

车路协同环境下基于动态车速的相位差优化模型

吴伟¹, 马万经^{2†}, 杨晓光²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对基于固定路段行驶车速的相位差优化模型在优化双向滤波时存在的不足, 本文基于车路协同环境下车辆-信号控制系统双向、实时通信的运行环境, 研究并建立了车辆动态速度与交叉口相位差的整合优化模型. 首先, 基于对上游交叉口流出的两类交通流, 即饱和交通流和非饱和交通流运行特征分析, 建立了速度与相位差相互影响关系模型, 在此基础上, 分别针对两种不同的交通流, 以干道实时流量与速度乘积最大为目标, 考虑初始排队清空时间, 可变速度范围, 和相位差取值空间等约束条件, 建立了车辆速度与相位差的动态优化模型, 从而实现干道交通流不停车通过量最大且延误最小的目的. 最后, 对比分析了本文模型与经典Maxband绿波优化模型及Synchro软件信号协调控制优化方案, 结果表明, 相比其他两种典型优化方法, 本文模型能显著提高双向绿波带宽并大幅减少停车次数, 提高协调控制的效益.

关键词: 交通控制; 动态速度; 相位差; 车路协同

中图分类号: U491.2 文献标识码:

Dynamic speed-based signal offset optimization model within vehicle infrastructure integration environment

WU Wei¹, MA Wan-jing^{2†}, YANG Xiao-guang²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410004, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to overcome the drawbacks of signal offset optimization model using link travel speed as a fixed parameter, in this paper, based on the real time communication between vehicle and signal controller within vehicle infrastructure integration environment, an integrated signal coordination control model has been proposed to optimize the dynamic link travel speed and signal offsets. Firstly, based on the theoretical analysis of two different types of traffic flows, i.e., saturation flow and non-saturation flow discharged from upstream intersection, the mathematical formulations for describing the interactions between link travel speed and offset have been set up. Then, the product of output volume and link travel speed is employed as the objective of the proposed model for the two types of traffic flows. A set of constraints including initial queue length, rational scope of travel speed, and offset are developed to ensure feasibility of the integrated optimization model, hence maximizing traffic throughputs without stopping and minimizing traffic delays simultaneously. Compared with the results optimized by classical max-band model and synchro-program, the proposed model can remarkably improve the green wave bandwidth, decrease number of stops significantly as well as increase total coordinated benefits.

Key words: traffic control; dynamic speed; offset; vehicle infrastructure integration

1 引言(Introduction)

协调控制能提高交通系统单向或多向交通流的通行效益, 降低延误、停车次数及油耗^[1]. 由于传统控制环境下数据采集与信息交互的局限, 现有大多数协调控制模型将路段行驶车速作为固定参数进行绿波优化^[2-7], 然而, 路段行驶车速受道路与交通条件的影响^[8], 且车辆实际运行速度与交叉口信号配时之间存在相互作用. 一方面, 随着路段交通状态如饱和度的

变化, 车辆驾驶自由度的改变将导致路段行驶车速的变化^[9]. 同时, 下游交叉口排队长度会影响车流行驶车速, 较长的排队将诱使驾驶人降低车速, 等待排队消散; 而排队较短则会导致驾驶员保持较高的路段行驶车速. 另一方面, 速度的大小直接影响着信号相位差的优化, 不同的运行速度下, 交叉口间最优的相位差不同; 进而能够获得的双向绿波带宽度也不同. 过高或过低的估计路段行驶车速都将显著影响协调控

制的成效甚至导致绿波无效益^[10]. 但受限于传统控制条件下, 难以实现车辆速度的动态采集与调控, 因此在大多数的协调控制模型中, 车辆运行速都只作为输入参数.

在车路协同环境下, 车辆之间、车辆与信号控制系统之间双向、实时的通信, 车辆不但能实时将车辆位置、车速等信息传送到信号控制系统, 而且控制系统经过优化, 也能实时将控制方案、建议车速等实时传回给单个车辆, 从而能主动、动态的调整路段行驶车速, 这为克服上述缺陷提供了基础数据和通信环境. Abu-Lebdeh等人^[10-11]首先探索了可变速度情况下对交叉口间协调能带来的效益, 但其模型着重于分析动态速度的效益, 成果主要用于单向绿波优化, 并没有提出系统的相位差优化模型.

本文基于由车路协同环境提供的实时准确的干道车流流量与车流到达数据, 建立整合车辆速度与相位差的集成优化模型, 克服传统模型的不足, 并实现干道信号协调效益的最大化.

2 问题描述与参数定义(Research problem description and parameter definitions)

大多协调控制模型在进行绿波优化时假定路段行驶车速已知且固定不变, 或服从某固定分布, 如几何分布或正态分布. 假设固定路段行驶车速, 并等于设计车速, 如图1(a)所示, 从图中可以看出, 固定车速的分析方法认为方向2在 t_1 时间段内从上游交叉口驶出的车流将在下游交叉口遭遇停车, 而在时间段 t_2 与 t_3 则存在绿灯空放. 车路协同环境下的交叉口间车流运行如图1(b)所示, 交叉口间路段上的车流不再以固定的或已知的车速运行, 而是根据下游信号灯状态、排队长度状态等参数计算出最佳的行驶速度, 并通过加速或减速达到此最佳速度, 能有效的提高绿灯利用率, 降低停车次数与延误.

