

城市应急交通疏散的启发式实现

亢文文^{1, 2}, 谢立³, 席斌⁴, 吕宜生^{2, 1}, 朱凤华^{2, 1}, 熊刚^{2, 1}

¹中国科学院自动化研究所, 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京, 中国

²中国科学院云计算产业技术创新与育成中心, 东莞, 523808, 中国

³浙江大学, 信息与电子工程学系, 杭州, 310027, 中国

⁴厦门大学, 信息科学与技术学院, 厦门, 361005, 中国

摘要 随着我国城市化进程的加快, 城市中各类突发灾害也越来越多, 给城市应急管理提出了严峻的挑战。在这一背景下, 本文提出了城市应急交通疏散的启发式实现, 在解决路径选择问题时, 将 Dijkstra 最短路和当前路况作为启发式算法估价函数的两部分, 通过应用需求产生模型、启发式搜索算法、位置更新算法等, 得到所需的数据, 经过对比分析, 最终得到最优的行驶路径。与传统方法相比, 本文巧妙地将数学分析和计算机仿真相结合, 得到了良好的效果。

关键词: 应急交通疏散; 启发式搜索; 路径选择

A Heuristic Implementation of Traffic Emergency Evacuation in Urban Areas

Wenwen Kang^{1, 2}, Li Xie³, Bin Xi⁴, Yisheng Lv^{2, 1}, Fenghua Zhu^{2, 1}, Gang Xiong^{2, 1}

¹State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing, China

²Cloud Computing Center, Chinese Academy of Sciences, Dongguan, 523808, China

³Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

⁴School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, 361005, China

Abstract: *With the acceleration of China's urbanization, more and more unexpected disasters happened in city make a severe challenge to city emergency transportation management. Under this background, this paper presents a heuristic implementation of emergency traffic evacuation in urban areas. When solving the path selection problem, we take Dijkstra shortest path and current road condition as two parts of evaluation function of heuristic algorithm. By applying demand generation model, heuristic search algorithm and position update algorithm, we can calculate the data we need. After comparative analysis, we get the best path from origin to destination. Compared with traditional methods, it results in good effects by ably combining mathematical analysis and computer simulation.*

Keywords: *Emergency Traffic Evacuation; Heuristic Search; Path Selection*

0. 引言

近年来, 各国城市化进程迅猛发展, 各大城市如雨后春笋般林立; 但同时, 各种天灾人祸频发不断, 除了国际上发生的 911 恐怖事件、“卡特里娜”飓风袭击、印度洋地震海啸等重大突发灾害事件以外, 有研究指出我国大城市也已进入突发事件高发期。这些灾害的发生, 极大地威胁着人民群众的财产和生命安全。在灾害突发的紧急时刻, 如不能很好的解决交通应急疏散问题, 很可能引发其他重大社会问题, 带来不堪设想的后果。研究和解决城市交通应急疏散问题, 有利于城市管理决策者在最短时间内组织人员疏散, 最大限度地保障人民群众的生命和财产安全; 有利于应急决策的科学化、人性化、智能化, 提升政府决策能力, 提高城市现代化水平。

研究灾害条件下的应急疏散问题, 就是在灾害发生之前, 研究灾害的发生发展规律, 提出合适的应急疏散算法, 制定科学有效的应急疏散方案, 从而在灾害真正发生时最大限度地保障人民群众的生命财产安全。

对此问题的解决, 目前主要采用数学分析和计算机仿真两种方法。国外的研究起步较早, 受到当时计算机性能的限制, 主要采用数学分析方法。Lewis 于 1985 年针对飓风的疏散问题首次提出了交通需求预测的一般性方法和交通应急疏散的一些关键性问题, 如疏散交通形式的选择、交通控制方法、疏散需求预测和疏散时间估计等^[1]。接着, Dunn 和 Newton 提出了基于网络模型的最大流方法^[2]; Yamada 运用最小成本流思想提出了最短路撤退规划方法^[3]; 近年来, Cova 等人提出的基于车道的网络流模型, 该模型是一个整数延伸的最小费用流优化问题^[4]。鉴于静态路网的局限性, Choi 等人研究了基于动态网络的最小费用流问题^[5]。卢兆明等提出了以疏散时间最短为目标的基于时变动态流的网络优化模型^[6]。由于动态模型能实时地反映网络的状态变化, 因此在某些问题的解决比静态网络拥有更好的效果, 在应急疏散规划中已经得到了一定程度的应用。

