点^[2]; 5G 通信技术具有超大的移动带宽、超低时延通信、大规模物联网等技术优势^[3]。运用大带宽、低时延的 5G 技术可以使 VR 技术的虚拟仿真渲染功能在云端完成, 实现场景模型加载与渲染的动态、准确、实时性, 并同步(几乎零延时)给受训人员, 能提供更加沉浸的虚拟教学训练内容, 能有效提高学习效果。

因此, 5G 与 VR 技术相融合的船舶机舱火灾应急应变虚拟仿真平台的开发与实践, 不仅能克服实物式训练方式存在的诸多不足, 而且可使航企船员、院校学生在高逼真度的虚拟仿真船舶火灾场景内, 随时随地通过人机交互方式, 自主开展上述实操训练, 培养其面对火灾的良好应急应变能力。

1 平台设计

以集美大学教学实习船“育德”轮(6.4 万 t)为仿真对象, 采用 B/S 架构, 融合 5G 与 VR 技术优势, 运用 3DMax 建模软件仿真“育德”轮大型 CO₂ 灭火系统及机舱火灾场景, 开发了逼真度高、交互性强和实训效果好的船舶机舱火灾应急应变虚拟仿真平台。图 1、图 2 分别为仿真实操训练平台登入界面、船舶大型 CO₂ 灭火系统仿真场景。



图 1 仿真实操训练平台登入界面

Fig.1 Interface of logging the virtual simulation training platform

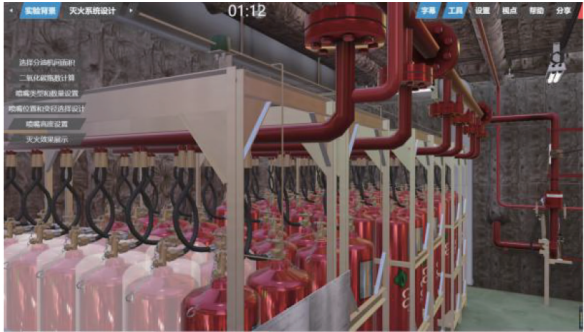


图 2 船舶大型 CO₂ 灭火系统仿真场景

Fig.2 Simulation scenario for marine CO₂ fire extinguishing system

该虚拟仿真平台包含练习和考核两种模式, 支持 PC/手机/微信端浏览器实时访问, 提供高逼真的船舶大型 CO₂ 灭火系统参数仿真设计和机舱灭火体验; 训练过程具有智能指导功能, 可根据学员操作步骤给出相应理论知识和操作指导; 考核报告具有自动评判功能, 可根据训练报告详细列出学员的每一步骤的操作和分数, 并给出正确的操作步骤和改进要点; 提供教务管理功能, 教师可以登录平台后台进行学员管理、权限管理、考核管理、成绩报告管理等操作。

该平台主要包括三个虚拟仿真实操训练模块: 船舶大型 CO₂ 灭火系统参数仿真设计、固体/油类/电气设备三类机舱火灾扑灭过程仿真实操训练、机舱小型/大型火灾扑灭过程应急应变虚拟仿真实操训练。

1.1 船舶大型 CO₂ 灭火系统参数仿真设计

以“育德”轮机舱分油机间舱容与舱内设备为仿真设计参考, 按照《国际消防安全系统规则》(FSS 规则) 第五章固定式气体灭火系统的规定——释放 CO₂ 的体积能覆盖包括舱棚在内的被保护的最大机器处所总容积的 35% (本文简化模型取值 35%), 学员任意选择分油机间舱容为 55 m³ 和 85 m³, 通过计算模型的选择、参数赋值的选择完成各组成部件的搭建, 并按照节约成本的理念设计 CO₂ 灭火系统模型(模块); 通过实时可视化动画展示检验设计成效, 检验上述两种机舱保护容积下, CO₂ 灭火系统瓶数计算、喷嘴选择、输送管路段连接等仿真设计的合理性和适用性。

