

3-22-2023

Lightweight WebVR Real-Time Simulation of Large-Scale Fire Scenario in Metro

Yang Li

School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201800, China; 876056236@qq.com

Huijuan Zhang

School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201800, China;

Chenchen Ge

School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201800, China;

Kang Xie

School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201800, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Lightweight WebVR Real-Time Simulation of Large-Scale Fire Scenario in Metro

Abstract

Abstract: Large-scale fire simulation requires a huge amount of calculation and excellent rendering capabilities, which poses a challenge to the realization of a real-time online fire simulation system on the Web. *A lightweight Web-based real-time simulation technology framework for subway station fire is proposed.* Based on the simplification of calculation formulas in the field of fire safety and the analysis of the impact of smoke prevention facilities in subway stations, *a two-stage smoke diffusion model based on smoke bay is proposed* to achieve the smoke diffusion trend calculation; *a Web-side multi-granularity particle emitter framework at the smoke bay level is proposed* to complete the rendering of flames and smoke shapes, and to realize the real-time calculation and visualization process based on the Web. The experimental verification shows that the simulation results of the method in this paper are similar to the simulation results of the professional fire simulation software. And the method in this paper can simulate the fire online in real time by opening the Web page, which has a significant advantage in convenience.

Keywords

fire simulation, smoke diffusion, WebVR, lightweight dynamic modeling, real-time rendering

Authors

Yang Li, Huijuan Zhang, Chenchen Ge, Kang Xie, Zhuang Li, and Jinyuan Jia

Recommended Citation

Yang Li, Huijuan Zhang, Chenchen Ge, Kang Xie, Zhuang Li, Jinyuan Jia. Lightweight WebVR Real-Time Simulation of Large-Scale Fire Scenario in Metro[J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(3): 646-657.

轻量级 WebVR 地铁站大规模火灾情景实时仿真研究

李阳, 张惠娟, 葛晨晨, 谢康, 李庄, 贾金原*

(同济大学 软件学院, 上海 201800)

摘要: 大规模火灾仿真需要庞大的计算量和卓越的渲染能力, 对 Web 端实时在线火灾仿真系统的实现提出了挑战。提出了一套轻量级 Web 端地铁站火情实时仿真技术框架。基于火灾安全领域中的计算公式整理简化, 分析地铁站防烟设施影响, 提出了基于防烟分区的两阶段烟雾扩散模型, 实现烟雾扩散趋势计算; 提出了 Web 端的防烟分区级多粒度粒子发射器框架, 完成火焰和烟雾形态的渲染, 实现基于 Web 端实时计算和可视化过程。试验验证表明: 本文方法与专业火灾模拟软件模拟结果在大体趋势上相近, 并且打开网页即可实时在线对火灾进行模拟, 在便捷性上拥有显著优势。

关键词: 火灾仿真; 烟雾扩散; WebVR; 轻量级动态建模; 实时渲染

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)03-0646-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1198

引用格式: 李阳, 张惠娟, 葛晨晨, 等. 轻量级 WebVR 地铁站大规模火灾情景实时仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(3): 646-657.

Reference format: Li Yang, Zhang Huijuan, Ge Chenchen, et al. Lightweight WebVR Real-Time Simulation of Large-Scale Fire Scenario in Metro[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 646-657.

Lightweight WebVR Real-Time Simulation of Large-Scale Fire Scenario in Metro

Li Yang, Zhang Huijuan, Ge Chenchen, Xie Kang, Li Zhuang, Jia Jinyuan*

(School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201800, China)

Abstract: Large-scale fire simulation requires a huge amount of calculation and excellent rendering capabilities, which poses a challenge to the realization of a real-time online fire simulation system on the Web. A lightweight Web-based real-time simulation technology framework for subway station fire is proposed. Based on the simplification of calculation formulas in the field of fire safety and the analysis of the impact of smoke prevention facilities in subway stations, a two-stage smoke diffusion model based on smoke bay is proposed to achieve the smoke diffusion trend calculation; a Web-side multi-granularity particle emitter framework at the smoke bay level is proposed to complete the rendering of flames and smoke shapes, and to realize the real-time calculation and visualization process based on the Web. The experimental verification shows that the simulation results of the method in this paper are similar to the simulation results of the professional fire simulation software. And the method in this paper can simulate the fire online in real time by opening the Web page, which has a significant advantage in convenience.

Keywords: fire simulation; smoke diffusion; WebVR; lightweight dynamic modeling; real-time rendering

0 引言

地铁站内空间相对密闭且极其拥挤, 一旦发

生火灾, 其复杂的建筑结构、高密度的客流以及较长的疏散路径均使得地铁站内乘客疏散及营救

收稿日期: 2021-11-23

修回日期: 2021-12-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(6207071897); 国家自然科学基金区域联合基金重点项目(U19A2063)

第一作者: 李阳(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为计算机图形学、Web3D。E-mail: 876056236@qq.com

通讯作者: 贾金原(1963-), 男, 教授, 博士, 研究方向为计算机图形学、虚拟现实、Web3D。E-mail: jyjia@tongji.edu.cn

变得非常困难。因此, 针对地铁站火情的仿真, 尤其是烟雾扩散的模拟, 对虚拟消防疏散演练和地铁站防火构建都有重要意义。

烟雾模拟是计算机图形学中流体模拟研究热点之一, 针对这一问题, 国内外学者提出了多种解决方案^[1], 其中最被广泛使用的是拉格朗日粒子法和欧拉网格法, 其主要优点是对烟雾模拟符合物理规律, 模拟结果真实, 但此类方法大多存在以下3方面的问题:

(1) 计算过程复杂, 计算量巨大, 难以达到Web端烟雾扩散在线仿真的轻量化和实时性要求;

(2) 难以运用在大规模烟雾仿真中。此类方法通常需要划分精细网格或大量粒子, 更适合小规模场景模拟。

(3) 很少将烟雾与火灾场景联系起来。此类方法通常将烟雾视为纯粹的流体对待, 很少与燃烧现象关联, 且忽略实际火灾场景中防烟设施和排风系统作用。

针对上述问题, 本文融合计算机图形学和火灾安全两个领域的相关知识, 提出了一套轻量级且考虑真实火灾情境的Web端地铁站大规模火情实时在线仿真技术框架。

1 相关研究

在计算机图形学中, 通常基于模拟常规流体方法对火灾烟雾进行模拟。其中最主流的方法是基于物理的流体模拟方法, 其主要思想是通过计算流体力学中的不可压缩Navier-Stokes(N-S)方程模拟流体运动。此类方法优点是模拟结果真实性高, 流动细节符合流体物理特性。根据追踪流体运动方式不同, 此类方法又分为基于粒子的拉格朗日方法和基于网格的欧拉方法。

