

复杂高层建筑火灾中人员疏散行为建模与智能引导路径优化

王尔新

230103*****2815

摘要: 高层建筑火灾疏散涉及人员行为、火势蔓延与建筑结构三者的动态耦合,传统静态疏散预案难以应对火场的不确定性。本文系统梳理了疏散行为建模与智能路径优化的研究进展,分析了从网络模型到多智能体仿真的行为建模技术演进,以及从静态路径规划向动态自适应优化的算法变革。研究发现,疏散行为呈现出显著的非理性特征与社会交互效应,而火势的动态蔓延则要求路径规划具备实时预测与自适应能力。本文提出行为建模与路径优化的耦合框架,即在数字孪生环境中实现疏散智能体学习—决策—适应的闭环,并探讨了电梯疏散、智慧标识等新型引导策略的协同机制。研究表明,深度强化学习与人工势场相结合的方法能够在多出口场景中实现出口自适应选择,同时保持与火源的安全距离。未来研究需进一步融合火灾动力学预测与个体差异化行为模型,构建人—机—环深度耦合的智能疏散系统。

关键词: 高层建筑火灾; 疏散行为建模; 路径优化; 深度强化学习; 数字孪生

DOI: 10.69979/3029-2727.26.04.022

引言

随着城市化加速,高层建筑规模扩张、功能复合,火灾安全风险攀升。高层建筑火灾垂直距离长、路径复杂、火势蔓延快、人员密集,缺乏有效疏散引导会降低效率、引发次生灾害。高楼火灾安全高效疏散是建筑与公共安全核心议题。

传统建筑消防疏散遵循预设静态预案,引导人员按固定路线向最近出口撤离。但实际火灾中,预设路线未必安全,火势和烟气会使通道危险,这暴露了静态方案无法适应火场动态变化及个体、群体行为多样的缺陷。

近年来,物联网、数字孪生和人工智能技术为解决这一问题提供新思路。构建与实体同步更新的虚拟模型,将建筑、消防、传感、人流数据映射到云端,可秒级完成疏散路径动态规划。深度学习能短期预测火场状态,使路径规划从“响应式”变为“预见式”。重庆“灵基智城”大模型实践显示,基于数字孪生的智能疏散系统能精准推送着火层逃生通道^[1]。

然而,技术提升未消除问题复杂性。疏散引导系统关键在于路径能否被疏散者接受执行,这要求深入理解火灾中人的行为规律,如个体决策、群体拥堵、信息感知响应等。智能疏散系统有效性取决于对人类行为规律的建模保真度。

1 高层建筑火灾中人员疏散行为建模

1.1 疏散行为的复杂性及其建模挑战

火灾时人员疏散行为非理性,有显著社会交互效应。个体感知火灾信号后有“预动作时间”,在不同人群差异大,受建筑警报等多因素影响。运动阶段个体路径选择遵循启发式规则,群体层面会有出口失衡等涌现现象。

行为建模挑战是将复杂现象转为可计算表达,需在个体异质性、社会交互与环境约束间平衡,要识别关键行为变量并数学表征。

1.2 从网络模型到多智能体仿真的演进

疏散行为模型从宏观集总到微观个体、从运动学主导向行为规则驱动转变。早期 EXIT89 采用网络模型,能处理大规模疏散,可与火灾模拟工具集成,引入基于密度的速度计算函数,但行为模拟较简化^[2]。

随着计算能力提升,多智能体建模成主流。BuildingEXODUS 等软件可模拟个体运动轨迹,考虑环境因素影响,能评估建筑结构等对疏散时间的影响。

近年来,数据驱动方法为行为建模注入活力,NIST 团队用霍克斯点过程对疏散演习数据建模,为量化人际交互对疏散流率的影响提供新工具。

1.3 行为模型对疏散效率的影响机制

行为模型差异显著影响疏散效率评估。分层疏散自由疏散总时间减少 9.7%,提示引导策略要考虑人员响应行为。夜间疏散比白天耗时增加 29.4%,说明照明与环境熟悉度影响大。带连廊建筑疏散时间比常规建筑缩短 25.0% - 37.8%,体现建筑结构对行为模式的塑造作

