

基于灾害仿真的虚拟应急演练系统^①

冯磊, 徐圆, 林晓勇

(北京化工大学, 信息科学与技术学院, 北京, 100029)

摘要: 基于虚拟现实技术的虚拟应急演练有着广泛的应用, 但现有演练系统往往缺少对灾害场景的有效仿真, 以及预案支撑下的完整系统框架. 针对上述问题, 该文首先提出了一种面向应急演练的仿真系统 VEDSimu, 解决了实体间消息高效传输、大规模仿真模型计算问题; 并基于 VEDSimu 开发预案脚本系统、预案推理机、考核评价以及虚拟现实客户端等其他模块, 构建虚拟应急演练系统 VEDSys. 最后, 结合 VEDSys 在实际企业虚拟消防演练中的应用, 验证了系统的可行性、高效性与可扩展性.

关键词: 虚拟现实; 灾害仿真; 虚拟应急演练

Virtual Emergency Drill System Based on Disaster Simulation

FENG Lei, XU Yuan, LIN Xiao-Yong

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Virtual reality-based virtual emergency drill has wide application. But existing drill systems lack accurate environmental simulation and plan support. In this paper, a virtual emergency drill simulation system (VEDSimu) was proposed. It solved the entity message passing problem and large-scale simulation model computing problem. Then, a virtual emergency drill system (VEDSys) was constructed. It implemented plan script system, plan inference engine, evaluation system and virtual reality client based on VEDSimu. Furthermore, VEDSys was proved to be feasible, efficient, and scalable with the application in actual company virtual fire drill.

Key words: virtual reality; disaster simulation; virtual emergency drill

安全是石化、消防、制造、勘探等行业永恒的主题. 企业安全教育中, 应急演练是提高员工学习事故处置流程、设备操作方法的有效手段. 然而, 由于灾害的危险性, 以及设备、场地和时间等条件的限制, 现场演练难以在日常培训中广泛展开.

虚拟应急演练综合了虚拟现实、网络通信、计算机仿真、安全系统工程、教育心理等技术理论, 成为企业员工安全教育的新方式. 演练过程中, 系统通过演练客户端提供一致、可交互的演练环境, 参演人员分工协作完成演练, 最终达到技能掌握、预案学习的目的. 虚拟演练具有低成本、低风险、组织难度小、可重现性高等特点, 在石化、消防、勘探、电力等领域已得到应用, 并仍有更为广阔的发展前景.

然而, 现阶段的演练系统往往欠缺对设备联动、灾害实时干预、灾害连锁反应的支持^[1], 且由于计算能力所限, 欠缺对设备运行、灾害蔓延背后机理模型的准确仿真^[2], 造成演练真实性较低. 此外, 参演人员对预案的学习往往停留在按照预案顺序执行任务, 在参演人员操作失误情况下缺少进一步分支推理^[3], 以及对事故灾害的模拟并触发相应二级预案^[4], 导致演练与实际情况的脱节.

本文研究解决上述问题, 提出一种虚拟应急演练系统(Virtual Emergency Drill System, VEDSys)三层架构, 如图1所示. 其中虚拟现实层提供可交互的演练虚拟场景; 演练仿真层(Virtual Emergency Drill Simulation, VEDSimu)提供场景模拟、客户端交互等核心功能, 演

^① 基金项目:北京市自然科学基金(4142039);中央高校基本科研业务费(JD1413);北京高等学校青年英才计划(YETP0503)

收稿时间:2014-04-26;收到修改稿时间:2014-05-15

练应用层在仿真层基础上完成预案执行, 演练推进、考核评价等功能.

本文首先对 VEDSimu 设计实现, 在此基础上提出完整的虚拟应急演练系统解决方案, 并给出实际应用案例.

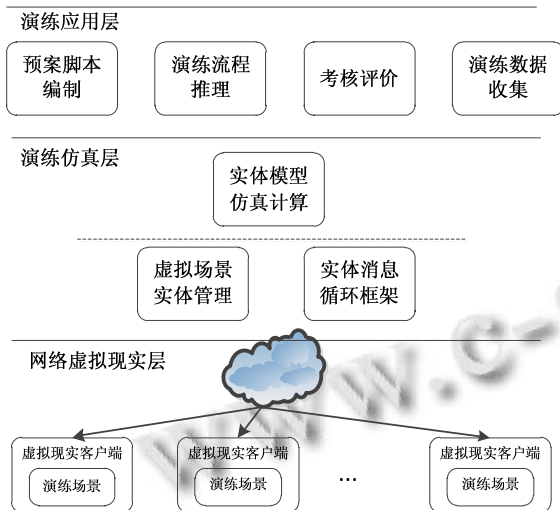


图 1 VEDSys 层次架构

1 演练仿真层

1.1 需求与总体设计

危险行业应急演练一般存在“设备运转或操作异常; 引发灾害事故, 并可能引发灾害连锁反应; 员工应急救援, 操作设备, 救人救灾”的过程, 为对此有效仿真, 归纳 VEDSimu 的具体需求为:

