

中文引用格式:文政,张健钦,田傲,等.基于热传递的VR粒子灭火算法及消防培训系统构建[J].中国安全科学学报,2025,35(10):157-165.

英文引用格式:WEN Zheng, ZHANG Jianqin, TIAN Ao, et al. A VR particle fire-extinguishing algorithm based on heat transfer and firefighting training system construction [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 157-165.

基于热传递的VR粒子灭火算法 及消防培训系统构建*

文政,张健钦**教授,田傲,胡超男
(北京建筑大学测绘与城市空间信息学院,北京100044)

中图分类号:X932 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1529
基金项目:国家自然科学基金资助(42371416);北京建筑大学2025年度博士研究生科研能力提升项目(DG2025036)。

【摘要】 为提升消防培训的沉浸性与实效性,增强灭火技能学习的交互体验,基于虚拟现实(VR)平台,提出一种基于热传递的VR粒子灭火算法。首先,引入热传递与能量交换机制,构建粒子层面的热力学交互模型,用于模拟灭火剂颗粒与火焰粒子之间的能量转移过程;然后,结合随机游走算法与涡旋动力学模型,增强粒子系统在喷射、扩散与湍流过程中的自然表现力,从而提升火焰蔓延与灭火过程的动态真实感;最后,基于Unity 3D引擎开发具有多种典型火灾场景的VR消防培训系统,并通过模拟试验验证不同类型灭火器与火灾类型之间的匹配关系。试验结果表明:不同灭火器粒子系统在匹配适用场景时,灭火粒子与火焰粒子之间的碰撞频率与能量衰减曲线存在显著差异;热传递模型下的火焰衰减速率与灭火器类型密切相关,能有效反映火灾扑灭过程的物理规律。

【关键词】 热传递; 虚拟现实(VR); 粒子灭火; Unity 3D; 消防培训; 粒子碰撞

A VR particle fire-extinguishing algorithm based on heat transfer and firefighting training system construction

WEN Zheng, ZHANG Jianqin, TIAN Ao, HU Chaonan

(School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: To enhance the immersion and effectiveness of fire training and improve the interactive experience of acquiring fire-extinguishing skills, a VR particle fire-extinguishing algorithm based on a heat transfer was proposed and developed on a VR platform. First, a thermodynamic interaction model at the particles level was constructed by introducing a heat transfer mechanism to simulate the energy transfer process between extinguishing agent particles and flame particles. Then, the random walk algorithm was combined with the vortex dynamics model to enhance the natural behavior of the particle system during

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0157-09; 收稿日期:2025-05-11; 修稿日期:2025-07-12

** 通信作者:张健钦(1977—),男,河北保定人,博士,教授,主要从事智慧应急、城市大数据可视化、智能交通、道路病害检测方面的研究。
E-mail: zhangjianqin@bucea.edu.cn。

spraying, diffusion, and turbulence, thereby improving the dynamic realism of flame propagation and fire suppression. Finally, a VR-based fire training system featuring multiple typical fire scenarios was developed based on the Unity 3D engine, and simulation experiments were conducted to validate the matching relationship between different types of fire extinguishers and fire categories. The results show that the collision frequency and energy attenuation curves between extinguishing particles and flame particles vary significantly depending on the extinguisher type and its applicable scenario. Furthermore, the flame decay rate governed by the heat transfer model is closely related to the type of fire extinguisher, effectively reflecting the physical patterns of fire suppression processes.

Keywords: heat transfer; virtual reality (VR); particle fire-extinguishing; Unity 3D; firefighting training; particle collision

0 引言

随着全球城市化进程的加速和人口密度的不断提升,火灾事故已成为对城市安全构成严重威胁的关键因素之一。在应对火灾等突发事件时,公众的消防意识和应急能力尤为重要。传统的消防培训方式,如现场演习和视频教学,虽然能够在一定程度上增加公众的消防知识,但由于缺乏互动性和沉浸感,其培训效果往往难以达到理想水平^[1]。此外,传统培训模式难以有效模拟复杂多变的火灾场景,尤其是针对不同类型火源灭火的细致操作^[2]。因此,如何借助技术手段提升培训的互动性与实战性,成为当前火灾消防培训领域亟待解决的关键问题。

虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术通过创造沉浸式的交互环境,正在逐步改变各个领域的培训和教育方式^[3]。在消防培训中,VR技术已有较多应用^[4]。如高云卓等^[5]通过VR技术模拟消防培训教学过程,增强学员的操作技能和应急反应能力。何秋海^[6]开发了基于Unity 3D引擎的火灾培训系统,通过硬件设备为学员提供沉浸式的互动体验。陆承等^[7]通过设计仿真水枪代替手柄控制器,在虚拟场景中进行交互训练,并可控制水流的开关和大小。邓鹏等^[1]针对石化基地灭火救援问题设计并构建了VR训练系统,丰富了消防救援队伍针对石化基地事故灭火救援行动的训练手段。曾鹏^[8]基于Unity 3D设计了虚拟教学楼火灾疏散仿真系统,并以路径规划算法优化了火灾逃生路线。尽管VR系统在提升消防培训效果方面取得了一定进展,但依然存在一些局限性。传统的VR模拟往往依赖于预设的场景和静态参数,无法充分模拟火灾的动态变化和复杂性。而Unity 3D仿真系统中的粒子特效技术作为火灾场景模拟的重要技术,其能够通过模拟粒子碰撞、燃烧等过程,真实再现火焰的动态变化

及灭火剂的喷射过程。因此,可通过优化粒子特效来提高场景真实性。例如,平桢等^[9]通过Unity3D粒子模拟消防水枪流体喷射,通过设置速度、生命周期、速率、重力等粒子基础属性优化了灭火过程。李婷婷等^[10]针对虚拟漫游沉浸感不足、交互性差的问题,研究了碰撞体检测、粒子特效技术、虚拟交互技术,通过属性面板设置粒子系统参数,优化了粒子特效。王怀兵等^[11]通过建立粒子系统的物理模型,模拟水滴破碎和飞溅等运动状态。刘晨璐^[12]利用三维渲染技术实现对雨雪粒子个体之间不规则性的渲染。目前相关研究主要是基于Unity 3D自带的粒子系统进行模拟与特效优化,通过使用系统自带的Collision脚本检测碰撞来控制粒子的可视化效果,但这些特效优化没有考虑到真实的灭火机制,因此,在演示灭火过程中依然存在真实性不足、灭火效率评估不精确等问题。

针对以上不足,面向火灾消防培训,文中拟提出一种基于VR技术的粒子灭火算法,通过引入火焰的温度、灭火剂的热传递、灭火剂粒子的质量、比热容等物理参数,并增加随机游走模型和涡旋模型来优化灭火剂粒子行为,使火灾场景和灭火过程更加符合实际情形。通过构建VR火灾消防培训系统,基于4种常见的火灾场景和灭火器的使用,验证该粒子灭火算法的可行性,以期为VR环境下的消防培训提供更具沉浸感和实用性的技术支持。

1 粒子灭火算法

灭火最常用的方法是通过降低温度和窒息(隔绝氧气)使火焰无法继续燃烧,可选择在虚拟场景中使用粒子系统模拟这一过程。粒子系统是计算机图形学中常用的模拟工具,其通过大量粒子组成群体行为来模拟复杂的自然现象。因此,可以使用粒子系统进行灭火仿真,模拟灭火剂和火焰。通过调

整灭火剂粒子的方向和位置使其与火焰粒子发生碰撞,每个粒子代表灭火剂的一部分,例如:水滴、干粉、二氧化碳或化学泡沫,灭火剂粒子会通过热传递效应吸收火焰的热量,使火焰温度逐渐降低,燃烧会在火焰温度降至足以终止燃烧反应的临界值时熄灭。在理想化模型中,假设火焰温度降至 0℃ 时实现灭火。为实现以上粒子的灭火流程,提出基于热传递与碰撞机制的粒子灭火算法,同时使用粒子行为优化算法提高模拟的真实性。需要说明的是,模型中火焰温度降至 0℃ 时实现灭火为理想化设定,旨在通过显著的温度变化直观表征灭火成功的临界状态。实际火灾中,灭火条件需综合考虑燃料类型、氧气浓度等因素,但文中聚焦热传递机制,以温度为核心变量简化计算。

1.1 粒子碰撞模型

灭火粒子与火焰之间的碰撞是实现能量传递的核心机制。碰撞的频率和能量传递的速率直接影响灭火效果,粒子与火焰的碰撞频率公式为:

$$f = \frac{N \cdot \nu}{A} \quad (1)$$

式中: f 为碰撞频率,Hz; N 为单位时间内与火焰接触的粒子数量,个/s; ν 为粒子速度,m/s; A 为火焰表面积,m²。通过控制粒子的释放速率、碰撞频率以及能量传递效率,来动态调整灭火效果,模拟不同类型火灾的行为。此外,粒子与火焰之间的碰撞还需要考虑能量损耗和粒子的再生机制,以确保仿真过程的稳定性和准确性。

