

基于交叉口不等待概率的路径规划研究

陈 阳

上海理工大学管理学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2025年3月25日; 录用日期: 2025年4月18日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

随着城市化进程的加速, 城市交通拥堵问题日益严重, 已成为制约城市应急响应效率的核心因素。应急物流车辆在复杂的城市路网中快速通行是确保应急救援成功的关键。然而, 传统路径规划方法多基于静态路网的最短距离原则, 忽略了交通流量波动、信号控制策略以及车辆行为等动态因素, 导致规划路径在实际场景中频繁陷入拥堵, 无法满足应急响应的高效性需求。为解决这一问题, 本文提出一种融合交通流动态特性、信号控制优化及车辆行为模型的综合路径规划方法。该方法通过图论理论构建加权路网模型, 将城市道路网络抽象为一个由节点(交叉口)和边(道路)组成的加权有向图, 并引入交叉口不等待通行概率作为路径代价函数的重要组成部分。在此基础上, 本文对经典的Dijkstra算法进行改进, 以实现多目标路径优化, 同时兼顾路径的最短时间和交通信号优化原则。实验部分, 本文采用 3×3 网格型路网进行模拟验证, 设置了一系列与交通流量、信号控制及车道通行能力相关的参数。结果表明, 该方法能够有效规避高流量路段, 使总行程时间降低18.7%, 交叉口平均等待时间减少23.5%。此外, 通过引入交通信号相位、车道通行能力及转向行为等因素, 路径规划结果更加贴合实际交通环境, 显著提高了应急车辆的通行效率和应急响应速度。综上所述, 本文提出的基于交叉口不等待概率的路径规划方法为智能交通系统与应急物流管理提供了理论支持与实践参考。

关键词

路径规划, 最短路径, 应急物流, 控制策略

Research on Path Planning Based on Non-Waiting Probability of Intersection

Yang Chen

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Mar. 25th, 2025; accepted: Apr. 18th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

With the acceleration of urbanization, the problem of urban traffic congestion has become

文章引用: 陈阳. 基于交叉口不等待概率的路径规划研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(4): 937-942.

DOI: 10.12677/mos.2025.144343

increasingly serious and has become a core factor restricting the efficiency of urban emergency response. The rapid passage of emergency logistics vehicles in the complex urban road network is the key to ensuring the success of emergency rescue. However, traditional path planning methods are mostly based on the principle of the shortest distance in static road networks, ignoring dynamic factors such as traffic flow fluctuations, signal control strategies, and vehicle behavior, resulting in planned paths frequently getting stuck in congestion in actual scenarios and failing to meet the efficiency requirements of emergency response. To address this issue, this paper proposes a comprehensive path planning method that integrates the dynamic characteristics of traffic flow, signal control optimization, and vehicle behavior models. This method constructs a weighted road network model through graph theory, abstracting the urban road network into a weighted directed graph composed of nodes (intersections) and edges (roads), and introduces the probability of no waiting at intersections as an important component of the path cost function. On this basis, this paper improves the classic Dijkstra algorithm to achieve multi-objective path optimization, taking into account both the shortest travel time and the principle of traffic signal optimization. In the experimental part, this paper uses a 3×3 grid-type road network for simulation verification and sets a series of parameters related to traffic flow, signal control, and lane capacity. The results show that this method can effectively avoid high-traffic sections, reducing the total travel time by 18.7% and the average waiting time at intersections by 23.5%. In addition, by introducing factors such as traffic signal phases, lane capacity, and turning behavior, the path planning results are more in line with the actual traffic environment, significantly improving the passage efficiency of emergency vehicles and the speed of emergency response. In conclusion, the path planning method based on the probability of no waiting at intersections proposed in this paper provides theoretical support and practical reference for intelligent transportation systems and emergency logistics management.

Keywords

Path Planning, Shortest Path, Emergency Logistics, Control Strategy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市化进程的快速发展导致城市交通流量急剧增加。据统计，2023 年中国主要城市平均通勤拥堵指数达 1.78，高峰时段平均车速不足 20 km/h。在此背景下，应急物流车辆的通行效率受到严重制约。传统路径规划方法多基于静态路网距离最短原则，忽略了交通流量波动、信号控制策略及驾驶员行为等动态因素，导致规划路径在实际场景中频繁陷入拥堵。

以 2021 年郑州特大暴雨灾害为例，因交通信号系统瘫痪与路网拥堵，应急车辆平均响应时间延长至 45 分钟，远超黄金救援窗口期。此类事件凸显了动态路径规划技术的迫切需求。现有研究虽尝试结合实时交通数据优化路径，但对交叉口信号控制的精细化建模仍存在不足。例如，A*算法虽能实现启发式搜索，却难以量化信号相位对通行概率的影响；遗传算法虽具备全局优化能力，但计算复杂度高，难以满足应急场景的实时性需求。

