

江辉仙, 聂名萱, 吴娟, 等. 基于避灾人口预测的城市综合体应急疏散仿真试验[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 184-188, 213. [JIANG Huixian and WU Guang. A Simulation Experiment of Urban Complex Emergency Evacuation Based on the Forecast of Disaster-evaded Population [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 184-188, 213. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.031.]

# 基于避灾人口预测的城市综合体应急疏散仿真试验\*

江辉仙<sup>1,2</sup>, 聂名萱<sup>1</sup>, 吴娟<sup>1</sup>, 吴广<sup>1</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福建福州 350007)

**摘要:**以福州市万达广场作为城市综合体研究案例,在区域范围内选取临时避灾点,确定城市综合体内大型商场出口和居住楼宇疏散点等疏散单元及预测相应人口数量,构建适应人口分布的避灾场所应急疏散分配模型并验证其有效性;设计城市综合体应急疏散仿真试验系统,为受灾民众快速准确地到达指定的避灾点提供最快、最安全的路径导航方案。该研究可为城市灾害性事件的虚拟演练和应急救援提供决策辅助支持。

**关键词:**应急疏散; 路径; 城市综合体; 避灾点; 动态分配

**中图分类号:** X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)04-0184-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.031

随着社会的不断发展,城市化进程的加快,城市化规模和人口数量越来越大,不断新建起了各种类型城市综合体,如中央商务区建筑群、大剧院、体育场馆等。这些城市综合体一般具有人群高度集中,地处繁华区域等多重性质。一旦发生紧急事件(如地震、火灾、危险品泄漏等),必将威胁到建筑物内的人员安全,因此安全高效的疏散显得尤为重要<sup>[1]</sup>。在突发事件发生过程中,疏散的行为不当会造成许多人员伤亡,较大的自然或人为灾害发生时,还往往伴随着众多的次生灾害。灾害类型不同,其性质和范围大小,会带来不同程度的危险,在避灾所分析过程中,疏散撤离过程也是错综复杂的,也应区别分析。

本文以中国地产商业的典型代表万达广场城市综合体作为研究案例,根据应急避灾时的人口数量预测,结合分析研究区范围内避灾空间服务能力,分析各应急避灾场所服务范围内的人口数量,科学合理地将所有预计受灾人员进行有效分配,寻求一定条件下满足的最优疏散路径解决方案,并最终快速疏散到相应的避灾点,从而实现在突发事件发生后,信息正面、及时、有效的传播,方便相关部门进行紧急救援工作,将损失降低到最低点。通过对城市综合体应急避灾疏散过程所涉及交叉学科领域相关模型和方法进行分析,在避灾路径规划以及应急避灾点动态分配方

面探讨<sup>[2]</sup>,针对越来越复杂的城市结构的灾害应急避灾问题,最大化融合各种灾害或仿真信息,兼顾灾难区域复杂多变的状况,提供应急避灾最优动态分配方案,使救援人员与物资最快的到达救援地点,以保证城市居民的生命财产安全。

## 1 基于城市综合体应急疏散情景分析

### 1.1 问题的描述

城市综合体区域内人口居住密集,生活工作等各种功能完善,包含有商业卖场、广场、居民区、公共绿地、公园等各种建筑和场所。在如此密集人口情景下,面对突发性各种灾害事件,如地震、火灾、毒气泄露、恐怖袭击等事件,受灾个体将表现更加敏感脆弱,处于该区域的所有人员都将成为受灾体。因此,决策者应在尽可能短的短时间内制定出相应应急疏散方案,能够安全、快速、有效的将受灾人员进行疏散并实施救援。

如何选择合适疏散规划方案将商业综合体区域内预估人口进行快速的逃生到合适避灾点?即将研究区内的避灾人员以疏散点为单元分配到一个或多个避灾场所<sup>[3]</sup>。

### 1.2 样本的选择

本文以福州仓山万达广场商业圈以及周边的5

\* 收稿日期: 2017-03-30 修回日期: 2017-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502905); 福建省科技厅公益类项目(2015R1034-6)