随着计算机硬件技术的发展, 计算机性能得到了大幅度地提高, 由于其解决问题的有效性, 越来越多的人开始选择用计算机仿真技术解决大型复杂问题, 其在应急交通疏散领域中的发展催生了许多宏观疏散仿真系统, 如 NETVACI、OREM、MASSVAC 和 TEDSS 等。近年来, 在应急疏散领域出现了很多基于智能体 (Agent) 的仿真技术。Chen 等对突发事件情况下棋盘状、环状和真实路网的分阶段疏散和同时疏散进行了仿真模拟, 得出了在不同交通环境下应该区分应用分阶段疏散和同时疏散的结论^[7]。Sinuany-Stern 等人在放射性危险事件紧急撤退的情况下, 对行人、车辆保有量、交叉口行程时间和路径选择变化对路网疏散时间的敏感性进行了研究, 认为行人与道路交通的相互作用对路网疏散时间的影响较大^[8]。

1. 算法整体思路

数学分析和计算机仿真两种方法, 在应用上各有优缺点。数学分析方法基于网络模型, 通过对问题的精确定义, 可以得到有关应急疏散的精确结果, 且结果是最优的, 它的优点就是定义清晰, 结果精确; 但是应急疏散是一个动态的过程, 数学分析方法不能将疏散过程的状态变化实时地反应到算法中去, 因此丧失了一定的真实性。计算机仿真方法则恰好相反, 它可以通过仿真步的控制将路网状态的变化实时反映到下一仿真步中, 因而能更好的模拟实时情况, 但是由于对问题的界定不明确, 因此结果数据量大, 有时候不能直接得到我们想要的结果, 而且由于是基于仿真的, 往往只能得到较优解, 而不是最优解。

本文在借鉴前人研究的基础上, 提出数学分析方法和计算机仿真相结合的方法, 在算法的宏观控制层面上采用计算机仿真技术, 因而可以将疏散过程的实时状态变化反映到求解过