基于粒子的拉格朗日方法将流体视为许多粒子组成的粒子团, 每个粒子具有速度、温度等属性, 通过绘制粒子运动轨迹模拟流体运动过程。基于网格的欧拉方法将整个空间划分为一个个固定网格, 在各个时刻计算得到这些网格观测点上

的物理值以模拟流体运动。

此外, 基于数据的流体模拟方法近年来得到发展。其中文献[2]通过对预先在专业火灾模拟软件中模拟好的火灾烟雾数据进行插值处理, 实现了Web端烟雾扩散仿真, 虽无法在线实时计算, 但其改变烟雾可控单元的方法对本文中湍流形态烟雾的渲染有很大启发。而随着机器学习技术发展, 众多基于数据的深度学习方法也应用到流体模拟中来^[3-6], 相较于基于物理的传统模拟方法, 其在生成流体动画阶段的速度大幅提升。

基于物理的流体模拟方法在计算时需要大量时间, 即使后续研究通过复合网格^[7-8]、GPU并行加速^[9-10]等方式提升了计算速度, 仍难以较好运用于Web端大规模火灾实时模拟场景。而基于数据的流体模拟方法则在准备阶段需大量时间搜集数据、训练模型。它们都不会将烟雾与燃烧现象关联起来, 且更关注烟雾的微观流动特性, 即每个微小粒子的运动或网格点的属性都要符合流体流动的物理特性, 从而使得其整体扩散也符合真实情况。而火灾安全领域的烟雾计算方法则更关注烟雾的宏观扩散情况^[11-13], 其不分析烟雾中各粒子具体如何流动, 而是采用经验公式直接计算整体烟雾层的覆盖范围与厚度等信息。并且其将烟雾与燃烧现象紧密关联而非只是看作单纯的流体, 但这一领域研究几乎都缺乏对烟雾的可视化工作。

2 基本思路

在地铁站火情仿真应用场景中, 应更注重烟雾的宏观扩散、而非微观流动; 因此本文将烟雾的模拟分为计算和渲染两个部分, 其中计算部分通过火灾安全领域公式计算烟雾扩散趋势以节省大量计算时间, 而烟雾流动特性则在渲染部分近似模拟。

本文提出了一套轻量级Web端地铁站火情实时仿真技术框架, 其技术路线如图1所示, 主要分为火情计算模块和火情渲染模块。

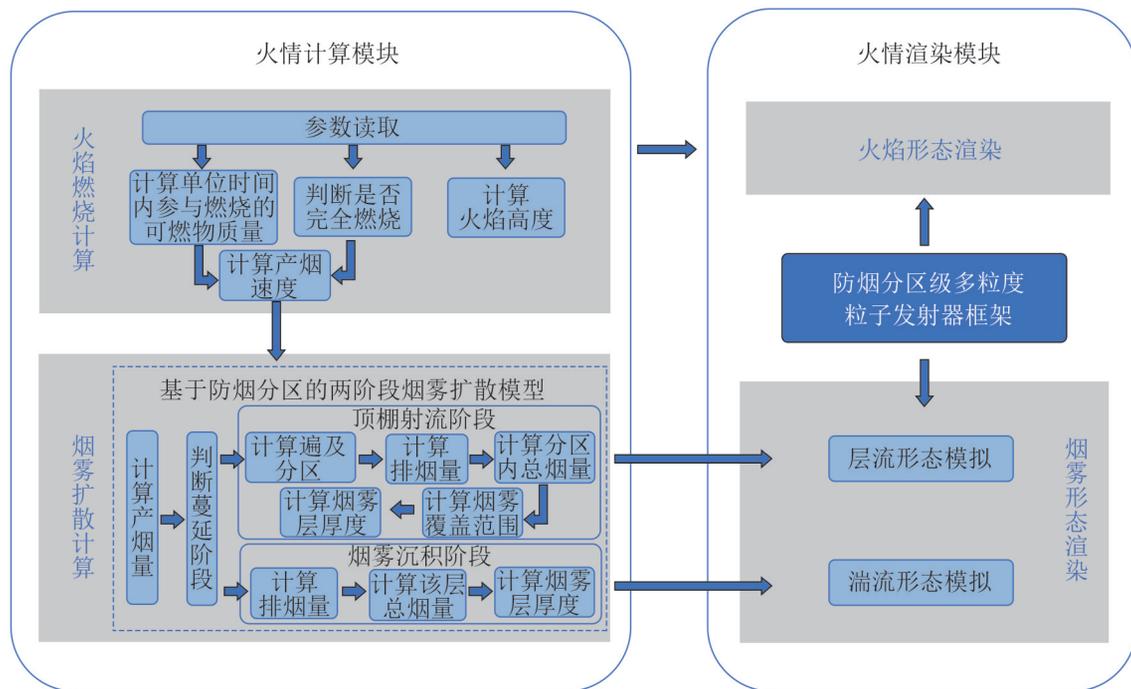


图1 轻量级Web端地铁站火情实时仿真技术框架

Fig. 1 Lightweight Web-side real-time simulation technology framework for subway station fire

火情计算模块针对火焰属性及烟雾扩散情况进行计算，其功能主要由火焰燃烧计算和烟雾扩散计算两个模块完成。火焰燃烧计算模块基于整理简化后的火灾安全领域经验公式，完成火焰高度和产烟速度等属性的计算。烟雾扩散计算模块根据地铁站火灾烟雾扩散规律，提出了基于防烟分区的两阶段烟雾扩散模型，实现了在减小计算量的基础上使计算结果符合真实情况。

火情渲染模块实现了上述火情计算模块结果数据的Web端可视化渲染。本文基于Three.js技术提出了Web端防烟分区级多粒度粒子发射器框架，针对不同防烟分区采用多粒度方式渲染，减轻了烟雾规模扩大对运行时帧率影响，实现了火焰和大规模烟雾形态模拟。同时，与基于防烟分区的两阶段烟雾扩散模型相对应，对烟雾形态的渲染分为层流和湍流两种形态。受基于粒子方法和基于网格方法的启发，此处采用粒子发射器和划分烟雾单元的形式近似模拟这两种形态的烟雾，只需形似而不必使其流动严格符合物理特性，大幅

降低了计算消耗。

3 火情计算模块

3.1 火焰燃烧计算

火焰燃烧计算主要利用燃烧物类型、着火点位置和火源功率等参数，计算火焰平均高度和产烟速度等属性。其中火焰平均高度属性将传输给火情渲染模块以对火焰形态渲染，产烟速度属性将用于烟雾扩散计算。