第一作者简介: 江辉仙(1975-), 福建仙游人, 副教授, 研究方向为虚拟地理环境。E-mail: jhx155@163.com

个小区为研究样本区,总面积约 30 hm<sup>2</sup>,包含了城市生态所具有的公园、绿地、操场。研究样本区所涉及道路网有金港路、浦上大道、金榕南路和金州南路等五条大道的部分路段,以及其它纵横交错的次级道路;同时包含能作为临时避灾点的 1 个公园、1 个学校操场、1 个广场、2 块绿地区域。如图 1 所示。

### 1.3 预测人口数据空间化

人口流量数据采用概率预测方法,通过比较各种概率预测方法的适用性,选取出针对其研究区最佳的人口预测方法。根据样本研究区特征,可以将受灾人员分为以下几种类型。(1)万达广场商业圈人口数据。其中人员构成主要包括商场顾客、店铺导购、办公人员以及商场管理人员等。商场人口数据预测主要通过三种方式:①获取商场 3~5 km 范围内居民区的人口数据的比例值;②通过商场面积和店铺数目获取数据;③通过实地调研咨询相关管理人员获得数据值。再由三者平均求得商场人口数据,分别统计出商场 4 个出口的人流量。(2)居住小区人口数据。人口普查是世界各国广泛采用的一种搜集人口资料的科学方法,是获取基本人口数据的主要渠道<sup>[4]</sup>。可对居住小区人口预测使用人口普查数据。特别是含有性别、年龄等属性信息,能够为避灾人口预测提供切实可靠的参考价值。(3)街道人流量数据。通过不同时间段实地调研来获取一个平均人口流量数据。

在突发事件应急疏散研究中,如何设计更加贴近真实受灾人员分布的空间位置模型,这是人口数据空间化需要研究的一个重要问题。本文采用多元回归建模方法获取研究分区域内以 100 m 的格网形成人口空间数据,并以流的形式储存在于路网的节点中。

### 1.4 情景设计

城市综合体区域内大型商场及周边配套小区内建筑密度大、楼层高、人员密集,且能作为避灾区域的地点比较缺乏。本文对选取的原则、方式、影响因子以及评价方法进行综合分析,采用层次分析法对临时应急避灾点进行适宜性分级,并排除不可作为临时应急避灾点的位置及场所。最后,将规划出的应急避灾点输入矢量化路网交通网络中,同时把避灾点面积作为临时避灾所容量的一个重要衡量因素。以格网单元形式把分布于道路网中社区单元楼或商场出口的节点作为疏散单元,综合分析得到基于道路网的避灾点最优分配方案。

把试验所获取的避灾点最优分配方案实现过程进行可视化仿真模拟。即通过设计一个针对城市综合体类型灾害应急疏散的分析模拟和仿真演示系统,对应急避灾疏散过程中所涉及到的模型

和影响因子的综合分析,将疏散模拟与仿真技术相结合,从二维和三维两个方面对应急疏散结果进行可视化表现。运用该系统,模拟者可以进行地图操作来定位避灾点和应急避灾点的人员动态分配,并根据计算分析结果制定详细的路径规划方案,从而在仿真演示中,针对演示过程出现的问题来改进疏散规划方案<sup>[5]</sup>。

## 2 基于应急疏散路径的避灾空间分配

### 2.1 路径规划

路径规划就是把现实空间中的评价对象进行空间概化,转换为空间几何数据点、线等矢量数据,将相关的影响因子引入到路径中,采用科学计算的方式获得某几个点到目标点的线路规划相关问题,并获取最优方案应用到现实生活中。

#### 2.1.1 应急避灾路径空间模型构建

应急避灾路径空间模型包括从各个疏散点到临时避灾场所的所有路网组成的网络。其中起始点为疏散点,包含居民楼、城市综合体商场出口等,中间结点主要为路网叉路口,终点为研究区范围内的临时避灾点。起始点主要属性数据为每个疏散点受灾人口数目,终点主要属性数据是每个临时避灾点能够安置人员数目,路网所构成的线段属性各种影响因子权重值叠加。具体实现如图 2 所示。

