

5-15-2024

Research on Simulation Methods for Forest Fire Extinguishing Using Water Mist

Bing Xiang

Hulunbuir University, Hulunbuir 021008, China, xiangbing911@126.com

Xiaohong Dong

Hulunbuir University, Hulunbuir 021008, China

Yang Li

Hulunbuir University, Hulunbuir 021008, China, liyang@hlbec.edu.cn

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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Research on Simulation Methods for Forest Fire Extinguishing Using Water Mist

Abstract

Abstract: As a highly hazardous natural disaster, the occurrence and spread of forest fires are usually affected by a variety of complex factors such as climate, terrain, vegetation, combustible materials, etc., which makes it difficult to accurately simulate the spread and extinguishing process of forest fires. The spread of forest fires and the process of water mist fire extinguishing are physically modeled. The spread model adopts a tree module structure to simulate the pyrolysis reaction of tree burning, and considers the effects of temperature, wind field, mass loss rate and other factors on the spread of tree burning. In the fire extinguishing simulation experiment using water mist, the focus is on the water film formed by the water mist penetrating the flame area and the fire extinguishing effect caused by the evaporation of water, so as to prevent the spread of forest fires, successfully realizing the simulation platform for interactive fire extinguishing, which allows users to experience the process of spreading forest fires in an immersive way, and conducting water mist fire extinguishing simulation experiments with water guns, fire trunks and drones. The results of this research are of great significance for applications in the field of fire simulation.

Keywords

forest fires, water mist, physical model, tree pyrolysis, fire spread

Recommended Citation

Xiang Bing, Dong Xiaohong, Li Yang. Research on Simulation Methods for Forest Fire Extinguishing Using Water Mist[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(5): 1222-1231.

森林火灾中使用细水雾进行灭火仿真方法研究

向兵, 董晓红, 李洋*

(呼伦贝尔学院, 内蒙古 呼伦贝尔 021008)

摘要: 森林火灾作为一种极具危害性的自然灾害, 其发生和蔓延过程通常受到气候、地形、植被、可燃物等多种复杂因素的影响, 导致很难准确地对森林火灾的蔓延与灭火过程进行仿真。对森林火灾的蔓延和细水雾灭火过程进行物理建模, 蔓延模型采用树形模块结构来模拟树木燃烧的热解反应, 并考虑了温度、风场、质量损失率等因素对树木燃烧蔓延的影响。在使用细水雾进行灭火仿真实验时, 重点关注细水雾穿透火焰区域形成水膜以及水分蒸发导致的灭火作用, 从而阻止森林火灾的蔓延, 成功实现了交互灭火的仿真平台, 可以让用户沉浸式地体验森林火灾的蔓延过程, 并通过水枪、消防车和无人机进行细水雾灭火仿真实验。该研究成果对消防仿真领域方面的应用具有重要意义。

关键词: 森林火灾; 细水雾; 物理模型; 树热解; 火灾蔓延

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)05-1222-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-1267

引用格式: 向兵, 董晓红, 李洋. 森林火灾中使用细水雾进行灭火仿真方法研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(5): 1222-1231.

Reference format: Xiang Bing, Dong Xiaohong, Li Yang. Research on Simulation Methods for Forest Fire Extinguishing Using Water Mist[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(5): 1222-1231.

Research on Simulation Methods for Forest Fire Extinguishing Using Water Mist

Xiang Bing, Dong Xiaohong, Li Yang*

(Hulunbair University, Hulunbair 021008, China)

Abstract: As a highly hazardous natural disaster, the occurrence and spread of forest fires are usually affected by a variety of complex factors such as climate, terrain, vegetation, combustible materials, etc., which makes it difficult to accurately simulate the spread and extinguishing process of forest fires. *The spread of forest fires and the process of water mist fire extinguishing are physically modeled. The spread model adopts a tree module structure to simulate the pyrolysis reaction of tree burning, and considers the effects of temperature, wind field, mass loss rate and other factors on the spread of tree burning. In the fire extinguishing simulation experiment using water mist, the focus is on the water film formed by the water mist penetrating the flame area and the fire extinguishing effect caused by the evaporation of water, so as to prevent the spread of forest fires, successfully realizing the simulation platform for interactive fire extinguishing, which allows users to experience the process of spreading forest fires in an immersive way, and conducting water mist fire extinguishing simulation experiments with water guns, fire trucks and drones. The results of this research are of great significance for applications in the field of fire simulation.*

Keywords: forest fires; water mist; physical model; tree pyrolysis; fire spread

收稿日期: 2023-10-19 修回日期: 2023-12-04

基金项目: 呼伦贝尔学院科学研究计划(2021ZKYB05); 内蒙古自治区高等学校科学研究(ZSZX21106)

第一作者: 向兵(1987-), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为计算机图形学、虚拟仿真。E-mail: xiangbing911@126.com

通讯作者: 李洋(1982-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为系统仿真技术应用。E-mail: liyang@hlbec.edu.cn

0 引言

据统计全世界每年平均发生20万起森林火灾, 每年被森林大火烧毁的面积占世界森林总面积的1%以上^[1]。可以说森林火灾已成为最严重的自然灾害之一, 森林火灾不仅对生态环境造成了巨大的破坏, 而且还造成严重的生命伤害。为了更好地理解森林火灾蔓延燃烧行为并采取有效的灭火措施, 科研人员为此做了大量的研究工作。

