

基于路径的信号控制交叉口关联度计算模型

马万经, 李晓丹, 杨晓光

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 首先分析了传统基于路段进行关联度计算模型的局限, 在此基础上, 建立了综合考虑交叉口信号相位、路径流量不均匀性、交叉口间距和交叉口排队的路径关联度模型. 针对 2 个实际的信号控制交叉口, 进行了关联度计算和协调控制关键路径判断的算例分析; 对比研究了本文模型与路段关联度模型的性能, 分析了交叉口间距、排队、车道数和信号相位等对交叉口路径关联度的影响. 算例分析结果表明, 提出的路径关联度模型能更确切地描述交叉口间的关联性, 并能够准确判定交叉口间协调控制的关键路径.

关键词: 城市道路交叉口; 信号控制; 路径; 关联度

中图分类号: U 491

文献标识码: A

Incidence Degree Model of Signalized Intersection Group Based on Routes

MA Wanjing, LI Xiaodan, YANG Xiaoguang

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: An analysis was first made of the shortcomings of traditional link-based incidence degree model. Then a route-based incidence model was built by taking the factors into consideration such as the intersection distance, the signal phases, route volume distribution and queue at approaches. Finally, a case study was made of the two intersections. A comparative study was made of the performance of traditional link-based incidence model and the proposed route-based incidence model. The impacts of intersection distance, queues, number of lanes and number of signal phases were analyzed. The results show that the proposed route-based incidence model can descript the real relationship of adjunct intersections and find the key route for signal coordination.

Key words: intersections group; signal coordinated control; route; incidence degree

城市交通的拥挤使得分析交通流演变规律和最佳利用有限道路交通资源日趋重要. 交叉口间的关联度很早就被提出来作为分析两交叉口间的交通流和判断 2 个交叉口是否需要协调, 或者说是否可以通过信号协调提高交通效益的关键指标^[1].

对于如何确定交叉口之间的关联性, 国内外学者做过诸多研究. 王殿海和景春光等利用交通波理论研究了车辆在交叉口的排队、消散过程及其对上、下游交叉口的影响, 并根据交通波的传播方向和速度进一步分析了城市干道交叉口间的车队间隔及其与信号协调的关系, 并建立了相应的数学模型^[2]. 在对交叉口协调控制的研究中, 杭明升、林瑜等人对关联交叉口间的车流行驶离散性进行了分析, 从信号协调控制的角度对交叉口群的组合进行了论述^[1], Yagoda 等人^[3]认为交叉口之间的关联性主要与路段上的流量 Q 和路段长度 L 有关. Whitson 认为影响相邻交叉口关联性的因素有路段长度和上游交叉口车流量及到达规律^[4]. Edmond Chin-Ping Chang 对关联度模型进行了深入研究, 认为只要可以通过有效的信号控制方案使到达下游交叉口的车流呈现高密度的车队特征就应该协调 2 个相邻交叉口的信号控制方案^[5]; 影响车流到达率波动的主要因素是上游交叉口的各流入流向流量及流量波动特征, 以及车流在路段上的离散程度. 国外典型的研究成果以美国《交通控制系统手册》中提出的 2 个相邻交叉口之间的合理互联指数为代表^[6], 其继承了 Chang 等人的研究成果, 采用交叉口间距、交通流量作为自变量, 来考察交叉口群交通关联度与距离、流量之间的耦合关系.

综合上述研究可以发现, 以美国交通控制系统手册为代表的关联度计算模型以路段为研究对象,

收稿日期: 2008-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70631002; 50808142); 同济大学青年优秀人才培养行动计划资助项目

作者简介: 马万经(1980-), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为交通系统分析与控制. E-mail: mawanjing@tongji.edu.cn

杨晓光(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通系统工程. E-mail: yxguang@tongji.edu.cn

以路段交通流的不均匀性为重点, 是基于路段的关联度计算模型. 没有反映出上下游流量流向关系即协调路径的特征, 且其关联度计算中没有考虑关联交叉口信号相位设计、交叉口排队等的影响. 笔者在这些研究和分析的基础上, 建立了综合考虑路径流量不均匀性、交叉口间距、信号相位和交叉口排队等多因素的交叉口群关联度计算模型, 称为路径关联度模型. 随后的案例对比分析表明, 该模型能更确切地描述交叉口间关联性, 并能够准确地确定网络协调控制的关键路径.