在高温火焰下,灭火粒子可能无法全部吸收热量,部分热量散失到空气中。碰撞时,粒子之间的非弹性碰撞会产生能量损耗。因此,为确保仿真稳定性,引入能量损耗机制,能量损耗用损耗因子 λ 表示,计算公式为:

$$E_l = \lambda \cdot E_i \quad (2)$$

式中: E_l 为损失能量,J; E_i 为入射能量,J。

1.2 粒子热传递模型

在火灾灭火过程中,通过粒子热传递模型,灭火粒子(如水滴、干粉或泡沫)在与火焰接触时吸收火焰的热量,逐渐降低火焰的温度^[13]。每个粒子都具有一定的热容量,当粒子吸收足够的热量时,火焰温度会不断下降直至低于燃烧所需的最低温度,从而实现火焰熄灭。热传递的基本方程为:

$$Q = mc(T_s - T) \quad (3)$$

式中: Q 为粒子吸收的热量,J; m 为粒子质量,g;

c 为粒子比热容,J/(g·℃); θ_s 为火焰温度,℃; θ 为灭火粒子温度,℃。在实际应用中,还需要考虑粒子的热容量和吸热速率,并校准不同灭火剂,以保证模拟的准确性。热传递效率计算公式为:

$$\eta = \frac{Q_a}{Q_i} \quad (4)$$

式中: η 为粒子的热传递效率,J; Q_a 为粒子实际吸收的热量,J; Q_i 为粒子接触到的总热量。高效的热传递能快速降低火焰温度,提高灭火效果。

1.3 粒子行为优化算法

在火灾模拟中,粒子的行为建模需要精确模拟其在多种物理因素影响下的运动,包括重力和流体动力学效应。文中提出了一种基于随机游走和涡旋模型的粒子行为优化与仿真算法。

1) 随机游走模型。由于粒子在生成后会沿直线移动,因此,只需要考虑一维方向上的随机游走。在每个时间步,粒子的位置受当前速度、随机扰动和重力的作用而变化。进而模拟灭火粒子的扩散行为,使其运动路径更逼真。粒子位置的更新公式为:

$$r_{t+1} = r_t + v_t \cdot \Delta t + \varepsilon_t + \frac{1}{2}g \cdot \Delta t^2 \quad (5)$$

式中: t 为当前时刻,表示模拟或计算中的第 t 个时间点,s; Δt 为时间步长,即从 t 到 $t+1$ 所经过的时间,s; r_t 为粒子在当前时刻的位置,m; r_{t+1} 为粒子在下一时间步的位置,m; v_t 为当前速度,m²/s; ε_t 为随机扰动,其按照正态分布随机生成,m/s²; g 为重力加速度,m/s²。

2) 涡旋模型。涡旋模型用于模拟粒子在流体中的旋转效应^[14]。粒子在空气或烟雾中运动时,会受到涡旋影响,沿旋转路径移动,形成复杂轨迹。涡旋模型可用于描述灭火剂在气流或涡流中的运动,涡旋速度 v_v 的计算公式为:

$$v_v = \frac{\Gamma}{2\alpha Lr} \hat{z} \times r \quad (6)$$

式中: Γ 为涡旋强度,s⁻¹; r 为粒子到涡旋中心的距离,m; $\hat{z}$ 为旋转轴方向; L 为涡旋元长度,m; α 为涡旋模型的归一化系数,用于控制模拟中涡旋诱导速度的尺度。

3) 综合优化模型。综合优化模型将速度、涡旋效应和重力影响整合在一起,以更精确地模拟粒子行为。综合模型的更新公式为:

$$r_{t+1} = r_t + (v_t + v_v) \cdot \Delta t + \varepsilon_t + \frac{1}{2}g \cdot \Delta t^2 \quad (7)$$

通过引入重力和流体动力学效应进行粒子行为

优化,能够更准确地模拟火灾场景中灭火剂的动态特性。

1.4 粒子灭火算法流程

文中提出一种基于粒子碰撞和热传递的灭火模拟算法,该算法设置了灭火剂粒子和火焰粒子的基础属性和物理属性,通过调整粒子的释放速率、碰撞频率以及能量传递效率来优化灭火过程,粒子属性设置及解释见表 1,粒子灭火算法灭火主要流程如图 1 所示。

表 1 粒子属性

Table 1 Particle properties

参数	类型	解释
r/m	基础属性	粒子在系统中的位置
$v/(m \cdot s^{-1})$	基础属性	粒子的运动速度
寿命	基础属性	粒子的存在时间,即粒子从创建到消失的时间
颜色	基础属性	粒子的视觉效果,用于表示不同的状态或类型
m/g	灭火剂属性	粒子的质量,影响其动量和碰撞行为
$c/(J \cdot g^{-1})$	灭火剂属性	粒子的比热容,影响其吸收和释放热量的能力
$\theta/^{\circ}C$	灭火剂属性	粒子的当前温度,影响其与火焰的热传递过程
λ	灭火剂属性	粒子在碰撞过程中能量的损耗程度
Γ/s^{-1}	灭火剂属性	流体中涡旋的强度,影响粒子的旋转和轨迹
θ_s	火焰属性	火焰的温度,用于计算热量传递和模拟火焰燃烧状态

