

文章编号: 1009-6744 (2012) 01-0055-08

城市信号控制交叉口群路径关联度模型

杨洁, 过秀成*, 李岩, 何赏璐, 刘迎

(东南大学 交通学院, 南京 210096)

摘要: 为对交叉口群范围内具有强关联性的路径实施信号协调控制, 提出了交叉口群路径关联度计算方法. 该方法以避免由强关联性导致的交叉口排队溢流和绿灯空放等负面效应为目标, 考虑交叉口群拓扑结构、各交叉口渠化形式与信号配时方案、交通流量、行程车速及车流离散等诸多因素, 建立由离散性关联指标和阻滞性关联指标组成的交叉口群路径关联度计算模型. 以滁州市区某交叉口群为例, 计算各路径关联度值, 确定信号协调控制对象. 通过 Synchro 仿真比较协调前后交叉口群交通运行效益指标. 结果表明, 路径关联度计算方法能有效描述路径的关联特征, 可为交叉口群交通信号协调控制奠定基础.

关键词: 城市交通; 路径关联度; 计算模型; 交叉口群; 信号协调控制

中图分类号: U491.5

文献标识码: A

Modeling Route Correlation Degree of Urban Signalized Intersection Group

YANG Jie, GUO Xiu-cheng, LI Yan, HE Shang-lu, LIU Ying

(Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A method for the route correlation degree calculation is proposed to realize the traffic coordination control of the routes with a strong correlation in the intersection group. To avoid the detrimental effect such as spillback and starvation, the model considers several influencing factors, namely, the topology of the intersections group, the channelization and timing plan for each intersection, flow distribution, travel speed, the dispersion of traffic platoons, etc. The route correlation model composes of dispersion index and retardation index. An intersection group in Chuzhou city of China is taken as a case study. The coordination objects are determined after the correlation degree for all the routes are obtained. The improvements of the traffic operation are validated by the Synchro simulation. The results show the proposed method can effectively describe the correlation characters of the routes in the intersection group, which lays foundations for traffic coordination control.

Key words: urban traffic; route correlation degree; calculation model; intersection group; signal coordination control

CLC number: U491.5

Document code: A

收稿日期: 2011-10-01 修回日期: 2011-11-22 录用日期: 2011-11-30

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (CX10B_072Z) .

作者简介: 杨洁 (1984 -), 女, 江苏常州人, 博士生.

* 通讯作者: seuguo@163.com

1 引言

交叉口群是城市路网中交通关联性较强的若干邻近交叉口的集合^[1]. 判断交叉口关联性的强弱是实施交叉口群信号协调控制的前提. 交叉口群的概念不等同于控制子区. 控制子区的产生是基于区域信号协调控制的需要, 同一个控制子区内所有交叉口共用同一个信号周期长度, 对相位差和绿信比进行协调. 一个控制子区内的交叉口一般具有类似的交通特征, 但不一定具有较强的关联性, 如位于工业区的控制子区. 以交叉口群为协调单元, 结合交叉口之间的关联特征应用交通信号控制及车流组织优化等手段, 可缓解局部路网的交通拥堵问题. 识别交叉口群范围内具有强关联性的路径, 并根据该路径交通流特征制定交通协调控制方案, 把道路交通网络控制问题拆解为几个关键路径上交通协调控制的集合, 可有效简化交通协调控制算法, 提高交通管控效率.

在研究信号控制子区划分问题时部分研究者引入交叉口关联度计算模型, 将交叉口间距、路段流量、行程车速、车流离散、周期长度等因素纳入关联度模型的考虑之中^[2-5]. 对交叉口群路径关联度的研究可借鉴此类方法. 目前应用较为成熟的控制子区划分方法是依据路网形态逐一度量相邻交叉口之间的关联度指标, 判断是否需要协调控制以及如何对时空资源进行协调, 如 TRANSYT 系统所采用的“结合法”^[6]以及美国交通控制系统手册推荐的耦合指数法等^[7]. 但交叉口群内一条路径由若干交叉口与路段组成, 包含各交叉口转向车流、信号配时、车道功能划分等多重信息, 既有的交叉口关联度模型无法表征此类路径信息^[8].