1 问题描述

路段关联度指对于连接 2 个交叉口的 1 个路段, 把流入和流出交通流作为一个整体计算的 2 个交叉口协调控制的必要程度. 基本路径指上游交叉口一个流向与下游交叉口一个流向共同构成 1 个基本路径. 路径关联度指基于基本路径计算出的 2 个交叉口该路径信号协调控制的必要程度.

美国《交通控制系统手册》提出的路段关联度计算具体模型如下^[1]:

$$I = \frac{0.5}{1 + t} \left[\frac{nq_{\max}}{\sum_{i=1}^n q_i} - 1 \right] \tag{1}$$

式中: I 为交叉口群连线间的关联度; t 为车辆在两交叉口间的行程时间, \min , 等于交叉口间距 L 除以车辆的平均速度 V ; n 为来自上游交叉口的车流驶入的分支数; q_{\max} 为来自上游交叉口的主线方向的直行车流量(最大流量), 为 q_i 中的最大值; $\sum_{i=1}^n q_i$ 为到达下游交叉口的交通量总和, 对于十字型交叉口而言, $n = 3$.

式(1)所示的路段关联度模型, 综合了车队离散和车流的不均匀性, 但该模型将上游交叉口流入车流作为一个整体进行分析, 如图 1a 所示, 图中 i, j 为相邻两交叉口. 它没有分析每一股车流驶离上游交叉口的时间离散性, 即信号相位的影响. 如不受控制的右转车流和受控制的右转车流, 对下游交叉口流量到达的波动性的不同影响在路段关联度模型中无法体现. 同时, 该模型也没有考虑上游交叉口流入的不同车流在下游交叉口的转向比例和通行相位. 如图 1b 所示, 图中 s 为空间, T 为时间, q_1, q_2, q_3 分别为在不同相位放行的上游 3 股车流. 考虑到车流到

达的次序和转向之后, 对下游交叉口整个进口道而言是车流均匀到达, 但对下游交叉口每一个流向的进口道而言却未必如此.

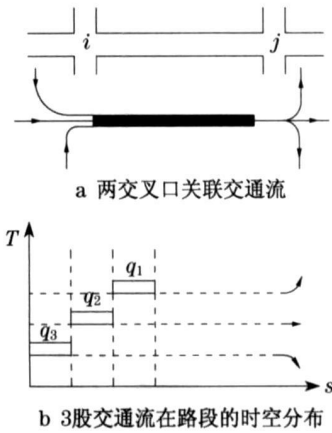


图 1 基于路段的关联度模型分析
Fig.1 Analysis of link-based incidence degree model

从 2 个交叉口协调控制必要程度的这一关联度核心含义出发, 考虑车流的路径特征即上下游交叉口流量流向的相互关系提出基于路径的交叉口关联度计算模型, 主要考虑了如下几个要点:

- (1) 考虑上游交叉口流入车流的时间分布特征. 即考虑交叉口信号相位安排, 按照上游交叉口相位相序计算流入车流, 从而区分同时流入和不同时流入车流对下游进口道到达不均匀性的影响.
- (2) 考虑上游流入车流在下游交叉口的转向比例. 协调控制根本上是相邻交叉口车流流向之间的协调, 考虑了不同车流的转向比例之后, 能够区分不同上游车流对下游各车流的不同影响.
- (3) 交叉口排队的影响. 在计算两交叉口间车辆行驶时间时考虑下游交叉口排队的影响, 同时将下游进口道车道数的影响考虑在内.

2 路径关联度模型

路径关联度是 2 个交叉口间各个路径信号协调的确切需求程度的度量, 因此模型需要反映出 2 个影响协调控制的主要因素: ①路径流量不均匀系数; ②交叉口排队的影响. 由于本文模型是离线计算模型, 以上述因素的统计数据为基础进行建模. 同时, 2 个交叉口是信号协调的基本单元, 本文模型针对 2 个交叉口进行构建.