- 1) 初始化粒子系统。为火焰和灭火剂创建 2 个独立的粒子系统,分别设置粒子系统的基础属性(位置、速度、寿命等)和灭火剂粒子的物理属性(质量、温度、比热容等),火焰粒子则需要设置温度,用于后续热量传递的计算。
- 2) 热量传递与火焰温度更新。当灭火粒子和火焰粒子发生碰撞时,基于热量传递公式进行热量传递的计算,根据每次碰撞的热量传递,逐步降低火焰的温度。碰撞频率由碰撞公式计算,在每次碰撞时,灭火粒子会吸收火焰的部分热量,并通过能量损耗因子 λ 进行调整。在 Unity 中,可通过调整粒子发射器的参数来控制粒子的释放速率与速度。
- 3) 粒子行为优化。灭火粒子的位置会随着时间步长动态变化,模拟其扩散效果。在灭火过程中,灭火剂粒子会受到空气中的涡旋影响,沿着旋转轨迹移动,通过模拟粒子在风场中的运动来模拟这种

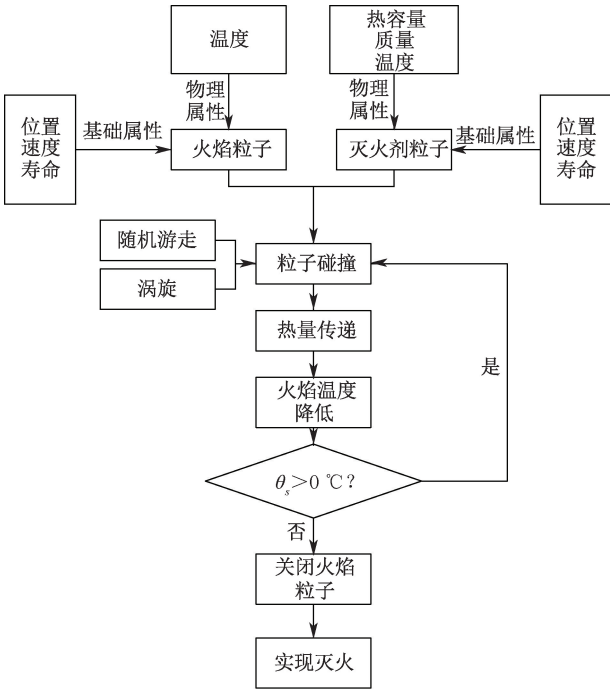


图 1 粒子灭火算法流程

Fig. 1 Process of the particle extinguishing algorithm

旋转运动,涡旋效应通过粒子系统中的 Force Over Lifetime 模块来实现。综合以上因素对粒子进行动态优化模拟,通过实时计算来调整粒子的位置和状态。

4) 实现灭火。随着灭火粒子与火焰的不断碰撞,火焰的温度逐渐下降。当温度低于 0 °C 时,停止火焰粒子的生成,火焰熄灭。

2 粒子灭火算法火灾消防培训系统构建

2.1 粒子系统构建

1) 粒子参数设置。根据常用灭火器类型,将灭火器分为二氧化碳、化学泡沫、干粉和水基 4 类灭火器。分别针对 4 种灭火器构建火灾场景:化学实验室、家庭厨房、办公室和客厅。其中,二氧化碳灭火器用于扑灭涉及易燃液体的火灾,如化学药剂泄漏引发的火焰;化学泡沫灭火器则用于扑灭油品火灾,如厨房油火;干粉灭火器用于扑灭电器设备火灾,如电器设备短路着火;水基灭火器适用于普通固体可燃物火灾,如木质家具着火。针对不同类型的灭火剂粒子,采用粒子参数设置的方式来调整不同粒子的形态特征。针对二氧化碳灭火剂,通过调整粒子的形态、颜色、生命周期和速度来模拟气流粒子,以此呈现二氧化碳灭火剂快速扩散的状态;针对化学

泡沫灭火剂,通过设置泡沫粒子的形态、颜色和生命周期,模拟出泡沫的喷射效果;针对干粉灭火剂,通过粒子模拟干粉形态,直观展现其在灭火场景中的实际状态;针对水基灭火剂,将液态水视为气态水蒸气粒子进行模拟。每种灭火剂的粒子在粒子系统中的表现,均依据其各自独特的物理特性进行针对性调整。

基于粒子灭火算法,粒子系统参数的设置需依据灭火器类型和火灾场景进行调整,参数包括火焰温度,灭火器粒子的热容量、质量和温度,碰撞频率,涡旋强度和损耗因子等。其中,火焰温度,灭火器粒子的热容量、质量和温度均以实际灭火器和灭火剂的数值作为参考并取平均值作为粒子参数。碰撞频率根据不同类型灭火剂的喷射特性进行范围内的随机生成,例如:化学泡沫灭火器产生的泡沫较多,碰撞频率较高;而干粉灭火器的粉末较重,碰撞频率较低。涡旋强度则根据灭火剂产生的流体动力特性进行范围设置,例如:水基灭火剂和化学泡沫可能产生较大的涡旋强度,迅速扩散和覆盖火源;而二氧化碳