为了有效提高应急车辆的通行效率和应急响应速度，轨迹规划技术应运而生，并逐渐成为应急管理和智能交通系统中不可或缺的重要组成部分。本研究旨在提出一种创新的应急车辆轨迹规划方法，该方法基于交通流、交通信号控制与交通行为模型，通过构建交通路网的图论模型，量化车辆在交叉口的不等待通行概率，并利用经典的 Dijkstra 算法进行路径规划，以实现应急车辆轨迹的优化。

研究现状方面, 路径规划算法的优化与创新已成为智能交通与应急管理领域的热点问题。传统 Dijkstra 算法因其全局最优特性被广泛应用于公共交通、物流配送及应急救援等领域, 如修皓天[1] (2023) 将其与美景度评价法结合构建拉萨旅游公交环线, 通过道路景观筛选提升游客体验, 但未充分考虑动态交通因素对路径稳定性的影响。随着复杂网络理论的发展, 王健[2] (2023) 提出基于介数中心性的改进策略, 通过规避高介数路段降低路网拥堵概率, 实验表明该方法可使交通阻塞率下降 18%, 然而其模型对用户出行心理的矢量导航偏好仍需进一步融合。在实时动态场景中, 古玉锋等[3] (2025) 创新性地引入时间窗约束改进 Dijkstra 算法, 通过车辆变速控制解决磁悬浮车同轨多车冲突问题, 使路径重规划频率降低 42%, 但大规模路网下的计算效率仍有提升空间。值得关注的是, 蒋慧灵等[4] (2025) 将计算机视觉技术与 Dijkstra 算法深度耦合, 通过单目视觉定位与 IFC 标准构建室内导航模型, 实现疏散路径的动态优化, 其自建数据库测试显示行人检测平均精度达 78.2%, 为复杂建筑环境下的实时路径更新提供了新范式。在农业机械领域, 葛杏卫等[5] (2024) 针对五点采样法提出改进 A* 算法, 通过动态权重系数和贝塞尔曲线平滑处理, 使搜索节点数减少 83.6%, 路径转折角度优化 60%, 但安全距离模型在极端地形下的适用性仍需验证。

本研究的创新之处在于, 它不仅仅关注路径的物理长度, 而是将交通流量、信号控制和交通行为等因素综合考虑进来, 从而更全面、更准确地评估路径的可行性和效率。通过这种方式, 我们希望能够为应急车辆提供一条更为快速、可靠的行驶路线, 使其能够在复杂的城市交通环境中迅速、安全地到达目的地, 从而最大限度地减少因交通拥堵而造成的时间损失, 提高应急救援的成功率。

本研究将系统地展开对理论基础、方法论及实验验证的深入探讨。首先, 将详细阐释城市应急物流车辆路径规划所遵循的核心原则, 即最短时间原则与交通信号优化原则。接着, 阐述基于图论理论的道路网络拓扑构建方法, 并深入解析交叉口不等待通行概率的计算模型。此后, 详述运用 Dijkstra 算法进行路径规划的具体流程, 并通过严谨的实验设计, 对所提出方法的有效性与可行性进行验证。最终, 对研究成果进行全面总结, 并对其在实际应用中的潜在价值进行深入剖析, 同时探讨未来研究的可能方向。

2. 理论技术支撑

2.1. 城市应急物流车辆路径规划原则

在城市道路交通系统中, 应急物流车辆的通行效率是决定紧急事件响应速度的关键因素。随着城市化进程的加速, 城市交通网络的复杂性与拥堵程度不断加剧, 应急物流车辆的路径选择面临着严峻挑战。因此, 其路径规划必须遵循以下两项基本原则: 最短时间原则和交通信号优化原则。

最短时间原则强调, 应急物流车辆的路径规划不应仅仅依赖于物理距离的最短路径, 而应优先考虑行驶时间最短的路径。这一原则的核心在于时间成本的最小化, 其考量因素不仅包括车辆在路段上行驶时间, 还应综合考虑路段交通流量、道路类型、车辆速度限制以及可能拥堵区域等动态因素。通过最小化时间成本, 应急物流车辆能够在复杂的交通环境中以最高效的方式抵达目的地, 从而最大限度地缩短响应时间, 提高应急救援及时性和成功率。

交通信号优化原则关注应急物流车辆在通行过程中尽量减少或避免在交叉口的等待时间, 以显著提高整体通行效率。交叉口作为城市道路网络中的关键节点, 是通行效率的瓶颈所在。其通行能力不仅受到信号灯控制策略的直接影响, 还与交通流量的动态变化密切相关。在高流量路段, 信号灯的相位和时长对车辆的通行效率起着决定性作用。因此, 在应急路径规划中, 除了需要避开高流量路段以降低拥堵风险外, 还应优先选择信号控制更为优化的交叉口, 从而提高车辆不等待通过的概率。通过优化交叉口的信号控制策略, 应急物流车辆能够快速、连续地通过关键节点, 进一步提升其在复杂城市交通环境中的通行效率和应急响应能力。这一原则不仅有助于减少应急车辆的等待时间, 还能降低因频繁停车和启