目前对森林火灾的扑救仿真仍然是一个极具挑战性的复杂问题。大规模森林火灾的实时蔓延不仅要考虑不同尺度上复杂物理现象的组合, 还要考虑地形、风力、气候等各种环境因素对森林火灾蔓延的影响。除了森林火灾蔓延的可视化仿真之外, 目前细水雾灭火作用的研究多是基于实验的数值研究, 而将细水雾用于三维虚拟森林火灾的可视化灭火仿真研究还十分稀少^[2-4]。因此, 为了更直观逼真地实现森林火灾的蔓延以及使用细水雾进行消防灭火仿真, 本文在三维虚拟场景中实现了森林火灾的实时蔓延和细水雾灭火仿真的可视化。同时对森林火灾的蔓延机理以及燃烧火焰与细水雾的交互灭火过程进行了深入研究, 通过粒子系统构成的细水雾模拟水雾粒子与燃烧火焰在物理上合理地相互作用实现灭火仿真。在追求可视化结果的同时, 尽可能地减少复杂的计算过程, 从而保证森林火灾灭火行为的实时性和虚拟环境的沉浸体验。

1 相关工作

植物燃烧是森林火灾可视化的首要任务之一, 已有很多学者致力于物体燃烧的研究。文献[5]提出了一种燃烧物体分解的建模方法, 模拟物体在燃烧过程中的分解, 实现物体的几何结构和拓扑结构随时间而变化。文献[6]提出了一种在一般几何约束条件下模拟植物燃烧的方法, 这些方法虽然允许捕捉不同材料的热力学性质并改变其力学性质, 但是都不支持实时交互建模和热传导。文献[7]将树模型表示为具有分支结构的连接粒子和

燃烧的多边形表面网格, 提出了一种基于传热的植物模型燃烧方法, 但该方法主要侧重于单个树木模型的燃烧, 不适合大规模森林火灾中。

文献[8]提出森林火灾的蔓延模型之后, 研究人员分别基于物理、元胞自动机、水平集, 以及经验模型等各种不同的方法实现了森林火灾的蔓延^[9]。在森林火灾蔓延的三维可视化方面, 树木的表示多采用拉格朗日粒子^[10]、截锥体^[11]、草图^[12]等方法进行建模。与本文的工作最相近的是文献[11]的方法, 通过截锥体表示模块结构并将模块集合定义为有向图, 然后在分支级别模拟燃烧。本文的方法则更逼真地实现了树木燃烧的可视化效果, 通过利用优先队列来存储模块以便在树上有序地产生燃烧火焰, 然后将优先队列与具有相同模块结构的树木建立映射关系, 实现火焰绘制与火灾蔓延的解耦。

在森林火灾的灭火领域, 针对森林火灾的灭火主要采用以水灭火的技术实现, 细水雾作为一项有效的灭火方式, 已经被广泛应用于消防的各个领域, 但细水雾灭火的研究多数是基于实验的数值计算进而分析了细水雾的灭火作用。文献[13]对细水雾系统的灭火与灭火机理做了详细的阐述。文献[14]通过数值计算分析了细水雾扑灭池火的有效性, 得出细水雾的灭火作用主要取决于密闭空间的氧气消耗、燃料表面的水膜冷却作用(主要因素)和辐射衰减、动力学效应(次要因素)的影响。文献[4]通过对桦树、针叶树的燃烧实验分析了细水雾抑制森林燃料热解的物理原理, 确定了抑制森林燃料热解所需的水量以及细水雾对灭火时间的影响。文献[2]在电池火灾中对细水雾的灭火作用进行了相关研究。文献[3]通过细水雾扑灭油池火建立了细水雾与池火相互作用的灭火模型并对其效果进行了分析。上述内容为细水雾灭火的仿真研究提供了理论支持。

2 树木燃烧与灭火模型

2.1 树木表示

文献[7]将树枝离散化为三角形表面网格, 并

在三角形网格上进行大量的热解计算，不适用于森林火灾中大量植被燃烧的表示。文献[11]则把树木的分支使用截锥体的形式抽象为一个燃烧模块，大大减少了树木燃烧的计算量。根据其基于模块化燃烧的思想以及用于实时交互灭火的目的，本文把树木的树冠表示为若干半径为 r_i 的球形包络，主要包含树叶和细的树枝部分，而树干或较粗的树枝表示为半径为 r_j 和高度为 h_j 的圆柱形包络。为了使树木的燃烧展示出逼真的燃烧效果，树冠火焰的产生位置设置在模块的中心位置，树干的火焰位置根据最近的模块触发树干燃烧的位置确定火焰的初始位置。通过这种模块的表示方法也可以更高效地处理细水雾对树木燃烧火焰的影响，大幅减少树木燃烧及蔓延的计算量。

2.2 热解模型

树木的燃烧特性是植物的生物学特性、植物学特性及其理化性质的综合体现，树木的树叶、树枝、树干具有不同的可燃性、耐火性，树冠模块易燃、燃烧时间短、产生的火焰范围大，而树干耐火性强、燃烧时间长、火焰范围小。针对树木的燃烧模型除了需要考虑模块包络的几何结构外，关键还要考虑模块的质量、温度、风场对树木热解反应的作用。

