

文章编号: 1002-0268 (2009) 08-0135-05

应急车辆出行前救援路径 选择的多目标规划模型

刘 杨¹, 云美萍², 彭国雄²

(1. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092;

2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对城市中应急车辆的救援路径优化问题, 分析了基于交通信息中心的应急车辆最优路径的多目标属性, 给出了随机网络中各属性的量化计算方法, 以最小化出行时间, 最大化行程时间可靠度为目标, 考虑了通行可靠性、安全性、道路条件限制等因素, 建立了应急车辆出行前最优路径选择的多目标规划模型。模型所求得解是综合最优路径, 反映了应急车辆路径选择的目标需求, 克服了以往直接等同于图论中最短路径的缺陷, 给出了算法, 通过算例验证了模型的合理性和有效性。

关键词: 交通工程; 综合最优路径; 多目标规划; 应急车辆

中图分类号: U491

文献标识码: A

A Multi-objective Programming Model of Route Choice of Emergency Vehicles before Travel

LIU Yang¹, YUN Meiping², PENG Guoxiong²

(1. School of Architecture & Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To the route optimization of emergency vehicles in cities, a multi-objective programming model of optimal route choice with minimum travel time and maximum reliability was established. With consideration of the factors such as the capacity reliability, safety and road condition, the model displays the quantitative numeration of attributes in random network based on the analysis of the multi-objective attribute of the optimization of route choice problem of emergency vehicles in urban traffic information center. The model results in a comprehensive optimal route which can reflect the diversity feature of information demand for emergency vehicles. The disadvantage which the optimal path was always simplified to the shortest path problem was overcome. The solution algorithm was proposed. The rationality and validity of the model is demonstrated by one example.

Key words: traffic engineering; comprehensive optimal route; multi-objective programming; emergency vehicle

0 引言

应急车辆 (Emergency Vehicle) 主要包括警车、消防车、救护车、工程抢险车等执行应急救援服务的车辆, 它们是重要的城市应急服务资源。应急车辆的

路径优化可以在很大程度上减少应急车辆的行程时间和避免对其他车辆的干扰, 同时提高车辆的救援速度。

对于应急车辆的路径优化方法, 在以往的研究中都是直接等同于图论中的最短路径算法, 如 Dijk-

收稿日期: 2008-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70501023)

作者简介: 刘杨 (1978-), 男, 江苏涟水人, 工学博士, 博士后, 研究方向为交通安全和防灾. (liuyangis@126.com)

stra 算法^[1-2], A* 算法^[3], 以及启发式算法^[4-5]。

随着 ITS 技术的发展, 城市综合交通信息中心可以把实时的道路交通信息集成到紧急事件管理中心。本文在此背景下, 研究基于交通信息中心的应急车辆最优路径选择的多目标规划模型, 为应急车辆提供最优路径选择的参考和支持。