- (1)管理虚拟环境中灾害、设备等实体的属性、行为, 完成实体模型迭代更新, 并响应用户操作;
- (2)提供实体消息传输框架, 支持实体间交互影响, 并对实体消息进行过滤, 降低系统负载;
- (3)有效完成复杂机理、渲染模型的计算, 对计算资源均衡负载, 并提供良好的伸缩性.

针对以上需求, VEDSimu 层次架构如图 2 所示. 1.2 场景实体管理

VEDSimu 首先对虚拟场景中如人员、设备装置、灾害、气象等实体抽象建模, 并建立 VEDSimu 与演练客户端对应实体的映射关系; 演练人员通过演练客户端操作虚拟设备, 并按照“人在回路”思想, 场景实体对用户操作实时反馈.

为方便实体模型的重用和扩展, VEDSimu 以面向对象方式进行实体建模. 图 3 为实体类型层次示意.

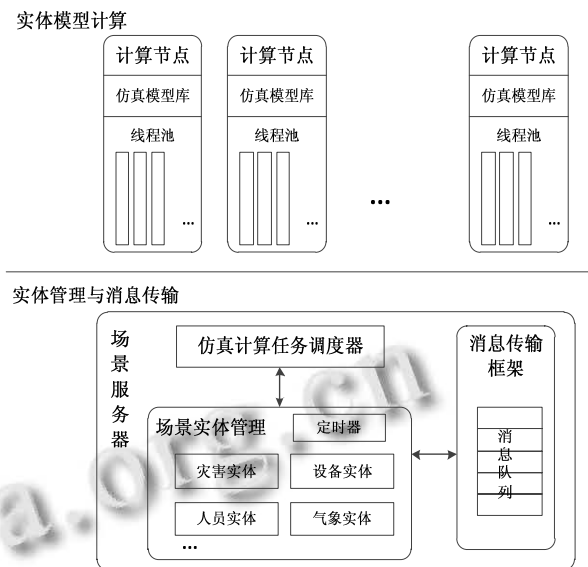


图 2 VEDSimu 层次架构

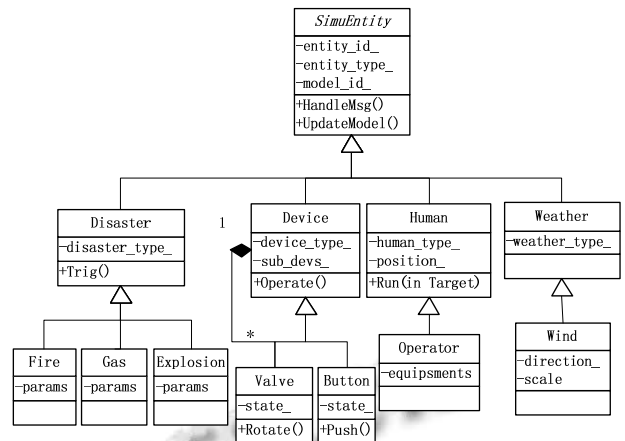


图 3 实体类型层次 UML 图

实体类型通过三个层次逐步定义, 每层类型继承上层类型的属性和方法:

(1)第一层 SimuEntity 定义所有实体的接口, 提供实体 ID、实体类型和对应的模型 ID 等属性, 并定义实体消息处理接口 HandleMsg, 以及模型迭代处理接口 UpdateModel.

(2)第二层包括灾害、设备、人员和气象条件 4 个抽象类, 对每个类型实体的共同特性抽象表示, 如灾害实体定义了灾害类型 disaster_type_ 和灾害触发抽象方法 Trig(), 并在 Trig() 中实现如事件抛出, 事件记录等基本操作.