程中；在算法的微观求解上采用数学分析方法，保证在每一步实时的路网状态下定义的模型都是精确的，求解的结果都是最优的。这样，将二者结合，扬长避短，具有更好的效果。

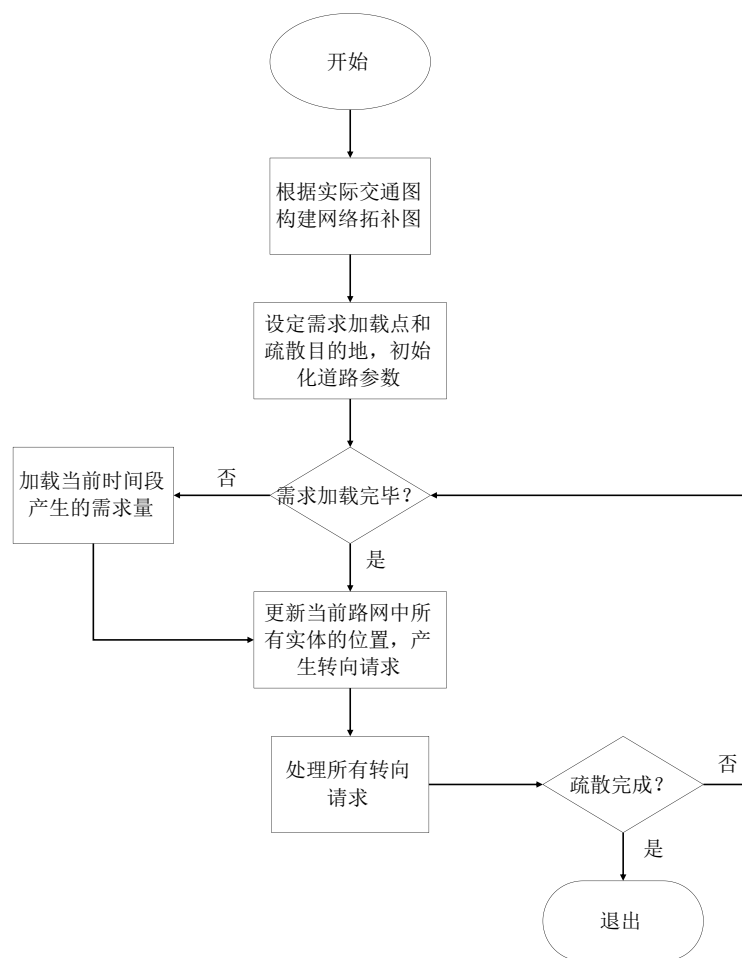


图 1-1 应急疏散算法整体思路流程图

本文提出的应急交通疏散算法整体思路如下：

- 1) 根据实际路网，构建网络拓补图。一个网络拓补图由节点、弧段以及他们之间的连接情况组成，并包含相关的节点和弧段信息；
- 2) 设置需求加载点和疏散目的地。所有疏散需求都经过加载点加载到路网，并被疏散到目的地；同时，初始化其他路网参数，如路段的长度、容量、自由行驶速度等；
- 3) 判断是否所有的需求加载完毕，如果已加载完毕，进入下一步；否则，加载当前时间段产生的疏散需求；
- 4) 更新状态和产生转向请求。对于当前路网上的所有车辆，计算在该时间步内行驶的距离，判断是否到达路段交叉口，如果是，则产生一个转向请求；否则，更新该车辆在当前路段的位置和其它状态信息；
- 5) 处理所有转向请求。应用启发式搜索算法解决；
- 6) 判断是否完成疏散，如果是，退出；否则，返回 3)，继续下一个时间步的处理。

以上算法思路可由图 1-1 所示的流程图表示。

由流程图可以看出，该算法涉及到的主要问题有：(1) 应急需求如何被加载到路网中去，即每个时间步应加载多少应急需求才更加符合实际情况；(2) 如何处理转向请求，即当一个

交通实体到达交叉口时,如何确定其应该选择哪一条道路,使其可以尽快到达目的地;(3)如何根据转向请求处理结果更新交通实体的位置和路网信息。下节就将一一讨论这些问题。

2. 主要模型和算法

2.1 疏散需求产生模型

在应急交通疏散开始后,所有疏散需求不可能同时到达集结地,而是按照某一时间顺序逐步到达,即疏散人员的疏散需求是按照某一时间顺序逐步形成的。因此,对整个疏散过程划分时段来定义疏散人员产生的疏散需求,并根据疏散需求产生情况制定每一次的车辆疏散路线。经过前人研究发现^{[9][10]},在自然灾害发生时,应急交通需求量加载到路网中的累计百分比可以通过S型行为反应曲线来模拟:

$$P(t) = \frac{1}{1 + \exp[-\alpha(t-H)]} \quad t \in [0, T] \quad (2-1)$$

式中:

$P(t)$ ——从时间0到t交通需求产生的累计百分比;

α ——人们对灾害的反映快慢参数,根据不同地方具体分析标定;

H ——系统一半的应急疏散需求加载到路网所需要的时间, $P(H) = 0.5$;

T ——交通需求产生的总时间,可以根据具体地区和以往的灾害发生情况确定。

为了便于仿真实现,将此连续模型离散化,只需将式2-1中的t换成 $i \cdot \Delta t$,并用 $P(i)$ 表示 $P(i \cdot \Delta t)$,从而得到如下离散形式的需求产生模型:

$$P(i) = \frac{1}{1 + \exp[-\alpha(i \cdot \Delta t - H)]} \quad i = 1, 2, 3, \dots, \frac{T}{\Delta t} \quad P(0) = 0 \quad (2-2)$$