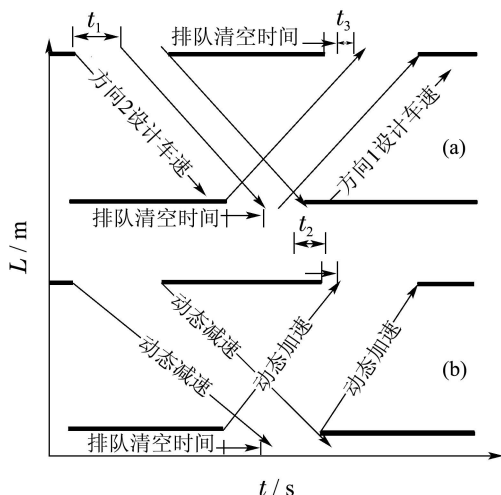


图1 交叉口间协调控制示意图

Fig. 1 Coordination control between intersections

因此, 本文的研究问题可归结于: 在车路协同环境可变路段行驶车速的情况下, 基于实时交叉口到达流量, 将路段车流分为饱和车流与非饱和车流, 以不停车车流流量与速度乘积最大为目标, 建立交叉口间相位差优化模型, 以求得两种车流的最佳路段行驶车速以及交叉口间的相位差.

考虑相邻两交叉口 i, j , 如图2所示, 考虑交叉口间干道双向协调, 协调方向包括方向1从交叉口 i 到交叉口 j 以及方向2从交叉口 j 到交叉口 i .

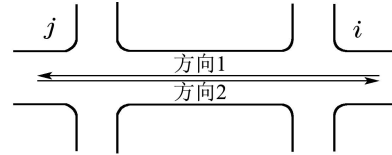


图2 交叉口几何位置与干道协调方向

Fig. 2 Basic layout and the directions for coordination between intersections

本文用到的主要参数及其定义如下:

i, j : 交叉口 i 与交叉口 j ;

C_0 : 交叉口 i 与交叉口 j 的共同周期;

O_{ij} : 交叉口 i 与交叉口 j 的相位差;

r_i : 交叉口 i 协调相位有效红灯时长;

r_j : 交叉口 j 协调相位有效红灯时长;

g_i : 交叉口 i 协调相位有效绿灯时长;

g_j : 交叉口 j 协调相位有效绿灯时长;

f_s : 上游交叉口绿灯初期以饱和流量流出的饱和车流;

f_q : 上游交叉口绿灯末期以非饱和流量流出的非饱和车流;

g_j^s : 交叉口 j 协调相位有效绿灯期间用于清空初始排队长度与服务饱和车流 f_s 的绿灯时长;

g_j^q : 交叉口 j 协调相位有效绿灯期间用于服务非饱和车流 f_q 的绿灯时长;

g_i^s : 交叉口 i 协调相位有效绿灯期间用于清空初始排队长度与服务饱和车流 f_s 的绿灯时长;

g_i^q : 交叉口 i 协调相位有效绿灯期间用于服务非饱和车流 f_q 的绿灯时长;

L : 交叉口 i 到交叉口 j 的距离;

L_i : 交叉口 i 路径 b 协调相位初始排队长度;

L_j : 交叉口 j 路径 a 协调相位初始排队长度;

τ_i : 交叉口 i 协调相位清空初始排队所需绿灯时长;

τ_j : 交叉口 j 协调相位清空初始排队所需绿灯时长;

t_i^s : 交叉口 i 协调相位车流以饱和流量驶出的时长;

t_i^q : 交叉口 i 协调相位车流以非饱和流量驶出的时长;

t_j^s : 交叉口 j 协调相位车流以饱和流量驶出的时长;
 t_j^q : 交叉口 j 协调相位车流以非饱和流量驶出时长;
 t_{ji} : 饱和车流 f_s 从交叉口 j 到交叉口 i 的行程时间;
 V_1^s : 方向1车流 f_s 在交叉口间路段上的平均行驶车速;

V_1^q : 方向1车流 f_q 在交叉口间路段上的平均行驶车速;

V_2^s : 方向2车流 f_s 在交叉口间路段上的平均行驶车速;

V_2^q : 方向2车流 f_q 在交叉口间路段上的平均行驶车速;

Q_1^s : 方向1车流 f_s 中的车辆数;
 Q_1^q : 方向1车流 f_q 中的车辆数;
 Q_2^s : 方向2车流 f_s 中的车辆数;
 Q_2^q : 方向2车流 f_q 中的车辆数.