2.2.1 质量损失率

树木模块的燃烧时长由模块内的燃料质量控制，模块质量为

$$M_m = \rho_m V_m \quad (1)$$

式中： ρ_m 为模块内所包含树木枝叶可燃物的密度； V_m 为模块的体积。

树木的燃烧是由于木质材料达到一定的温度之后开始热解，并分解成可燃气体和碳。热解过程中对单个模块的质量损失率 dM/dt 可描述为

$$\frac{dM}{dt} + k(T)cA_m = 0 \quad (2)$$

式中： c 为无量纲碳化系数； A_m 为模块热解区域的面积。

单位面积的燃烧反应速率充分描述了温度对木

材未点燃和点燃状态的质量损失速率。反应速率为

$$k(T) = \eta \begin{cases} 0, T < T_0 \\ S\left(\frac{T - T_0}{T_1 - T_0}\right), T_0 \leq T \leq T_1 \\ 1, T > T_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： S 为在0~1之间实现平滑插值的S型函数；温度 T 介于 $T_0=150^\circ\text{C}$ 和 $T_1=600^\circ\text{C}$ 之间； η 为应用常数，主要考虑风速对燃烧反应速率的影响， η 描述为

$$\eta(\mathbf{u}) = (\eta_{\max} - 1)S\left(\frac{\mathbf{u}}{\mathbf{u}_{\text{ref}}}\right) + 1 \quad (4)$$

式中： $\eta = 1$ 为没有风的影响， $\eta = \eta_{\max} \geq 1$ 为 \mathbf{u}_{ref} 最大可以达到的风速， $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ 为风在 t 时刻及空间位置 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ 处的速度场。

2.2.2 热传递

树木燃烧主要由温度的升高引起模块的热解反应产生燃烧现象，模块的温度变化主要由模块之间的直接热传递、空气与模块的双向热传递决定，模块表面温度 $T_m(\mathbf{x}, t)$ 的变化可以描述为

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \alpha_m \nabla^2 T_m + b(T - T_m) \quad (5)$$

式中： α_m 为相邻模块之间的热扩散系数； b 为空气与模块之间的热传导系数； T 为在 t 时刻与空间位置 \mathbf{x} 处的空气温度。

根据文献[15]将空气流体沿着风的轨迹运动时，空气温度的变化可以由强度为 α 的扩散分量和辐射冷却项 γ 来描述，另外模块到空气中的热传递会通过热解过程中释放的气体将热量添加到空气中，从而改变空气的温度，这可以通过调整质量损失率的比例 τ 来实现。在风的作用下，空气温度变化的热传递模型为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T - \gamma(T - T_{\text{amb}})^4 - \tau \frac{dM}{dt} \quad (6)$$

式中： T_{amb} 为森林场景中固定的环境温度。

如果在树木表面有水的冷却作用时还会发生模块表面与水之间的热传递使模块表面的温度降低，在模块表面上单位面积水的热通量可近似为

$$\dot{q}'' = \bar{c}(T_m - T_{\text{sat}})^3 \quad (7)$$

式中： $\bar{c}=0.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ；相应的水饱和温度 $T_{\text{sat}}=373 \text{ K}$ 。

根据温度与能量变化的热量公式, 当模块的质量为 M_m 时, 该模块在水的作用下模块释放的能量为 $U_m = C_{pm} M_m \Delta T_m$, 其中木材的热容量 $C_{pm} \approx 2.5 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, ΔT_m 为模块改变的温度。在给定能量变化的情况下, 模块表面温度的变化率为

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{dU_m}{dt} \frac{1}{C_{pm} M_m} \quad (8)$$

模块释放的能量是通过模块表面区域 A_m 的热传递发生的, 根据式(7)可以得出模块表面的能量变化率为

$$\frac{dU_m}{dt} = \dot{q}'' A_m = \bar{c} A_m (T_m - T_{sat})^3 \quad (9)$$

模块在有水作用的情况下, 模块表面温度的变化在式(5)的基础上减去水吸收热量导致模块温度的改变, 可得

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \alpha_m \nabla^2 T_m + b(T - T_m) - \frac{\bar{c} A_m (T_m - T_{sat})^3}{C_{pm} M_m} \quad (10)$$

2.3 细水雾灭火模型

细水雾主要通过3种机制抑制火灾: 吸热冷却、氧置换、热辐射衰减^[2,16]。由于森林火灾环境属于开放环境, 不考虑氧置换情况, 而热辐射衰减的作用对森林火灾的影响也可以忽略不计^[17]。本文主要考虑水雾的蒸发吸热作用以及细水雾液滴覆盖树木表面形成水膜而导致的表面冷却作用, 灭火过程必须确保足够的细水雾通量才能实现灭火。文献[3,18]使用细水雾进行油池灭火, 并建立了相应的能量守恒方程。在本文的研究框架中将该能量方程进行修改, 不再考虑燃料汽化损失的热量, 并且结合树木的模块化结构, 得到了新的公式:

$$K(T_m) A_m \Delta H_c = \mu \dot{m}_w (L_{vw} + C_{pwl} (T_{sat} - T_{water}) + C_{pww} (T_f - T_{sat})) + K(T_m) A_m (C_{pm} (T_f - T_m) + \varphi C_{pa} (T_f - T)) \quad (11)$$