系统仿真设计参数主要有: 1) CO₂ 容量和所需气瓶数规范化计算与选择; 2) CO₂ 输送管径的规

范化设计与变径接头的选择；3）CO₂喷嘴选型与成本考虑；4）喷嘴数量合规性计算与安装位置规范化设计；5）喷嘴高度规范化设计与优化调整等。

图 3、图 4 为 CO₂灭火系统组成部件的设计交互界面。



图 3 喷嘴选型仿真设计

Fig.3 Designs of simulations for selecting the nozzle



图 4 喷嘴安装位置规范化仿真设计

Fig.4 Designs of simulations for normalizing the position for nozzle installation

1.2 固体、油类、电气设备三类机舱火灾扑灭过程仿真实操训练

分别搭建机舱物料间破布着火、分油机房集油槽燃油着火、电气控制箱着火仿真场景。仿真实操训练过程中，仿真界面随机弹出任一类火灾场景，学员用可编辑的操作方式选择灭火思路和操作方案。操作检查单包括：1）灭火器的选择（消防水枪、手提干粉灭火器、手提 CO₂ 灭火器、水基泡沫灭火器）；2）灭火器操作（检查压力、拆铅封、拔保险销、钢瓶摇晃动作等）；3）所选灭火器最小喷射时间的选择；灭火人员站位与喷射距离选择；4）灭火时喷射角度的选择等。

完成检查单内所有操作动作后，开展三类火的扑灭仿真实操训练。图 5 ~ 8 为扑灭机舱三类火仿真实操训练场景。



图 5 扑灭固体火灾仿真实操训练

Fig.5 Simulation training for extinguishing solid fires



图 6 扑灭油类火灾仿真实操训练

Fig.6 Simulation training for extinguishing oil fires



图 7 电器设备火灾仿真场景

Fig.7 Simulation scenario for fires on electrical equipments



图 8 扑灭电器设备火灾仿真实操训练

Fig.8 Simulation training for extinguishing fires on electrical equipments

1.3 机舱小型、大型火灾灭火过程应急应变仿真实操训练

在该虚拟仿真实操训练平台上,学员可自主选择小型、大型火灾扑灭仿真实操训练模块。根据“育德”轮消防应变部署表相关规定,设置消防队、隔离队、救护队三组人员,按各自在消防灭火中的任务开展如下仿真实操训练:1) 机舱小型火灾灭火过程应急应变仿真实操训练;2) 释放船舶大型 CO₂ 灭火系统扑灭机舱大型火灾应急应变仿真实操训练。

根据学员的仿真实操训练结果将形成各自的船舶机舱小型火灾、大型火灾灭火操作方案。图 9 ~ 12 为破灭机舱小型、大型火灾仿真实操训练场景。



图 9 列队集合
Fig.9 Assemble in line



图 10 扑灭小型火灾
Fig.10 Extinguishing small fires



图 11 大型火灾探火
Fig.11 Fire detection for large fire



图 12 释放大型 CO₂ 灭火系统扑灭大型火灾
Fig.12 Extinguishing large fires by releasing large CO₂ system

上述仿真实操训练的教学设计,既兼顾与学员对机舱 CO₂ 灭火系统设计基本知识的学习、机舱火灾应急应变操作应知应会知识的学习以及基本操作动手技能的训练的需要,同时有助于提升学员分析问题能力、应急处理能力和创新能力。

2 平台开发

2.1 虚拟仿真平台整体框架结构

2.1.1 网络框架

船舶机舱火灾应急应变虚拟仿真平台采用 B/S 网络架构开发而成,即浏览器、Web 服务器、应用服务器和数据库服务器的体系结构,如图 13 所示。

该平台架设在中国电信 5G 天翼云上,所有应用程序、数据库及 Web 服务器都布置在云端上,学员不用安装专门的客户端软件,只需要通过 PC、手机及微信端的浏览器访问平台 Web 服务器即可完成平台训练。