由于应急车辆的出行时间一般较短, 而交通流预测有一定的周期, 并往往超过了应急车辆的出行时间, 因此, 本文将重点放在应急车辆出行前的路径优化上。

1 符号定义

本论文中的符号定义如下: A 为城市交通网络中路段 a 的集合; R 为起始点集合; S 为终点集合; r 代表一个起始点, $r \in R$; s 代表一个终点, $s \in S$; K_{rs} 为连接 OD 对 $r-s$ 的所有出行路径集合; K_{rs}^l 为满足道路条件限制的连接 OD 对 $r-s$ 的出行路径集合; k 为连接 OD 对 $r-s$ 的一个出行路径; $\delta_{a,k}^s$ 为 0-1 变量, 如果路段 a 在连接 OD 对 $r-s$ 的第 k 条路径上, 其值为 1, 否则为 0; t_k 为应急车辆出行后获得的第 k 条路径上实际的行程时间; $t_{k,1}$ 为根据历史交通信息预测的连接 OD 对 $r-s$ 的第 k 条路径的行程时间, 是随机变量; $t_{k,2}$ 为根据历史交通信息和实时交通信息预测的 OD 对 $r-s$ 的第 k 条路径的行程时间, 由行程时间 $t_{k,1}$ 和误差 $\alpha_{k,2}$ 组成; $\mu_{k,1}$ 为根据历史交通信息预测的连接 OD 对 $r-s$ 的第 k 条路径的行程时间分布的均值; $\tau_{k,1}$ 为根据历史交通信息预测的连接 OD 对 $r-s$ 的第 k 条路径的行程时间分布的方差; P_k 为连接 OD 对 $r-s$ 的第 k 条路径的通行可靠度; r_a 为路段 a 通行的概率; r_k 为第 k 条路径的行程时间可靠度; SI_k 为路径 k 的安全度; T_0^y 为 y 等级事件对应的最大反应时间; SI_{m_k} 为路径 k 经过的交叉口的安全度; m_k 为路径 k 经过的交叉口数量; C_n 为平行、垂直、反向交通、信息复杂对应的冲突指数; N 为应急车辆平均乘坐人数。

2 路径选择的多目标规划模型

2.1 最优路径属性分析

应急车辆的路径选择的特点和常规车辆有一定的区别, 应急车辆出行的目的是为了到达现场进行救援活动, 在以往的研究中, 一般认为快速性是出行的唯一属性。应急车辆路径选择的属性包括快速性、安全性、可靠性, 如图 1 所示。根据 SP 调查, 应急车辆路径选择的属性包括快速性、安全性、可靠性^[6]。

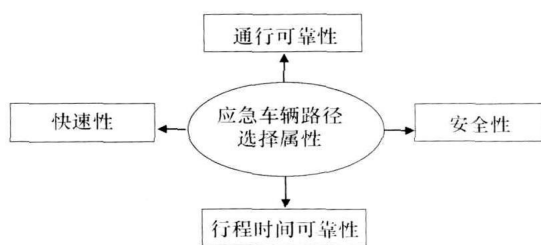


图 1 应急车辆路径选择的属性

Fig. 1 The attribute of the route choice of emergency vehicle

2.2 目标函数的确定

(1) 行程时间可靠性

在进行应急车辆的路径优化时, 行程时间的预测是基于历史数据、实时数据两方面的信息。本文采用随机交通网络模型来描述道路网中的运行状态。将历史数据作为先验信息, 把实时数据作为后验信息, 得出行程时间的预测过程。

结合贝叶斯的分析方法, 如果把根据历史数据得出的行程时间作为先验信息, 把预测的行程时间作为后验信息, 则构成了贝叶斯分析过程^[7]。

贝叶斯分析过程在选择项为无限的情况下的计算是较为困难的, 从理论上来说, 应急车辆的可以选择的路径是无限的, 但是在现实中, 应急车辆的出行路径是一个有限路径的集合, 因此可以采用贝叶斯分析方法进行研究。

应急车辆行程时间的可靠性定义为应急车辆出行的时间不超过某一规定值 T_0^y , 根据贝叶斯分析, $t_{k,2}$ 服从均值为 $\mu_{k,1}$, 方差 $\phi_{k,2} = \sqrt{\sigma_{k,2}^2 + \tau_{k,1}^2}$ 的正态分布, $r-s$ 的第 k 条路径的行程时间预测值 $t_{k,2}$ 的可靠度可以定义为式(1):

$$r_k = \Pr(t_{k,2} < T_0^y) = \Phi\left(\frac{T_0^y - \mu_{k,1}}{\phi_{k,2}}\right) = \Phi\left(\frac{T_0^y - \mu_{k,1}}{\sqrt{\sigma_{k,2}^2 + \tau_{k,1}^2}}\right). \quad (1)$$