式中: ΔH_c 为模块的有效燃烧热(kJ/mol); $L_{vw} = 2260 \text{ kJ/kg}$ 为水汽化潜热; $C_{pwl} = 4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 为水的热容量; T_{water} 为细水雾的温度; $C_{pww} = 2.1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 为水蒸发的热容量; φ 为模块已在空气中燃烧的比例; $C_{pa} = 1.15 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 为空气的热

容量; T_f 为树木燃烧火焰的温度, 根据森林消防的经验得知树木燃烧火焰的边焰温度通常在 $1300 \sim 1600 \text{ K}$ 之间, 因此, T_f 大约取 1600 K ; \dot{m}_w 为细水雾开始灭火时细水雾的总质量, 其中质量为 $\mu \dot{m}_w$ 的水雾颗粒穿过火焰区域时吸收热量并蒸发, 剩余的 $\lambda(1-\mu)\dot{m}_w$ 到达燃料的表面形成水膜从而实现燃料的降温, λ 为水雾落到树木枝叶表面的比例, 其余部分落到地上不进行计算。

在细水雾穿越火焰区域蒸发的过程中, 树木燃烧的能量用于细水雾的蒸发、火焰与树木之间的热传递过程和加热火焰周围的空气。在细水雾的作用下当水雾将反应区冷却至低于极限绝热火焰温度时, 火焰可能会熄灭, 从而导致燃料-空气混合物的燃烧反应终止。由于燃料表面冷却而不足以支撑火焰燃烧, 因此, 燃料表面的能量转移过程为

$$E = (f_c \Delta H_c) K(T_m) A_m - \dot{Q}_L \quad (12)$$

式中: f_c 为燃烧过程中从火焰传递到燃料表面的最大比例。 \dot{Q}_L 为燃烧过程中的热损失量。根据热平衡定律(燃烧维持理论), 当 $E > 0$ 时, 有足够的热量可用于维持燃料表面上的火焰并继续燃烧。然而, 当 $E < 0$ 时, 热量将不足以使燃料热解来支撑火焰, 导致火焰熄灭。

$$\dot{Q}_L = \varepsilon \sigma T_m^4 + \lambda(1-\mu)\dot{m}_w (C_{pwl} (T_m - T_{sat}) + L_{vw}) \quad (13)$$

式中: ε 为辐射系数。损失的能量主要包括辐射到空间的能量、水膜吸热的能量与模块表面水雾汽化的能量3个部分。辐射损失的能量根据 Stefan-Boltzmann 定律计算, Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 。水雾到达燃料表面时, 很难确定水滴的温度, 也无法获得水滴蒸发和吸热引起热损失的准确值, 因此, 忽略了这部分损失的能量, 直接用水饱和温度 T_{sat} 代替水滴到达表面的温度。因此, 式(12)可以重写为

$$E = (f_c \Delta H_c) K(T_m) A_m - \varepsilon \sigma T_m^4 - \lambda(1-\mu)\dot{m}_w (C_{pwl} (T_m - T_{sat}) + L_{vw}) \quad (14)$$

如果水雾可以冷却火焰或者将燃料冷却到着火点以下, 则所需的临界水雾通量 \dot{m}_w 可由式(15)

和式(16)估算获得。

$$\mu \dot{m}_w = \frac{K(T_m)A_m(\Delta H_c - C_{pm}(1600 - T_m)) - L_{vw} + C_{pwl}(373 - T_{water})}{\varphi C_{pa}(1600 - T)} \leftarrow \frac{\varphi C_{pa}(1600 - T)}{C_{pww}(1600 - 373)} \quad (15)$$

$$\lambda(1 - \mu)\dot{m}_w = \frac{(f_c \Delta H_c)K(T_m)A_m - \varepsilon \sigma T_m^4}{(C_{pwl}(T_m - 373) + L_{vw})} \quad (16)$$

3 森林火灾灭火算法实现

3.1 森林场景可视化

可视化系统中森林场景主要添加了落叶松、樟子松两种针叶树模型，如图1所示。系统把森林的渲染和驱动森林火灾的树木模块作为两个独立的部分进行，便于使用 GPU Instance 批量渲染具有相同网格和材质的树^[19]以提高系统的绘制效率。



(a) 落叶松 (b) 樟子松

图1 树模型库

Fig. 1 Tree model library

3.2 森林火灾蔓延

在火灾蔓延之前，首先，计算不同树木类型的模块结构，模块结构包含绝大部分的树木分支，将模块结构与相同类型的树木建立映射关系实现森林的渲染与模块的驱动作用分离。然后，根据文献[20]提出的 Loose Quadtree 存储树木的分布数据，创建新的线程获取着火点附近半径小于 R 的树木，并添加到预燃烧队列中，使用前向有限差

分法计算树木的热解模型以更新模块的质量损失率和温度的变化，实时检测模块的温度是否达到着火点温度的阈值 T_{burn} ，如果大于 T_{burn} 就在该模块指定位置绘制燃烧的火焰。最后，利用燃烧状态的模块与其他模块之间相互热传递的作用实现火灾的蔓延，完全燃烧的树从燃烧队列移除并销毁相关资源，树木燃烧蔓延的算法如算法1所述。