用。

这些发现启示智能引导系统设计：路径优化要考虑不同人群行为特征，引导信息呈现方式影响人员遵从行为，将行为模型嵌入优化框架是提升引导系统实用性的关键。

2 智能引导路径优化方法

2.1 静态路径规划及其局限

传统的疏散路径规划方法主要包括 Dijkstra 算法、A*算法及其变体。这些方法将建筑空间抽象为网络图，为每条边赋予通行成本（如距离、时间），然后计算从起点到出口的最短路径。在实际应用中，通常通过移除代表火源或危险区域的节点来考虑火的影响。部分研究采用蚁群算法等启发式方法，在考虑火势干扰的情况下搜索最短路径。

然而，这类静态或准静态方法存在根本性局限：其一，危险区域的确定基于当前时刻的火警信息，而非对未来火势蔓延的预测，因此规划的路径可能在数分钟后失效；其二，大多数方法预设单一出口为目标，无法根据火势发展自适应地切换出口；其三，静态规划无法响应疏散过程中人流分布的变化，可能导致引导路径与实际拥堵状况脱节^[3]。

2.2 动态路径规划与实时自适应算法

针对上述局限，研究者发展了多种动态路径规划方法。D*Lite 等增量式重规划算法可在环境变化时高效更新路径，已应用于数字孪生消防系统中的宏观路径规划层。实时火灾应急疏散路径选择模型采用 SARSA 强化学习算法，引入“出口雷达”与“火源雷达”机制，能够针对任意位置的疏散人员快速决策安全路线，初始路径规划的收敛时间在 0.05 至 4.5 秒之间。

深度强化学习方法的引入标志着路径优化技术的范式跃迁。中国石油大学（北京）团队提出的 APF-DQN 算法将人工势场(APF)与深度 Q 网络(DQN)相融合，解决了传统 DQN 在动态火灾环境中马尔可夫假设失效的问题。该算法的核心创新在于：吸引力场引导智能体朝向出口，排斥力场使其远离火源，二者共同构造奖励函数，驱动智能体在多出口环境中自适应选择目标。实验结果表明，APF-DQN 相较传统 A*、APF 和 DQN 方法，疏散时间成本降低 18.7%，与火源的安全距离增加 20.1%。

这一方法的本质优势在于将路径规划从“一次计算、固定执行”转变为“持续感知、动态适应”。疏散智能体不再是执行预设指令的被动对象，而是能够在与环境的交互中不断更新策略的主动决策者。当火势蔓延使某一出口变得危险时，智能体能够感知排斥力场的增强，转而选择次近但更安全的出口——这种自适应目标选择能力是传统方法难以实现的。

2.3 基于深度学习的火场态势预测

动态路径规划的前提是对火场态势的实时感知与短期预测。现有研究大多假设危险区域范围可根据火警位置预先设定，但这种做法忽略了火势蔓延的时间维度和空间异质性。高层建筑火灾中，烟气可在数十秒内充满整个走廊，温度场和有毒气体浓度的分布极不均匀，仅在探测器位置监测到报警时，人员高度可能早已达到危险阈值。

香港城市大学（中国香港地区）团队提出的基于深度学习的危险区域预测方法突破了这一限制。该方法采用双向门控循环单元编码器—解码器(BiGRU-ED)架构，建立现场温度时序观测与火灾特征未来状态之间的预测映射。模型输出包括温度、一氧化碳浓度和能见度等关键安全指标，能够提前识别即将变得危险的区域^[4]。案例研究表明，该预测方法可为动态方向指示牌(DDES)的控制提供前瞻性信息，使疏散路径规划从响应式升级为预见式。

将火势预测与路径优化相融合，构成了智能引导系统的完整技术闭环：实时传感数据驱动火灾动力学模型更新，预测未来火场状态；路径规划算法在预测的火场时空演化图上计算安全路径；引导指令通过智能标识、移动终端或 AR 设备传递给疏散人员；人员行为和环境状态的变化又通过传感器网络反馈至系统，触发新一轮优化。

3 行为模型与路径优化的耦合机制

3.1 分层路径规划架构中的行为嵌入

数字孪生消防系统的发展为行为模型与路径优化的耦合提供了技术平台。典型的分层路径规划架构包含宏观、中观、微观三个层次：宏观层以整栋建筑为节点，采用改进 DLite 算法在 30 秒内生成着火层到安全出口的初始全局路线；中观层将楼梯间、前室、避难层细化为子节点，结合实时人流密度执行 A 重算，保证通道容

量不超载；微观层在每个楼梯段内基于多智能体仿真对个体逃生行为进行毫秒级轨迹优化，防止逆流与踩踏。

在这一架构中，行为模型嵌入于微观层和中观层之间的反馈回路。微观层多智能体仿真输出的密度与流速信息，向上传递至中观层作为路径重算的约束条件；中观层规划的路径分配，又向下影响微观智能体的出口选择和运动轨迹。三层结果通过数字孪生的时间同步机制闭环反馈，当任意一层约束条件变化时，上下两层自动迭代，确保路径始终全局最优。