假定通过应急车辆的出行可以获得第 k 条路径上实际的行程时间, 记为 t_k , 通过更新后, 相应的行程时间可靠性可以表示式(2):

$$r'_k = \Pr(t'_{k,2} < T_0^y) = \Phi\left(\frac{T_0^y - \mu'_{k,2}}{\phi'_{k,2}}\right). \quad (2)$$

(2) 通行可靠性

本文定义的应急车辆的通行可靠性可以表示为: 在规定的时间内, 规定的条件下, 路网单元能够使得应急车辆通行的可能性, 其概率测度为通行可靠度。

OD 对 $r-s$ 的第 k 条路径的通行可靠度可以表示为式(3):

$$P_k = \prod r_a \delta_{a,k}^s. \tag{3}$$

(3) 路径安全性

应急车辆在出行过程中的安全性也是路径优化必须考虑的方面。

从事故发生的原因看, 交叉口发生的冲突是主要

原因。尽管应急车辆不受交通信号的限制通过交叉口, 但是却留下发生事故的隐患。图 2 表示通过无信号控制交叉口应急车辆产生的冲突。从图中可以看出, 应急车辆的行驶方向和相冲突的交通流量是影响应急车辆通过交叉口的主要因素。

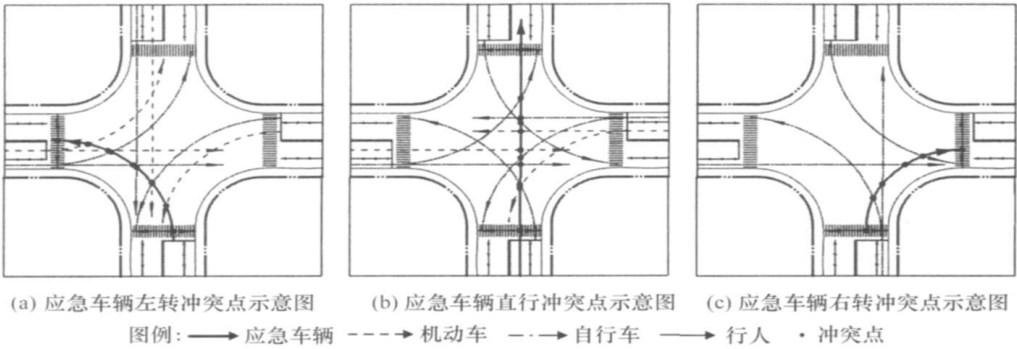


图 2 应急车辆和常规车辆冲突示意图

Fig 2 The conflict in intersection of emergency vehicle with other vehicles

由于以事故为基础的直接评价法很难实现, 采用非事故间接评价法来进行。路径 k 通过 m_k 个交叉口, 路径 k 的安全度表示为式(4)^[8-9]:

$$SI_k = \sum_{m_k} SI_{m_k} = N \sum_{m_k} \sum_n CI_n. \tag{4}$$

2.3 模型的建立

基于城市交通信息中心的应急车辆出行前最优路径的确定是受多种因素的影响, 是多因素联合作用下的结果。应急车辆在出行前最优路径的选择准则方面表现出多目标性以及多属性的特点, 因此出行前最优路径的选择是一个对于上述多目标进行优化的问题。建立的应急车辆出行前救援路径优化模型见式(5):

$$\begin{cases} G = \begin{cases} \max: (T_0^Y - \mu_{k,1})x_k, \\ \max: r_k x_k, \\ P_k \geq \alpha_{\min}, \\ SI_k \geq SI_{\min}, \end{cases} \\ \text{s. t. :} \begin{cases} x_k \in \{0, 1\}, \\ k \in K_{rs}^l, \end{cases} \end{cases} \tag{5}$$

式中, $SI_{\min}$ 为最小安全度; $\alpha_{\min}$ 为最小通行可靠度; $x_k = 1$ 或 0, 当选择路径 k 时为 1, 否则为 0。