(3)第三层实现对具体实体的定义, 如 Button 实体定义了所处状态 state_(打开或关闭)和具体行为 Push(), 并根据需求对上层接口和抽象方法定义补全.

实体实例创建后, 系统对实体的生命周期进行管理, 过程步骤包括:

(1)配置文件中定义场景中的实体, 包括实体类型、位置等基本信息, 并设置触发条件, 如温度、浓度阈值等, VEDSimu 在初始化时加载;

(2)实体间通过消息进行交互, 并根据消息改变自身状态, 当满足条件时实体被激活, 并开始模型迭代. 如爆炸因浓度、温度参数达到预设条件而被触发.

(3)定时器驱动实体模型迭代, 每次迭代将模型计算任务交由 VEDSimu 计算部分异步处理.

(4)客户端三维场景与 VEDSimu 中实体存在映射关系, 即其中一方的变化会同步至另一方. 如演练人员操作阀门, 系统对应实体进行响应, 改变自身状态, 并广播至客户端, 由客户端进行三维展现.

1.3 消息传输框架

1.3.1 消息循环

实体管理基础之上, 系统需要动态处理如灾害连锁演化、设备联动等实体间的交互行为.

VEDSimu 中, 将消息定义为实体所触发的事件, 并通过消息循环实现实体间交互影响. 实体由单服务器集中管理, 消息传输在共享内存模型下进行; 为减少队列操作的竞争占用, 采用 Per-Queue-Per-Thread 模型; 消息则以轮转(Round Robin, RR)方式推送至其中一个队列.

图 4 所示为消息传输框架, 框架基于消息队列完成消息循环: 实体模型迭代中, 当实体状态满足事件触发条件时发布消息; 消息经消息代理器推送至消息队列; 对应线程处理消息并调用消息接收实体的消息处理函数.

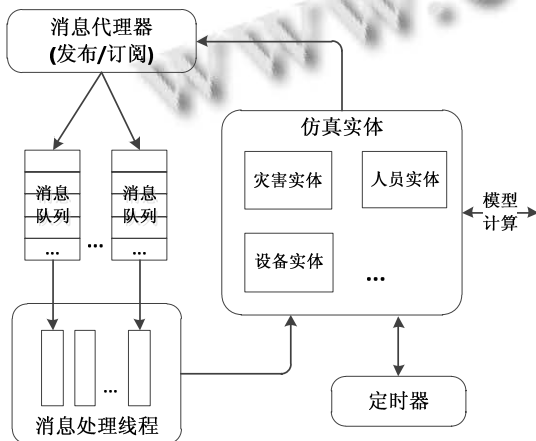


图 4 消息传输框架

以火灾对设备的影响为例:

(1)火灾实体每次迭代将灾害中心位置、中心温度等参数封装成消息发布;

(2)如某设备实体订阅了上述火灾消息, 在收到消息后, 由消息处理函数计算火灾对设备环境温度的影响, 并更新设备模型参数;

(3)在设备实体迭代中, 设备模型根据模型参数判断是否引发故障, 并决定是否发布消息.

1.3.2 消息过滤

场景中灾害、设备等实体演变较快, 需要频繁、大量的发布消息, 如果以广播方式发布消息会导致大量无意义消息使系统饱和, 对此, VEDSimu 以发布-订阅模型进行消息过滤.

如图 5 所示, 发布方发布消息, 由消息代理器根据映射规则, 依次将消息经由消息队列投递至订阅方.

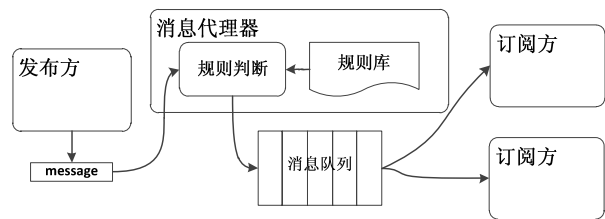


图 5 消息代理器

消息代理器的过滤规则包括类型映射、实体映射、和空间关系映射三种, 如表 1 所示.

表 1 消息过滤规则

规则类型	例子
类型映射	灾害类型对人员类型的映射
实体映射	装置设备实体间的映射
空间关系映射	灾害对影响范围内实体的动态映射

1.4 仿真模型计算

虚拟演练需要对如设备液位、物料温度, 以及泄露、爆燃、气体扩散等灾害进行模拟, 以及对火灾、烟团、气体等可见灾害渲染模型进行计算.