本文综合考虑影响交叉口群路径关联度的诸多因素, 建立信号控制交叉口群路径关联度模型, 截取滁州市道路网络中由4个邻近交叉口组成的交叉口群作为示例对象, 检验该路径关联度计算方法在交叉口群交通运行效率改善中的作用.

2 问题分析

相邻交叉口高度关联是实施信号协调控制的先决条件, 但倘若交通饱和度过高或信号配时不合理, 也易发生溢流及绿灯空放等负面效应. 所谓溢流, 是

指下游交叉口产生的排队占用了下游交叉口到上游交叉口所有的道路空间, 以致上游交叉口车辆无法在绿灯时间内通过该交叉口; 绿灯空放的产生是由于上游交叉口红灯设置不当致使下游交叉口绿灯时间内没有车辆到达, 绿灯时间得不到有效利用.

绿灯空放问题可通过调节相位差来避免, 若设置得当可实现交叉口群内一条路径上若干交叉口的绿波控制. 但受车队离散因素的影响, 车队在运动过程中其头部和尾部之间的距离逐渐加大, 以致整个车队通过下游停车线所需的时间加长. 假设一条路径包含若干个间隔为200 m的信号控制交叉口, 在理想情况下采用绿波控制使车辆以恒定速度连续通过, 设置不同的路径长度, 采用 Robertson 车队离散模型^[9], 分析由于离散因素导致在等宽绿波情况下绿灯时间内通过交叉口的车辆折减数 ΔN . 假定路径起点交叉口在绿灯时间内以1800辆/h的饱和流率放行车辆, 信号控制周期为100 s, 有效绿灯时间为50 s, 平均车速设为10 m/s. 如图1所示, 路径长度值越大, 即途径交叉口个数越多, 等长绿灯时间内通过终点交叉口的车辆数越少, 受红灯阻滞影响排队车辆的总延误也越大. 因此, 将车队离散因素纳入路径关联度计算模型之中可反映路径长度、车流运行特征对路径关联度的影响.

交叉口间距、流量分布、车辆平均行驶速度、信号配时也是决定信号协调控制的关键因素. 设连接邻近交叉口的路段长度为 L , 下游交叉口的上游功能区长为 D . 功能区长度与路段总长度的比值较大时, 车辆在加速启动通过上游交叉口后不久就需要采取刹车制动, 在下游交叉口进行排队等候, 自由行驶时间短, 燃油消耗高; 此外, 一旦交通流量略有增加, 发生交通溢流的可能性也增大. 如图2所示, 交叉口上游功能区由3部分组成: 排队长度 d_1 、驾驶员进行减速直至停止的减速距离 d_2 和感知时间行驶的距离 d_3 . 其中, 排队长度 d_1 与进口道转向流量、信号配时方案相关, d_2 和 d_3 与行程车速相关. 研究功能区长度 D 与路段总长度 L 的比值可以从交通设施供给和需求层面分析交叉口关联特征.

信号控制交叉口群路径关联度受路径长度、交叉口间距、各交叉口配时方案、流量分布等交通供需特征, 以及行程车速、车队离散等交通运行因素

的影响.在改善交叉口群网络运行效益时应发挥路径强关联性的积极作用,进行信号协调控制,同时也应避免强关联性导致的交通负面效应.在构建关

联度计算模型时,既应考虑决定绿波控制效果的车流离散因素,也应反映由于车辆加减速频繁导致的行车不畅现象.