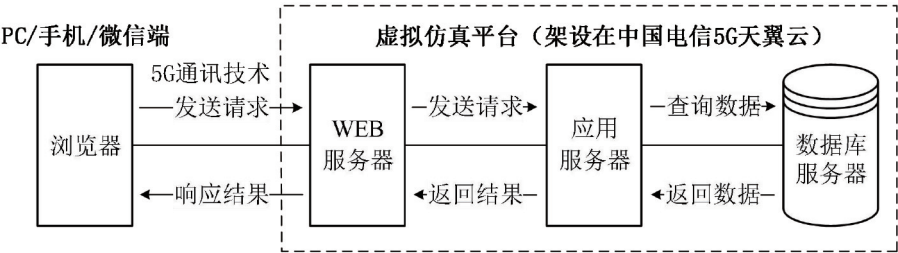


图 13 机舱火灾应变平台网络框架图

Fig.13 Network framework diagram of virtual simulation platform for marine engine room fire emergency response

借助中国电信 5G 技术超大带宽、超低延时、超强运算能力、超多网络节点、资源动态调度的特性，可以在云端完成虚拟仿真三维场景实时渲染、学员数据实时存储以及学员与平台之间实时请求和响应等通讯功能，真正实现随时随地、超低延时、多用户访问平台并进行训练与管理，有利于增强学员学习自主性、体验沉浸感和实操训练有效性。另外，学员的浏览器就是客户端，客户端不需要专门维护，对学员电脑或手机性能要求较低，只要浏览器通过网络连上平台即可享受到平台最新服务；无论用户规模有多少、系统维护工作量有多大，平台维护、系统升级或更新等功能只需要在 5G 云服务器上进行管理和操作，即可实现平台远程维护、升级和功能扩展等^[4]。

此外，中国电信 5G 天翼云提供端到端安全防护，保障系统安全稳定运行；通过防火墙、数据加密、数据备份、日志审计、服务监控、登录告警等手段，加强数据访问安全控制，保证用户数据安全不泄露，同时保证了虚拟仿真平台的安全和稳定性。

2.1.2 功能框架

该虚拟仿真平台的功能框架是以 VR 技术、3D 仿真技术和网络技术为依托，运用 Web3D、3DMax、MayaOSG、Photoshop 等工具进行开发的，具有良好自主性、交互性和可扩展性。整个平台由教务管理界面、中间支撑层及学员操作界面三大部分组成，如图 14 所示。

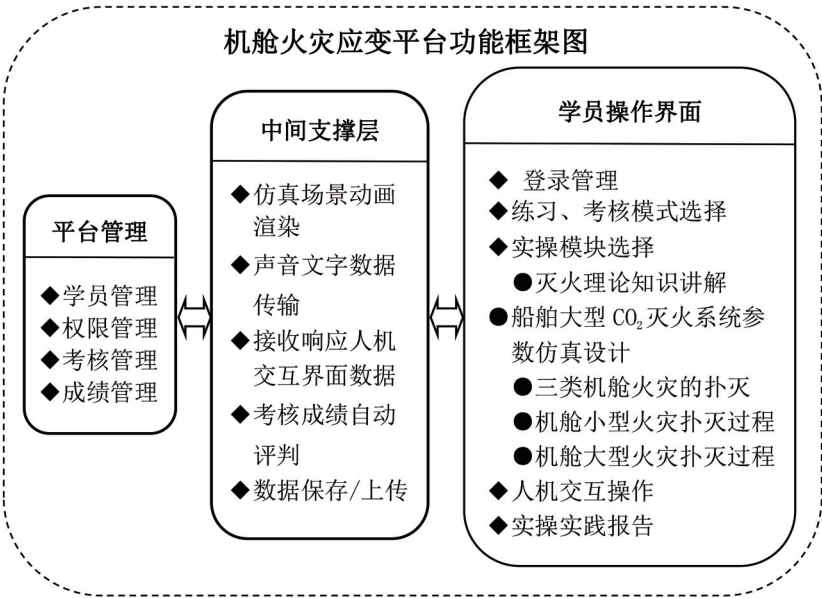


图 14 机舱火灾应变平台功能框架图

Fig.14 Functional framework diagram of virtual simulation platform for marine engine room fire emergency response

①教务管理界面。提供面向教师的学员管理、权限管理、考核管理和成绩管理等教学管理功能，确保教师进行自动评判考核设置、学员信息管理及训练成效评估。

②中间支撑层。提供仿真场景动画渲染、场景声音文字数据传输、接收和响应人机交互操作界面

数据、考核成绩自动评判、数据保存/上传等场景和训练数据传输与储存功能, 实现二/三维场景模型实时渲染和动画、声音和文字等各类场景素材的数据传输、人机交互数据通讯、对学员训练考核报告进行自动评判以及连接数据库服务器进行各类数据处理, 确保平台场景高度逼真、功能正常运行、训练高质高效。

