

高速公路通道路网交通诱导决策模型

王晓飞¹ 李新伟^{1,2} 刘立能¹ 杜锦涛¹

(¹ 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641)

(² 广州市高速公路有限公司, 广州 510288)

摘要:为解决灾变事件发生时一条最优路径和多条可绕行路径的决策问题,应用图论及最优化理论相关方法构建模型.以通道路网为研究对象、实时安全可靠度为基本约束条件,采用图论相关方法研究了诱导起终点间通路求解方法.应用最优化理论建立运营安全最优路径决策模型,并采用 Dijkstra 算法求解最优路径.在解决最优路径的基础上,引入重复度的概念及相应算法,研究其他可绕行路径的决策模型.针对高速公路通道路网,构建了灾变事件下的交通诱导决策模型,解决综合考虑安全、行程时间和通行需求的路径决策.结果表明,图论方法能求解任意起终点间的所有通路,Dijkstra 算法能求解最优路径,应用重复度算法可寻求其他可绕行路径以满足灾变事件下的绕行需求.

关键词:高速公路;通道路网;运营安全;行程时间;路径决策

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0505(2016)03-0641-05

Traffic route guidance decision-making model for freeway corridor

Wang Xiaofei¹ Li Xinwei^{1,2} Liu Lineng¹ Du Jintao¹

(¹ School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

(² Guangzhou Expressway Co., Ltd., Guangzhou 510288, China)

Abstract: To decide an optimal route and several alternate routes under disastrous conditions, a guidance decision-making model is proposed based on the graph theory and the optimization theory. Taking freeway corridor as the research object and real-time safety reliability as the basic constraint condition, the solution method for connected routes between the initial point and the ending point is studied by using the graph theory. The optimal route decision-making model based on safety is built by the optimization theory and the optimized route is solved by the Dijkstra algorithm. On the basis of the optimized route, the conception of multiplicity and the corresponding algorithm are introduced to study the models of other alternate routes. Aimed at the freeway corridor, the traffic route guidance decision-making model under disastrous conditions is proposed to solve the route decision taking safety, travel time, and traffic demand into consideration comprehensively. The results show that all connected routes between the initial point and the ending point can be solved by the graph arithmetic and the optimized route can be solved by the Dijkstra algorithm. Furthermore, other alternative routes can be solved by the multiplicity algorithm to satisfy route requirements under disastrous conditions.

Key words: freeway; corridor; operation safety; travel time; route decision

经过 30 多年的发展,我国公路路网基本形成,很多省份的公路网整体功能和技术水平已接近发达国家,但与此不匹配的道路管理水平尚不能自如

地应对灾变事件.2008 年春运期间,我国发生了严重的雪灾,在较大范围内造成交通拥堵以及一系列损失惨重的交通事故,由于没有完善的管理对策,

收稿日期:2015-06-01. 作者简介:王晓飞(1980—),女,博士,讲师,xiaofeiw@scut.edu.cn.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278202,51408229)、广东省交通运输厅科技资助项目(2013-02-068,2015-02-003,2015-02-004).

引用本文:王晓飞,李新伟,刘立能,等.高速公路通道路网交通诱导决策模型[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(3):641-645.

DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2016.03.031.

部分高速公路只能采取关闭措施^[1]. 为了有效利用现有公路网资源、保障高速公路的运营安全及充分发挥现有公路设施整体效能,需要适时、超前地研究基于路网的运营安全管理问题.

交通诱导系统是智能交通系统的重要子系统之一^[2]. 诱导系统的核心理论是建立科学有效的诱导决策模型. 目前,相关学者在动态路径诱导方面研究较多,但绝大多数都只给出了一条最优路径^[3-7],单条最优路径模型能满足非灾变条件下道路用户的要求. 但对于道路管理者而言,发生灾变事件时,需要为事件影响范围内的交通流制定管理对策,提供足够多的疏散路径. 因此,研究通道路网的多条疏散路径确定方法已成为该领域的发展趋势. 此外,绝大多数的研究关注于行程时间最优,将实时运营安全作为最优化模型或基本约束条件的相关文献则较少.