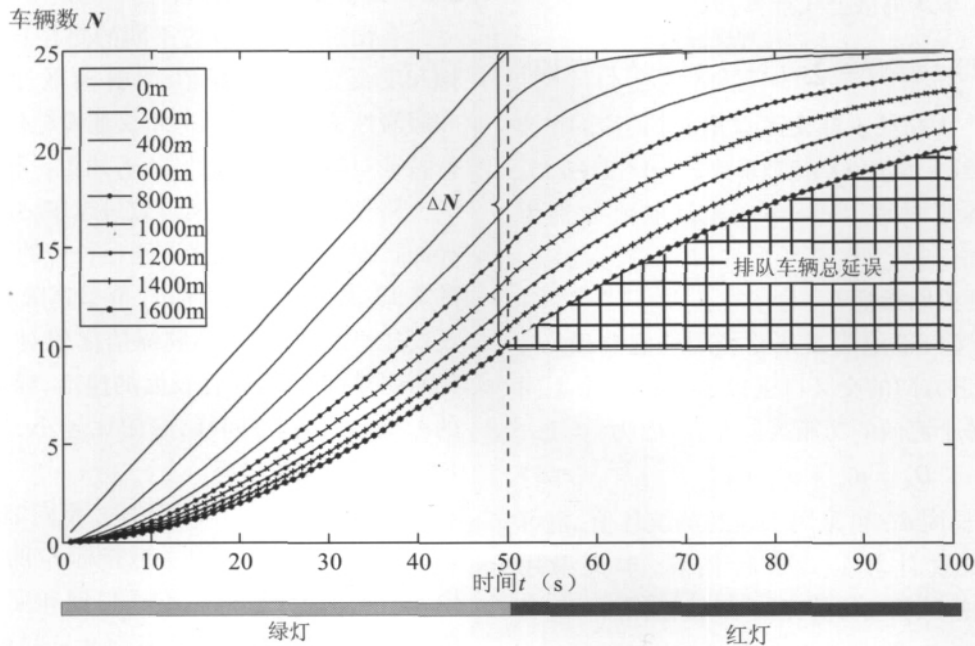


图1 绿灯时间内车辆累计到达量与路径长度变化关系

Fig. 1 Impacts of route length on cumulative vehicle counts during green time

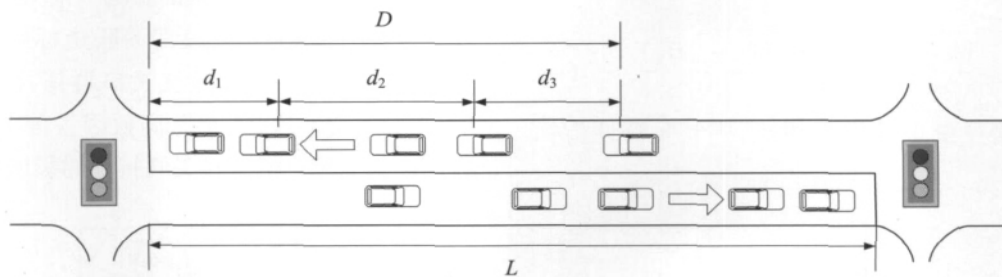


图2 交叉口上游功能区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of intersection upstream domain

3 模型建立

3.1 离散性关联指标 I_1

受车流离散因素的影响,在下游交叉口若在保证车队的首车和末车均在同一绿灯时间内通过交叉口,则需要设计一种扩散状的变宽绿波带.但此设计会使最下游交叉口的绿灯时间长得无法接受,是一种对离散性不加约束的控制方式.在实际工作中往往不可取.对离散约束的控制方法一般采用等宽绿波,但该方法会使位于车流首部或尾部的部分车辆在每个路口都有一定的延误.

设定离散性关联性指标 I_1 为一个信号控制周期内路径起、讫点等长绿灯时间通过车辆数的比值,即

$$I_1 = \frac{\sum_{i=1}^{t_g} q_d(i+T)}{\sum_{i=1}^{t_g} q_o(i)} \quad (1)$$

式中 $q_o(i)$ 为某一条路径初始上游交叉口停车线第 i 个时段的车流通过数; $q_d(i+T)$ 为路径末端交叉口第 $i+T$ 个时段的车流到达数; T 为从路径

起点至终点的行驶时间, t_g 为一个信号周期内的绿灯持续时间.