由于过程涉及大量代数-微分方程求解^[5], VED-Simu 采用多节点并行计算方式提升系统性能和伸缩性, 图 6 为模型计算流程, 计算任务(Task)由调度器分派至计算节点, 节点完成计算后将结果(Result)返回. 该部分具体设计如下:

(1)模型的一次迭代计算交由一个计算单元(这里为一个节点内的一个线程)完成, 避免计算单元间的同

步开销;

(2)单纯使用多线程并行容易受机器 CPU 数限制,且可能受服务器其他功能影响造成性能抖动^[6],因此 VEDSimu 使用多计算节点、节点内多线程方式并行计算,以保证性能稳定并提供更大的系统伸缩性.

(3)以消息队列方式异步处理任务和结果,避免调用方的阻塞等待,并使调用方与拥塞控制、任务分派等复杂性隔离.

(4)由于节点性能可能存在差异,任务分派时需进行节点负载均衡.此处由 WRR (Weighted Round Robin, WRR)算法实现,并考虑到任务为计算密集型,通过节点 CPU 主频和核数估算节点的权值.

(5)监控器定时对计算节点的可用性进行心跳检测,并将可用节点列表的变化及时反馈给调度器.

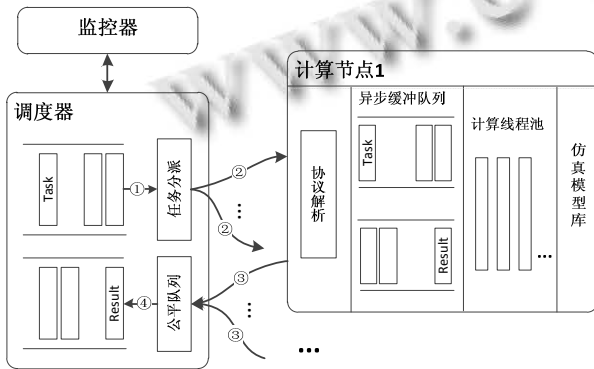


图 6 模型计算

1.5 性能测试

VEDSimu 使用 Boost::Asio, Protobuf, ZeroMQ 等实现网络通信,协议解析,消息队列,并进一步开发如生产者/消费者队列,线程池等功能.以下对 VEDSimu 的消息处理能力和模型计算能力进行测试.

1.5.1 消息处理能力测试

首先对不同消息队列数目下,VEDSimu 消息处理能力和消息收发延迟时间进行测试.

使用一台 Intel Xeon E5620 2.4G 4 核 8 线程 CPU, 16G 内存服务器作为场景实体服务器.消息 100 字节大小(填充空字节),并带有时间戳字段.采用一致流量模型,即发送方向消息队列平稳持续发送消息.发送方和接收方均为独立线程.图 7 为不同消息队列数下消息循环框架总体吞吐量和平均收发延迟对比.

实验表明,系统吞吐量和消息队列数之间有近似线性的加速关系,这是因为每个消息队列及处理线程

之间相互独立.消息收发延迟稳定在 0.35ms 以下,远小于一般模型的迭代步长.

系统在 4 队列配置下每秒处理接近 80 万条消息,理论上可以支撑 8000 个实体每秒 100 次的消息发送频率,可支持绝大部分演练.

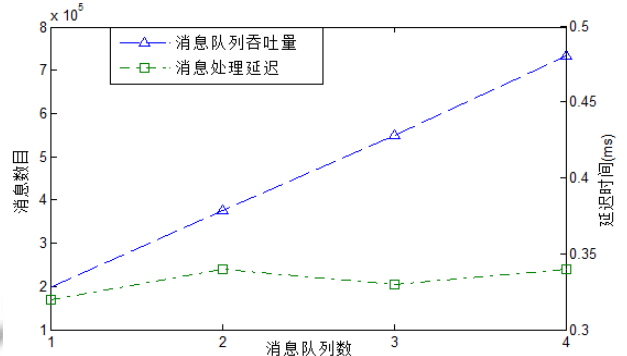


图 7 消息队列性能测试

1.5.2 模型计算能力测试

以下对不同计算节点数下,VEDSimu 模型计算能力和响应延迟进行测试.