3.2 电梯疏散与混合模式引导

传统高层建筑疏散策略几乎完全依赖楼梯，但随着建筑高度增加和人口老龄化，单纯依靠楼梯的局限性日益凸显。行动障碍者（包括老年人、残疾人、临时受伤者）在楼梯间的运动速度极慢，不仅自身暴露于火场风险的时间延长，还会阻滞后方人群，造成严重拥堵。

利用普通客梯进行疏散的设想正逐步获得认可。研究表明，对于着火层及其邻近楼层，采用所有服务于该层的电梯进行疏散，可使电梯到达间隔缩短至30—45秒，有助于缓解等待焦虑，促使人员有序进入电梯或停留在楼层。对于混合用途高层建筑（如商业、办公、酒店复合体），通常规划有穿梭电梯与转换层，这些空间可用作临时休息区或电梯—楼梯换乘点。但需注意的是，穿梭电梯的最大运输能力往往小于服务上部楼层的区划电梯，可能导致人员在转换层过度聚集，需提前规划增能措施并配置引导人员^[5]。

电梯疏散的引入使引导策略变得更加复杂。在智能引导系统中，需根据火源位置、人员分布、电梯可用状态动态决策：哪类人员应使用电梯，哪类应使用楼梯，哪些楼层应原地待援。这一决策问题可建模为随机动态规划，目标是在火场演化不确定性的条件下最小化期望伤亡风险。求解这一问题需要融合人员行为模型（如对电梯的信任度、在电梯厅的排队行为、换乘决策规则）与电梯系统动力学模型。

3.3 智能引导与人机交互

引导信息的呈现方式直接影响人员的遵从行为。研究表明，动态方向指示牌(DDIS)相比传统静态标识具有显著优势，可通过绿色箭头表示安全方向、红色叉号表示危险方向，实现实时导向。但 Olander 等人的实验

发现，红色叉号的劝阻效果可能弱于预期，部分人员仍会走向被标记为危险的出口。这提示我们，引导系统设计需要基于实证的人因工程研究，而非直觉判断。

增强现实(AR)技术的应用为引导信息呈现开辟了新可能。消防班长可通过头盔AR获取个性化导航提示，避免在浓烟中迷失方向。未来可进一步探索基于数字人技术的语音交互，使AI在火场嘈杂环境中仍能精准下达指令。这种人机交互层面的设计，实质上是行为模型向引导系统反向输出的过程——理解人员如何感知和响应信息，然后将这种理解转化为交互设计原则。

4 结语

复杂高层建筑火灾中的人员疏散行为建模与智能引导路径优化是涉及安全科学、计算机科学、心理学与建筑工程的交叉领域。系统审视表明，该领域正从静态预设向动态自适应、从宏观集总向微观个体、从运动学主导向行为规则驱动转变。行为建模进展能更精确刻画火灾中个体决策规律与群体运动模式，工具方法从EXIT89网络模型到BuildingEXODUS多智能体仿真，再到基于霍克斯过程的统计建模，核心是在计算可行前提下逼近真实行为。研究显示，行为模型的fidelity显著影响疏散效率评估，分层策略等因素通过行为机制影响宏观疏散结果。路径优化技术突破使实时自适应引导成为可能，深度强化学习让疏散智能体在多出口环境中自适应选目标并与火源保持安全距离，基于深度学习的火场预测使路径规划升级，数字孪生平台提供行为模型与路径优化耦合的技术架构，分层路径规划实现宏观—中观—微观闭环反馈，兼顾全局最优性与个体适应性。

参考文献

- [1] 李良. 建筑消防设施在高层灭火救援中的应用分析[J]. 中国设备工程, 2026, (02): 239-241.
- [2] 张少辉. 城市高层建筑的消防隐患与防火监督研究[J]. 产品可靠性报告, 2025, (12): 190-192.
- [3] 何伟东. 高层建筑消防安全设计的核心问题与技术应用[J]. 工程建设与设计, 2025, (24): 34-36.
- [4] 汪群威. 高层建筑火灾扑救的制约因素及改进措施[J]. 居业, 2025, (12): 220-222.
- [5] 魏文超. 高层建筑消防安全问题及对策研究[J]. 散装水泥, 2025, (06): 189-191.