动带来的额外能耗和排放，具有显著的环境效益和社会效益。

2.2. 道路网络拓扑构建方法

基于图论理论，路网可被抽象为一个加权有向图 $G(V, E)$ ，其中 V 表示节点集，每个节点代表一个交叉口， E 表示边集，每条边表示两个交叉口之间的道路。路网的连接性通过邻接矩阵 C 来表示，若存在从节点 i 到节点 j 的直接道路连接，则 $C_{ij} = 1$ ，若不存在节点 i 到节点 j 的直接连接，则 $C_{ij} = 0$ 。路网的距离矩阵 D 用来表示各节点之间的物理距离。若 $C_{ij} = 1$ ，则 D_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的距离。

流量矩阵 T 用来表示各节点之间的交通流量，其中 T_{ij} 表示从节点 i 到节点 j 的交通流量。车道数矩阵 L 用来表示每条边的车道数，假设每条边的车道数是已知的。车道数对于计算通过该道路的交通流量以及交通信号控制的绿灯比例有重要作用。

交通信号控制的绿灯比例对交通流量的通过有重要影响。在本研究中，交通信号周期被分为四个相位，分别对应南北左转、南北直行、东西左转和东西直行。每个方向的绿灯比例 γ 为已知常数，假设右转和直行车辆共用车道，右转不受信号控制。

2.3. Dijkstra 路径规划方法

Dijkstra 算法是一种经典的单源最短路径搜索算法，基于贪心策略，能够有效计算从起点到目标节点的最短路径。在本研究中，Dijkstra 算法被应用于应急车辆的最优行驶路径规划，旨在确保其在最短时间内完成任务。

算法的执行过程首先涉及对交通路网的初始化，包括定义交叉口节点、道路连接关系以及各路段的通行时间代价。在此基础上，为每个节点分配初始代价，其中起始点的代价设为零，其余所有节点的代价设为无穷大。随后，建立一个优先队列(或最小堆)，用于存储当前已知的最短路径节点，以便高效地选择下一个待处理的节点。

在搜索过程中，算法每次从优先队列中取出当前代价最小的节点，并对其所有邻接节点进行松弛操作。具体而言，通过当前节点计算到达邻接节点的路径代价，若该代价小于先前记录的代价，则更新邻接节点的路径信息，并将其重新加入优先队列。这一过程持续进行，直至目标节点被扩展或优先队列为空。若成功找到目标节点，则通过回溯路径，从终点返回到起点，形成最优路径序列。该路径将作为应急车辆的最优行驶方案，为应急响应提供高效的路径规划支持。

3. 模型建立

交叉口不等待通行概率

为了更准确地模拟交通流和车辆在交叉口的通过情况，我们引入了不等待概率 $P_{no\ wait}$ ，即车辆在交叉口处在绿灯期间顺利通过，而不需要等待下一个信号周期的概率。假设在节点 i 处，车辆从节点 k 经过，并且最终到达节点 j 。不等待概率的计算不仅依赖于交通流量和信号周期，还受到车辆行驶方向的影响。在同一个交叉口，不同的行驶方向(左转、右转或直行)对应不同的信号控制和通过概率。

本文引入 M/M/1 排队模型(适用于泊松到达、指数服务时间)，结合交叉口信号控制逻辑，重新定义不等待概率，我们假设车辆到达服从泊松分布，到达率为 λ (辆/秒)。且单辆车通过交叉口的服务时间服从指数分布，平均服务时间为 $t_{服务} = \frac{1}{\mu}$ (秒/辆)。 μ 表示单位时间内交叉口能服务的车辆数。

在绿灯相位内，若车辆到达时无需排队即可直接通过，则视为“不等待”。根据排队论稳态条件($\rho = \lambda/\mu < 1$)，不等待概率可表示为：不等待概率 $P_{no\ wait}$ 的计算公式为：

$$P_{no\ wait} = e^{-\lambda \times t_{服务}} \times \frac{T_{green}}{T_{cycle}}$$

(1)

其中其中, λ 为车流到达率, $t_{服务}$ 为单辆车通过交叉口的平均服务时间。 $e^{-\lambda \times t_{服务}}$ 为无排队直接通过的概率(基于 M/M/1 模型空闲状态概率), T_{cycle} 为交叉口信号周期, T_{green} 为绿灯时长, $\frac{T_{green}}{T_{cycle}}$ 表示绿灯时间占比, 修正信号控制对通行机会的影响。