2.1 路径流量不均匀性系数

定义变量 δ_{mp} 为交叉口 i 车流 m 在相位 p 通行

的比例,如果 m 不在相位 p 中通行,则 δ_{mp}^i 为 0; q_m^i 为交叉口 i 车流 m 的总流量; P 为上游交叉口所有流入下游交叉口车流通行的相位总数; N 为下游交叉口关联进口道的车流数; λ_{mn}^i 为交叉口 i 车流 m 到下游交叉口 j 车流 n 的流量占车流 m 总流量的比例. 则交叉口 i 相位 p 的总流量中,到下游加入车流 n 的流量 q_{pn}^{ij} 为

$$q_{pn}^{ij} = \sum_{m=1}^M q_m^i \delta_{mp}^i \lambda_{mn}^i \quad \forall i, j, p \quad (2)$$

设 q_{kn}^i 为交叉口 i 中,到下游交叉口 j 加入车流 n 的流量最大的车流,即

$$q_{kn}^i = \max(q_{pn}^{ij}, \forall p = 1, 2, \dots, P) \quad (3)$$

则下游车流 n 的到达流量不均匀系数 I_{kn}^{ij} 为

$$I_{kn}^{ij} = \frac{q_{kn}^i}{\sum_{p=1}^P q_{pn}^{ij} / P} \quad (4)$$

此对应的路径为 R_{kn}^{ij} ,即 I_{kn}^{ij} 为上游交叉口 i 流向 k 到下游交叉口 j 流向 n 的路径的流量不均匀系数.

2.2 交叉口排队的考虑

交叉口排队一方面反映了交叉口饱和度水平;另一方面,特别是在短连线交叉口的情况下,排队长度的大小也是影响 2 个交叉口协调控制需求程度的重要指标,因而,考虑对行程时间 t 进行折减,折减后的行程时间 t_{jn} 为

$$t_{jn} = \frac{L - q_{jn}}{v} \quad (5)$$

式中: t_{jn} 为上游交通流到下游交叉口 j 流向 n 的行程时间; L 为 2 个交叉口的间距; q_{jn} 为交叉口 j 流向 n 的排队长度(统计值); v 为 2 个交叉口间的平均行程速度.

2.3 关联度计算模型

借鉴美国交通控制系统手册的关联度模型形式,建立路径关联度 I_n^{ij} 的计算模型如下:

$$I_n^{ij} = \frac{0.5}{1 + t_{jn}} (I_{kn}^{ij} - 1) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

即相对于下游交叉口 j 车流的任意车流 n ,都有一上游交叉口 i 的车流 k 与其构成可能协调控制的路径, k 由式(3)确定. 在此基础上,2 个交叉口的关键路径关联度 $I_{keyRoute}^{ij}$ 计算模型为

$$I_{keyRoute}^{ij} = \max \left\{ \frac{Q_{kn}}{\sum_{n=1}^N Q_{kn}} I_n^{ij}, n = 1, 2, \dots, N \right\}$$

式中: Q_{kn} 为上游车流 k 到下游车流 n 的流量.

3 验证分析

为评价本文交叉口路径关联度模型,以如图 2 的交叉口 i 、交叉口 j 2 个交叉口为案例进行分析,图中数据指流量. 其中 p_{ia} 和 p_{ja} ($a=1, 2, 3, 4$) 分别为 2 个交叉口的相位编号. 分为 2 步进行对比分析,首先根据两交叉口的几何条件、相位设计和流量分布情况,进行关联度模型计算,并与路段关联度模型结果进行对比分析,以验证本文模型在描述 2 个交叉口关联度方面的有效性和优越性. 然后,改变两交叉口之间的距离、交叉口的流量分布、交叉口的排队和信号相位等参数,分析关联度的变化趋势与特点.

3.1 交叉口基本数据

两交叉口均为十字交叉口,交叉口间距 605 m,取行程车速为 40 km · h⁻¹,设两交叉口均进行 4 相位信号控制. 两交叉口各个进口道流入路段 $i-j$ 的交通流量和相关车流的放行相位设计如图 2.