式中, $P(i)$ 表示到第*i*个时间段为止加载到路网上的交通需求累积百分比, Δt 为每个时间段的持续时间(所有时间段持续时间相同)。

假设可以预测某一地区总的疏散需求量为A,则第*i*个时间段加载到路网中的需求量为:

$$Q(i) = A \cdot [P(i) - P(i-1)] \quad i > 1 \quad (2-3)$$

2.2 交叉口道路选择的启发式搜索算法

启发式搜索就是在状态空间中对每一个候选策略的好坏进行评估,根据所有候选策略的评估值得到最好的策略,再从这个策略出发进行下一步搜索直到目标。在启发式搜索中,对候选策略的估价是十分重要的,可以通过估价函数得到,启发式搜索算法的设计,本质上就是对估价函数的设计^{[11][12]}。

考虑实际应急交通疏散情况,当一个交通实体到达交叉口时,往往有多个路段可以选择。为了尽快疏散到安全区域,人们往往关心的是,如果我选择了某条路段,那么经过这条路段到达目的地的距离长短(越短越好),以及该路段当前的拥挤状况(越不拥挤越好),如果该路段太拥挤了,那么即使到达目的地更近,人们可能也不会选择此路段。

因此,将启发式搜索算法应用到应急交通疏散中^[13],得到如下改进后的估价函数:

$$f(x) = \alpha \cdot g(x) + \beta \cdot h(x) \quad (2-4)$$

式中, x 代表可能存在的候选路段, $f(x)$ 是对候选路段的估价, α 、 β 是决策者对于各因素考虑的权重, 应满足 $\alpha + \beta = 1$ 。对于所有的候选路段, 我们求出从当前交叉口到疏散目的地的 Dijkstra 最短路 $d(x)$, 以及该路段当前的行驶速度 $v(x)$ 。为了避免 $d(x)$ 和 $v(x)$ 因数量级不一致导致大数“吃掉”小数的情况, 需要将其归一化, $g(x)$ 和 $h(x)$ 即为其归一化后的结果。

其中 $d(x)$ 可由 Dijkstra 标准算法^[14] 求出, $v(x)$ 需要用路段阻抗函数模型求出, 其中具有代表性的是美国公路局的 BPR 阻抗函数模型的改进模型^[15]:

$$\frac{v_f}{v(x)} = 1 + J \left(\frac{q}{C - q} \right) \quad q < C \quad (2-5)$$

式中, v_f 为路段自由行驶速度, q 和 C 分别是路段当前流量和最大容量。规定, 当 $q = C$ 时, $v(x) = v_{\min}$, 即路段最小行驶速度。

有了 $d(x)$ 和 $v(x)$, 其归一化值 $g(x)$ 和 $h(x)$ 可由如下方法求得。假设对于当前所有候选路段, $d(x)$ 的最小值和最大值分别为 d_{\min} 和 d_{\max} , $v(x)$ 的最小值和最大值分别为 v_{\min} 和 v_{\max} 。因为启发式搜索算法默认估价函数值越小表示候选方案越好, 所以应有:

$$g(d_{\min}) = 0, \quad g(d_{\max}) = 1, \quad h(v_{\min}) = 1, \quad h(v_{\max}) = 0 \quad (2-6)$$

于是得到如下归一化公式:

$$g(x) = \frac{d(x) - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad h(x) = \frac{v_{\max} - v(x)}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (2-7)$$