火焰平均高度计算方法为^[14]

$$L = -1.02D + 0.235Q^{2/5} \quad (1)$$

式中： D 为火源直径，m； Q 为热释放速率，kW。

考虑到空气供给不足对理论烟气量计算的影响，本文将火灾安全领域中完全燃烧和非完全燃烧两种不同情况下的计算式进行整合，对产烟速度进行计算，具体为

$$v_s = \begin{cases} Q[V_{s0} + 1.016 \frac{1}{\alpha} V_0/q], & \alpha \geq 1 \\ Q[V_{s0} + 0.806 \frac{1}{\alpha} V_0/q], & \alpha < 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： v_s 为产烟速度， m^3/s ； Q 为火源的热释放速

率, kW; q 为可燃物的热值, kJ/kg; V_0 为理论空气量, 即可燃物刚好完全燃烧所需的空气量, m^3/kg ; V_{s0} 为理论烟气量, 即可燃物在理论空气量条件下燃烧所生成的烟气量, m^3/kg ; α 为过量空气系数, 指燃烧过程中实际空气量与理论空气量之比, 当 $\alpha < 1$ 时, 燃烧为非完全燃烧, 否则为完全燃烧。

上述火灾属性在火灾开始后实时计算, 并记录已燃烧的可燃物质量 m_c , 当其达到可燃物总质量 m_t 时, 火焰熄灭并不再产生烟气, 具体过程如算法1所示。

算法1 火焰属性计算算法

输入: 热释放速率 Q , 燃烧物热值 q , 燃烧物总质量 m_t , 过量空气系数 α , 火源直径 D

输出: 产烟速度 v_s , 火焰高度 L

1. 计算理论空气量 V_0 和理论烟气量 V_{s0} ;
2. $m_c = 0$;
3. WHILE $m_c < m_t$ DO
4. 根据式(1)计算火焰高度 L ;
5. $m = Q / q$;
6. $m_c = m_c + m$;
7. IF $\alpha < 1$ THEN
8. $v_s = m[V_{s0} + 1.0161(\alpha - 1)V_0]$;
9. ELSE
10. $v_s = m[V_{s0} + 0.8061(\alpha - 1)V_0]$;
11. END IF
12. END WHILE

3.2 烟雾扩散计算

3.2.1 火灾场景的三级划分方法

为方便对火情进行多粒度计算和渲染, 本文从建筑火灾安全系统工程角度考虑, 对火灾发生的场景在3个级别上进行划分, 如图2所示。第1级: 楼层级。整个地铁站场景划分为多个楼层级单元, 一个地铁站最常见的楼层级单元有站厅层和站台层等。第2级: 防烟分区级。每个楼层又根据各自结构和消防设置被划分为多个防烟分区, 称为防烟分区级。第3级: 烟雾单元级, 为方便

对湍流烟雾进行模拟, 将各个防烟分区单元划分为许多个烟雾单元, 即烟雾单元级。其中, 楼层级针对烟雾扩散进行粗粒度计算, 防烟分区级针对烟雾扩散计算进行细粒度计算; 而烟雾渲染中的层流形态和湍流形态则分别在防烟分区级和烟雾单元级进行模拟。

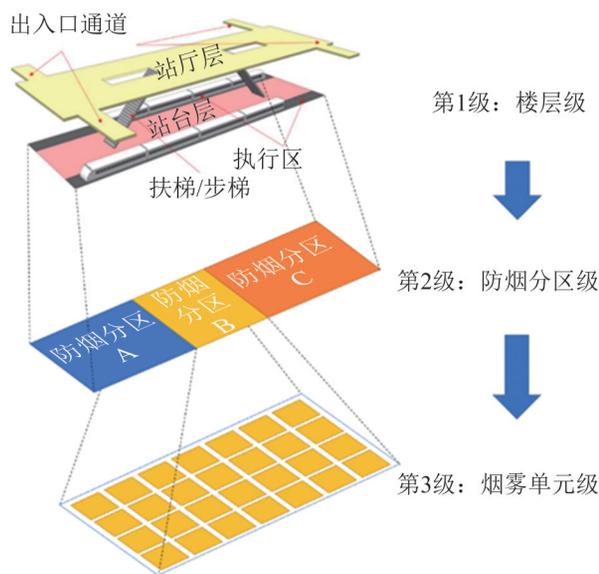


图2 火灾场景的3级结构划分
Fig. 2 Three-level structure division of fire scene

3.2.2 基于防烟分区的两阶段烟雾扩散模型

火灾发生后, 火焰上方的烟气裹挟空气上升形成烟羽流, 当烟羽流撞击到房间顶棚后会沿顶棚水平运动, 形成一个较薄的射流层称为顶棚射流。随着燃烧持续发展, 新的烟气不断向上补充, 若可燃物充足且烟气不能充分从上部排出, 烟气层将会一直下沉, 使可视高度降低, 影响疏散逃生和消防救援。此外, 火灾场景中的防烟设施也对烟雾扩散产生着巨大影响。地铁车站的站厅、站台公共区根据消防安全要求划分防烟分区, 各防烟分区边界设置挡烟垂壁以形成储烟仓, 并配置排烟设备。基于上述特点, 本文提出了基于防烟分区的两阶段烟雾扩散模型, 该模型将烟雾扩散分为2个阶段: 射流扩散阶段和烟雾沉积阶段, 如图3所示。

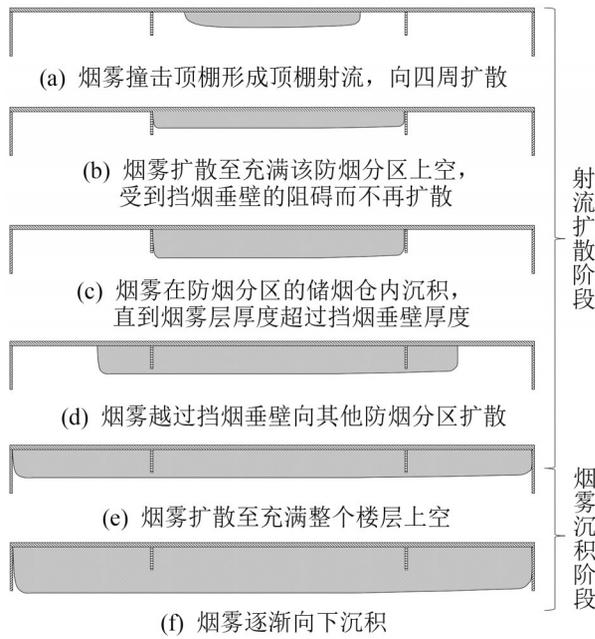


图3 烟雾两阶段扩散示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two-stage smoke diffusion