图 2 以交叉口 i 流入路段 $i-j$ 的 3 股交通流为例,分析了每股交通流在交叉口信号控制下流入路段并在下游交叉口分流向在不同信号相位流出的情形. 其中,设置右转车流 i_3 在交叉口 i 的 P_{i1} 和 P_{i4} 这 2 个相位通行,以进一步反映信号相位设置对关联度的影响. 而 j 交叉口右转不受控制. 并设两交叉口流入路段流量分别在下流的转向分配比例如表 1 所示.

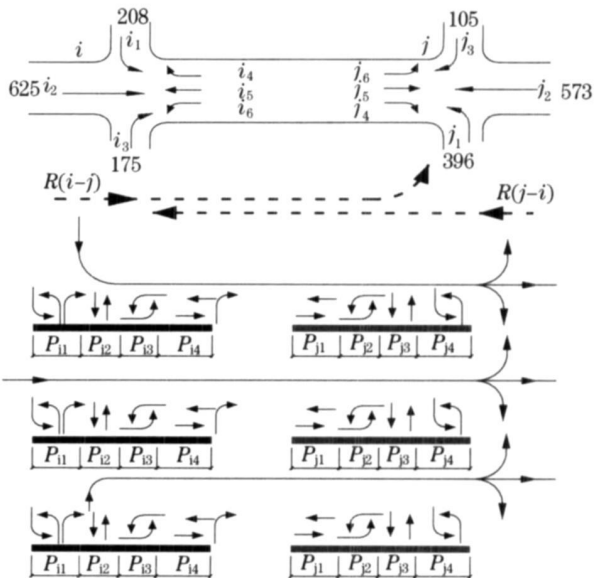


图 2 交叉口信号控制与路径关系
Fig.2 Signal phase sequence and routes of intersections

表 1 路径流量分配比例
Tab.1 Allocation of routes volume

| 交叉口 | 路径流量分配比例/% | | | | | |
|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | i_1 | i_2 | i_3 | j_1 | j_2 | j_3 |
| i_1 | | | | 35 | 5 | 70 |
| i_2 | | | | 40 | 85 | 10 |
| i_3 | | | | 25 | 10 | 20 |
| j_1 | 10 | 40 | 25 | | | |
| j_2 | 60 | 40 | 60 | | | |
| j_3 | 30 | 20 | 15 | | | |

3.2 两交叉口的协调路径的判断与分析

按照路段关联度模型(1)进行计算路段 $L(i-j)$ 和 $L(j-i)$ 的关联度,与本文模型的路径关联度对比如图 3 所示.从中可以看出:

$i \rightarrow j$ 方向:路径 $R(i_2-j_4)$, $R(i_2-j_5)$ 和 $R(i_2-j_6)$ 是交叉口 i 与交叉口 j 信号协调的主路径集合,且其中以路径 $R(i_2-j_6)$ 的关联度最大,为 $i \rightarrow j$ 方向的关键协调路径. $j \rightarrow i$ 方向:路径 $R(j_1-i_4)$, $R(j_2-i_5)$ 和 $R(j_1-i_6)$ 是交叉口 j 与交叉口 i 信号协调的主路径集合,且其中以路径 $R(j_1-i_5)$ 关联度最大,为 $j \rightarrow i$ 方向的关键协调路径.

根据文献[4],关联度小于 0.25 不进行信号协调;关联度大于 5.00 进行信号协调控制.则按路段关联度模型判断,两交叉口不需要信号协调,而按路径关联度,两交叉口需要进行信号协调.协调的路径为, $i \rightarrow j$ 方向:协调路径为由 i 交叉口直行车流 i_2 和 j 交叉口左转车流 i_6 构成的路径; $i \rightarrow j$ 方向:协调路径为由 j 进口直行车流 j_2 和 i 交叉口直行车流 i_5 构成的路径.如图 2 所示.

从图 3 中还可以看出,本文模型与路段关联度模型的计算结果有较大差异.本文模型计算结果能够反映出各个路径关联度的对比关系,并能够确定最佳的协调路径;而路段关联度模型则掩盖了不同路径关联度不同这一重要现象.