结合以上各式, 就可以求出每一候选路段的估价值, 其中估价值最小的即为最优选择。

2.3 交通实体位置更新算法

如图 2-1 所示, 每个交通实体有一个 *position* 属性, 表示该实体在当前所在路段的位置; 每一个路段有一个 *length* 属性, 表示路段的长度。一个时间段开始, 先由 BPR 模型求出交通实体当前行驶速度 v 和路程 $s = v \cdot \Delta t$, 我们需要判断 *position* + s 与 *length* 的大小, 如果 *position* + $s \leq length$, 则直接更新实体的位置为 *position* + s 。否则, 更新实体的位置为 *length*, 表示到达交叉口, 并产生一个转向请求, 同时, 还需要计算实体走到路段交叉口所需的时间 $t_q = (length - position) / v$, 和该时间步剩余时间 $t_r = \Delta t - t_q$; 假设该交通实体经过转向请求处理后, 选择了下一条路段 R_{next} , 它的当前行驶速度为 v_n , 计算 $s_n = v_n \cdot t_r$, 即在路段 *next* 上走完剩余时间的路程; 然后继续判断 s_n 与路段 R_{next} 的长度 l_n 的大小; 如果 $s_n > l_n$, 则重复上一步, 直到 $s_n \leq l_n$; 否则, 更新该实体当前所在路段为 *next*, 当前位置为 s_n , 位置更新完成。此过程用流程图描述如图 2-2 所示。

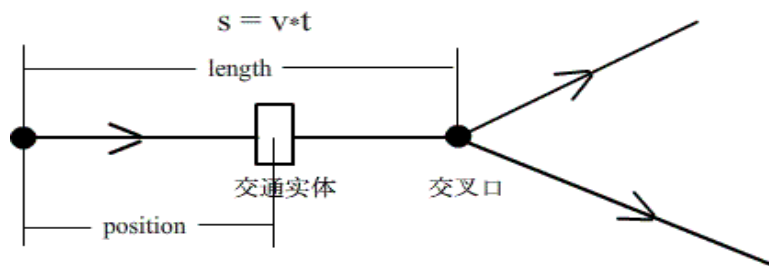


图 2-1 交通实体位置更新示意图

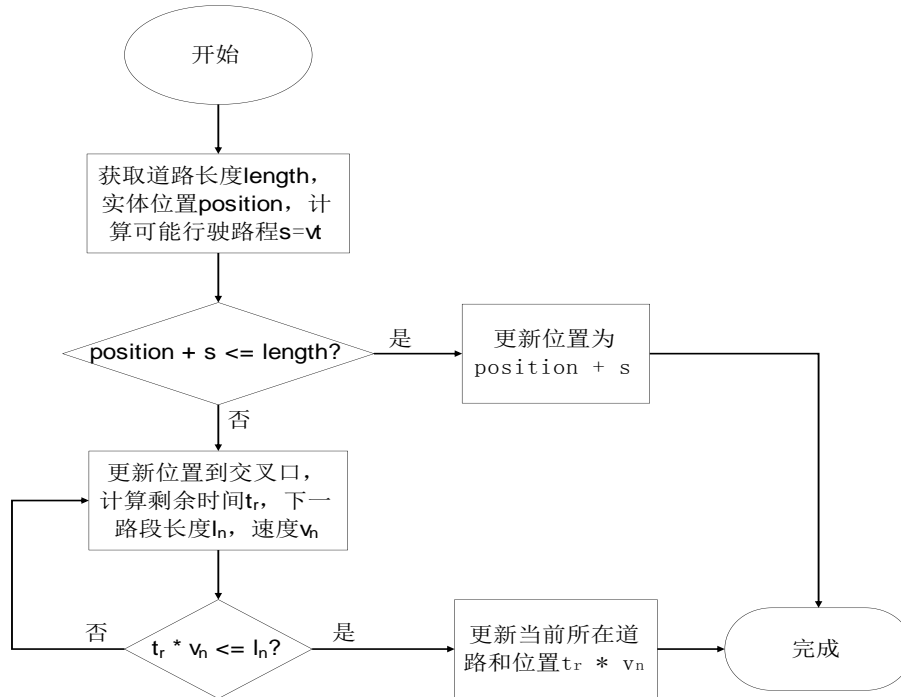


图 2-2 交通实体位置更新算法流程图

至此,本次时间步的所有转向请求都处理完成,交通实体的位置和道路信息也得到更新。接着判断是否所有路段上交通实体数量为 0,如果是,则表示疏散完成,退出;否则,继续进行下一时间步的疏散。