具体过程如算法2所示。

算法2 基于防烟分区的两阶段烟雾扩散算法

输入：产烟速度 v_s ，排烟速度 v_c ，挡烟垂壁高度 h_c ，防烟分区面积 S ，防烟分区体积 V ，楼层总面积 S_{floor} ，楼层总体积 V_{floor}

输出：烟雾层厚度 h_{smoke}

1. 判定火源所在楼层与防烟分区；
2. 设置烟雾扩散阶段 $stage$ 为 1；
3. WHILE 火焰还未熄灭 DO
4. 获取产烟速度 v_s ；
5. 计算产烟量 $A_{\text{smoke}} = v_s \times \Delta t$ ；
6. IF $stage = 1$ && 烟雾已覆盖整个楼层 THEN
7. $stage = 2$ ；
8. END IF
9. IF $stage = 1$ THEN
10. FOR EACH 该层所有防烟分区 DO
11. 获取输入该防烟分区的烟雾量 A_{in} ；
12. 获取该防烟分区内烟雾覆盖面积 S_{smoke} ；
13. $A_{\text{now}} = A_{\text{now}} + A_{\text{in}}$ ；
14. $A_{\text{exhaust}} = v_c \times \Delta t \times S \times A_{\text{now}} / V$ ；

$$15. \quad h_{\text{smoke}} = A_{\text{now}} - A_{\text{exhaust}} / S_{\text{smoke}};$$

16. IF 烟雾蔓延至防烟分区边界 &&

$h_{\text{smoke}} > h_c$ THEN

17. 计算该防烟分区输出烟气量 A_{out} ；

$$18. \quad A_{\text{now}} = A_{\text{now}} - A_{\text{out}};$$

19. END IF

20. END FOR

21. ELSE IF $stage = 2$ THEN

$$22. \quad A_{\text{now}} = A_{\text{now}} + A_{\text{smoke}};$$

$$23. \quad A_{\text{exhaust}} = V_c \times \Delta t \times S_{\text{floor}} \times A_{\text{now}} / V_{\text{floor}};$$

$$24. \quad h_{\text{smoke}} = A_{\text{now}} - A_{\text{exhaust}} / S_{\text{floor}};$$

25. END IF

26. RETURN h_{smoke} ；

27. END WHILE

其中，算法2的两阶段计算过程如下：

(1) 射流扩散阶段。在此阶段，烟雾在场景上空从火源点向四周蔓延，覆盖面积越来越大直至充满该层整个上层空间。在扩散过程中，即使某防烟分区中烟气已蔓延至分区边界，但由于挡烟垂壁的阻挡烟气会转为向下沉积，直至烟气层厚度超过挡烟垂壁高度才会向相邻防烟分区输出烟气。即火焰所在防烟分区的烟雾来源为火源，而其他防烟分区的烟雾来源为有烟雾溢出的相邻防烟分区。将整个着火楼层的防烟分区排列情况视为一个无向图，在计算过程中以火焰所在防烟分区为起点，按广度优先遍历该楼层所有防烟分区，并在遍历的同时计算各防烟分区的烟雾覆盖面积和烟气层厚度等信息。此阶段对各防烟分区分别计算各自区域的烟雾扩散情况，烟雾的计算相对细粒度化，但因为这一阶段大部分时间中烟雾并没有扩散到所有防烟分区，所以并不是每个防烟分区都需要参与计算，整体的计算量可以得到控制。

(2) 烟雾沉积阶段。此时烟雾已遍及整个楼层所有防烟分区，若再对每个防烟分区分别进行计算，则整体计算量将非常之大。根据火灾中的双层区域模型理论，整个室内空间由水平面分为各

项物理性质均匀的上层热烟气层和下层冷空气层。因此场景中整个烟雾层可视为一个整体, 并且这一阶段烟雾在水平方向上的分布几乎不变, 所以不必再对各防烟分区分别进行计算, 而是将整个楼层的烟雾视为一个整体进行粗粒度的计算, 在减轻计算量的同时依然还能保证烟雾扩散趋势的准确性。

4 火情渲染模块

4.1 防烟分区级多粒度粒子发射器框架

火焰与烟雾形态的模拟需要使用粒子实现, 但目前 Web 端的粒子系统都较为简陋, 即使是 Web3D 领域受到广泛认可的 Three.js 框架, 其自带的粒子系统也难以直接运用在大规模火灾烟雾模拟上。因此, 为方便对火焰和烟雾的形态进行模拟, 本文在 Three.js 的基础之上提出了一套 Web 端的防烟分区级多粒度粒子发射器框架, 该框架通过分阶段控制粒子运动的流程以模拟不同物体, 并根据各防烟分区情况设置了不同的渲染粒度。

本粒子发射器框架中的每个粒子都具有位置、大小、颜色、生存时间、生存阶段等属性。每隔一定时间 T 就向场景中发射粒子, 粒子随着其生存时间的增加进入到不同的生存阶段, 在不同的生存阶段可设置不同的运动和着色方式, 直至达到其最大生存时间而消亡。为了灵活模拟不同粒子效果, 可修改粒子各个生存阶段的停留时间, 以及在该阶段的运动和着色方式, 甚至可以增加或删减粒子的某些生存阶段。

此外, 本粒子发射器系统使用粒子回收池机制存储已消亡粒子。当场景中需要注入新粒子时, 先从粒子回收池中取粒子重新进行初始化, 仅当回收池中无可用粒子时才创建新粒子, 从而达到循环利用的目的, 以避免系统性能被大量浪费而造成帧率下降、运行卡顿。粒子发射器框架流程如图 4 所示。

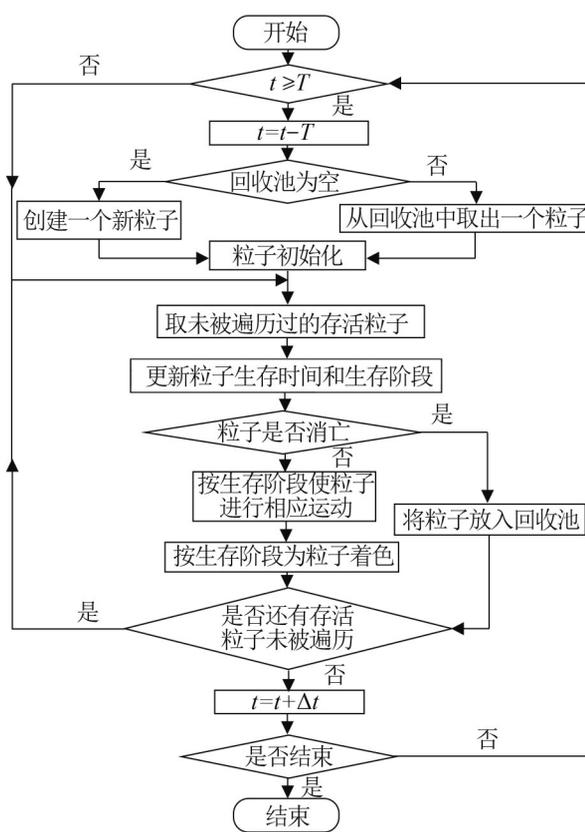


图 4 粒子发射器框架流程

Fig. 4 Flow chart of particle emitter framework

为降低火焰与烟雾规模对运行时渲染帧率的影响, 本文对不同防烟分区的粒子发射器进行了多粒度的渲染设置。根据粒子发射器所在防烟分区与摄像机目前所处防烟分区的距离, 调整其发射粒子的时间间隔 T :