算法1 树木燃烧蔓延

输入：树木 T_1, T_2, \dots, T_h ，模块结构 M_1, M_2, \dots, M_n ，温度阈值 T_{burn}

输出：可视化火焰 $fire_1, fire_2, \dots, fire_n$

初始化预燃烧队列(Q_p)与燃烧队列(Q_c)

计算点火点附近半径 $< R$ 范围内的树木 T_k ，并将其添加到预燃烧队列中

for $i = 1, 2, \dots, Q_p.length$ do

for $j = 1, 2, \dots, n$ do

根据式(6)更新温度 T

根据式(2)(5)更新模块 M_j 的质量和温度

if $M_j.temperature > T_{burn}$ then

在模块 M_j 上生成火焰，并将树 T_i 从 Q_p 中移除并添加到 Q_c 里

end if

if $M_j.mass = 0$ then

销毁火焰及相关资源

end if

end for

end for

3.3 细水雾灭火

使用细水雾扑灭森林火灾中燃烧的树木时通过其模块结构捕获细水雾的水量及连续作用时间，根据细水雾的吸热作用决定模块的燃烧。而在实际的灭火情景中无法获得水滴蒸发和吸热引起的热损失的准确值，即比例系数 μ 和 λ 无法得到一个准确值，因此，本文通过估计获得高于实际值的临界雾通量。由于较短时间、少量的细水雾作用对火灾的扑灭作用有限，反而还会对树木的燃烧

起到助燃作用, 所以要求在模块上的连续作用时间要大于临界雾通量所需要的时间, 水量也要高于临界雾通量, 而且只计算细水雾触碰到树木的主要模块。算法2描述了细水雾的灭火作用。

算法2 细水雾交互灭火

输入: 燃烧的树木队列, 细水雾

输出: 熄灭火焰的树木

计算 Q_c 中被细水雾碰撞的模块

for $i = 1, 2, \dots, k$ do

 根据式(10)更新模块 M_i 的温度

 根据式(11)(14)计算模块的能量 E

 根据式(15)(16)计算细水雾流量的临界值 V

 if $E > 0$ then

 减小火焰的大小

 else if $m_w \cdot \text{time} > V \cdot \text{time}$ and $\dot{m}_w > V$

 销毁火焰

 end if

end for

4 实验结果

本文实验环境为 Windows 11, Intel® Core™ I9-12900 K CPU @ 3.2 GHz, 32 GB 内存, NVIDIA Geforce RTX 3090 的台式电脑。脚本主要为 C# 语言和 HLSL, 采用 Unity2021 的高清渲染管线进行渲染。

在森林火灾的蔓延实验过程中, 主要考虑了风场和森林覆盖率这两个主要因素对火灾蔓延的影响。在使用细水雾进行灭火仿真时主要计算了细水雾粒子系统与树木模块结构的碰撞检测, 粒子系统与模块外部火焰之间未进行碰撞检测。通过本文的可视化框架对不同类型的森林火灾蔓延以及细水雾灭火进行了可视化仿真实验。

4.1 树木燃烧与蔓延

本文使用树木的模块化结构来实现三维火灾蔓延的仿真, 三维的火灾蔓延不仅能直观地展示火灾而且更容易进行实时交互。图2描述了火焰在水平方向和垂直方向上蔓延的可视化实验, 图2

(b)表示点燃只有1个模块的小树使具有15个模块的树木发生燃烧。在无风的状态下, 首先会使靠近小树部分的模块燃烧, 如图2(c)所示。然后大树从下往上逐步蔓延燃烧, 为解决燃烧导致的树叶减少的问题, 本文使用 Alpha Culling 技术^[21]动态调整 Alpha 参数来剔除树叶, 其可视化效果如图2(d)(e)所示; 最终完全燃烧之后形成如图2(f)所示的烧焦树, 其炭化层表面使用多重纹理技术^[22]解决炭化变黑的问题。

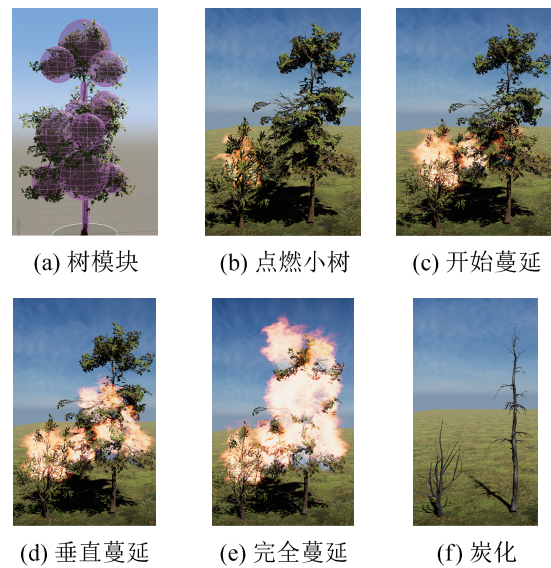


图2 树木燃烧蔓延

Fig. 2 Tree burning and spreading

4.2 风场和森林覆盖率对火灾蔓延的影响

风场与森林覆盖率为影响森林火灾蔓延的主要因素, 在针叶林环境中测试了风场在不同森林覆盖率的环境下对森林火灾蔓延的影响, 如图3~4所示。图3展示了在不同风速和森林覆盖率情况下火灾蔓延结束时的效果图, 图4是对图3中森林火灾蔓延过程中燃烧树木比例的统计图。