#### 2.1.2 路径分析影响因子确定

网络路径中连接各个关键点(主要有疏散点、临时避灾点、路网交叉路口)的线段是各种大小的交通道路,抽象为线段。其中每条线段权重主要有以下几个影响因子叠加而成。

##### (1)道路长度

道路长度作为路径分析的主要指标,反映该路段的直线距离,值与疏散时间成反比。

##### (2)道路宽度

反映该路段在某一时刻并排通过的人员数量的最大值。疏散时间与路段宽度成正比,该路段越宽,单位时间内能够通过人数越多。

##### (3)道路坡度

反映该路段单位时间内通过的人员的速度,值与疏散时间成反比。坡度越大,造成人员疏散速度变慢,当单位时间内涌入人数超过规定值,将会产生堵塞。

##### (4)路段滞留时间

路段滞留时间是指个体从到达该路口开始到完全通过该路段所花费的时间,疏散人员在每条路线段都有行走滞留时间,即人员从进入该路段到走出该路段的时间。反映出两个交叉口之间路段每个时间段可通过人数值。滞留时间与路段长度成正比,与速度和宽度成反比。

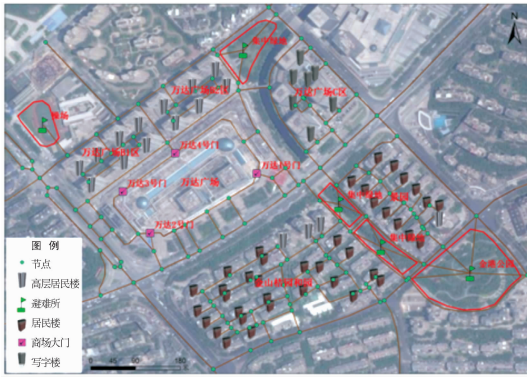


图1 样本区示意图

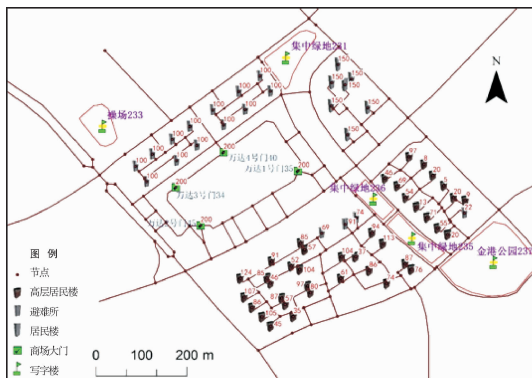


图2 研究区网络空间模型

## 2.2 空间分配

### 2.2.1 算法描述

一个合理的疏散模型路径规划需要涉及到空

间数据网络表达、路径算法、权重影响因子、方案优化策略等诸多关键问题。本文路径求解算法采用迪杰斯特拉算法(Dijkstra)。Dijkstra 算法是由荷兰计算机科学家迪杰斯特拉(Dijkstra)于1959年提出的,是从一个顶点到其余各顶点的最短路径算法,解决的是有向图中最短路径问题<sup>[6]</sup>。该算法可以计算从起点到终点之间的最短路径,基本原理以起点为中心逐条向外遍历,当每次遍历搜索一个距离最短的经过点,实时更新与其相邻的点的距离,一直搜索到终点目标。

### 2.2.2 分配模型构建原理

#### (1) 条件假设

①应急疏散时间是以第一个人开始疏散到最后一个人进入其分配灾点这个时间段,所以要保证疏散距离最长的疏散点总长度尽可能小。

②每个避灾点空间区域范围限制,安置人数有一个最大容纳量,因此每个避灾点动态分配避灾人员不超过能容纳最大量。

③疏散路线不能重复或呈现返回。在分配方案中,保证每个疏散点行进到所分配的避灾点,不能与其他疏散点产生重复路线或相反方向,从而产生碰撞及拥堵。

④每一个避灾点有多条疏散路径,但每条路径有容量限制;