③学员操作界。提供面向学员的登录管理、仿真练习与考核选择、各实操模块(包括灭火理论知识讲解、船舶大型 CO₂ 灭火系统参数仿真设计、三类机舱火灾的扑灭、机舱小型和大型火灾扑灭过程)训练、训练过程智能指导、人机交互操作等仿真训练功能, 尽可能帮助学员实现自主的实操训练, 提升学习和训练效果。

2.2 开发流程

“船舶机舱火灾应急应变虚拟仿真平台”项目开发前期, 平台总体设计人员会同软件开发技术人员、建模人员等核定《产品内容原型图》《产品功能列表清单》《产品界面 UI 原型图》《产品内容流程图》《美术文档》等前期需求文件。开发过程中, 技术人员根据产品内容和界面 UI 原型图、功能列表清单等文档, 利用 Babylon.js 渲染引擎完成基础的 Web3D 虚拟仿真操作界面搭建; 建模人员根据“育德”轮真实机舱实景图片及美术文档, 利用 3DMax 软件渲染出虚拟仿真场景和人物、动画、场景之间交互的模型文件, 实现船舶大型 CO₂ 灭火系统与机舱火灾场景三维呈现、火焰氧气及温度参数实时显示、文字、声音和视频提示以及人机交互方式等功能; 技术人员根据产品内容流程图, 利用 TDu 虚拟仿真可视化编辑器编写项目流程配置表。最后, 技术人员利用 C++ 语言编写程序, 完成虚拟仿真操作界面读取和使用模型文件与项目流程配置表的整合工作, 到达符合设计需求的虚拟仿真场景展现和人机交互方式, 至此, 项目研发完成, 进入测试及运营阶段。平台开发流程示意图如图 15 所示。