由图3~4可以看出当森林覆盖率低时不论风场强度大小, 森林火灾的蔓延范围只能达到10%左右; 森林覆盖率达到50%以上时, 风场对火灾的蔓延范围和蔓延速度都具有明显的促进作用; 随着风速的增加, 火灾的蔓延就越快, 而且不管风速多大, 火灾蔓延的覆盖率都达到了80%以上。

<http://www.china-simulation.com>

• 1227 •

由图 4(b)(c)可以看出, 当风速相同时, 森林覆盖率越高, 火灾蔓延的就越快, 而且燃烧树木的比例也越高。

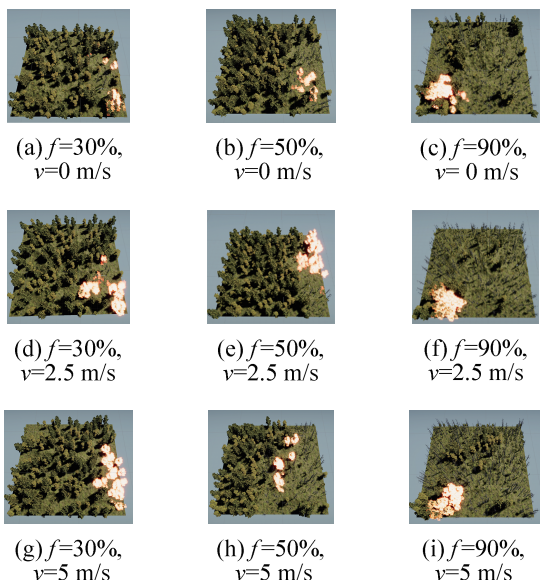


图 3 森林火灾在不同风速和森林覆盖范围内的蔓延
Fig. 3 Spread of forest fires in different wind speeds and forest coverage areas

4.3 交互式灭火仿真

图 5 展示了树木开始燃烧之后不同时刻使用细水雾进行灭火的实验过程, 基于模块结构的火焰在受到细水雾的作用之后会逐渐变小, 并根据式(12)计算 $E < 0$ 时使火焰熄灭, 图 5(c)中部分模块的火焰展示了火焰变小的可视化效果。表 1 记录了使用细水雾进行灭火时的统计数据, 结果表明模块在开始燃烧之后, 树木周围空气的温度会逐渐上升直到所有的模块全部燃烧起来, 在细水雾的作用下随着火

焰的逐渐熄灭, 空气的温度也渐渐降低。

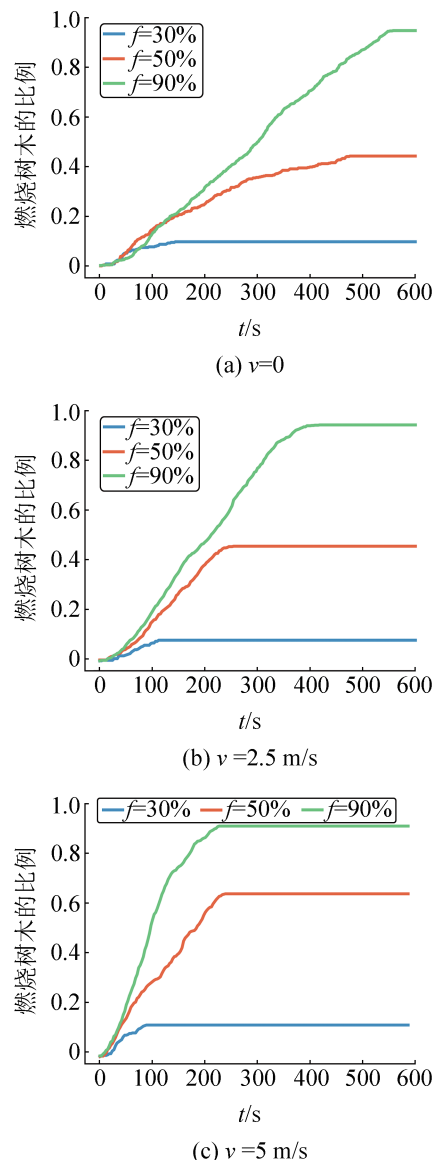


图 4 不同风速和森林覆盖率的森林燃烧树木比率的时间演变
Fig. 4 Temporal evolution of tree burning rates in forests with different wind speeds and forest cover

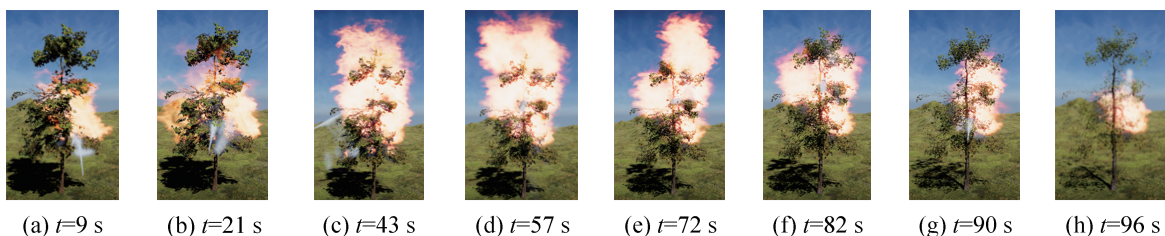


图 5 细水雾灭火效果
Fig. 5 Fire extinguishing effect of water mist

表1 细水雾灭火统计数据

Table 1 Statistical data of fire extinguishing by water mist

图序号	t/s	$\frac{dm}{dt}$	$T/^\circ\text{C}$	n	n_{mist}
图5(a)	9	0.221	176.532	1	0
图5(b)	21	0.356	282.125	3	1
图5(c)	43	0.653	476.354	8	3
图5(d)	57	0.865	582.023	11	1
图5(e)	72	0.752	517.631	9	2
图5(f)	82	0.636	406.376	8	1
图5(g)	90	0.454	287.525	6	2
图5(h)	96	0.136	163.376	3	3