$q_o(i)$ 与 $q_d(i+T)$ 可采用现场观测值,也可通过 Robertson 车队离散公式计算,即

$$q_d(i+T) = q_d(j) = \sum_{i=1}^{j-t} q_o(i) F(1-F)^{j-i-t} \quad (2)$$

式中 $q_o(j)$ 为路径末端交叉口第 j 个时段的车流到达数; $t = \beta T = \beta(j-i)$; 离散系数 $F = 1/(1 + \alpha t)$; α 、 β 为待标定参数,Robertson 建议取值分别为 0.35 和 0.8^[9].

3.2 阻滞性关联指标 I_2

对于交叉口群组成某条路径的任意路段 m ,沿该路径前进方向的交叉口进口道若有 N 个不同流向,计算每个流向的功能区长度值 D_n^m 为

$$D_n^m = d_{1n}^m + d_{2n}^m + d_{3n}^m \quad (3)$$

式中 排队长度 d_{1n}^m 可采用实地观测统计值,也可使用排队长度计算公式进行估算,本文采用 Synchro 7 的排队长度计算方法^[10]; 减速距离 d_{2n}^m 和感知—反应距离 d_{3n}^m 的计算方法可参考文献^[11].

将 I_2^m 定义为路段 m 沿路径前进方向的交叉口进口道中流向功能区长度最大值与路段长度 L 的比值,即

$$I_2^m = \frac{\max(D_1^m, D_2^m, \dots, D_n^m, \dots, D_N^m)}{L} \quad (4)$$

若该路径由 M 个路段组成,则其阻滞性指标 I_2 为

$$I_2 = \frac{\sum_{m=1}^M I_2^m}{M} \quad (5)$$

3.3 关联指标变化分析

在恒定车速下设置不同的路径长度、绿信比、饱和度及交叉口间距值,计算离散性关联指标 I_1 和阻滞性关联指标 I_2 ,分析交通设施供给与车流运行特征对路径关联度的影响,如图 3 和图 4 所示.

路径所包含的交叉口数量越多,则必然延伸路径的长度.图 3 表明,随着路径长度的增加、绿信比的降低,离散性关联指标 I_1 值呈递减趋势.在路径长度较小的情况下,不同绿信比值对 I_1 的影响差异不明显,但随着路径长度的递增,绿信比对 I_1 值的影响愈加明显;同样,绿信比越小, I_1 值对路径长度的变化也越敏感.

当路径仅包含 1 个路段时,不同饱和度和交叉口间距条件下的阻滞性关联指标 I_2 的变化趋势如图 4 所示.由图 4 可知,交叉口饱和度与交叉口间距对 I_2 均有较大影响.随着交叉口间距的增加, I_2 值逐渐减小.相同交叉口间距、不同饱和度情况下 I_2 的差值也逐步缩小.在短交叉口间距的情况下,饱和度越高,受车辆排队的影响 I_2 值也越大.

分析结果表明,离散性关联指标 I_1 和阻滞性关联指标 I_2 可共同反映交叉口群拓扑结构、信号配时方案、交通流量、车队离散因素等关键要素对信号控制交叉口群路径关联特征的影响.