基于此,本文以灾变事件下高速公路所处的局域路网为对象,从通道路网角度出发,以运营安全为基本约束条件,行车时间最短为决策依据,进行多条疏散路径决策研究,以满足安全通行要求,真正发挥路网的整体效率.

1 建模基础

1.1 通道路网

本文研究的通道路网由高速公路主线、邻近若干并行的其他等级道路以及相互间的连接线组成. 路网中某高速公路并行线主要为路段范围内事件处理的绕行路线,作为并行线的其他等级道路应具有一定的通行能力和服务水平,并且与该高速公路相距不能太远. 绕行线路不能随意确定,应根据一定的指标进行择优选用. 采用关联度的方法,对高速公路的邻近道路进行关联度评价,然后根据关联度大小排序,将关联度较大的道路作为该高速公路的并行辅助线^[8].

随着路网的确定,路网节点也随之确定. 其中,

$$a(i,t,m,n) = \frac{V^2(i,t,m,n)}{2H(i,t,m,n) + V^2(i,t,m,n)/a_c - 2V(i,t,m,n)T(i,t) - 2L_{safe}}$$

式中, $V(i,t,m,n)$, $H(i,t,m,n)$ 分别为管理单元 i 在车道 m 处布设的第 n 个车辆检测器于 t 时刻的行驶速度和至车头的间距; a_c 为紧急制动减速度,根据紧急情况,一般取 $-3 \sim -6 \text{ m/s}^2$; $T(i,t)$ 为 t 时刻管理单元 i 的驾驶员反应时间,一般取 3 s ; L_{safe} 为车辆的安全距离.

1.4 诱导范围的确定

诱导范围的确定是制定通道路网管理的基础.

路网节点包括内部高速公路之间的交点及起终点.

1.2 管理单元的划分

管理单元是进行公路管理的基本分析单元. 管理单元的划分因系统目标而异,明确系统目标是管理单元划分的前提^[9]. 本文基于高速公路通道决策模型而展开研究. 划分管理单元时,首先确定路网中不同等级、道路设施条件、路名的路线,然后,将上、下行公路分开考虑,以若干具有代表性的构造物作为划分管理单元的重要节点(如起终点、立交、收费站、带回转车道的隧道起终点、出入口等),从而得到各类管理单元.

1.3 实时安全可靠度的确定

实时安全可靠度可定义为一定的交通、气候和道路环境下车辆能够保持安全运行的概率^[1]. 本文采用多个指标表征管理单元 i 于 t 时刻的实时安全可靠度 $S(i,t)$,由结构函数的期望值给出^[10],即

$$S(i,t) = w_s SS(i,t) + w_d SD(i,t) \tag{1}$$

式中, $SS(i,t)$ 为管理单元 i 在 t 时刻的静态安全可靠度,可由文献[10]计算得到; w_s 为静态安全可靠度的权重, w_d 为动态安全可靠度的权重, $w_s + w_d = 1$; $SD(i,t)$ 为管理单元 i 在 t 时刻的动态安全可靠度,且

$$SD(i,t) = \prod_{n=1}^{N(i)} \left[1 - \prod_{m=1}^{M(i)} (1 - R(i,t,m,n)) \right]$$