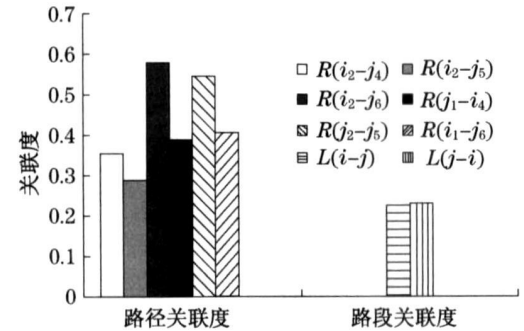


图 3 路段与路径关联度对比

Fig.3 Comparison of route-based and link-based incidence degrees

3.3 协调控制效果对比

由于双向协调的优化本身就是一个复杂问题,为更加直接反映模型的效果,并防止协调控制策略本身的好坏影响对模型结果的对比,笔者设计从交叉口 i 到交叉口 j 的单向协调的绿波.由于 $R(i_2-j_4)$ 不受控制,仅分析不协调以及主路径 $R(i_2-j_5)$ 和 $R(i_2-j_6)$ 协调所取得的效益,利用 VISSIM 仿真软件,对受协调与否影响的 $R(i_2-j_5)$ 和 $R(i_2-j_6)$ 路径车流的车均延误统计如图 4 所示.图中,路径 1 和路径 2 分别代表 $R(i_2-j_5)$ 和 $R(i_2-j_6)$.协调 1 和协调 2 分别代表协调路径 1 和协调路径 2.

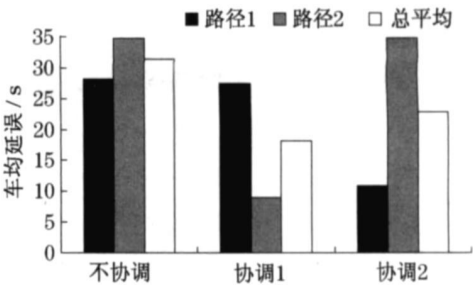


图 4 协调控制效果分析

Fig.4 Results of coordinated control

按照文献[4]推荐的标准,路段关联度模型计算结果是 2 个交叉口不需要协调,但按照本文模型则需要协调.从图 4 可以看出协调控制能够取得较好效果,且不同路径协调取得的总效果不同,而关键路径协调取得的效果大于非关键路径.

3.4 路径关联度随路段长度变化分析

以从交叉口 i 到交叉口 j 的 3 条主路径为例,分析路径关联度与路段关联度的差值随交叉口间距变化关系,如图 5 所示.

图 5 表明,随着交叉口间距的增加,路径关联度与路段关联度的差值逐渐减小.而随着交叉口间距的减小,各个路径关联度与路段关联度的差值增加,不同路径间关联度的差异也在增加.即交叉口间距越小路段关联度模型的局限性越明显.

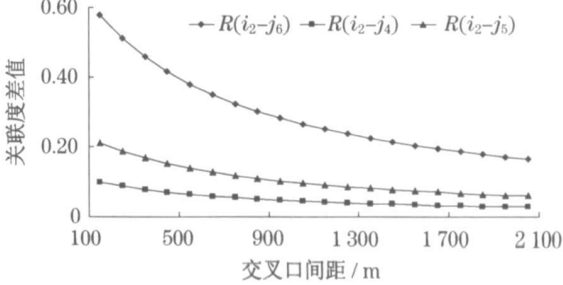


图 5 关联度差值随路段长度变化关系
Fig.5 Impacts of link distance on incidence degree

3.5 排队长度及进口车道数变化影响分析

以关键路径 $R(i_2-j_6)$ 为例,不同排队、车道数和交叉口间距条件下的关联度变化趋势如图 6 所示.从图中可以看出,排队长度和车道数对路径关联度有较大的影响,而路段关联度模型无法反映这一影响.交叉口间距越小,关联度对排队长度越敏感.同样,车道数在交叉口间距较小的情况下,对关联度也有着显著的影响.