$$T = T_0 + 2^{\lfloor \alpha \cdot S \cdot v \cdot D \rfloor} \cdot t - t \quad (3)$$

式中: T_0 为摄像机所在防烟分区粒子的正常发射时间间隔; t 为各粒度之间的粒子发射时间间隔的跨度; α 为粒度调节因子, 用来调节各防烟分区之间粒度变化的快慢, 可根据实际情况进行设置; S 为防烟分区平均面积; v 为摄像机移动速度; D 为该防烟分区与摄像机所在防烟分区的间隔距离。

在式(3)控制下, 粒子发射器离摄像机所在防烟分区越远时 T 值越大, 发射粒子的频率越低, 以此降低远处防烟分区的粒子数。在保证摄像机所见效果基本不变的情况下, 降低场景中总粒子

数目,以提高运行时帧率。此外可以预见,即使在某时刻切换了某防烟分区的粒子发射频率,其粒子数调整到与新粒度对应的数量级仍需要一定时间。因此,为防止摄像机到达某防烟分区时其粒子数与对应数量级相差太多,本文在粒度控制公式中加入了 S/v 项,使相近防烟分区之间粒度级别跳跃不致太大。

4.2 火焰形态渲染

本模块中采用上述防烟分区级多粒度粒子发射器框架对火焰效果进行模拟。为营造火焰的立体感,本文在模拟火焰时采用立体的二十面缓冲几何体作为粒子。并且为了呈现出更好的粒子效果,通过GLSL(openGL shading language)在顶点着色器中采用柏林噪声对粒子顶点进行了随机化处理,并在片段着色器中也根据其柏林噪声结果进行颜色渐变化处理。通过GLSL的实现,这些计算都是在GPU中进行,不仅可以获得更好的拟真效果,还缓解了CPU的计算压力。粒子的柏林噪声随机化过程如图5所示。



图5 粒子的柏林噪声随机化过程

Fig. 5 Berlin noise randomization process of particle

根据火焰形态特征,将火焰粒子生存时间分为3个阶段:生成阶段,膨胀阶段和漂浮阶段。生成阶段为粒子从无到有的初始化阶段,这一阶段的火焰粒子亮度最亮,在火焰中属于中心的燃烧部分;膨胀阶段的粒子继续增大,其位置上升并显著向外扩散,同时粒子亮度下降,颜色接近橘色;最后的漂浮阶段中粒子逐渐变小且透明度逐渐增大直至消失,在快速上升的同时向火焰中轴线聚拢,为了与烟雾形成更好的衔接效果,其颜色进一步变暗直至最后渐渐与烟雾颜色相近。烟雾模拟中粒子生命周期的3个阶段和最终效果如图6所示。

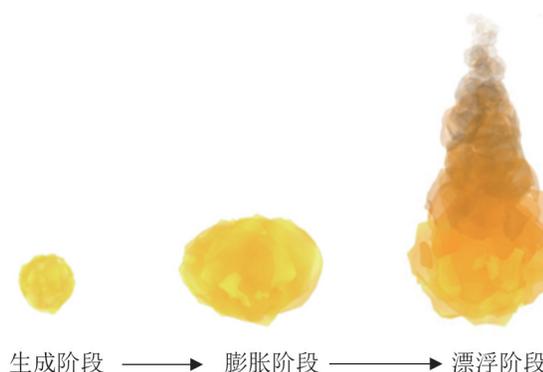
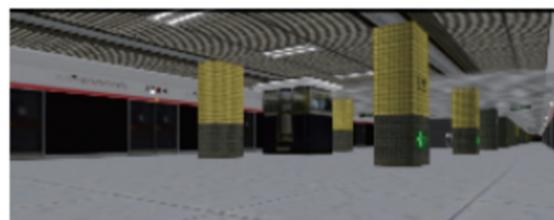


图6 火焰形态模拟的3个阶段

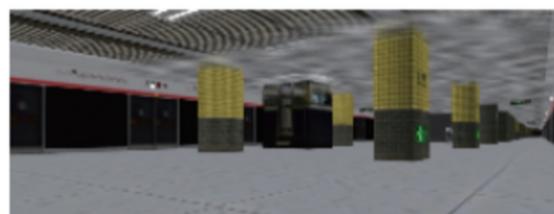
Fig. 6 Three stages of flame shape simulation

4.3 烟雾形态渲染

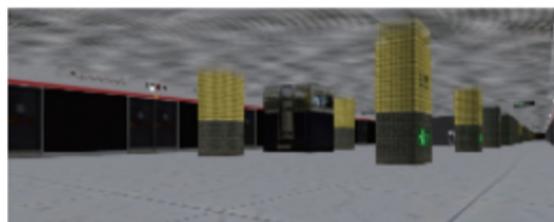
与基于防烟分区的两阶段烟雾扩散模型中烟雾的两个扩散阶段相对应,本文对烟雾形态的模拟也分别采取2种形式:射流扩散阶段对应烟雾的层流形态,烟雾沉积阶段对应湍流形态,分别如图7、8所示。



(a) $t=80$ s



(b) $t=90$ s



(c) $t=100$ s

图7 射流扩散阶段(层流形态)

Fig. 7 Jet diffusion stage (laminar flow pattern)

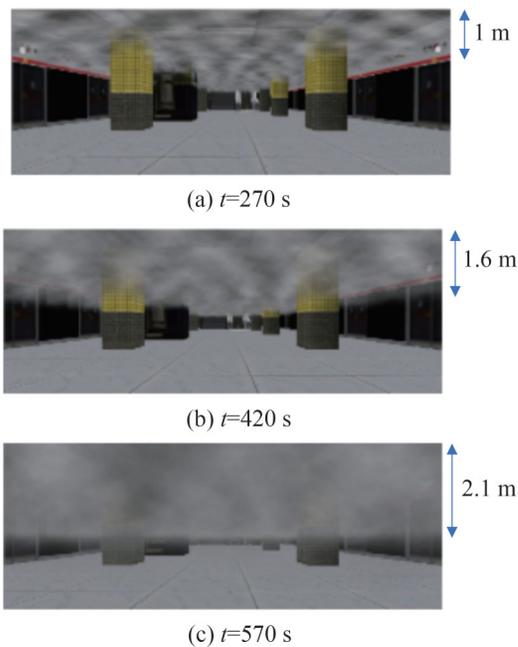


图 8 烟雾沉积阶段(湍流形态)