3. 结论

本文在前人研究的基础上,巧妙地提出将数学分析和计算机仿真相结合的方法,很好地解决了应急交通疏散的路径选择和疏散时间估计(即仿真结束时间)等问题,有利于决策者在灾害发生时做出科学、正确的疏散决策,最大限度地保障人民群众的生命财产安全。

本算法模型的优势还在于,各个输入都是参数式的,因此可以通过改变输入参数,获得更多有用的研究数据。例如,可以通过改变需求总量参数研究在不同疏散规模下的平均疏散时间;可以通过修改各个路段的容量,分析疏散时间对各路段容量的敏感性,找到制约疏散速度的关键路段,从而针对此关键路段提出交通管制措施,提高该路段通行能力,加快疏散完成;由于采用了基于 Agent 代理的思想,甚至可以得到每一个交通实体从起始点到终点经过的所有路径,从而分析整体的路径选择情况,做出合理的决策。

除此之外,本文还有许多需要改进的地方。本文用到的计算机仿真是宏观层面上的,作为 Agent 代理的交通实体智能化程度不高,而且没有考虑交通实体之间的相互作用。其次,本文假定路网信息是静态的,没有考虑灾害范围的扩大对疏散路网参数的影响,比如台风或暴雨发生时,随着灾害范围的移动,疏散路网的通行能力必然受到灾害的影响。进一步的研究需要解决以上问题,将其纳入算法的考虑范围之内。

致谢

本论文的研究工作得到国家自然科学基金项目 61174172, 61233001, 60904057, 61203166 的资助。

参考文献:

- [1]. Lewis D C. Transportation planning for hurricane evacuations [J]. ITE Journal, 1985, 55(8): 31-35.
- [2]. Dunn C E, Newton D. Optimal routes in GIS and emergency planning applications [J]. Area, 1992, 24(3): 259-267.
- [3]. Yamada T. A network of approach to a city emergency evacuation planning [J]. International Journal of Systems Science, 1996, 27(10):931-936.
- [4]. Cova T J, Johnson J P, A network flow model for lane-based evacuation routing [J]. Transportation Research Part A, 2003, 37(1): 579-604.
- [5]. Choi W, Hamacher H, Tufekci S. Modeling of building evacuation problems by network flows with side constrains [J]. European Journal of Operational Research, 1988, 35: 98-110.
- [6]. 卢兆明, 林鹏, 黄河潮. 基于 GIS 的都市应急疏散系统[J]. 中国公共安全学术版, 2005, (2): 35-40.
- [7]. Chen X and Zhan B. Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simulations and evacuation strategies [J]. Natural Hazards, 2006, 38: 321-338.
- [8]. Sinuany - Stern Z and Eliahu S. Simulating the evacuation of a small city: the effects of traffic factors [J]. Socio - Economic Planning Sciences, 1993, 2(27): 97-108.
- [9]. Jamei, B. Transportation Actions to Reduce Highway Evacuation Times under Natural Disasters [D]. America: Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. 1984.
- [10]. 韦献兰. 突发公共事件应急交通疏散对策研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [11]. 夏永锋, 曹元大. 启发式搜索算法的面向对象设计实现[J]. 微机发展, 2005, 15(7): 11-13.
- [12]. 罗兵, 李华嵩, 李敬民. 人工智能原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [13]. 闫小勇, 牛学勤. 公交网络多路径选择启发式算法研究[J]. 城市交通, 2005, 3(3): 23-26.
- [14]. 胡运全等. 运筹学基础及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [15]. 王素欣, 王雷, 高利, 崔小光, 陈雪梅. BPR 路阻函数的改进研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, (3):446-449.