灭火剂由于其气体特性,涡旋强度较低。损耗因子设置依据灭火剂在灭火过程中的能量损失程度,干粉灭火剂由于其较高的摩擦和粒子间碰撞,损耗因子可能较高;而水基灭火剂的损耗因子较低。灭火剂粒子的热容量与质量通过热力学第一定律确定,如水基灭火剂的比热容直接采用水的标准热力学值,确保单位粒子吸热量的理论一致性;涡旋强度与粒子速度通过纳维-斯托克斯方程简化模型计算,模拟灭火剂在气流中的扩散行为(如二氧化碳灭火剂的低涡旋强度反映气体扩散特性)。同时,参数范围参考灭火剂规范中对各类灭火剂的物理特性要求,如干粉灭火剂的质量密度与颗粒尺寸符合标准规定的范围。具体参数设置见表 2。此外,参数敏感性可通过理论模型间接验证:根据热力学第一定律,热容量与质量的乘积直接决定单位粒子的吸热能力,因此,二者对灭火效率的敏感性最高(如水基灭火剂效率为干粉的 1.5 倍);而涡旋强度通过流体动力学模型影响粒子分布,其阈值效应与纳维-斯托克斯方程的非线性特性一致。

表 2 粒子参数

火灾场景	$\theta_s/^{\circ}\text{C}$	灭火器类别	灭火器粒子参数					
			$c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	m/g	$\theta/^{\circ}\text{C}$	f/Hz	Γ/s^{-1}	λ
化学药剂泄漏	2 000	二氧化碳	0.84	0.77	-70	10-30	0.1-0.5	0.3
厨房油火	1 000	化学泡沫	3	1.2	20	40-60	0.1-1	0.2
电器设备短路	1 200	干粉	1	0.9	20	10-30	0.5-2	0.4
木质家具着火	800	水基	4.18	1	15	20-40	0.1-1	0.1

2) 粒子灭火模拟。基于以上参数设置,使用线性函数模拟 4 种场景的灭火过程,如图 2 所示。二氧化碳灭火器主要适用于高温火焰环境(如化学药剂泄漏),其温度明显低于其他类型灭火器,在灭火过程中可极快降低火焰温度。化学泡沫灭火器针对厨房油火等易燃液体,其具有较高的热容量与质量,且碰撞频率较高,相对较低的损耗因子也有助于提升灭火效率。干粉灭火器适用于电器设备短路火灾,具有较高的涡旋强度的同时损耗因子较高,灭火速度适中。水基灭火器适用于木质家具着火,其粒子具有最高的热容量与较低的损耗因子,但较高的温度影响了灭火速度。

粒子灭火过程以化学实验室场景中使用二氧化碳灭火器为例展示,灭火过程如图 3 所示。灭火器的交互主要依靠手持设备或手势提供的射线点击,通过调整灭火器的位置和角度使灭火剂喷射到火焰上,触碰到灭火剂粒子的火焰粒子将会降温至消失,