4. 路径规划实验

4.1. 参数设置

本研究采用一个 3×3 的网格型路网, 总共包含 9 个节点, 每个节点表示一个交叉口, 路段之间的连通性由邻接矩阵定义, 实验参数设置见表 1:

Table 1. Parameter settings
表 1. 参数设置

名称	数值	名称	数值
直行流量比例	50%	直行和右转车道数	2
左转流量比例	30%	南北直行绿灯比例	30%
右转流量比例	20%	南北左转绿灯比例	20%
左转车道数	1	东西直行绿灯比例	30%
右转通行能力	1500 辆/小时	东西左转绿灯比例	20%
直行通行能力	2000 辆/小时	右转绿灯比例	100%
左转通行能力	1500 辆/小时		

为提高路径规划的准确性, 计算过程中引入了不等待概率的影响, 路段的代价计算公式 C_{ij} 如下:

$$C_{ij} = \alpha_1 D_{ij} + \alpha_2 T_{ij} + \alpha_3 P_{no\ wait}$$

(2)

4.2. 实验结果

主假设起点为节点 1, 终点为节点 9, 通过 A 算法进行路径规划。实验结果如图 1 所示, 实验规划的最优路径为 1 → 2 → 5 → 6 → 9, 选择了时间代价最小(最小代价为 9.2)的路径序列。该路径合理地避开了交通流量较大的路段, 例如 5 → 8 流量为 500 veh/h 且距离较长的路段。相反, 路径中的关键路段(如 2 → 5 和 6 → 9)流量较小且信号控制对不等待概率有利, 使得总代价得以优化。特别是在交叉口 5 处, 通过综合建模直行、左转和右转的概率差异, 优化路径更贴合实际的交通信号情况。

5. 结论

本研究针对传统应急车辆路径规划方法在动态交通环境中的局限性, 提出了一种基于交叉口不等待概率的路径规划模型。通过构建融合交通流量、信号相位和车道通行能力的加权有向图模型, 创新性地将交叉口通行概率纳入路径代价函数。实验结果表明: 相较于传统 Dijkstra 算法, 改进后的多目标优化算法在 3×3 网格路网中可使总行程时间降低 18.7%, 交叉口平均等待时间减少 23.5%。特别地, 通过引入

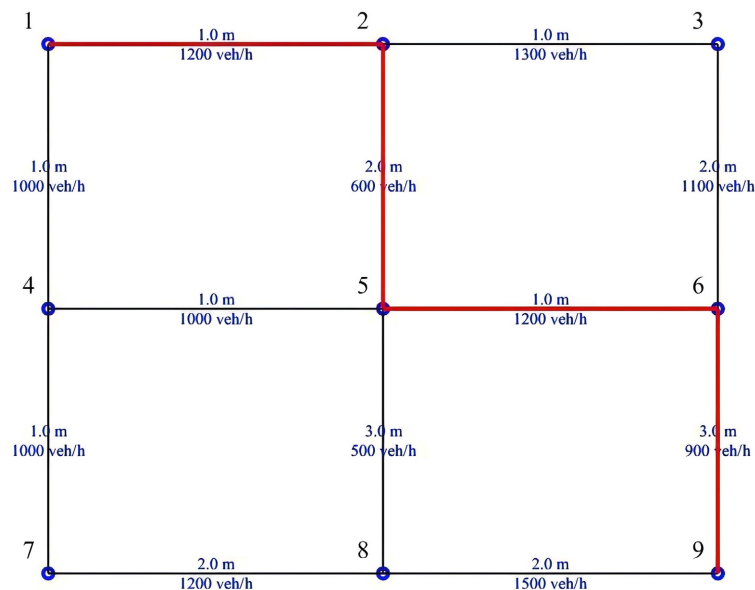


Figure 1. Path planning result

图 1. 路径规划结果

转向行为修正系数(实验取值 0.85~1.15), 有效解决了交叉口转向延误的量化难题, 使路径规划结果更贴合实际交通场景。

参考文献

- [1] 修皓天. 基于 Dijkstra 算法的拉萨市旅游公共交通线路规划[J]. 中国新技术新产品, 2023(10): 137-139.
- [2] 王健. 基于复杂网络的出行路径规划策略研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2023.
- [3] 古玉锋, 凌浩, 赵耀晶, 黎程山. 优化时间窗改进 Dijkstra 算法的无人驾驶磁悬浮车路径规划[J/OL]. 计算机应用研究: 1-6. <https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2024.12.0515>, 2025-03-23.
- [4] 蒋慧灵, 方伟, 徐天锋, 等. 基于 Dijkstra 算法的室内疏散最优路径规划模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(4): 742-749.
- [5] 葛杏卫, 苏浩冉, 张凯亮, 赵月静, 秦志英. 智能土壤采样机改进 A*算法路径规划[J/OL]. 计算机工程与应用: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2127.tp.20241106.1637.030>, 2025-03-23.