使用八台 Intel Xeon E5620 2.4G 4 核 8 线程 CPU, 16G 内存服务器作为计算节点和一台同配置场景服务器,同机房内测试.以高斯烟团模型为计算对象:

$$C(x, y, z, t, H_c) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-vt)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H_c)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H_c)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

其中, C 为点(x, y, z)在 t 时刻下烟雾浓度,一个渲染模型选取 200 个上述控制点.响应时间为任务提交和返回时间差,包括模型计算、网络以及调度开销.调度器在一致流量模型下进行测试,并以 WRR 方式分派任务.图 8 为不同节点数下 VEDSimu 吞吐量和响应时间对比.

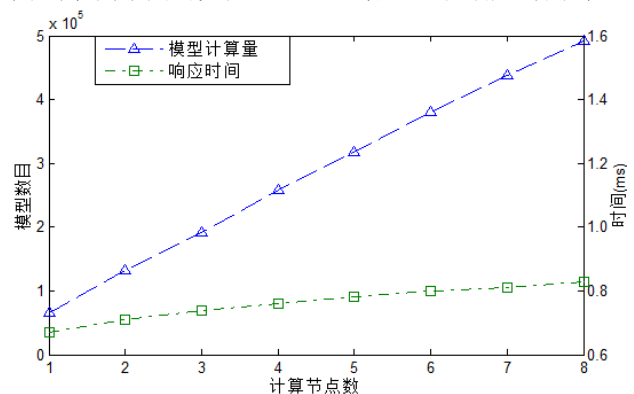


图 8 模型计算性能测试

实验表明,系统在不同节点数下可得到近似线性的加速比,且系统响应延迟均在1ms以下.

系统在8节点下可以完成每秒50万个模型计算任务,理论上可以支撑5000个仿真模型每秒100次的模型计算.

2 虚拟应急演练系统

2.1 需求与总体设计

虚拟演练系统需向各个参演人员提供一致的虚拟演练环境,模拟场景中的灾害与设备运转;参演人员控制场景中的对应角色并与虚拟环境交互,执行个人防护、设备操作任务,并与其他人员分工协作,完成事故、灾害处置;系统在多预案支持下动态控制演练流程,提高演练真实度,训练员工应变能力.为实现上

述功能,VEDSys 具体需求如下:

(1)能够将文字预案转换为计算机可识别的脚本,并可进行预案分支推理,以及消防、救援和疏散等多预案并行执行能力.

(2)对设备、灾害、人员等准确、实时仿真,并模拟实体间的交互影响.

(3)三维客户端通过网络虚拟现实技术加载场景、人物模型,渲染灾害等粒子效果.

(4)参演人员在一致的场景下演练,协作完成任务,并可通过语音实时广播、通话.

(5)作为教学系统,应具备演示、学习、考核及量化评价的功能.

针对以上需求,VEDSys 在 VEDSimu 基础上进行如图9所示的架构设计.

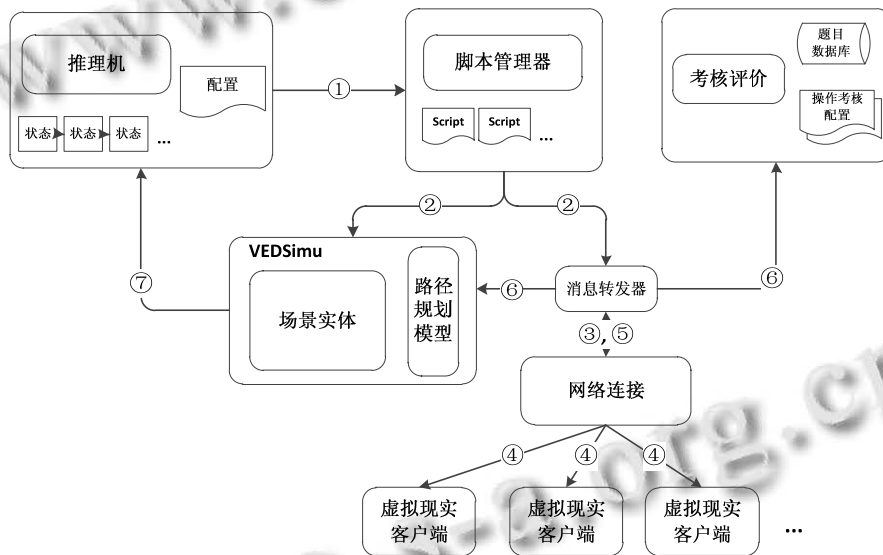


图9 VEDSys 架构设计

2.2 系统模块设计

2.2.1 推理机

推理机控制演练中的预案执行流程,并和仿真系统、脚本系统、各个演练客户端形成一个控制回路,完成演练进程的推进,过程如图10所示.