注: n 为火焰实例的数量; n_{mist} 为水雾熄灭的火焰实例的数量。

根据文献[4]对细水雾抑制燃料热解的研究, 假定细水雾穿过火焰区域进行有效灭火的比例 $\mu=0.15$, 通过式(15)(16)可以计算出每个模块灭火所需要的细水雾流量, 图6选择了3种半径不同的模块进行灭火实验, 并实时记录了直到模块完全熄灭所用细水雾的流量, 可以看出, 燃烧模块的半径越大则所需要的水雾流量越多, 随着水雾的增多, 水膜吸热的重要性就更加突出。

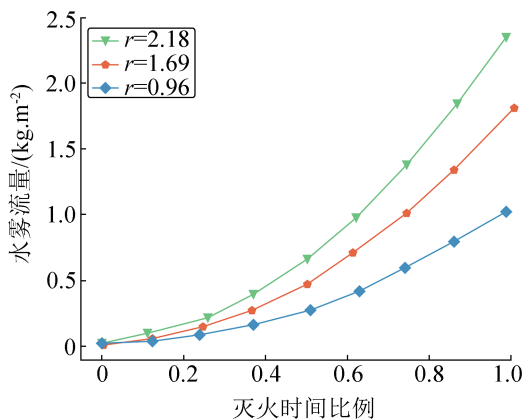


图6 不同尺寸模块灭火所需的细水雾流量

Fig. 6 Required water mist flux for extinguishing modules of different sizes

根据上述细水雾的灭火作用, 本文使用细水雾水枪、消防车和无人机进行了灭火仿真实验, 灭火效果如图7(a)~(c)所示。图7(a)展示了在森林火灾蔓延时使用细水雾水枪进行灭火; 图7(b)中可以看出中间燃烧的树木被消防车水雾扑灭了火

焰; 图7(c)展示了无人机的灭火仿真实验, 从图中可以看出在已经蔓延的火灾中, 通过控制无人机喷洒细水雾有效地熄灭了树上的火焰。另外需要注意的是在进行细水雾灭火仿真实验时, 已被细水雾熄灭的模块除了火焰会被销毁之外, 对应模块结构的碰撞体也会被移除, 主要是为了避免已灭火的模块阻挡细水雾熄灭其他模块, 以提高用户交互灭火的效率。

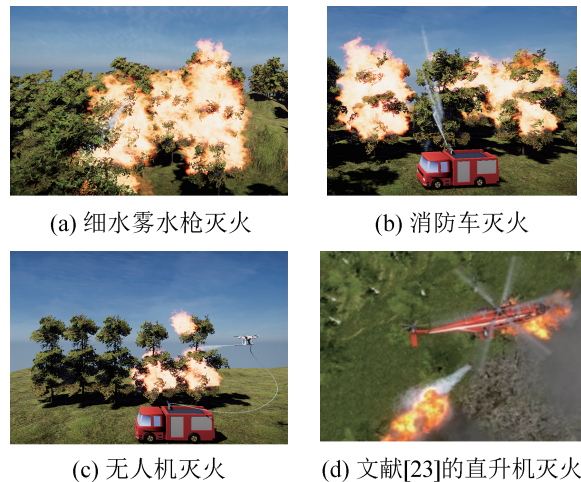


图7 森林火灾的灭火效果

Fig. 7 Fire extinguishing effect diagram of forest fires

表2中列举了3种灭火工具在可视化框架中进行森林火灾交互灭火的性能测试结果。灭火树木表示蔓延过程中熄灭燃烧树木的数量, 从表中数据可以看出3种灭火方式中细水雾水枪的灭火效率更高一些, 说明其交互性更好。主要是由于细水雾水枪的交互只需要使用鼠标即可拖拽水枪, 而另外2种灭火工具则需要额外控制车辆和无人机的移动, 所以导致灭火的效率受到限制。3种灭火工具在进行灭火时系统框架的帧率都在70帧/s以上, 说明系统能非常流畅的进行交互灭火。

表2 细水雾交互灭火的性能测试

Table 2 Performance testing of water mist interactive fire extinguishing

灭火方式	灭火树木	平均灭火时间/(s/棵)	帧率/(帧/s)
细水雾水枪	11	19	75.9
消防车	9	25	72.3
无人机	8	32	74.5

相比使用直升机进行灭火方面的研究文献[23] (如图7(d)所示), 本研究更加注重森林火灾灭火的可视化效果以及更灵活多样的灭火手段, 从而提高了用户在虚拟环境中的沉浸体验。