对于常规车辆, 出行前路径选择的子目标一般包括路径理解阻抗的最小化、路径行驶距离最小化、路径拥挤程度最小化等^[10]。而应急车辆出行是为了到达事件现场进行救援活动, 出行路径优化的目标函数选择为最小化出行时间, 最大化行程时间可靠度。约束(1) 式是路径的通行可靠性约束; 约束(2) 式是路径的安全性约束; 约束(3) 式保证决策变量 x_k 是

0- 1 变量; 约束(4) 式保证优化路径集满足道路条件的限制。

3 模型求解算法

应急车辆出行前救援路径优化方法的逻辑框图如图 3 所示。

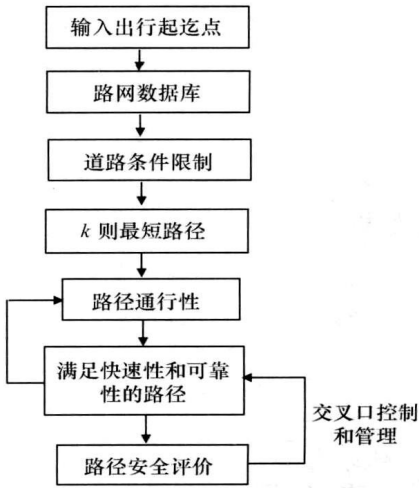


图 3 路径优化逻辑流程框图

Fig 3 Flow chart of the optimization of route choice

在实际路径优化中, 不可能只选择一条最优路径, 在路径优化中往往需要找出多条优化路径, 因此需要运用 k 则路径规划算法。路径优化方法的求解顺序如下所示:

(1) 确定合理路径

应急车辆行驶中道路方面的限制主要有: ①荷载

的要求。如果应急车辆对路面产生的荷载超过了交通设施的最大荷载的限制，会引起交通设施的破坏。尤其是在桥梁、隧道等交通控制点中；②净高的要求。应急车辆的高度不能超过桥梁、架空线、交通标志牌、树木、路灯等对道路净高引起的限制；③宽度的要求。所选择的路径的宽度应该大于应急车辆的宽度，使得车辆能够通行；④转弯半径的要求。应急车辆的最小转弯半径需要小于所选择的需要转向的交叉口的转弯半径。

应急车辆所选择的路径必须满足这些道路条件的限制，本文称满足这些条件的路径为合理路径。删去道路条件不满足要求的路段，重新生成路网拓扑图。在此基础上，生成 k 则最短路径。