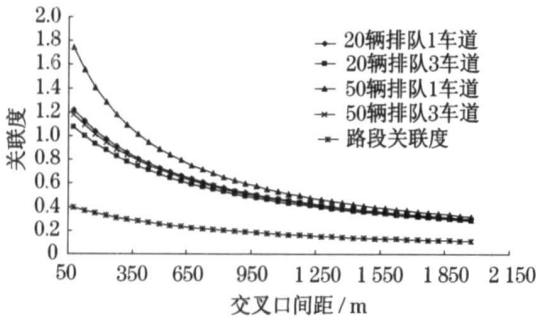


图 6 排队长度及进口道数对关联度影响
Fig.6 Impacts of approaches on incidence degree

3.6 交叉口信号相位设置影响分析

将 2 个交叉口的信号相位改为 2 相位(东西直左第 1 相位,南北直左第 2 相位),且右转车流不受控制,在此情况下的交叉口关联度如图 7 所示.

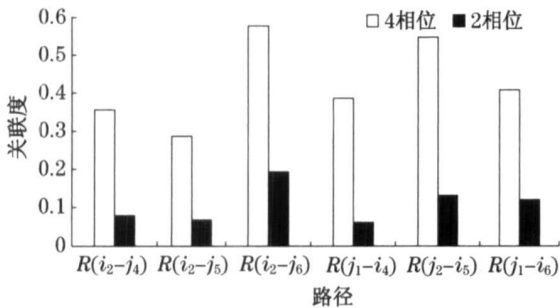


图 7 信号相位对关联度的影响
Fig.7 Impacts of signal phase sequence on incidence degree

图 7 反映了信号相位对关联度的影响.由于信号相位改变了路径车流的时空分布规律,因而从 4 相位变为 2 相位后,各个路径的关联度都发生了明显的变化.就本例而言,所有关联度都明显下降,且如按照关联度大于 0.5 为进行信号协调控制的条件,变为 2 相位之后,两交叉口不需要进行信号协

调.其关键的原因,在相应的路径流量下,对于下游交叉口而言,2 相位比 4 相位下到达流量更加均匀,而流量的相对均匀到达使得协调的必要性和预期效益降低.显然,路段关联度模型无法反映信号相位带来的这些影响.

4 结论

在分析了路段关联度模型缺陷的基础上,提出了基于路径的交叉口关联度计算模型.与路段关联度模型相比,本文模型不但能够反映交叉口间距、车流的不均匀性对交叉口关联度的影响,还考虑了信号相位、交叉口排队、交叉口车道数等关键要素对关联度的影响.因而,本文模型具备反映路径车流时空不均匀性的能力.利用该模型能够寻找到交叉口间的关键路径,并确定信号协调的主要路径.本研究的结果可以为研究交叉口的关联性、划分交通控制小区和进行信号协调控制提供基础.

参考文献:

[1] 林瑜.信号控制交叉口群交通阻塞机理解析方法[D].上海:同济大学交通运输工程学院,2006.
LIN Yu. Methods of traffic congestion analysis for signalized intersection group [D]. Shanghai: Tongji University. School of Transportation Engineering, 2006.

[2] 王殿海,景春光,曲昭伟.交通波理论在交叉口交通流分析中的应用[J].中国公路学报,2002,15(1):93.
WANG Dianhai, JING Chunguang, QU Zhaowei. Application of traffic-wave theory in intersections traffic flow analysis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1):93.

[3] Yagoda N. Subdivision of signal systems into control areas [J]. Traffic Engineering, 1973, 43(12):42.

[4] Edmond Chang Chinping. How to decide the interconnection of isolated traffic signals [C] // Proceedings of the 1985 Winter Simulation Conference. San Francisco: Transportation Research Board, 1985:445-453.

[5] Whitson R H, White B, Messer C J. A study of system versus isolated control as developed on the mockingbird pilot Study [R]. Dallas: Texas Transportation Institute, 1973.

[6] 美国运输部联邦公路局.交通控制系统手册[M].李海渊,译.北京:人民交通出版社,1987.
Federal Highway Administration. Traffic control manual [M]. Translated by LI Haiyuan. Beijing: China Communications Press, 1987.