Fig. 8 Smoke deposition stage (turbulent flow pattern)

射流扩散阶段, 烟雾会在顶棚下方形成一层较薄的紧贴顶棚的顶棚射流, 此时烟雾运动主要为沿顶棚的水平方向运动。且由于此时烟雾靠近顶棚壁面, 烟雾流动受到壁面限制, 其运动可以近似看作为有序的层流流动。为了对这种有序的水平方向的层流运动进行模拟, 本文在射流扩散阶段依旧利用防烟分区级多粒度粒子发射器框架模拟, 每个防烟分区设置一个粒子发射器来模拟各自区域的顶棚射流。层流烟雾的粒子分为生成阶段、射流阶段和消亡阶段。生成阶段中烟雾粒子在火源点上方的顶棚下生成并初始化。在射流阶段, 烟雾粒子沿其扩散方向有序运动, 并且根据烟雾扩散计算结果改变烟雾层厚度。最后进入到消亡阶段, 烟雾粒子移速渐缓并且透明度逐渐增大直至消失。

在烟雾沉积阶段中, 烟雾由水平方向上的流动变为在垂直方向上向下沉积。随着烟雾沉积和烟雾层厚度的增大, 顶棚壁面对烟雾的影响逐渐减弱, 烟雾由有序的层流变为无规律的三维涡旋湍流状态。

这一阶段烟雾沉积导致同一防烟分区下烟雾量显著增大, 继续使用粒子发射器框架会对性能提出极大挑战, 并且其也不太适合用于模拟无规

律的湍流运动。因此出于性能和形态两方面的考虑, 此处不再采用粒子发射器框架, 而是将整个空间划分为一个个的烟雾单元。烟雾单元是将整个场景进行 3 级划分时的第 3 级划分方式(见图 2), 每个烟雾单元由同一块区域的多个粒子组成。这样一来可通过对每个烟雾单元内烟雾粒子的合理排布, 用尽可能少的粒子达到良好的效果; 二来将可控单位由单个粒子变为烟雾单元, 方便对烟雾运动进行控制。各烟雾单元中的粒子团进行随机自旋运动, 并根据烟雾扩散模块计算结果实时调整各自单元中的烟雾层厚度。

5 试验结果

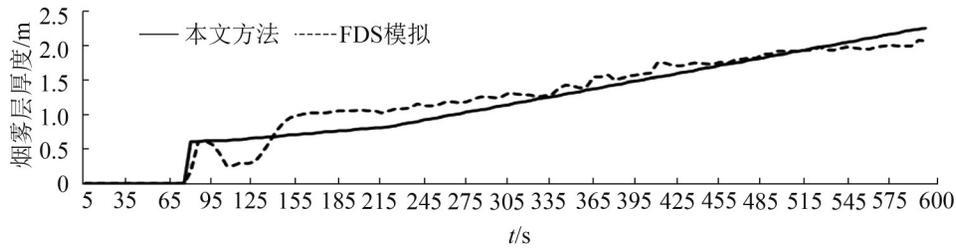
5.1 烟雾模拟试验结果

为对本文中烟雾扩散计算方法进行验证, 本文在火灾动力学模拟工具(fire dynamics simulator, FDS)中和本文提出的方法中分别建立了一个相同地铁站模型, 并对两种火灾工况进行模拟。电脑配置为 i7-10700, 16G, RTX2060 SUPER。

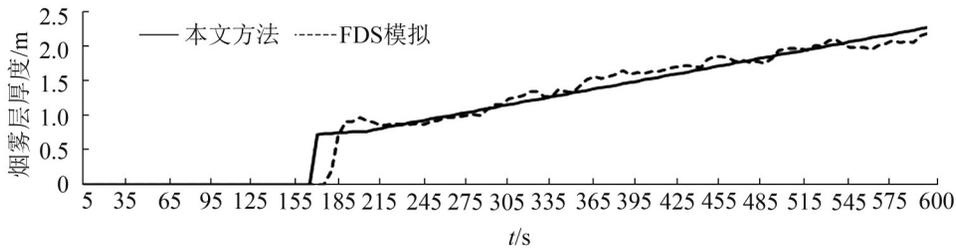
1 号火灾工况燃烧物设置为聚氨酯—乘客身上衣物与行李的主要成分, 其碳、氢、氧、氮质量百分比分别为 38.18%、43.03%、12.73%、6.06%, 热释放速率为 1 000 kW, 取地下二层两楼梯口处的烟雾层厚度作对比, 模拟结果见图 9。

2 号火灾工况燃烧物设置为尼龙, 其碳、氢、氧、氮质量百分比分别为 31.85%、57.33%、5.41%、5.41%, 热释放速率同样设置为 1 000 kW, 两楼梯口处烟雾层厚度数据如图 10 所示。

由以上试验结果分析, 本文方法与 FDS 模拟的烟雾扩散结果在大体趋势相近, 但 Pyrosim 需要先下载安装其客户端并在客户端软件中运行, 模拟时长约为 12 h, 而本文方法则只需打开浏览器中输入网址即可实时在线模拟。但是, 本文预测结果相对 Pyrosim 结果来说略显平滑单调, 在细节方面还有待提升, 这也是为减轻计算量而对公式简化所付出的代价。本文方法与 FDS 对比见表 1。