(2) 路径通行性

根据生成的 k 则最短路径，计算路径通行性，删去通行可靠性不满足要求的路径，对 k 则最短路径进行更新。

(3) 路径快速性和可靠性

比较各路径的行程时间均值和可靠度，选择可靠度高，均值小的路径，得到备选路径。

(4) 路径安全性

对路径可靠性和快速性满足要求的路径计算安全度，进行安全评价。

(5) 交叉口控制和管理

如果没有满足行程时间可靠性和安全性的路径，则需要通过交叉口控制和管理对路径进行改善。

4 算例

出行起始点为 1，出行终点为 20，路网拓扑结构如图 4 所示，路网特征数据如表 1 所示。

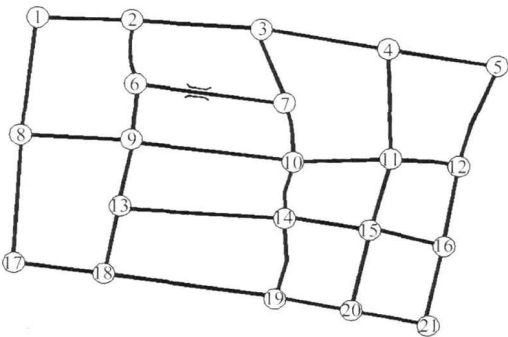


图 4 路网拓扑结构

Fig 4 The topology structure of road network

路段 6- 7、13- 14、14- 15、15- 16 的宽度小于车辆通行宽度。

表 1 路段特征数据表

Tab 1 Characteristics of the road network

交叉口	交叉口	车行道宽度/m	通行可靠度	预测行程时间分布
1	2	6	0.8	[5,2]
1	8	6	0.8	[5,2]
2	3	6	0.8	[6,3]
2	6	6	0.7	[3,2]
3	4	6	0.8	[5,1]
3	7	6	0.9	[2,3]
4	5	6	0.9	[4,2]
4	11	6	0.8	[6,3]
5	12	6	0.7	[6,3]
6	9	6	0.8	[4,3]
7	10	3	0.7	[6,2]
8	9	6	0.8	[5,3]
8	17	6	0.9	[6,3]
9	10	6	0.6	[5,2]
9	13	6	0.8	[6,1]
10	11	6	0.7	[6,1]
10	14	6	0.9	[2,0]
11	12	6	0.8	[4,3]
11	15	6	0.7	[2,1]
12	16	6	0.8	[4,1]
13	18	6	0.9	[1,2]
14	19	6	0.9	[5,0]
15	20	6	0.8	[3,1]
16	21	6	0.9	[4,3]
17	18	6	0.8	[5,0]
18	19	3	0.8	[7,0]
19	20	6	0.8	[5,2]
20	21	3	0.7	[4,1]

(1) 确定合理路径

删去宽度不满足要求的路段，重新生成路网拓扑图，如图 5 所示。在此基础上，生成 k 则时间最短路径，见表 2。

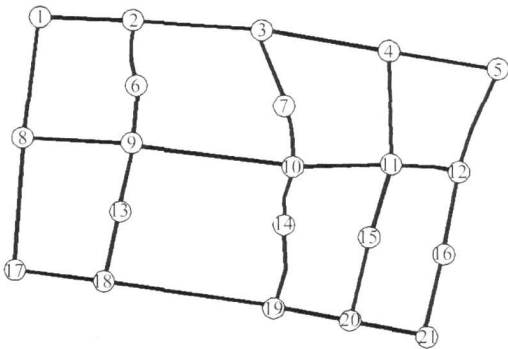


图 5 合理路径路网拓扑图

Fig 5 The topology structure of the rational road network

表 2 备选路径表 (1)

Tab 2 The detail of links in scheme (1)

序号	路径	连通性
1	1- 2- 3- 4- 11- 15- 20	0.23
2	1- 8- 17- 18- 19- 20	0.37
3	1- 2- 6- 9- 10- 14- 19- 20	0.17

(2) 路径连通性

根据生成的 k 条最短路径，计算路径连通性，删去连通可靠性不满足要求的路径。对 k 条最短路径

径进行更新, 见表 3。

表 3 备选路径表 (2)

Tab 3 The detail of links in scheme (2)

序号	路径	通行性
1	1- 2- 3- 4- 11- 15- 20	0.23
2	1- 8- 17- 18- 19- 20	0.37

(3) 路径快速性和可靠性

比较各路径的行程时间均值和可靠度, 选择可靠度高, 均值小的路径。得到备选路径, 见表 4。

表 4 备选路径表 (3)

Tab 4 The detail of links in scheme (3)

序号	路径	行程时间/min	行程时间可靠度/%
1	1- 2- 3- 4- 11- 15- 20	27	82
2	1- 8- 17- 18- 19- 20	28	78

(4) 路径安全性

对路径计算各交叉口的安全指数, 进行安全评价, 得到优化路径: 1- 2- 3- 4- 11- 15- 20, 见表 5。

表 5 备选路径安全性评价表

Tab 5 The safety evaluation of selected links

序号	路径	交叉口安全度
1	1- 2- 3- 4- 11- 15- 20	84.5
2	1- 8- 17- 18- 19- 20	78.5

5 结论

(1) 救援路径的优化问题在以往的研究大都简化为图论中的最短路径算法。

(2) 论文通过实际调查, 得出应急车辆救援路径优化的属性: 通行性、快速性、可靠性、安全性, 并分析了道路条件对路径的限制。

(3) 在中心导行式的路径决策背景下, 对随机网络中应急车辆的 4 个属性进行量化计算。

(4) 以快速性和可靠性为目标, 建立了出行前路径优化模型, 并给出计算方法, 为应急车辆的出行提供参考依据。

(5) 应结合实际对模型参数做进一步的标定。

参考文献:
References:

[1] 朱霁平, 苟永华, 廖光煊. 城市火灾扑救调度最佳路径分析 [J] . 火灾科学, 2002, 11 (4): 201- 205.
ZHU Jiping, GOU Yonghua, LIAO Guangxuan. Optimal Path of Dispatch in Urban Fire Fighting [J] . Fire Safety Science, 2002, 11 (4): 201- 205.
[2] 任少云. 消防车辆出动的最短路线优化算法 [J] . 灭火指挥与救援, 2005, 24 (5): 629- 630.

REN Shaoyun. Optimizing the Short Path Algorithm on Steering Vehicle of Fire Fighting [J] . Fire Science and Technology, 2005, 24 (5): 629- 630.
[3] 臧华. 城市快速道路交通异常事件管理系统救援资源的分布及最佳救援路径确定问题的研究 [D] . 上海: 同济大学, 2004.
ZANG Hua. A Study on Location of Service Facility and Routing of Response Units in Incident Management of Urban Expressway [D] . Shanghai: Tongji University, 2004.
[4] 谢红薇, 张晓波, 袁占花, 等. 基于遗传算法求解应急决策系统中的最优路径 [J] . 计算机应用, 2005, 25 (4): 737- 738.
XIE Hongwei, ZHANG Xiaobo, YUAN Zhanhua, et al. Best Path Analysis of Emergency Decision System Based on Improved Genetic Algorithm [J] . Computer Applications, 2005, 25 (4): 737- 738.
[5] 陈壁峰, 陆昊娟, 黄樟灿. 车辆导航系统的动态最优路径搜索模型及算法 [J] . 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2002, 24 (3): 46- 48.
CHEN Bifeng, LU Haojuan, HUANG Zhangcan. A Model and Its Algorithm to Search the Best Route in a Vehicle Navigation System [J] . Journal of WUT: Information & Management Engineering, 2002, 24 (3): 46- 48.
[6] 彭国雄, 刘杨, 沈海州, 等. 上海市高层建筑火灾应急救援方案研究 [R] . 上海: 同济大学, 2005.
PENG Guoxiong, LIU Yang, SHEN Haizhou, et al. Study on Shanghai High-rise Building Fire Rescue [R] . Shanghai: Tongji University, 2005.
[7] [美] BERGER J O, 著. 统计决策论及贝叶斯分析 [M] . 贾乃光, 译. 北京: 中国统计出版社, 1998.
BERGER J O. Statistical Decision Theory And Bayesian Analysis [M] . JIA Naiguang, translated. Beijing: China Statistics Press, 1998.
[8] LOUISELL C, COLLURA J, TEODOROVIC D. A Simple Worksheet Method to Evaluate Emergency Vehicle Preemption and the Impacts on Safety [C] //TRB (Annual Meeting CD-ROM) . 2004.
[9] LOUISELL C, COLLURA J, TIGOR S. A Proposed Method to Evaluate Emergency Vehicle Preemption and the Impacts on Safety: A Field Study in Northern Virginia [C] //TRB (Annual Meeting CD-ROM) . 2003.
[10] 宗传苓, 李相勇, 王英涛. 出行前路径选择的多目标规划模型 [J] . 交通运输系统工程与信息, 2005, 5 (6): 58- 61.
ZONG Chuanling, LI Xiangyong, WANG Yingtao. A Multi-objective Programming Model of Route Choice before Travel [J] . Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5 (6): 58- 61.