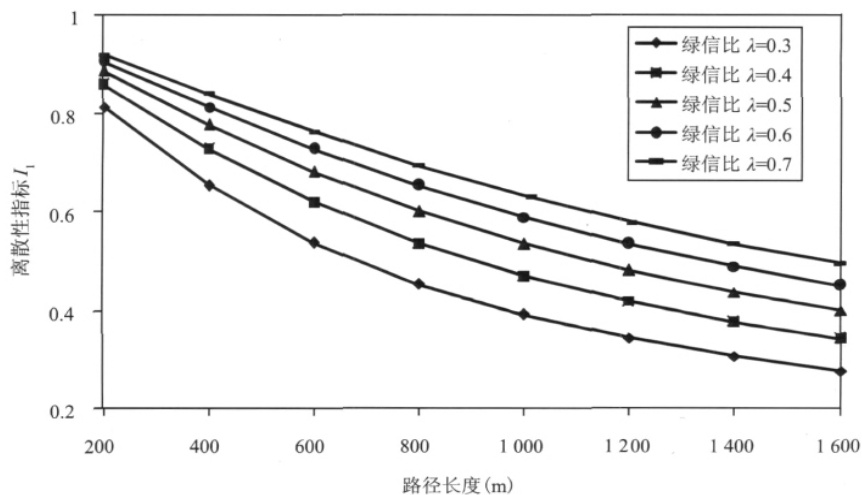


图 3 路径长度及绿信比对离散性指标影响

Fig. 3 Impacts of route length and split on dispersion index

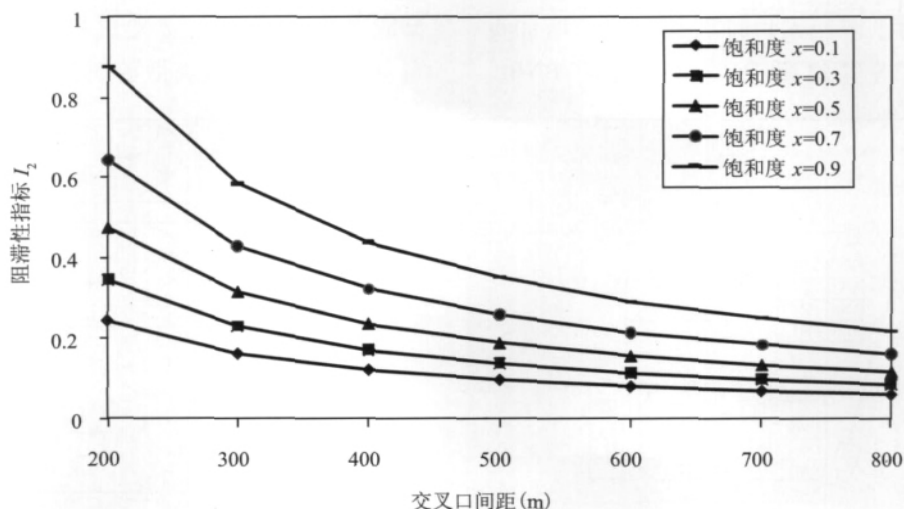


图4 交叉口间距及饱和度对阻滞性指标影响

Fig. 4 Impacts of intersection spacing and degree of saturation on retardation index

3.4 路径关联度计算

离散性关联指标 I_1 和阻滞性关联指标 I_2 所代表的物理含义不同,存在量纲上的差异,计算出交叉口群范围内所有路径的 I_1 和 I_2 值之后需无量纲处理,分别记为 I'_1 和 I'_2 ,如式(6)和式(7)所示:

$$I'_1 = \frac{I_{1\max} - I_1}{I_{1\max} - I_{1\min}} \quad (6)$$

$$I'_2 = \frac{I_{2\max} - I_2}{I_{2\max} - I_{2\min}} \quad (7)$$

式中 $I_{1\max}$ 、 $I_{1\min}$ 分别为交叉口群范围内所有路径离散性关联指标 I_1 值的最大值与最小值; $I_{2\max}$ 、 $I_{2\min}$ 分别为交叉口群范围内所有路径阻滞性关联指标 I_2 值的最大值与最小值。因此某条路径关联度 I 按式(8)计算

$$I = I'_1 + I'_2 \quad (8)$$

式中 $I \in [0, 2]$ 。依据路径关联度值可以对交叉口群信号协调控制对象的优先级别进行排序,对关联度指标值高的路径,在实施信号协调控制时应予以优先考虑。

