复杂建筑环境下地震疏散路线的智能规划方法

李　南

内蒙古自治区地震局　内蒙古　包头　014030

摘　要：地震预警信息触发后，如何在不依赖人员定位设备的条件下，快速为建筑内各区域人员生成个性化疏散指引，是提升震时应急响应实效的关键问题。本文提出一种基于建筑空间拓扑匹配的无定位依赖疏散路径规划方法，通过将人员所在房间与楼层平面图坐标匹配，实现无需实时定位的路线精准推送。方法融合多层建筑空间建模、基于改进蚁群算法的多目标路径优化，以及预警触发后的动态路径调整策略，并面向微信小程序终端设计了轻量化疏散指引生成方案。该方法可在无任何人员定位硬件投入的前提下，实现震后秒级疏散路线推送，为学校、医院、企事业单位等场景的低成本应急疏散系统建设提供技术支撑。

关键词：地震预警；无定位依赖；疏散路径规划；多目标优化；微信小程序

引言：震预警技术的快速发展，使震前数秒至数十秒的预警信息获取成为可能。然而，预警信息的价值最终取决于接收端能否在有限时间内转化为有效避险行动。当前多数建筑在收到地震预警后，仍依赖传统的固定疏散预案或人员自发逃生，缺乏与预警信息联动的动态疏散指引能力。与此同时，现有智能疏散系统多依赖蓝牙、UWB 等人员定位设备，在中小学校、医院、企事业单位等场景中面临部署成本高、维护难度大的现实瓶颈。

针对上述问题，本文提出一种面向地震预警响应的无定位依赖疏散路径规划方法。该方法不依赖任何人员实时定位设备，而是通过将人员所在房间与楼层平面图进行拓扑匹配，实现疏散路线的个性化推送。结合改进蚁群算法和预警触发后的动态调整策略，为微信小程序终端提供轻量化的路径规划服务。研究旨在为低成本、广覆盖的应急疏散系统建设提供技术方案，与《“十四五”国家应急体系规划》中提升基层应急能力的部署相契合。

1 复杂建筑环境特征与地震疏散需求分析

1.1 复杂建筑环境的结构与空间特性

复杂建筑主要涵盖大型商业综合体、高层公共建筑、复合型场馆等类型，整体具备空间布局交错、结构形式多元、功能分区繁杂的典型特征。此类建筑内部通道纵横交错、分支较多，同时存在楼梯间、电梯井、连廊等垂直与水平交错空间，极易形成疏散盲区。相较于常规建筑，复杂建筑存在大量通行瓶颈，主要集中在通道拐角、出入口、楼层衔接位置。本文通过实测与图纸梳理方式，统计各类空间参数，量化分析通道有效通行宽度、垂直疏散节点承载能力、空间连通率等核心指标，排查固定障碍物、设备占用区域等拥堵高发点位，搭建完整的建筑空间环境特征数据库，为后续疏散模型构建和路径规划提供真实数据支撑。本文方法主要面向学校、医院、办公楼等地震预警终端覆盖的典型场景。此类建筑虽结构复杂度不及大型综合体，但人员密集、通道有限，震时同样面临出口拥堵风险，且部署定位设备的成本约束更为突出。

1.2 地震灾害下的疏散风险源识别

基于地震灾害的破坏机理，建筑地震疏散风险主要分为结构风险、次生灾害风险和人群风险三类。地震发生时，建筑墙体、吊顶、管线等构件易脱落坍塌，堵塞疏散通道，直接切断逃生路径。突发灾害易引发人员恐慌，大量人员聚集在狭窄通道和出入口，极易发生拥堵、踩踏事故。各类风险并非固定不变，会随地震持续时间、建筑损毁程度动态变化，呈现明显的空间差异性和时间演变特征，是制约疏散安全的核心约束条件。

1.3 无定位条件下的路径规划约束与目标

在无定位依赖的前提下，路径规划面临三重核心约束：（1）定位信息缺失——无法获知人员的实时移动轨迹，只能以初始房间位置为起点；（2）终端算力有限——小程序端无法运行复杂优化算法，路径预计算须在服务端完成；（3）信息带宽受限——推送内容以文字和静态图示为主，不能依赖高带宽视频或三维交互。基于上述约束，规划目标设定为：以最短路径优先为基础，兼顾通道通行能力与出口负载均衡，确保