⑤在疏散的过程中满足先到避灾点,先进避灾点的原则。

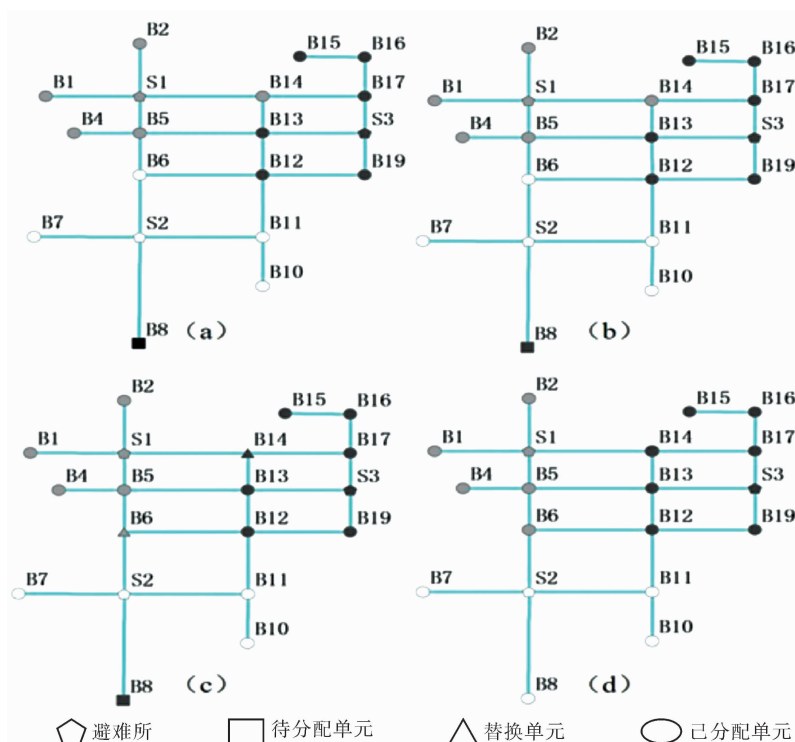


图3 基于道路网的单元替换原理图

## (2) 分配模型构建原理

避灾场所动态分配过程中,对于每一个疏散点分配所在临时避灾点,设定以下两个条件:①  $V_B \leq V_{Bmax}$ ; ②  $V_B > V_{Bmax}$ , 且  $d_{Bjlast} > d_{Ba}$ , 式中  $j_{last}$  表示已经被分配到避难所 B 的疏散单元中距离避难所 B 最远的疏散单元。条件①表示避灾点 B 仍有空可容纳避灾人数,可直接疏散到当前避灾点 B。条件②表示空间单元 a 比已经分配给避难所 B 的疏散单元  $j_{last}$  距离避难所 B 更近,应优先被分配到避难所 B。上述两个条件只要有一个条件满足要求,疏散单元 a 即可直接被分配到避灾点 B。对于每个疏散单元 j,按照其与每一避难所 i 距离远近  $d_{ij}$  进行排序,寻找最近的避灾点;如果最近避难所满足条件,则直接将疏散单元 j 分配给到距离最短的避灾点,若不满足条件,则采用单元替换的方法对当前分配方案进行调整;这样通过几次回溯调整保证疏散总长度距离最小,满足每个避灾点分配到的疏散单元在网络空间上连续<sup>[7]</sup>。

当某一疏散单元离其最近避灾点不满足直接分配条件时,则基于道路网利用空间单元替换方法对分配方案进行调整。过程如图 3 所示。

图 3 中三个避难所:  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$ ,按照距离远近均被分配有若干疏散单元。图 3a 中 B8 未被分配,其与三个避难所的最短距离关系为:  $d_{S2B8} < d_{S1B8} < d_{S3B8}$ 。  $S_1$ 、 $S_2$  都已满员,只有避难所  $S_3$  容量有剩余, B8 只能分配给避难所  $S_3$ ,如图 3b 所示。然而,将 B8 疏散到  $S_3$ ,会路过其它避难所,疏散过程中将产生方向冲突,容易造成堵塞,且其疏散距离过远。为避免发生拥堵,就需要在已分配给其它避难所且与  $S_3$  相邻的疏散单元中寻找合适替换单元,如图 3c 中的疏散单元 B6 和 B14。首先将 B6 和 B8 进行替换,然后 B6 再与 B14 替换,结果如图 3d 所示<sup>[7]</sup>。整个替换过程必须保证总的行程距离最小,即替换前的总行程距离必须大于替换后的总行程距离,根据这个规则,为实现总行程距离最短,可以用式  $t_{sfa} + t_{sfb} > t_{ska} + t_{sfb}$  对待选择替换单元是否可作为替换单元进行替换进行查找判断。如果不等式成立,则进行单元替换;否则直接跳过,继续查找<sup>[1]</sup>。