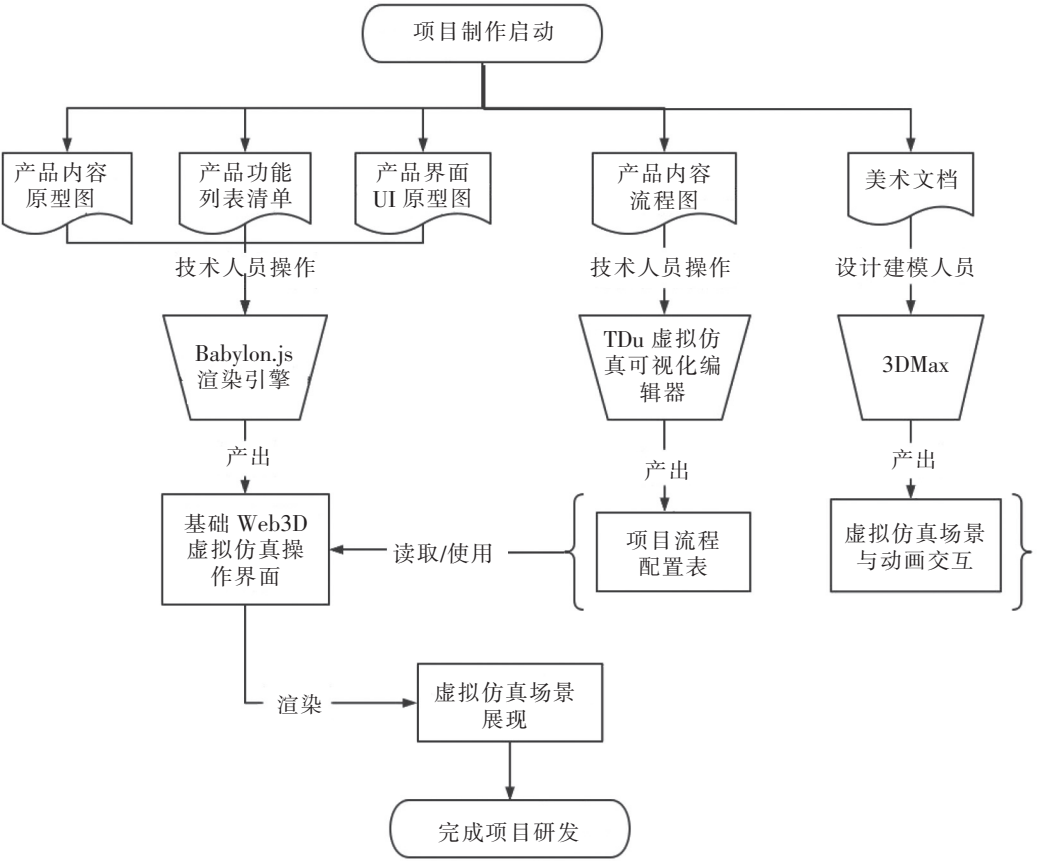


图 15 平台开发流程示意图

Fig.15 Schematic diagram of the process for platform development

3 关键技术 with 功能实现

3.1 利用 3DMAX 建模还原场景

根据“育德”轮机舱实景图图片（如图 16 所示），运用 PS 软件对实景图图片、文字、色彩进行处理，利用 3DMAX 建模软件搭建机舱（包括各个灭火舱室）及各机器设备等模型（如图 17 所示），利用材质贴图和渲染技术还原“育德”机舱真实情况，并搭配 Babylon.js 渲染引擎，实现高逼真度的场景 3D 漫游功能。

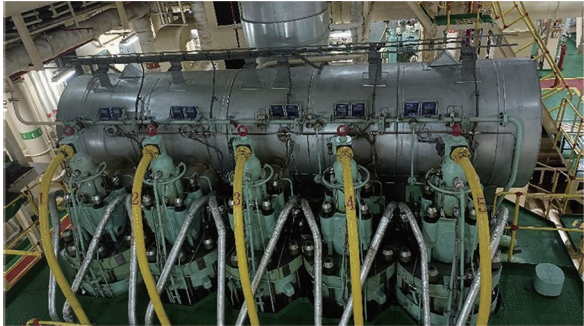


图 16 机舱主机实景图图片
Fig.16 Real time pictures of engine room

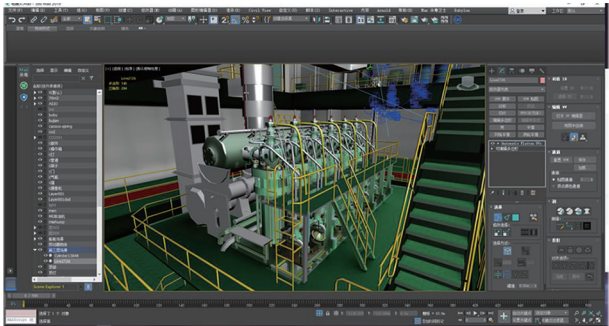


图 17 机舱模型渲染图
Fig.17 Render map of the engine room model

3.2 火焰渲染粒子效果的实现

借助 Web3D 技术，用户在网页上看到的不仅仅是冷冰冰的物品外观，还可以用鼠标/手点击相关交互点，对物品进行旋转、移动以及拆解，继而对物品的所有信息点有全面的了解和掌握。通过 Babylon.js 引擎携带的粒子特效与火焰纹理贴图功能，使用粒子特效实现体积烟雾效果，使用火焰材质（漫反射纹理、失真纹理、不透明纹理）贴图实现动态火焰效果，两者相结合并规定坐标定位，从而实现场景中的火焰渲染特效。

3.2.1 粒子系统

粒子系统使用小型 2D 精灵，用于模拟难以再现的现象（如火、烟、水），或抽象的视觉效果（如魔法闪光和技能特效）。产生的粒子云可以通过多种属性进行控制，包括大小、寿命、发射率、区域和功率。重力也可以添加到粒子属性。其中，需要创建一个 ParticleSystem 对象，这将设置系统中的粒子数。同时粒子系统还需要搭配纹理以便看到粒子效果以及发射器，其设置粒子从起始点的位置和扩散范围。