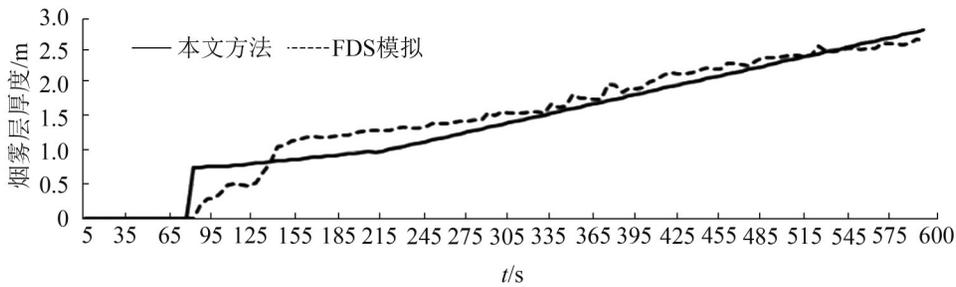


(a) 1号楼梯口烟雾层厚度

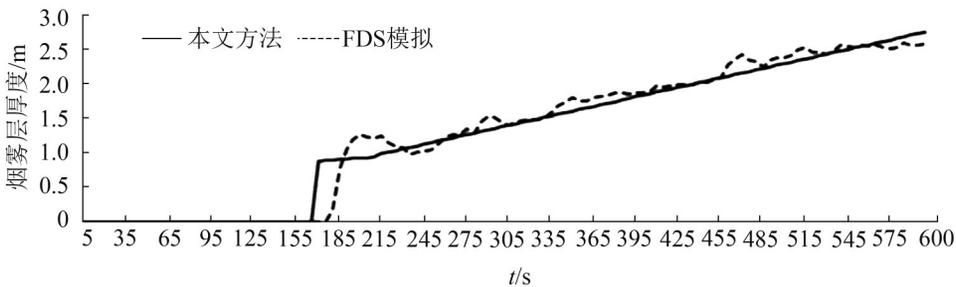


(b) 2号楼梯口烟雾层厚度

图9 1号火情试验结果(聚氨酯)
Fig. 9 Fire test results No. 1 (polyurethane)



(a) 1号楼梯口烟雾层厚度



(b) 2号楼梯口烟雾层厚度

图10 2号火情试验结果(尼龙)
Fig. 10 Fire test results No.2 (nylon)

表1 本文方法与FDS对比

Table 1 Comparison of the method in this paper and FDS

| 方法 | 运行准备 | 模拟时间 | 模拟结果 |
|------|-------------|----------|-----------|
| 本文方法 | 网页加载时间约 5 s | 实时模拟无需等待 | 趋势正确但细节不足 |
| FDS | 下载安装客户端 | 约 12 h | 趋势正确且细节丰富 |

5.2 排烟设施试验结果

为探寻排烟设施对烟雾扩散的影响, 本文在上述1号火灾工况的基础上, 分别将单位面积内的排烟速度设为0、0.5和1 m³/min, 其1号楼梯口处烟雾层厚度数据如图11所示。

从该试验结果可以看出, 随着排烟速度的增大, 该火灾工况下烟雾的沉积速度明显变慢, 甚至由于排烟设施和烟雾向相邻防烟分区扩散的影响, 该楼梯口处烟雾层厚度在某段时间内有减小的现象。由此看出, 防烟设施对烟气层的沉积起到了一定的限制作用。可以预见, 当排烟速度增大到一定程度时, 甚至有可能出现烟气层厚度在火灾发展过程中逐渐减小的现象。

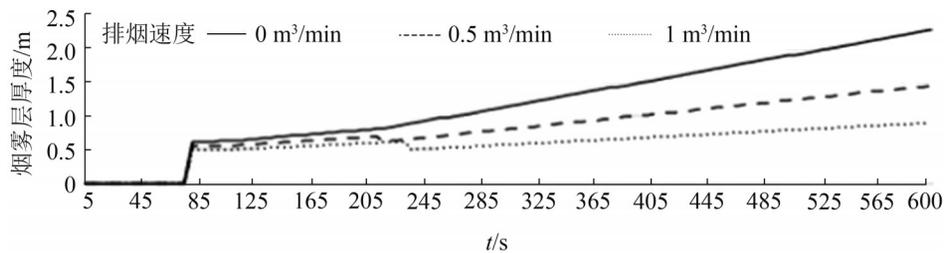


图11 排烟设施试验结果

Fig. 11 Results of the smoke extraction facility experiment

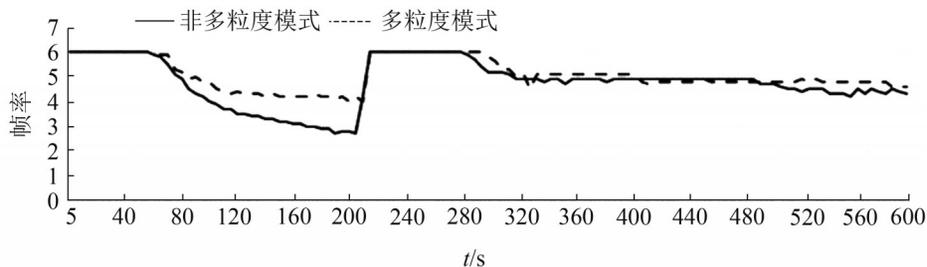
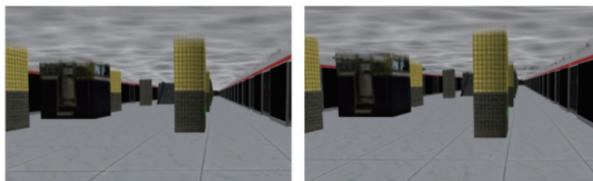


图12 多粒度粒子发射器对帧率的影响

Fig. 12 Impact of multi-granularity particle emitters on frame rate



(a) 多粒度模式

(b) 非多粒度模式

图13 多粒度模式对渲染效果的影响

Fig. 13 Impact of multi-granularity mode on rendering

5.3 多粒度粒子发射器帧率试验结果

为降低火焰及烟雾的规模对运行时系统渲染帧率的影响, 本文提出了一个Web端的防烟分区级多粒度粒子发射器框架。对此, 在1号火灾工况下记录了开启多粒度模式前后的系统运行帧率情况, 如图12所示。

由图12可以看出, 随着火灾发展烟雾规模的扩大, 开启多粒度模式后系统运行帧率较之前明显提升, 烟雾规模对粒子发射器的渲染效率影响减弱。并且, 开启多粒度模式后, 摄像机所视烟雾效果几乎不变, 如图13所示。另外, 在大约220 s时烟雾由层流形态变为湍流形态, 烟雾的模拟方式转变为通过烟雾单元控制的形式, 使得整体帧率大幅提升。

6 工具与应用

为使本文中火情仿真方法可应用在实际的地铁站消防疏散演练系统中, 本文在原有的火情仿真技术框架之上添加了火场设置模块, 使其可以作为一个工具从而更好的融入整个消防疏散演练系统。用户可在火场设置模块中对各项参数进行

设置以生成自己想要的火灾场景，其中包括燃烧物类型、着火点位置和火灾荷载等火源相关参数，以及防烟分区、排烟速度等场景相关参数。

加入火场设置模块后，其与原来的火情计算系统和火情渲染系统共同组成了一个 Web 端的实时在线火情仿真工具(<http://youku3d.com/smart3d/>

manvsfire_demo/new.html)，并已运用在 Web 端地铁站消防疏散演练系统中。该工具读取用户输入并将计算结果并输出到消防疏散模拟模块，对消防疏散模拟产生重要的影响。整个地铁站消防疏散演练系统架构和运行效果如图 14、15 所示。