式中, $N(i)$ 为管理单元 i 的车辆检测器布设的断面数量; $M(i)$ 为管理单元 i 的车道数; $R(i,t,m,n)$ 为管理单元 i 中第 m 个车道上第 n 个车辆检测器处 t 时刻的实时安全可靠度,且

$$R(i,t,m,n) = \frac{\varphi(i,t)g - a(i,t,m,n)}{\varphi(i,t)g}$$

式中, $\varphi(i,t)$ 为管理单元 i 在 t 时刻的路面附着系数,干燥气候下水泥混凝土路面可取 0.7 ,沥青混凝土路面可取 0.6 ; g 为重力加速度; $a(i,t,m,n)$ 为管理单元 i 中第 m 个车道上第 n 个车辆检测器处 t 时刻的安全制动减速度,且^[10]

$$V^2(i,t,m,n)$$

当事件发生时,交通诱导应为事件影响范围内的车辆提供足够数量的可绕行路线. 目前的技术还难以实现对单个驾驶员的动态诱导,仅能通过布设于沿线的信息板发布诱导信息,可发布的信息量有限,无法实现任意 2 点间最优路径的完整发布. 为此,本文将诱导起终点分为两大类:① 静态起终点,即任何环境下的主要起终点,这些节点包括高速公路的起终点、高速公路途径的重要城市、大交通量的

出入口等;② 动态起终点,即灾变条件下为使车辆避开事发单元及受事件影响路段的起终点. 诱导起点的确定应考虑事件影响范围和事发点与诱导起点间的交通疏导要求 2 个因素. 诱导终点(迂回点)可直接选取离事发单元下游最近的出入口.

2 通道路径诱导决策模型

本文中的路径诱导步骤如下:

① 基于 OD 集合中任意 2 点间通路求解模型;

② 以运营安全为首要约束条件,研究基于运营安全的最优路径决策模型;

③ 以通行疏散需要为前提条件,研究 k 条绕行路径的决策模型.

2.1 两点通路求解算法

本文采用图论和流体网络理论的相关方法求解 2 点间通路. 该理论认为包含新单元的路径即为新路径,因此利用该理论无法辨别回路. 图 1 为一个带回路的通路. 图中, e_i 为管理单元 i 的路段名称,节点 $v_1 \rightarrow v_5$ 只有 1 个有效通路 $\{e_1, e_2, e_3\}$, 当出现 1 个回路时通路变为 $\{e_1, e_2, e_4, e_5, e_2, e_3\}$, 出现 2 个回路时通路变为 $\{e_1, e_2, e_4, e_5, e_2, e_4, e_5, e_2, e_3\}$, 以此类推,产生无实际意义的多条重复通路. 因此,求解通路前应先回路去除.

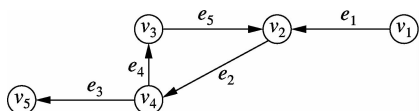


图 1 带回路的通路

流体网络理论中,任意节点 v_r 到 v_s 的全部通路数为^[11]

$$S_{r,s} = \sum_{k=1}^{m-1} a_{rs}^k = a_{rs}^1 + a_{rs}^2 + \cdots + a_{rs}^{m-1} \quad (2)$$

式中, a_{rs}^k 为 A^k 中第 r 行第 s 列元素,表示从节点 v_r 到 v_s 要经过 k 条路段的路线数量,其中, A 为通路求解图的节点邻接矩阵,且 $A^k = AA^{k-1}$.

所有节点之间的全部通路求和是路网诱导系统研究中的重点,其计算公式为

$$S = \sum_{r,s,k} a_{rs}^k$$

$$r \in \{r | v_r \in V^-(G)\}, s \in \{s | v_s \in V^+(G)\} \quad (3)$$

式中, $V^-(G)$ 为出发点集合; $V^+(G)$ 为到达点集合. 通过矩阵运算直到 $A^k = \mathbf{0}$.

代入各弧元素 e , 构建成矩阵 A^e , 令 $U = A^e + I$. 取行列式中 u_{sr} 对应的余子式便可得到 v_r 和 v_s

之间的所有通路.