4 计算示例

选取滁州市凤阳路、稻香路、紫薇南路和湖心路围合的4个交叉口组成的交叉口群为例,结合实地调查计算各路径的关联度值,以此为依据对信号配时进行优化,采用 Synchro 7 仿真比较协调控制

前后交通运行效益指标。实地调查获取的数据包括各交叉口流量、信号配时、行程车速、渠化形式等。图5为交叉口群结构示意图。

各转向编号由三部分组成,以转向“ASBT”为例,“A”为交叉口编号,“SB”为进口道方向,“T”表示直行车道。路径表示由不同转向编号组合而成,“CNBT-BNBL-AWBR”表示车辆由紫薇南路—湖心路交叉口北向进口道驶入,直行至稻香路—紫薇南路交叉口,左转至凤阳路—稻香路交叉口,右转驶出交叉口群范围。驶经2个交叉口、3个交叉口进出交叉口群范围的路径各有12条。计算此24条路径的离散性关联指标 I_1 和阻滞性关联指标 I_2 并进行无量纲处理,得出各路径关联度值 I ,由此确定信号交叉口群路径协调控制的优先级别。由于路径协调控制的实施效果受交叉口信号协调优化方法的影响,协调优化方法的优劣制约了信号协调控制范围。表1列出了路径关联度值从高到低排位前9位的计算结果,下文将对此9条路径进行信号协调优化。

如表1所示,路径距离越短,车流脉冲式到达下游交叉口特征越明显,关联度值越高;但短路径情况下当交叉口流量较小时,受车辆排队造成的阻滞影响程度不显著,关联度值降低。以路径“BSBR-AWBR”为例, I'_1 值为0.18, I'_2 值为0.27,虽然路径长度短于路径“CNBT-BNBL-

AWBR” ,但流量低 ,获得的有效绿灯时间短 ,连续车队规模小 ,对下游交叉口排队长度值的增加贡献少 ,所以关联度值低于路径“CNBT-BNBL-AWBR” .由此可见 ,本文所提出的路径关联度模型能多方面地反映交叉口群路径长度、流量分布、信号配时、车流离散等因素.