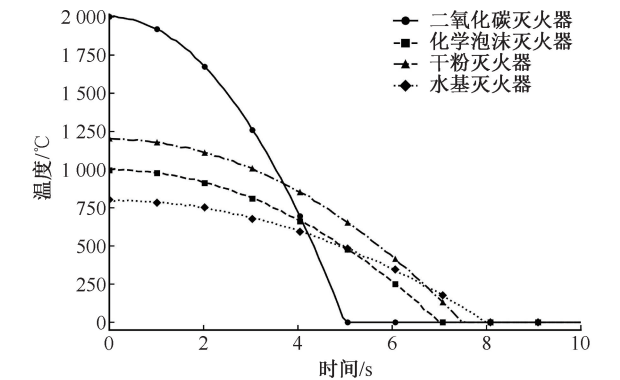


图 2 灭火过程模拟
Fig. 2 Extinguishing process simulation

最终使得所有的火焰消失后会产生烟雾,之后会提示灭火成功。

2.2 算法对比分析

为验证粒子灭火算法在火灾模拟和灭火效率控制方面的表现,将粒子灭火算法与普通粒子碰撞方

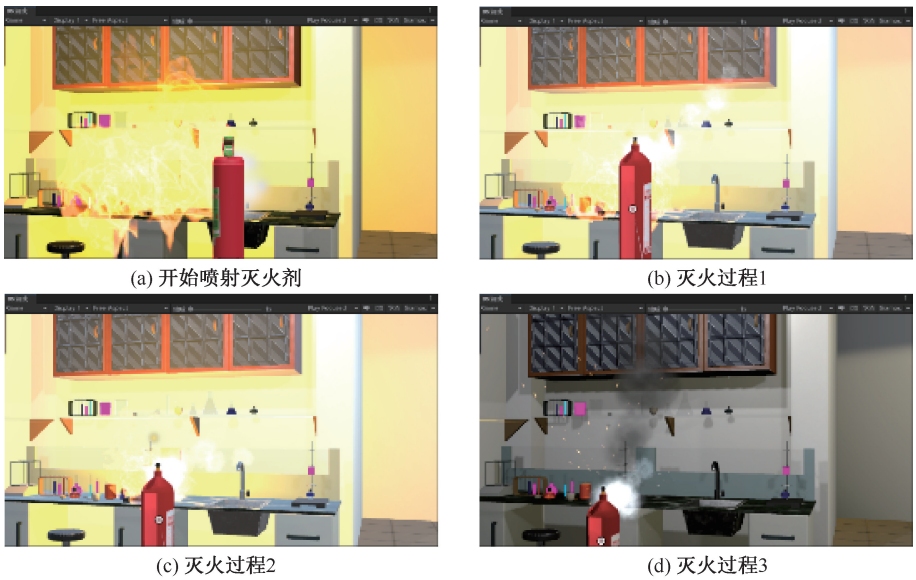


图3 灭火过程(以二氧化碳灭火器为例)

Fig.3 Extinguishing process (using a carbon dioxide extinguisher as an example)

法进行对比分析。将2种灭火方法在相同开发条件下运行,并随机选择2种火灾场景:化学药剂泄漏和厨房油火,分别从灭火真实性、灭火效率控制等方面对比分析2种方法在不同场景中的表现。

1) 真实性分析。通过粒子系统模拟火焰行为,分别运用粒子灭火算法和普通粒子碰撞方法模拟这2个场景的灭火过程,使用层次分析法通过专家打

分的方式进行定量评估。专家团队共由10名专家组成,均具有丰富的应急管理和火灾模拟领域研究经验,包括5名计算机图形学与虚拟现实技术领域的教授级专家和5名具有消防工程背景的专业人员。评估项包括粒子形态、火焰温度、交互效果、动态细节及总体真实感,评价结果见表3。

表3 真实性评价

Table 3 Realism evaluation

方法	场景	评估项	权重	得分	加权得分	总分
粒子灭火 算法	化学药剂泄漏	粒子形态	0.1	93	9.3	93.2
		火焰温度	0.2	90	18	
		交互效果	0.3	94	28.2	
		动态细节	0.1	92	9.2	
		总体真实感	0.3	95	28.5	
	厨房油火	粒子形态	0.1	91	9.1	92.1
		火焰温度	0.2	88	17.6	
		交互效果	0.3	96	28.8	
		动态细节	0.1	90	9	
		总体真实感	0.3	92	27.6	
普通粒子碰撞 方法	化学药剂泄漏	粒子形态	0.1	90	9.0	55.8
		火焰温度	0.2	0	0	
		交互效果	0.3	61	18.3	
		动态细节	0.1	69	6.9	
		总体真实感	0.3	72	21.6	
	厨房油火	粒子形态	0.1	90	9.0	55.9
		火焰温度	0.2	0	0	
		交互效果	0.3	63	18.9	
		动态细节	0.1	70	7.0	
		总体真实感	0.3	70	21	

结果显示,粒子灭火算法在 2 个场景中的总体真实感都明显高于普通粒子碰撞方法,粒子灭火算法通过引入热传递机制和粒子碰撞模型,使得火焰的传播特征和形态变化更加贴近真实的火灾行为。在该算法中,火焰粒子具备温度属性 θ_s ,从而能够动态反映火焰在不同燃烧条件下的温度变化。相较之下,普通粒子碰撞方法在火焰行为模拟上显得较为简单,缺乏温度属性而无法反映温度变化过程,导致火焰行为的真实性和复杂性大打折扣。此外,粒子灭火算法在交互效果和动态细节方面也显现出优势。因此,粒子灭火算法在真实性方面表现更佳,能够更有效地模拟现实中的火灾场景。

2) 灭火效率控制分析。针对粒子灭火算法和普通粒子碰撞方法,在 2 个随机场景中分别进行灭火模拟试验,结果如图 4 所示。由于普通粒子算法依赖于静态参数的预设,无法根据场景的不同设置不同的灭火速度,因此,在模拟试验中没有区分场景。结果显示,粒子灭火算法具备在不同场景控制灭火速度和效率的能力,如在化学药剂泄漏场景中,基于二氧化碳灭火器的特性,粒子灭火算法能够调整粒子释放和灭火剂的相互作用,使灭火速度加快,更加符合实际的灭火过程。其次,由于火焰粒子的范围会随着粒子碰撞逐渐减少,导致 2 种粒子的接触关系会从火焰粒子包裹灭火剂粒子转为灭火剂粒子包裹火焰粒子。因为粒子灭火算法的原理是通过热量传递降低火焰温度,所以灭火速度会随着火焰粒子的余量减少而逐渐增加,更加符合实际灭火情景,而普通粒子碰撞方法则因为粒子碰撞量减少使灭火速度逐渐减慢。