2.2 基于运营安全的最优路径决策模型

在任意两点 o, d 间, 寻找满足实时安全可靠度要求的最优路径数学表达式为

$$\sum_{i \in P_{o,d}[b]} c(i,t) \Rightarrow \min P_{o,d}[b] \in P_{o,d} \quad (4)$$

$$\text{s. t. } S(i,t) \geq S_c$$

式中, $c(i,t)$, $S(i,t)$ 分别为管理单元 i 在 t 时刻所需的行程时间和安全可靠度; $P_{o,d}$ 为 o, d 间的所有通路集合; $P_{o,d}[b]$ 为 o, d 间的第 b 条通路; S_c 为临界安全可靠度.

2.2.1 路阻函数

考虑以道路运营安全作为基本约束条件, 对路阻函数进行如下修正:

$$C(i,t) = \begin{cases} \frac{L_i K_{\text{jam}}}{v_f (K_{\text{jam}} - K(i,t))} & S(i,t) \geq S_c \\ +\infty & S(i,t) < S_c \end{cases} \quad (5)$$

式中, $C(i,t)$, $K(i,t)$ 分别为管理单元 i 在 t 时刻的行程时间和车流密度; L_i 为管理单元 i 的长度; K_{jam} 为阻塞密度; v_f 为自由流车速.

当主线高速发生交通事故时, 车辆行程时间的计算分为 2 种情形: 交通事故未消散和交通事故已消散. 取两者中的较大值进行计算, 则 $C(i,t)$ 为

$$C(i,t) = \max \left\{ \frac{L_i K_{\text{jam}}}{v_f (K_{\text{jam}} - K_i)}, t_e \left[\frac{4(K_r - K_i)(K_{\text{jam}} - K_r - K_i)}{(K_{\text{jam}} - 2K_r)^2} + 1 \right] + \frac{L_2 K_{\text{jam}}}{v_f (K_{\text{jam}} - K_r)} - (t - t_0) \right\} \quad (6)$$

式中, K_i 为管理单元 i 的车流密度; K_r 为管理单元 i 的上游车流密度; L_2 为事发点与管理单元 i 终点之间的距离; t_e 为事件清除时间; t_0 为事件发生时间.

2.2.2 最优路径

未发生交通事件时, 可直接应用 Dijkstra 算法进行搜索, 计算流程参见文献[12].

当高速公路发生交通事件时, 车辆继续在高速上行车的行程时间按式(6)计算, 其他绕行路径中最优路径的行车路线和行程时间可由最优搜索算法求得. 其步骤如下:

① 应用 Dijkstra 算法搜索绕行路线中的最优路径, 将最优路径行程时间记为 T_R .

② 选择在主线高速公路继续行驶, 按照式(6)计算所需行程时间 T_F .

③ 搜索最优路径. 取 $T_{P_{o,d}[1]} = \min\{T_R, T_F\}$ 和

当管理单元 e_4 发生三级事件时,不满足实时安全可靠度和通行需求. 诱导范围定为 $v_2 \rightarrow v_3 \rightarrow$

v_4 . 根据文献[12],通行能力降低为原来的17%,剩余通行能力为 $2\ 200 \times 3 \times 0.17 = 1\ 122$ pcu/h. 根据2.2节中的模型,搜索最短路径可得 $P_{3,4}[1] = \{e_3, e_{11}, e_6, e_{13}\}$.

进一步进行通行能力检验,在节点 $v_2 \rightarrow v_4$ 中搜索到2条路径 $P_{3,4}[1] = \{e_3, e_{11}, e_6, e_{13}\}$ 和 $P_{3,4}[0] = \{e_3, e_4\}$,其通行能力取瓶颈较小值2 348 pcu/h,不满足通行需求(3 948 pcu/h). 根据2.3节中的模型,需寻找其他绕行路径,具体步骤如下:

① 根据2.1节中的模型确定 $v_2 \rightarrow v_3 \rightarrow v_4$ 中的其他通路为 $P_{3,4}[2] = \{e_{21}, e_{17}, e_{23}\}$, $P_{3,4}[3] = \{e_3, e_{22}, e_{19}, e_{24}, e_{23}\}$, $P_{3,4}[4] = \{e_3, e_{11}, e_{12}, e_8, e_{14}, e_{13}\}$.