VEDSys 中的推理机基于状态和事件,类似状态机推理,每个状态和一段预案脚本绑定,仿真系统事件作为推理机输入事件,状态内部逻辑选择后继状态,并可触发其他预案的状态.

2.2.2 脚本系统

使用 Lua 语言将文字预案转换为计算机可识别脚

本,并由脚本管理器加载、管理.

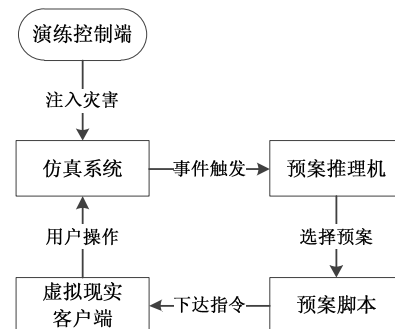


图10 VEDSys 演练控制回路

系统各个模块提供调用接口,脚本中利用 Lua 跨语言和协程支持,对上述接口进行调用,完成实体属性访问、命令下达、事件记录等功能。

此外,VEDSys 提供 NPC(Non-Player Character, NPC)功能,当演练中角色未由参演人员扮演时,系统生成 NPC 配合演练,并由脚本完成 NPC 控制。

2.2.3 仿真系统

由 VEDSimu 维护演练过程中实体的状态,并在前文所述基础上为脚本系统提供实体状态访问接口,以及为推理机提供事件回调设置接口。

2.2.4 虚拟现实客户端

虚拟现实(Virtual Reality, VR)客户端作为系统人机交互界面,向演练人员提供可交互虚拟场景,具体功能如下:

(1)加载厂区建筑、设备、地形等 3D 模型;对演练人员行动、设备操作、抢救伤员等动作建模;并渲染泄露、火灾、爆炸等粒子效果。

(2)演练人员可在场景中任意漫游走动;通过三维引擎提供人员与障碍间的碰撞检测功能;并可由鼠标或对话框实现对阀门、消防栓等设备操作。

2.2.5 路径规划

演练中人员、车辆面临进行路径选择问题,如危险区域的人员疏散、救灾人员赶往事发现场等,但如果每个人都选择最近或最便捷的路径,则会造成部分道路堵塞,影响整体行动效率。因此演练系统需要进行全面的路径规划,帮助每个参演人员选择路径,最终为实际的人员行动方案提供蓝本。

经典的路径规划算法如多目标优化,粒子群算法等^[7],可根据对计算时间、精度的要求选择模型实现。各个算法的运行均建立在路径网络之上,这里可选择演练环境中路口等关键位置作为网络节点,并根据道路承载能力、车辆通行能力设置网络弧权值。在此基础上计算得到如使疏散时间最快、拥塞度最小的疏散方案,并引导各个演练人员行动。

由于路况、人群行动和灾情变化等存在不确定因素,疏散路径需要实时调整才能达到预期的疏散效果,即疏散路径需做到实时更新。面对较大的计算量,系统利用 VEDSimu 提供的计算能力,将路径规划模型作为一个实体由 VEDSimu 管理,并完成模型的迭代更新,满足响应时间的要求。

2.2.6 考核评价

考核评价包括对个人的考评和对演练整体过程的评价等,具体包括:

(1)个人考评:对阀门、消防设施操作、跑位等完成的正确性、时间和操作顺序进行评价,评价内容与标准参数配置在 Json 格式文件中。演练中,客户端记录用户操作参数并发送至服务端,系统在演练结束后由打分程序将参演人员提交的操作参数与标准操作参数比较,并进行打分。以下是演练过程中某阀门操作的标准操作参数(Json 格式),包括设备 ID、超时时间、操作参数等。

```
"operations": [{
  "operationID": "10014:22",
  "roleID": "10014",
  "deviceID": "8000",
  "expireTime": 60,
  "fullScore": 10.0,
  "params": ["right", "720"],
  "description": "向右打开阀门 720 度"}, ...
```

(2)演练整体评价:演练过程中,脚本系统记录人力、物资调动情况、事故处置情况、完成时间等事实数据。演练结束后可参照系统计算出的量化综合评价指标体系^[8],对实际预案中的物资储备、人员分配等部署进行调整。图 11 为一个演练综合评价体系实例,分为 4 个方面 12 个指标。



图 11 演练综合评价体系实例

2.4 系统应用

VEDSys 已应用于某石化企业油品罐区应急演练安全培训,并根据具体需求,提供预案演示、预案学习和多人演练等功能。

预案演示功能由推理机控制执行应急预案脚本,

其中预案中的每个角色都有一个脚本，演示中执行每个角色脚本的 NPC 指令部分. 图 12 为演示功能界面，通过右边上半部可以选择各个俯视视角，下半部选择个人视角，画面上方为即时演练信息.