### 2.2.3 基于应急疏散路径的避灾空间分配

本文以福州市仓山区万达广场这个城市综合体(包含周边部分居住社区)作为研究区域范围,以每栋楼或每个商场出口作为一个疏散单元,把受灾人员作为一个集体进行研究,利用道路网数据、社区单元楼空间分布及楼宇人口调查数据、万达广场疏散点及疏散人口数据进行避灾动态分配,从总行程距离、连续性、疏散过程时间以及容量等四个方面进行综合分析验证动态分配方案有效性。采用空间单元替换的应急避灾点动态分配不仅能够有效避免避灾点容量超限问题,还能够做到在避灾容量不超限情况下的总行程距离最小化使疏散总时间最小,

使得分配方案更加的科学合理,如图 4 所示。

## 3 应急疏散仿真系统设计

### 3.1 总体设计

从地理学的空间视角出发,确定研究区中能作为应急避灾场所的空间位置。通过对研究区域内受灾人口、避灾点和疏散点三者之间分配模型的梳理,研究城市综合体应急疏散路径导航路径优化等问题,按照系统论的研究思路设计城市综合体应急疏散路径导航系统。该系统针对城市突发事件中灾害模拟应急疏散仿真演示,分析计算在满足基本理想值下多点对多点最优疏散路径方案,实现在系统中进行基本地图查询、避灾所在地图上空间定位、三维场景模拟、最优路径分析,以及应急避灾所的人口动态分配,并根据计算分析结果制定路径导航实现仿真演示。在针对仿真模拟过程中出现的问题进行,最终实现基于 unity3D 发布的程序通过过程数据控制疏散模拟。

### 3.2 实现流程

实现流程图如图 5 所示。

### 3.3 主要模块示例

基于 Unity 3D 中严肃游戏引擎设计城市综合体应急疏散路径导航系统,如图 6 所示。该模块主要由三维展示和二维模拟两部分组成,其中三维展示主要实现对研究区域内三维场景的浏览,二维模拟采用微观建模方法中的 Agent 技术不断产生行人、载人车辆等智能体模拟真实灾害场景中人群疏散路径,如图 7 所示<sup>[8]</sup>。

根据疏散区域内的所有受灾体和临时避灾点空间分布,综合各类影响因素计算其权重值,获得所有受灾人员最佳的避灾点分配方案以及相对应的受灾人员的紧急疏散路径。在模拟验证中,可以及时更新受灾区域内的路况通达信息,及时修正分配结果以及路径规划方案。其后,把避灾所分配以及路径规划方案作为模拟数据导入系统,进行仿真模拟,验证其结果,并针对模拟过程中出现的问题进行改进<sup>[7]</sup>。疏散仿真试验采用预案数据控制的方式进行模拟,通过增加时间节点指定不同时间段场景设置以及相应的模拟对象的属性、位置等信息的设定,使用图像表达的形式在系统界面进行实时的演示。即不同时间段受灾人员空间位置不同,有些疏散点的受灾人员被分成了几个部分遵循不同的路径规划方案进行疏散,整个过程中不同疏散点的疏散人员在路口相遇,可以从图中清晰地看到道路网中人流集中的路段与位置,如图 8 所示。如发现问题,改进参数数据,直到达到合适效果后,再根据系统的最终结果,生成实际的预案脚本,用于后续演习指导。