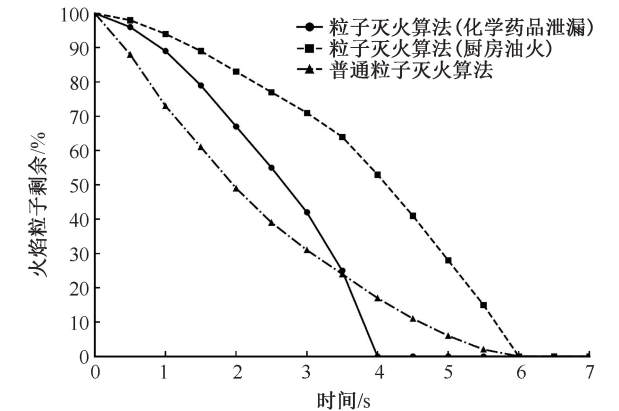


图 4 灭火效率对比

Fig. 4 Comparison of extinguishing efficiency

2.3 火灾消防培训系统设计与构建

1) 系统设计。火灾 VR 场景的构建与开发采

用了 Unity 3D 引擎,并选择 Android 平台,以确保广泛的设备兼容性。Unity 3D 引擎具有较强的图形渲染能力和粒子系统管理功能^[15]。在软件方面,火焰及灭火剂粒子使用自定义粒子系统,并通过 C#脚本建立粒子参数体系,在不同火灾场景中动态调整粒子参数,模拟真实的火焰及灭火操作。在硬件方面,采用 Rokid Max Pro 眼镜,该眼镜具有高分辨率和宽视场角,能够给用户 提供火灾场景中的沉浸感和实时互动功能。基于以上技术与设备,搭建 VR 火灾消防培训系统,该系统主要由 3 部分组成:软硬件、交互模块和粒子系统模块,系统架构如图 5 所示。最底层为软硬件层,包括 Unity 3D 引擎、Vuforia 软件开发工具包、C#脚本、Rokid Max Pro 眼镜和手持设备。中间为交互模块,用户可通过手势识别或手持设备与虚拟灭火器进行交互。同时,系统具备场景管理功能,允许用户在不同的火灾场景中进行切换,并进行灭火器选择,该模块基于 Point UI 界面实现交互功能。最顶层为粒子系统模块,使用 Unity 粒子系统设置粒子基础属性,基于粒子灭火算法的 C#脚本设置粒子物理属性。

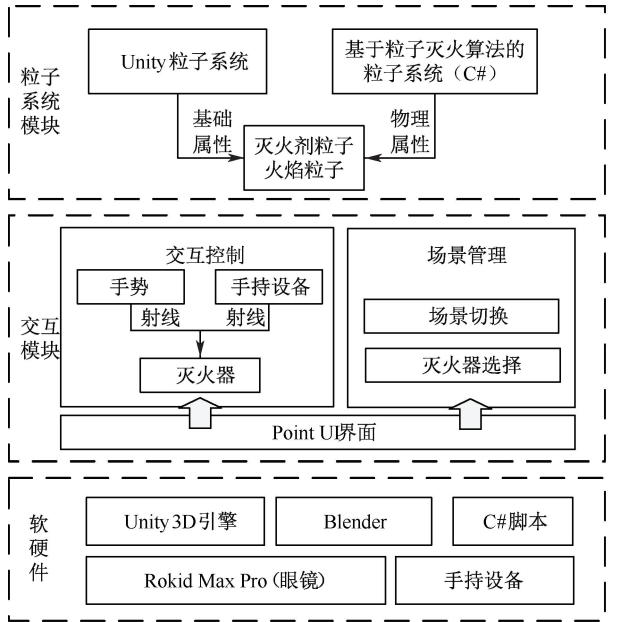


图 5 系统架构
Fig. 5 System architecture

2) 场景构建。根据现实场景的房间尺寸和大小搭建虚拟场景中的房间模型,并根据虚拟场景中 VR 摄像机的位置坐标,确定使用者进入系统时在现实场景中的具体位置,防止因虚拟场景与现实场景大小不匹配导致使用者被现实场景中的物体影响。

3) 系统构建。系统流程如图 6 所示。首先使用者佩戴 VR 眼镜进入虚拟场景,可选择 4 种场景(化学实验室、家庭厨房、办公室和客厅);之后,在场景中生成火焰,构建火灾场景;之后进入灭火器选择界面,根据火灾场景的信息选择使用的灭火器,然后,可选择使用手持设备或手势点击灭火器进行灭