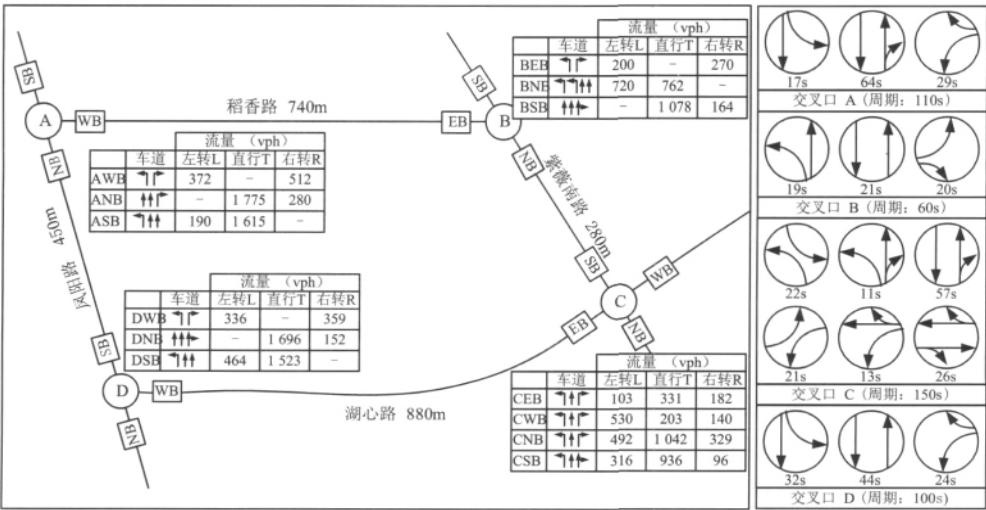


图5 交叉口群结构示意图

Fig. 5 Layout of intersections group

表1 部分路径关联度指标计算结果

Table 1 Part of the calculation results for the route correlation degree

序号	路径编号	I_1	I_2	I'_1	I'_2	I
①	BSBT - CSBT	0.60	0.56	0.59	1.00	1.59
②	BSBT - CSBL	0.60	0.51	0.59	0.90	1.49
③	DNBT - ANBT	0.70	0.38	0.73	0.64	1.37
④	CNBT - BNBT	0.88	0.19	1.00	0.24	1.24
⑤	CWBR - BNBT	0.78	0.19	0.86	0.24	1.10
⑥	ASBT-DSBT	0.84	0.12	0.94	0.09	1.03
⑦	CNBT-BNBL-AWBR	0.61	0.24	0.59	0.33	0.92
⑧	ASBT-DSBL-CEBT	0.58	0.14	0.55	0.13	0.68
⑨	CWBR-BNBL-AWBR	0.43	0.24	0.33	0.33	0.66

制定交叉口群信号协调控制时 ,对相位差的优化以路径关联度计算结果为依据. 路径③和⑥反映了交叉口 A 和 D 的关联程度 ,路径①、②、④和⑤反映了交叉口 B 和 C 的关联程度. 对相位差优化时采取如下思路:

将交叉口 A 和 D 设为协调控制单元 I ,兼顾路径⑦和⑨的信号协调; 将交叉口 B 和 C 设为协调控制单元 II ,兼顾路径⑧的协调. 对协调控制单元 I 将交叉口 A 设为关键交叉口 ,将其周期长度

110 秒定为公用周期时长 ,由于路径③关联度大于路径⑥ ,先协调北向车流 ,获得最大带宽 47 秒 ,再协调南向绿波获得最大带宽为 81 秒; 协调控制单元 II 将交叉口 C 设为关键交叉口 ,交叉口 B 的周期时长定为公用周期时长的一半 ,即 75 秒 ,对南向绿波优先考虑 ,获得最大带宽为 31 秒 ,北向带宽为 55 秒. 优化转向 AWBR 与转向 BNBL、转向 DSBL 与转向 CEBT 的相位差. 各交叉口的绿信比根据交叉口各方向的交通流量比确定.

通过对 Synchro 7 输出的评价指标进行统计, 获得协调前后各交叉口及转向的车均延误与停车率指标(见图6)。实行路径协调控制之后, 交叉口群交通运行效益略有提升, 车均延误与停车率分别降低 10.5% 和 12.6%。虽有个别转向因受控制协调优先级别调整, 运行状况略有恶化, 但表1中所

列的各条路径交通运行效益整体改善明显, 车均延误与停车率降低幅度分别为 44.1% 和 27.0%。协调控制仿真结果表明, 在计算出各路径关联度值之后, 能有效找出交叉口群范围内的相位差协调目标, 进而提出具有针对性的改善方案, 提高交叉口群交通运行效益。