5 结论

本文介绍了一种使用细水雾进行森林火灾灭火仿真的可视化框架, 该框架可以在物理上对森林火灾的蔓延过程以及细水雾灭火过程进行仿真建模。使用模块结构作为树木模型的几何表示, 能够探索不同植被类型组成的生态系统中野火的蔓延以及阻止火灾蔓延的方法。本文方法能够真实地捕捉森林火灾中森林覆盖率和风场对火灾蔓延的影响, 但尚未考虑地表矮小植被和落叶对森林火灾蔓延的影响。

对于细水雾的灭火仿真, 由于有效灭火的标准非常多(如火势蔓延率、火源大小变化、放热、火焰高度等), 在目前的细水雾灭火仿真中只考虑了水雾冷却的灭火作用。未来的工作可以考虑更多的灭火因素, 以提高灭火仿真的准确性和实用性。此外, 随着无人装备在森林火灾中的广泛应用, 探索利用深度学习使无人机和无人消防车能够进行自主灭火, 以及无人机集群的灭火仿真, 将是未来研究的重要方向。

参考文献:

- [1] Wu Zechuan, Wang Bin, Li Mingze, et al. Simulation of Forest Fire Spread Based on Artificial Intelligence[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108653.
- [2] Cui Yan, Liu Jianghong. Research Progress of Water Mist Fire Extinguishing Technology and Its Application in Battery Fires[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 149: 559-574.
- [3] Liu Yang, Fu Zhixi, Zheng Guanghui, et al. Study on the Effect of Mist Flux on Water Mist Fire Extinguishing[J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 130: 103601.
- [4] Zhdanova A O, Volkov R S, Voytkov I S, et al. Suppression of Forest Fuel Thermolysis by Water Mist [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126, Part A: 703-714.
- [5] Melek Z, Keyser J. Multi-representation Interaction for Physically Based Modeling[C]//Proceedings of the Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2005: 187-196.
- [6] Hong Yi, Zhu Dengming, Qiu Xianjie, et al. Geometry-based Control of Fire Simulation[J]. *The Visual Computer*, 2010, 26(9): 1217-1228.
- [7] Sören Pirk, Michał Jarząbek, Torsten Hädrich, et al. Interactive Wood Combustion for Botanical Tree Models [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 197.
- [8] Fons W L. Analysis of Fire Spread in Light Forest Fuels [J]. *Journal of Agricultural Research*, 1946, 72(3): 92-121.
- [9] Grasso P, Innocente M S. Physics-based Model of Wildfire Propagation Towards Faster-than-real-time Simulations[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2020, 80(5): 790-808.
- [10] Mendoza H, Brown A, Ricks A J. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2019.
- [11] Torsten Hädrich, Banuti D T, Wojtek Pałubicki, et al. Fire in Paradise: Mesoscale Simulation of Wildfires[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2021, 40(4): 163.
- [12] Longay S, Runions A, Boudon F, et al. TreeSketch: Interactive Procedural Modeling of Trees on a Tablet[C]//Proceedings of the International Symposium on Sketch-based Interfaces and Modeling. Goslar, DEU: Eurographics Association, 2012: 107-120.
- [13] Mawhinney J R, Back G G III. Water Mist Fire Suppression Systems[M]//Hurley M J, Gottuk D, Hall J R, et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. New York, NY: Springer New York, 2016: 1587-1645.
- [14] Ankit Dasgotra, Rangarajan G, Tauseef S M. CFD-based Study and Analysis on the Effectiveness of Water Mist in Interacting Pool Fire Suppression[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 152: 614-629.
- [15] Nguyen D Q, Fedkiw R, Jensen H W. Physically Based Modeling and Animation of Fire[C]//Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2002: 721-728.
- [16] Van P Carey. Liquid-vapor Phase-change Phenomena: An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment[M]. London: Taylor and Francis Ltd, 1992.
- [17] Finney M A, Cohen J D, Forthofer J M, et al. Role of Buoyant Flame Dynamics in Wildfire Spread[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(32): 9833-9838.
- [18] Liu Zhigang, Kim A K, Carpenter D. A Study of Portable Water Mist Fire Extinguishers Used for Extinguishment of Multiple Fire Types[J]. *Fire Safety Journal*, 2007, 42

<http://www.china-simulation.com>

- (1): 25-42.
- [19] Yvens Rebouças Serpa, Maria Andréia Formico Rodrigues. A Draw Call-oriented Approach for Visibility of Static and Dynamic Scenes with Large Number of Triangles[J]. *The Visual Computer*, 2019, 35(4): 549-563.
- [20] You Jiawei, Huai Yongjian, Nie Xiaoying, et al. Real-time 3D Visualization of Forest Fire Spread Based on Tree Morphology and Finite State Machine[J]. *Computers & Graphics*, 2022, 103: 109-120.
- [21] Jon Hasselgren, Thomas Akenine-Möller. PCU: The Programmable Culling Unit[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 92-es.
- [22] Spitzer J. Programmable Texture Blending[EB/OL]. [2023-05-10]. <https://developer.download.nvidia.cn/assets/gamedev/docs/ProgrammableTextureBlending.pdf>.
- [23] Han Yangnanbing, Liu Hu, Tian Yongliang, et al. Virtual Reality Oriented Modeling and Simulation of Water-dropping from Helicopter[C]//*Proceedings of the Proceedings of the 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018: 24-29.