② 按照式(7),计算各路径的重复度,得到 $R_{P_{2,4}[2]} = 0$, $R_{P_{2,4}[3]} = 0.25$, $R_{P_{2,4}[4]} = 0.33$. 取重复度较小的路径 $P_{2,4}[2]$ 作为第2条绕行路径.

③ 检验通行需求是否满足要求. 此处, $P_{2,4}[0]$, $P_{2,4}[1]$, $P_{2,4}[2]$ 的通行能力之和为6 848 pcu/h,满足通行需求之和5 068 pcu/h.

当管理单元 e_4 发生四级事件时,计算方法类似,可获得路径 $P_{2,4}[0]$, $P_{2,4}[1]$, $P_{2,4}[2]$.

4 结语

路径决策模型是交通诱导系统中的关键决策模型. 本文以高速公路主线通道路网为研究对象,构建了基于运营安全的路径决策模型,以解决灾变事件发生时一条最优路径和多条可绕行路径的决策问题. 本文提出的决策模型充分考虑了诱导路径的实时安全可靠度、行程时间和通行能力,并解决了诱导起终点间可能通路的求解方法. 该模型能为可变信息板为主的交通诱导方式提供决策依据.

本研究以通道路网为对象,决策方法适用于以高速公路为主线的小型局域路网. 研究成果应用于大型区域路网时,需进一步开发完整可靠的应用系统,并提出相应算法.

参考文献(References)

[1] 王晓飞. 灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2008.

[2] 谢秋燕. 车联网条件下车辆动态路径诱导方法研究[R]. 广州:华南理工大学土木与交通学院,2012.

[3] 龙琼,曾革,张谨帆,等. 面向驾驶员个性化需求的动态路径诱导方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(5):2124-2129.

Long Qiong, Zeng Ge, Zhang Jinfan, et al. Dynamic route guidance method facing driver's individual demand [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(5):2124-2129. (in Chinese)

[4] 杨群,关伟,张国伍. 基于合理多路径的路径选择方法的研究[J]. 管理工程学报,2002,16(4):42-45. DOI:10.3969/j.issn.1004-6062.2002.04.010.

Yang Qun, Guan Wei, Zhang Guowu. Study on multi-path based route choice approach[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2002, 16(4):42-45. DOI:10.3969/j.issn.1004-6062.2002.04.010. (in Chinese)

[5] Lee C K. A multiple-path routing strategy for vehicle route guidance systems [J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 1994, 2(3):185-195.

[6] Yang Q, Zhao Y. A fuzzy logic-based frame work for route choice in vehicle navigation systems[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2000, 9(4):467-474.

[7] 杨兆升,初连禹. 动态路径诱导系统的研究进展[J]. 公路交通科技,2000,17(1):34-38. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2000.01.010.

Yang Zhaosheng, Chu Lianyu. Study on the development of the dynamic route guidance systems (DRGS) [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2000, 17(1):34-38. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2000.01.010. (in Chinese)

[8] 王晓飞,柳本民,郭忠印. 并列型高速公路安全管理路网构建[C]//第七届世界华人交通运输学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2007:8-12.

[9] 邵敏华,孙立军. 公路管理单元动态划分技术与数据模型研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(3):343-347.

Shao Minhua, Sun Lijun. Research on segmentation technique and data modeling in highway management system[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2004, 32(3):343-347. (in Chinese)

[10] 王晓飞,郭忠印. 高速公路网管理单元的实时安全可靠度[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(7):15-20.

Wang Xiaofei, Guo Zhongyin. Real-time safety reliability of management unit of freeway network[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(7):15-20. (in Chinese)

[11] 卢开澄,卢华明. 图论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1995:37-49.

[12] 美国交通研究委员会 TRB. 道路通行能力手册(精)[M]. 任福田,等译. 北京:人民交通出版社,2007:236-239.