如：`var particleStstem = newBABYLON. ParticleSystem (“particles”, 2000, scene)。`

其中：“particles”为定义的粒子名称；2000 为容量，即规定粒子数；scene 为搭载的目标场景，场景是可选的，默认为当前场景。

启动特效：`particleStstem . start ()；`

停止特效：`particleStstem . stop ()。`

①粒子纹理。通过粒子贴图纹理，辅助粒子系统更好地展现其效果，配合粒子发射器展现出烟雾效果。

如：`particleSystem. particleTexture = new BABYLON. Texture (“PATH TO IMAGE”, scene)。`

其中：“PATH TO IMAGE”为展现粒子效果的图片路径；scene 为搭载的目标场景，场景是可选的，默认为当前场景。

②粒子发射器。粒子发射器可以使用三维向量或者模型网格定位，在这种情况下，网格的位置用于定位。

如：`particleSystem. emitter = new BABYLON. Vector3 (-1, 2, 3)；`

`var source = BABYLON. Mesh. CreateBox (“source”, 1.0, scene)；`

particleSystem.emitter = source。

3.2.2 火焰特效

通过粒子助手与火材料的漫反射纹理、失真纹理、不透明纹理创建出火焰特效, 不过不适用于照明。其中, 需要通过 ParticleHelper 创建复杂的粒子系统, 无须处理各个属性。配合火焰材质的创建, 生成燃烧的火焰效果。

①创建粒子助手。

如: var plane = BABYLON.Mesh.CreatePlane("fireplane",1.0,scene)。

②创建火焰材质。

如: var fireMaterial = new BABYLON.FireMaterial("fireMaterial",scene)。

③通过设置火焰材质的漫反射纹理、失真纹理、不透明纹理, 从而达到拟真的火焰效果。

漫反射: fireMaterial.diffuseTexture = new BABYLON.Texture("diffuse.png",scene);

失真: fireMaterial.distortionTexture = new BABYLON.Texture("distortion.png",scene);

不透明: fireMaterial.opacityTexture = new BABYLON.Texture("opacity.png",scene);

执行绑定渲染: plane.material = fireMaterial。

3.3 模糊综合评判法与自动评判设计过程

自动评判模块是该虚拟仿真平台的重要组成部分, 通过 C++ 编程自动完成自动评判功能。平台采用模糊综合评判法对考核试题的步骤分值、评分规则、自动评判机制等进行设置, 教师可通过编辑教务管理界面中“考核设置”实现相关自动评判参数设置。评判要素包括评价因素集和考核评判集两方面^[5]。

3.3.1 评价因素集和考核评判集的选择

评价因素集指的是对评判对象进行评价各方因素的集合, 考核评判集是评判者对评判对象进行考核时做出的各种评判因素的集合。根据《海船船员培训大纲(2021版)》中“实践技能与要求”相关规定, 结合实操训练内容和特点, 确定训练的评价因素集和考核评判集。

1) 选定五方面组成评价因素集 $U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$: a) 灭火器的正确选择/舱容设置与 CO₂ 输送管路段管径的正确设计与选择 (u_1); b) 站位的正确选择/喷嘴选型、喷嘴数量确定与场景内正确设计与布置 (u_2); c) 灭火点的正确选择/CO₂ 喷射效果正确仿真验证 (u_3); d) 操作准确性和熟练性 (u_4); e) 操作完成时间 (u_5)。

2) 选定五方面组成考核评判集 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$: a) 选择/操作准确/熟练 (100 分, v_1); b) 选择/操作准确/较熟练 (80 分, v_2); c) 选择/操作准确/熟练程度一般 (60 分, v_3); d) 选择/操作较差 (40 分, v_4); e) 选择/操作差 (20 分, v_5)。

3.3.2 单因素评判

矩阵 R_i 与权重 A 的确定。单因素评判矩阵 $R_i = (r_{ij}, \cdots, r_{im}, r_{ij}) (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m)$ 表示某个被评价对象从因素 u_i 角度评判 v_j 等级的隶属度。 r_{ij} 越大, 表明 u_i 和 v_j 之间关联越密切^[5]。单因素评判矩阵是以各单因素评判集的隶属度为行组成的矩阵, 即