火操作;如果灭火器选择错误,则系统会提示选择错误并重新进入灭火器选择界面;如果灭火器选择正确,则通过交互式灭火操作,对火焰喷射,灭火剂粒子实现灭火;当火焰温度降为 0℃后,场景会产生烟雾效果。完成灭火后,会根据灭火场景给出火灾场景和灭火器的介绍,结束灭火流程。



图 6 系统流程

Fig. 6 System flowchart

3 结 论

1) 面向火灾消防培训,提出基于 VR 技术的粒子系统灭火算法,通过模拟热传递、粒子碰撞和能量损耗机制,显著提升了火灾场景的真实感和灭火过程的互动性,为消防培训提供了高度沉浸的仿真环境,有效优化了灭火可视化效果和用户体验。

2) 该算法在不同火灾场景中具备灭火效率控

制能力,通过动态调整粒子参数(如释放速率和碰撞频率)精准模拟灭火过程,特别是在复杂条件下,增强了培训的真实性和实用性。

3) 尽管研究在提升真实感和效率方面取得进展,但该算法在复杂火灾动态变化、多种灭火剂协同作用以及微观行为监控方面存在不足;未来应深入探索这些领域,并融合物联网、人工智能等前沿技术,以进一步提高系统的综合性能和实时反馈能力。

参 考 文 献

[1] 邓鹏,袁狄平,靳学胜,等.石化基地灭火救援指挥 VR 训练系统设计与实现[J].中国安全科学学报,2021,

31(12): 160-166.

DENG Peng, YUAN Diping, JIN Xuesheng, et al. Design and implementation of VR training system for firefighting and rescue emergency command in petrochemical bases[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(12): 160-166.

[2] 刘春龙, 王勇, 李佳. 基于虚拟消防演练的综合评价研究与应用[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(12): 2 244-2 249.

LIU Chunlong, WANG Yong, LI Jia. Research and application on comprehensive evaluation based on virtual fire drill[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(12): 2 244-2 249.

[3] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学:信息科学, 2009, 39(1): 2-46.

[4] 刘雄. 基于 VR 技术的高层火灾消防培训演练系统设计与实现[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(9): 75-77.

[5] 高云卓, 曹世锋, 梁宏伟. 虚拟现实技术在消防培训中的应用研究[C]. 2014 中国消防协会科学技术年会论文集, 2014: 393-395.

[6] 何秋海. 基于 Unity 引擎的沉浸式火灾培训系统的开发与实现[D]. 北京:北京林业大学, 2015.

HE Qiuhai. The development of immersive fire training system based on Unity engine[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.

[7] 陆承, 靳学胜. 基于 Steam VR 的交互仿真水枪灭火训练系统设计[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(6): 1 312-1 319.

LU Cheng, JIN Xuesheng. Design of interactive simulated water gun fire fighting training system based on Steam VR[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(6): 1 312-1 319.

[8] 曾鹏. 基于 Unity3D 的虚拟教学楼火灾疏散仿真设计与研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2021.

ZENG Peng. Design and research on fire evacuation simulation of virtual teaching building based on Unity3D[D]. Ma' anshan: Anhui University of Technology, 2021.

[9] 平桢, 程乃伟. 基于 Unity3D 粒子系统的消防水枪流体喷射仿真研究[J]. 科技创新与应用, 2017(9): 42.

[10] 李婷婷, 余庆军. 虚拟交互系统开发及关键技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(12): 124-127.

LI Tingting, YU Qingjun. Research on key technologies and realization of virtual interactive system[J]. Computer Technology and Development, 2017, 27(12): 124-127.

[11] 王怀兵, 徐新, 陈姚节. 基于粒子系统的船行波三维仿真[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(8): 134-138.

WANG Huaibing, XU Xin, CHEN Yaojie. Simulation of 3D ship waves based on particle system[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(8): 134-138.

[12] 刘晨琨. 虚拟训练场景的雨雪实时仿真[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.

LIU Chenjun. Real-time simulation of rain and snow in virtual training scenarios[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[13] 范增. 我国高中物理核心概念及其学习进阶研究[D]. 重庆:西南大学, 2013.

FAN Zeng. Research on core ideas of physics in Chinese high schools and their learning progressions[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.

[14] 江源. 天气雷达观测资料质量控制方法研究及其应用[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2013.

JIANG Yuan. Meteorological radar data quality control study and application[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2013.

[15] 黄春营, 姜林, 李超, 等. 基于 Unity3D 的仿真平台构建技术研究[J]. 现代计算机, 2024, 30(5): 102-106.

HUANG Chunying, JIANG Lin, LI Chao, et al. Research on the construction technique of simulation platform based on Unity3D[J]. Modern Computer, 2024, 30(5): 102-106.



作者简介: 文政 (1998—),男,河北邢台人,博士研究生,主要研究方向为城市应急、虚拟现实、模拟仿真。E-mail: wenzheng_bucea@163.com。