每条推送路线在无实时定位修正的情况下仍具备较高的可行性与安全性[1]。

2 复杂建筑环境地震疏散模型构建

本文结合复杂建筑地震疏散的场景特性，从环境、风险、人员行为三个层面完成系统化建模，为疏散路径智能规划提供精准的数据与模型支撑。（1）多维度环境建模：依托建筑施工图纸与室内空间拓扑关系及初始人员分布数据，搭建一体化多维度疏散环境模型。模型统筹建筑物理空间边界、各通道实际通行能力、区域静态风险分布等核心要素，完成复杂建筑空间的数字化还原与可视化重构，精准表征建筑内部通道连通性、疏散瓶颈、盲区位置等关键空间特征。（2）地震动态风险评估建模：结合地震烈度等级、建筑构件损毁规律及次生灾害发生概率，构建分层分级的静态风险评估指标体系。根据预警信息中的震级、烈度预估值，对建筑各区域进行预先风险分级，在路径规划时作为静态约束条件参与计算。（3）人员疏散行为建模：结合地震应急场景下的人员行为特点，将人员分为常规人群和行动受限人群两类，分别采用差异化的疏散速度参数。模型中不涉及恐慌情绪、群体跟随等需实时感知的复杂行为参数，以降低数据需求，适配无定位依赖的应用场景。修正传统均质人员疏散模型参数，构建贴合真实地震场景的异质人员疏散行为模型，提升路径规划结果的真实性与适配性[2]。

3 地震疏散路线智能规划核心算法设计

3.1 无定位依赖的路径匹配机制

本文方法的核心创新在于不依赖任何人员定位设备实现个性化路线推送。机制设计如下：（1）房间注册机制：在系统初始化阶段，为建筑内每个房间分配唯一编号，并将其坐标标注于楼层平面图的拓扑网格中。人员无需佩戴任何定位终端，只需在首次使用时通过小程序选择自己所在的房间（如“3 层-会议室 301”），系统即可将该房间的空间坐标作为疏散起点。（2）起点-出口匹配算法：以房间坐标和建筑各出口坐标为输入，在楼层拓扑图上计算从起点到每个可用出口的最短路径集合。路径匹配精度取决于平面图网格分辨率（本文采用 0.5m 网格），可在不依赖 GPS/蓝牙的条件下实现米级精度的起点定位。（3）个性化推送策略：同一建筑的不同房间，因起点位置不同，经算法计算后推送的疏散路线可能不同。这一差异化推送机制使得“千人千面”的个性化指引成为可能，而无需依赖实时定位的持续跟踪。该机制将定位问题转化为“静态坐标匹配”问题，彻底规避了硬件部署成本与定位信号覆盖的约束。

3.2 智能规划算法的总体框架

结合复杂建筑地震疏散的动态性、高风险、多约束特点，本文构建全局寻优结合局部动态修正的双层智能规划算法框架，适配地震灾害下建筑环境的实时变化特征。算法整体分为数据输入层、模型计算层与路径输出层三个层级，摒弃传统静态路径规划的单一优化逻辑。（1）输入参数包含建筑空间拓扑数据、区域风险等级、通道通行状态、房间注册信息等初始化静态数据；（2）核心运算以多目标均衡优化为基础，完成全局疏散路径的初步求解，同时预留局部动态调整接口；（3）输出内容包含最优疏散路径、分区疏散方案及动态备用路径，可根据现场环境变化实时更新。该框架兼顾疏散效率与安全避险需求，能够有效适配地震过程中通道堵塞、区域风险升级、局部空间失效等突发工况，保证规划结果的稳定性与适配性。

3.3 多目标优化的路径规划算法

针对复杂建筑疏散路径规划中多目标相互制约的问题，本文基于改进蚁群算法构建多目标路径优化模型，突破传统单一路径寻优的局限性。（1）目标函数设定，以疏散通行时长最短、路径综合风险最低、通道通行通畅度最高为核心优化目标，结合建筑通道宽度、人员承载上限、风险区域约束条件，建立多目标权重配比机制，解决单一目标优化导致的安全性不足或疏散效率偏低的问题；（2）算法参数优化，结合复杂建筑多拐点、多分支、多瓶颈的空间特征，修正蚁群算法的信息素更新规则，弱化无效路径的信息素留存，提升有效逃生路径的搜索效率；（3）全局路径筛选，通过迭代寻优完成所有可行疏散路径的遍历计算，对比不同路径的综合目标收益，筛选出兼顾安全与效率的全局最优疏散方案，实现多约束条件下的路径精准规划[3]。

4 智能规划系统的架构设计与关键技术

4.1 系统总体架构与功能模块

针对复杂建筑地震疏散的轻量化应用需求，本文采用模块化分层设计方案，构建服务端、小程序端、管理后台三层系统架构。该架构无需依托传感、定位等硬件设备，仅通过前期录入建筑基础数据即可实现疏散智能规划，有效降低部署成本与落地难度。三层架构模块独立、数据互通，可完成建筑数据配置、路径计算、终端指引、后台运维的全流程工作，整体扩展性与实用性较强。各层级具体功能如下：（1）服务端。作为系统核心算力与数据管理中心，主要承担路径规划计算与全域数据管理工作。服务端内置多目标路径寻优、区域风险评