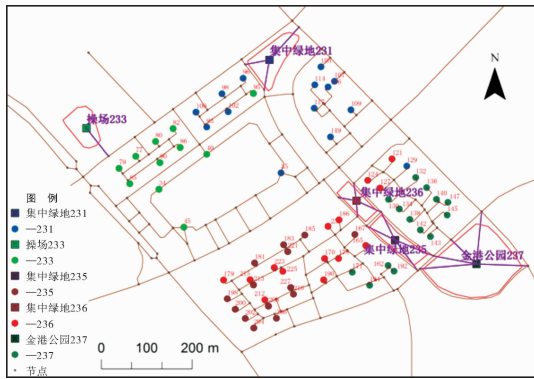


图4 分配方案可视化

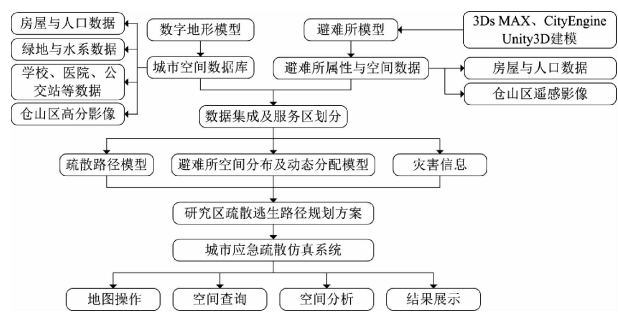


图5 实现技术流程图



图6 系统主界面

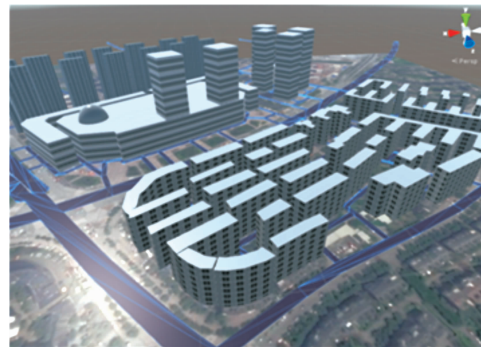


图7 三维场景浏览

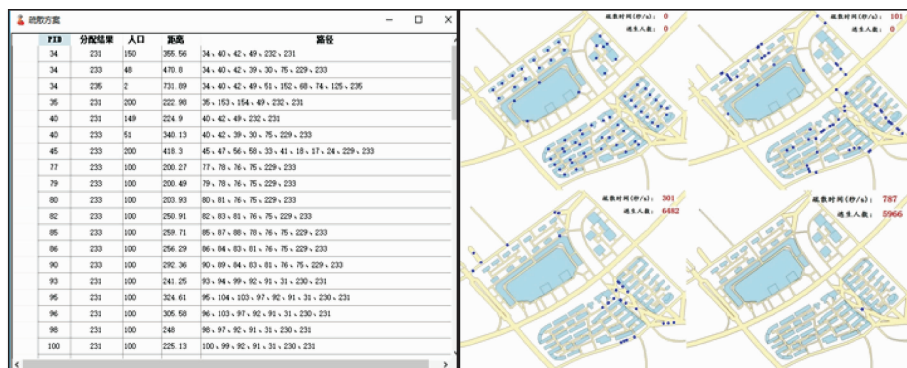


图8 疏散过程仿真试验

## 4 总结

针对错综复杂的大型建筑体灾害应急处置问题,本文以福州市仓山区万达广场城市综合体为研究单元,从应急避灾路径影响因子出发,分析并构建应急避灾网络路径模型,采用空间单元替换的方法对研究区域内从应急疏散到避灾点之间人口和路径动态分配,模拟实验验证其方法有效性;利用模拟仿真技术构建适应人口分布的避灾点应急疏散路径导航系统,以实现分区域进行疏散,得出最优避灾路径,对大型商场及其周边应急避灾疏散的过程分析以及仿真展示。该研究可快速高效地为城市灾害性事件的虚拟演练、应急救援提供数据验证和决

策辅助支持,对于城市防灾减灾有重要意义。当然,群体人员应急疏散必定是一个非常复杂的问题,各种因素如人的心理素质、道路人流量限制以及生活习惯等都会影响应急避难方式的选取及路径规划方案的制定,进而对应急避难疏散带来很大的难度<sup>[9]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 王海鹰,李志雄,张涛,等.地震应急救援信息需求及获取建议[J].灾害学,2016,31(4):176-180.
- [2] 阎俊爱,郭艺源.非常规突发事件救援物资输送的路径优化研究[J].灾害学,2016,31(1):193-200.
- [3] 吴健宏,翁文国,倪顺江.不同路径选择策略的城市疏散仿真研究[J].系统仿真学报,2013,25(1):122-126.

(下转第213页)