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}。$$

1) 隶属度确认。本系统 r_{ij} 数值按如下评判规则确认: a) u_1 —选择/操作准确为 1, 否则为 0; b) u_2 —选择/操作准确为 1, 否则为 0; c) u_3 —选择/操作准确为 1, 否则为 0; d) u_4 —按超出规定选择/操作次数和时间的百分比确认; e) u_5 —按超出规定操作时间的百分比确认。基于该规则, 平台通过“考核设置”进行“自动评判”的分值和评价机制设置; 并根据训练考核中学员最终完成每一操作步

骤对应因素集 u_i 的完成质量，自动赋值隶属度。

2) 权重 A 。反映各因素的重要程度，由各权重组成权重集 $A = (a_1, a_2, \cdots, a_n)$ 。通过 20 位评估专家的综合问卷调查进行统计分析，确认考核试题评价因素集的权重 $A = (0.1, 0.1, 0.1, 0.3, 0.4)$ 。

3.3.3 模糊评判模型

确定单因素评判矩阵 R_i 和权重 A 后，建立评分模糊评判模型 $B = A \cdot R = (b_1, b_2, \cdots, b_m)$ ，本平台考核试题自动评判模块，取 $b_j = \sum_{i=1}^m a_i r_{ij} (j = 1, 2, 3, 4, 5; m = 5)$ 。其中 b_j 为模糊综合评判指标，根据实际评估情况，取 b_j 为权数，对各个评判集元素进行加权平均计算，得出综合评判的最终结果。即：学员考核成绩： $N = \sum_{j=1}^n b_j V_j / \sum_{j=1}^n b_j$ 。

4 应用效果

自 2020 年 10 月该平台发布以来，共有 516 余人次完成了该平台仿真训练的练习和考核并取得了有效成绩，统计并分析有效成绩分布情况，学员平均优秀率高达 94.32%。表 1 为 2020—2022 年本系统发布之后学员使用情况。

表 1 自 2020 年 10 月网上发布以来该虚拟仿真平台学员使用情况
Tab.1 Usage of this virtual simulation platform by trainees

序号	学期	校内使用 人次	校外使用 人次	累计使用 人次	教学计划内 人次	学员自主 训练人次
1	2020—2021(上下学期)	138	92	230	58(本科) + 82(船员)	90
2	2021—2022(上下学期)	189	97	286	60(本科) + 85(船员)	141
合 计		327	189	516	285	231

为了解学员对该虚拟仿真平台的满意程度，每一个取得有效成绩的学员都填写了调查问卷，统计问卷反馈，结果如下：1) 在虚拟仿真场景评价的调查中，96.58% 的学员认为仿真场景逼真、沉浸感强，人机交互友好，能增强其对火灾知识及灭火器材使用的熟悉程度，能很好地通过应急应变训练完成机舱火灾的扑灭；2) 在虚拟仿真教学效果评估的调查中，95.66% 学员认为该平台训练极大激发了其学习热情，提升了其专业训练效果，整体学习和训练效果好；3) 在虚拟仿真训练优势的调查中，96.73% 的学生认为该平台有助于实现高危实操训练的三维数字化和虚拟化，能够满足其不限时间、不限空间，在安全、便捷的条件下开展实验和训练，有助于理论结合实践，切实掌握专业知识。

由此可见，该虚拟仿真平台不仅填补了集美大学在虚拟仿真火灾培训的空白，而且在教学实践应用中也达到了良好的预期效果。

[参 考 文 献]

[1]《劳动保护》编辑部. 2019 我国重特重大事故回顾[J]. 劳动保护, 2020(2):16-18.
[2]王钰莹. 虚拟学习环境下大学生批判性思维发展的影响因素及优化策略研究[D]. 长春:东北师范大学, 2022.
[3]白晶. 车联网边缘计算安全防护体系关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2022.
[4]涂婉丽,徐轶群. 基于 Web 的船舶动力装置虚拟操作训练系统[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2015, 20(2):128-133.
[5]王智勇,郑志强,郭凤仪. 基于模糊结构元的栓接电缆接头松动故障综合评判[J]. 电器与能效管理技术, 2016(15):70-71.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 郑青榕)