估、动态路径修正核心算法，可根据建筑基础参数完成风险分级、最优疏散路径求解、应急路径调整等核心运算。（2）小程序端。面向现场用户提供移动端交互与疏散指引服务，核心功能包含房间楼层选择与疏散方案可视化展示。用户可根据自身位置自主匹配对应疏散方案，终端界面直观呈现疏散通道、安全出口、风险区域等关键信息，结合图文指引为现场人员提供可直接落地的疏散依据。（3）管理后台。主要负责建筑参数配置与系统数据维护，是系统基础数据的录入与更新端口。工作人员可通过后台上传、编辑建筑二维平面图，完成楼层布局、房间分布、通道走向、出入口及禁区范围等参数初始化。同时支持后期数据修改、参数更新、方案复盘与数据统计，可适配建筑改造、功能分区调整等场景变化，保证系统规划结果贴合现场实际。

4.2 多源数据初始化与数据处理技术

本系统摒弃传统硬件实时采集模式，完全依托人工初始化静态建筑数据开展规划工作。通过标准化录入、清洗校准、参数转化等处理技术，解决建筑图纸格式杂乱、参数不统一、信息缺失等问题，为智能路径规划提供可靠数据支撑。核心技术流程如下：（1）基础数据资源录入。系统核心数据以建筑二维平面图为基础，包含两类关键信息：一是建筑空间拓扑数据，涵盖楼层结构、房间编号、通道宽度、通行路线、安全出口及障碍物分布，是路径规划的基础依据；二是场景适配参数，根据建筑结构预设各区域风险等级、疏散优先级、通道通行系数，为多目标路径优化提供量化评判标准。所有数据在系统部署阶段完成录入，后续可通过后台动态更新。（2）标准化数据预处理。针对原始图纸比例偏差、格式异构、信息冗余缺失等问题，系统配套标准化预处理机制。通过尺寸校准、比例规整、无效信息剔除、缺失内容补全等操作，统一图纸坐标与数据格式，重构建筑空间拓扑关系，精准划分可通行区域与禁行区域，保障基础数据规范准确。（3）数据数字化映射转换。对预处理后的平面数据进行量化转化，将可视化图纸信息转换为算法可识别的数字化参数。通过量化通道通行难度、区域风险值、分区疏散距离等指标，建立建筑空间与疏散规划的映射模型，实现无硬件感知条件下的精准路径寻优与方案匹配。

4.3 二维可视化与智能交互指引技术

为改善传统疏散方案展示抽象、实操性弱的问题，系统采用二维平面可视化结合文字指引的展示模式，搭建轻量化交互平台，实现建筑场景、风险分布、疏散路径的直观呈现，提升方案的可读性与落地性。核心技术如下：（1）轻量化二维场景建模。系统基于录入的建筑平面图完成场景复刻，完整保留楼层布局、房间位置、通道走向、出入口及障碍物等核心信息。（2）图文结合疏散指引。系统采用分级标注、线条高亮的方式，在二维平面图中区分安全区域、风险区域、最优路径与备用疏散路线。同时配套精细化文字说明，明确疏散行进方向、途经点位、出口信息及避险注意事项，弥补图形展示的信息短板，满足不同人员的疏散认知需求。（3）人机交互与方案优化。小程序端支持用户精准选择所处楼层与房间，自动匹配专属疏散方案，实现定点精准指引。管理后台可灵活调整风险阈值、路径权重、建筑布局等参数，适配多变场景[4]。

结束语：本文针对地震预警触发后疏散指引缺失、定位设备依赖度高、终端适配性差等现实问题，提出了一种面向地震预警响应的无定位依赖疏散路径规划方法。方法通过房间注册机制实现无硬件依赖的起点定位，采用改进蚁群算法生成多目标优化路径，并结合预警触发逻辑实现了秒级响应的疏散指引推送，为小程序终端的轻量化部署提供了技术方案。

参考文献

[1] 张佳瑜, 赵小勇, 白林波, 等. 地震易发区高校避震疏散空间需求与路径优化 [J]. 吉林大学学报（地球科学版）,2022,52(1):305-314.

[2] 陆佳鋆. 韧性视角下城市应急避难场所选址与疏散路径规划–以上海市为例 [D]. 镇江: 江苏科技大学,2023.DOI:10.7666/D03354706.

[3] 杨剑锋, 展慧, 陈良超, 等. 考虑地震灾害的城市人员密集区域应急疏散路线规划 [J]. 清华大学学报（自然科学版）,2022,62(1):70-76.

[4] 王禹萌, 王波, 陈旭亮, 等. 基于随机森林的地震灾区建筑人群疏散路径规划 [J]. 中国安全生产科学技术,2025,21(5):165-170.