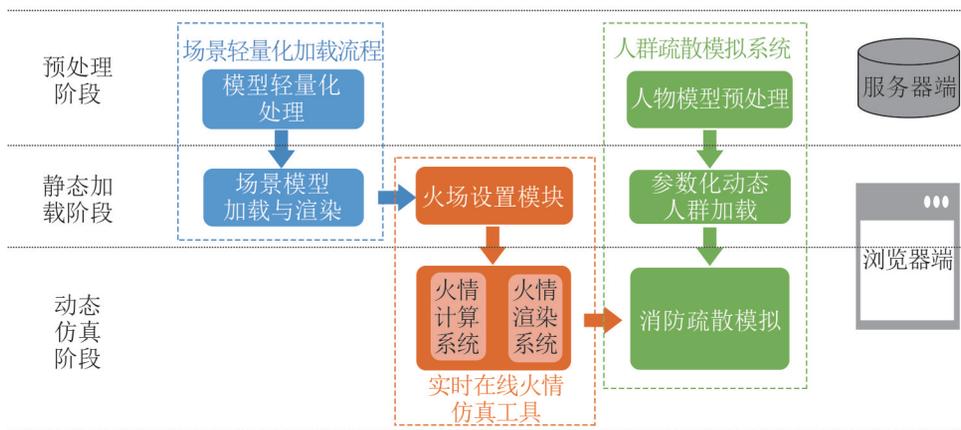


图 14 地铁站消防疏散演练系统架构图

Fig. 14 Architecture diagram of subway station fire evacuation drill system

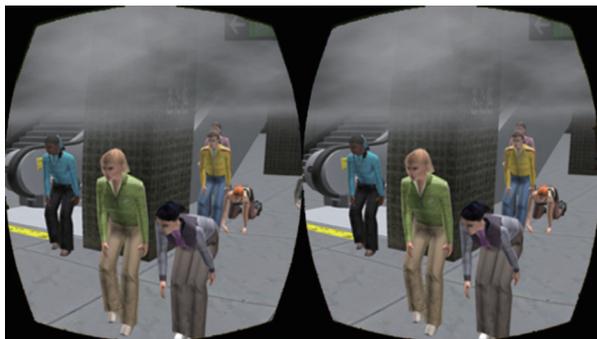


图 15 WebVR 地铁站消防疏散演练系统

Fig. 15 WebVR fire evacuation drill system in subway station

7 结论

针对大规模火灾仿真计算量大、性能要求高、难以在 Web 端实时在线模拟等问题，本文主要工作和贡献如下：

(1) 提出基于防烟分区的两阶段烟雾扩散模型。针对各阶段的烟雾扩散特点对计算进行简化，用于轻量级地计算地铁站火灾中的烟雾扩散趋势；

(2) 提出 Web 端的防烟分区级多粒度粒子发射器框架，其仿真效果几乎不受影响且减轻 Web 端渲染压力；

(3) 提出了一套轻量级 Web 端地铁站火情实时在线仿真技术框架，并最终将其制作成了一个火情仿真工具，运用在 Web 端地铁站消防疏散演练系统中。

本文方法计算量小、适用规模大并且充分考虑了实际火灾场景中的因素。试验验证结果表明，本文方法与 FDS 专业软件模拟结果在大体趋势上相近，可在不用下载客户端和插件情况下，即可打开网页实时在线对火灾进行模拟，在便捷性上拥有显著优势。

参考文献：

[1] 肖祥云, 杨旭波. 基于物理及数据驱动的流体动画研究[J]. 软件学报, 2020, 31(10): 3251-3265.
Xiao Xiangyun, Yang Xubo. Physically-Based and Data-Driven Fluid Simulation Research[J]. Journal of Software, 2020, 31(10): 3251-3265.

- [2] 艾子豪, 胡永豪, 闫丰亭, 等. 轻量级 Web3D 地铁火灾逃生在线规划关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(4): 405-421.
Ai Zihao, Hu Yonghao, Yan Fengting, et al. Key Technology of Lightweight Web3D Online Planning of Metro Fire Escape[J]. Chinese Science: Information Science, 2019, 49(4): 405-421.
- [3] Tompson J, Schlachter K, Sprechmann P, et al. Accelerating Eulerian Fluid Simulation with Convolutional Networks[C]// International Conference on Machine Learning. Sydney, Australia: PMLR, 2017: 3424-3433.
- [4] Wiewel S, Becher M, Thuerey N. Latent Space Physics: Towards Learning the Temporal Evolution of Fluid Flow [J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2019, 38 (2): 71-82.
- [5] Chu M, Thuerey N. Data-driven Synthesis of Smoke Flows with CNN-Based Feature Descriptors[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2017, 36 (4): 69:1-69:14.
- [6] Kim B, Azevedo V C, Thuerey N, et al. Deep fluids: A Generative Network for Parameterized Fluid Simulations [J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2019, 38 (2): 59-70.
- [7] Zhu B, Lu W, Cong M, et al. A New Grid Structure for Domain Extension[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2013, 32(4): 63:1-63:12.
- [8] Da F, Hahn D, Batty C, et al. Surface-Only Liquids[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2016, 35(4): 78:1-78:12.
- [9] Liu H, Mitchell N, Aanjaneya M, et al. A Scalable Schur-Complement Fluids Solver for Heterogeneous Compute Platforms[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2016, 35(6): 201:1-201:12.
- [10] Chu J, Zafar N B, Yang X. A Schur Complement Preconditioner for Scalable Parallel Fluid Simulation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2017, 36(4): 139a:1-139a:11.
- [11] Oka Y, Oka H. Velocity and Temperature Attenuation of a Ceiling-jet Along a Horizontal Tunnel with a Flat Ceiling and Natural Ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology (S0886-7798), 2016, 56: 79-89.
- [12] Oka Y, Oka H, Imazeki O. Ceiling-Jet Thickness and Vertical Distribution along Flat-Ceilinged Horizontal Tunnel with Natural Ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology (S0886-7798), 2016, 53: 68-77.
- [13] Guo Q, Li Y Z, Ingason H, et al. Theoretical Studies on Buoyancy-Driven Ceiling Jets of Tunnel Fires with Natural Ventilation[J]. Fire Safety Journal (S0379-7112), 2021, 119: 103228.
- [14] GB/T31593.7-2015, 消防安全工程[S].
GB/T31593.7-2015, Fire Safety Engineering[S].