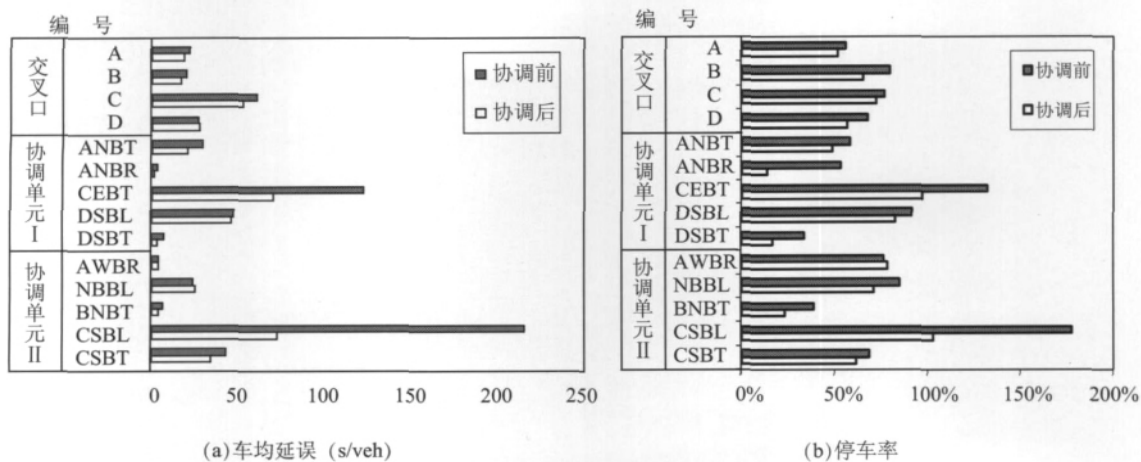


图6 协调控制效果分析

Fig. 6 Results of coordinated control

5 研究结论

综合交叉口群内路径长度、交叉口间距、路段流量、行程车速、车流离散、信号配时等诸多因素, 提出了由离散性关联指标和阻滞性关联指标共同构成的信号控制交叉口群路径关联度模型。该模型适用于多交叉口、多路径的关联度计算, 以此为基础对关联程度高的路径采取信号协调控制, 可避免排队溢流、绿灯空放等负面效应的影响。该模型被应用于改善滁州市某一交叉口群交通运行效益, 通过仿真比较验证了模型的有效性。后续研究应对基于路径关联度值的交叉口群信号协调控制优化方法进行深入探讨。

参考文献:

- [1] 杭明升. 城市道路交叉口群实时自适应控制若干理论与方法研究[D]. 同济大学, 2002. [HANG M S. Several theories and methods on real-time self-adaptive urban traffic control for grouped nodes [D]. Tongji University, 2002.]
- [2] Tian Z, Urbanik T. System partition technique to improve signal coordination and traffic progression[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(2):

119-128.

- [3] 卢凯, 徐建闽, 郑淑鉴. 相邻交叉口关联度分析及其应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 37-42. [LU K, XU J M, ZHENG S J. Correlation degree analysis of neighboring intersections and its application [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(11): 37-42.]
- [4] Day C M, Brennan T M, Premachandra H, et al. Analysis of peer intersection data for arterial traffic signal coordination decisions[EB/OL]. (2011) [2011-10-09]. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1091228>.
- [5] Li Y, Yang J, Guo X, Montasir A. Urban traffic signal control network partitioning using self-organizing maps [M/CD] (2011). The 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board Compendium of Papers DVD, Paper 11-4259.
- [6] Farzaneh M, Rakha H. Procedures for calibrating TRANSYT platoon dispersion model [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132: 548-554.
- [7] Federal Highway Administration office of Transportation Management. Traffic control systems handbook [R]. Washington, D. C.: Dunn Engineering Associates, 2005.
- [8] 马万经, 李晓丹, 杨晓光. 基于路径的信号控制交叉口关联度计算模型[J]. 同济大学学报(自然科学

- 版) ,2009 ,37(11) : 1462-1466. [MA W J ,LI X D , YANG X G. Incidence degree model of signalized intersection group based on routes [J]. Journal of Tongji University (Natural Science) ,2009 ,37(11) : 1462-1466.]
- [9] Denney Jr R W. Traffic platoon dispersion modeling [J]. Journal of Transportation Engineering ,1989 , 115: 193-207.
- [10] Husch D ,Albeck J. Synchro Studio 7 user guide [M]. Sugar Land: Trafficware ,Ltd. 2006.
- [11] 过秀成. 道路交通运行分析基础 [M]. 南京: 东南大学出版社 ,2010. [GUO X C. Foundation of road traffic operation analysis [M]. Nanjing: Southeast university press ,2010.]