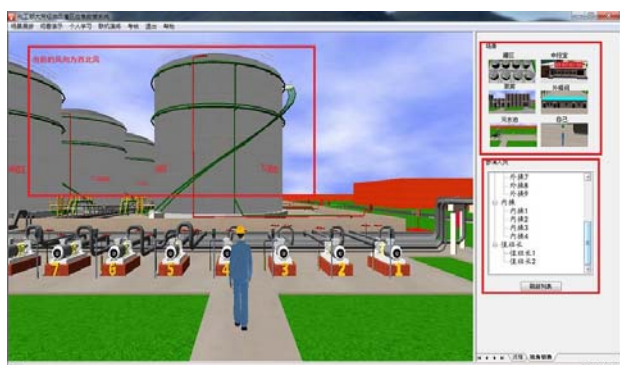


图 12 客户端界面 1

预案学习过程中，使用者扮演某个预案角色，其他角色为 NPC，演练过程与演示功能所介绍相似，但被扮演角色的脚本执行操作提示和题目考核部分. 图 13 正中人员为系统使用者，其他 NPC 在执行跑位、打开消防栓等操作，右边栏为该角色任务列表，打勾的为已完成任务.

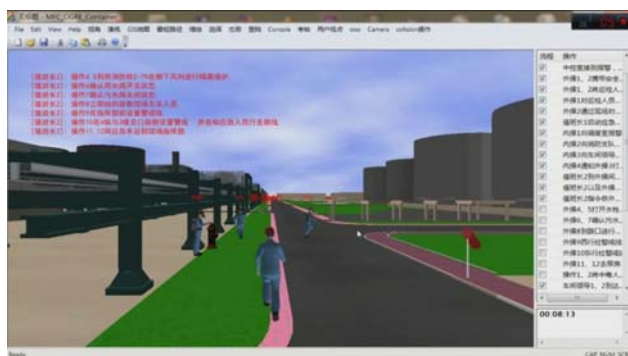


图 13 客户端界面 2

多人演练中，各个演练人员扮演相应角色，按预案流程执行自己的操作. 图 14 为演练过程中灭火场景，物料罐右侧因泄露起火爆燃，推理机触发消防预案，画面下方左侧人员配合后方消防水炮近距离灭火，火势逐渐减小，此时围堰内消防水水位超过警戒线，右

侧人员打开雨水阀导出消防水.



图 14 客户端界面 3

3 总结与展望

本文针对石化等行业虚拟应急演练系统具体需求，对场景实体消息传输和仿真模型并行计算问题、以及预案支持下的演练推进问题研究解决，在此基础上给出虚拟应急演练系统完整解决方案，并应用于实际企业消防演练培训，取得良好的训练效果.

参考文献

- 1 张磊,蔡智聪,朱群雄.化工企业安全教育系统的设计与实现. 计算机与应用化学,2012,29(3):331-334.
- 2 曲贵安.溢流仿真操作演练系统的研究与实现[学位论文]. 长春:吉林大学,2012.
- 3 朱钥,李琦,余铁桥.基于复杂系统理论的应急模拟演练平台研究. 计算机应用研究,2011,28(1):195-198,202.
- 4 赵国梁.综采工作面安全生产虚拟现实系统关键技术研究 [学位论文]. 西安:西安科技大学,2012.
- 5 江志英,朱群雄,徐圆.一种基于虚拟现实技术的化工安全实时干预机理仿真平台. 计算机与应用化学,2012,29(11): 1326-1330.
- 6 吴泉源.网络计算中间件鸟瞰. 软件学报,2013,24(1):67-76.
- 7 朱大奇,颜明重.移动机器人路径规划技术综述. 控制与决策, 2010,25(7):961-967.
- 8 承奇,张礼敬,邢培育,宋会会.基于层次分析法的化工事故应急演练模糊综合评估. 南京工业大学学报(自然科学版), 2009,31(4):98-102.