3 速度与相位差相互影响关系分析(Analysis of the functional relation between speeds and offsets)

3.1 上游流出的两类交通流(Two different types of traffic flows output from upstream)

以交叉口 i 方向1的进口道车流到达为例, 假设车流均匀到达, 到达率为 q , 则某个周期此进口道到达的车流排队累积与消散图如图3所示: 其中 s 表示饱和流量, t_i^s 表示车流以饱和流量 s 通过交叉口的时间, t_i^q 表示车辆以到达率 q 通过交叉口的时间, g_i 表示有效绿灯时长, r_i 表示有效红灯时长. 从图3中可看出, 在绿灯期间, 从交叉口驶出的车流可分为两部分: ①在 t_i^s 内以饱和流量驶出, 将此车流记作 f_s ; ②在 t_i^q 内以到达率驶出, 记作 f_q .

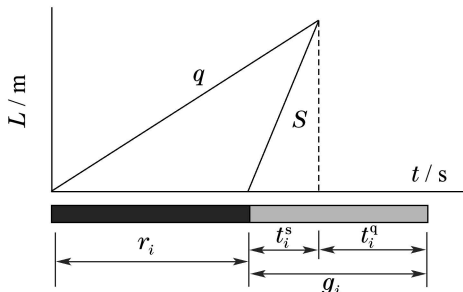


图3 车流排队累积与消散图

Fig. 3 Accumulation-dissipation of queue for an approach

图3中的 t_i^s 与 t_i^q 可由下式计算:

$$t_i^s = \frac{qr_i}{s - q}, \quad (1)$$

$$t_i^q = g_i - t_i^s. \quad (2)$$

以 θ_1 表示方向1的流量占此进口道总流量的比例, 则方向1中的饱和车流 f_s 的流量 Q_1^s 、非饱和车流 f_q 的

流量 Q_1^q 可分别表示为

$$Q_1^s = st_i^s\theta_1, \quad (3)$$

$$Q_1^q = qt_i^q\theta_1. \quad (4)$$

同理, 则方向2中的饱和车流 f_s 的流量 Q_2^s 、非饱和车流 f_q 的流量 Q_2^q 可分别表示为

$$Q_2^s = st_j^s\theta_2, \quad (5)$$

$$Q_2^q = qt_j^q\theta_2, \quad (6)$$

式中 θ_2 表示方向2的流量所占的比例.

3.2 速度相位差关系(Functional relation between speeds and offsets)

在车路协同环境下, 应最大程度引导车流 f_s 不停车且延误最小的通过下游交叉口, 即最大程度的引导车流 f_s 行驶至下游交叉口最大排队点时, 下游交叉口绿灯期间的启动波正好传至最大排队处, 进而车流 f_s 跟随最大排队点处的车辆通过下游交叉口. 对于非饱和车流 f_q , 则通过引导最大程度使更多的交通流顺利通过下游交叉口. 考虑上下游交叉口间双向交通流, 时空轨迹图如图4所示.

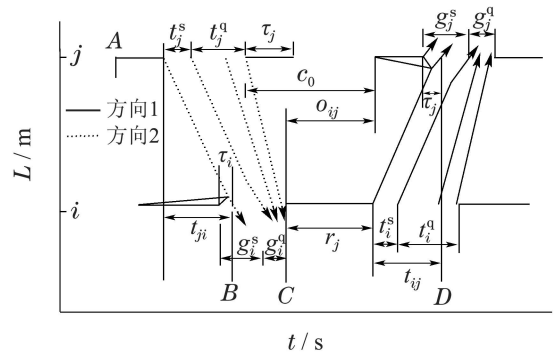


图4 上下游交叉口干道车流时空轨迹图

Fig. 4 Time-trajectory figure for both directions

以方向1协调方向的红灯起亮时间定义相位差 O_{ij} , 则方向2的相位差 O_{ji} 可用下式计算:

$$O_{ji} = C_0 - O_{ij}, \quad (7)$$

$$0 \leq O_{ij} < C_0, \quad (8)$$

$$0 < O_{ji} \leq C_0. \quad (9)$$

从图4中可以看出, 从时间点A到时间点B:

$$r_j + t_{ji} = O_{ji} + r_i + \tau_i. \quad (10)$$

把式(7)代入式(10)并整理得

$$t_{ji} + O_{ij} = C_0 + r_i + \tau_i - r_j. \quad (11)$$

同样, 从时间点C到时间点D:

$$r_i + t_{ij} = O_{ij} + r_j + \tau_j. \quad (12)$$

整理得

$$t_{ij} - O_{ij} = r_j + \tau_j - r_i. \quad (13)$$

对于排队清空时间 τ_i ,其由两部分构成,第1部分为启动波传递到最大排队长度点所需的时间,第2部分为从最大排队长度点行驶,直至通过交叉口所需的时间,可以用下式表示:

$$\tau_i = \frac{L_i}{W_i} + \frac{L_i}{V_i}, \quad (14)$$

式中: W_i 表示交叉口*i*处启动波速, L_i 为排队长度, V_i 表示交叉口*i*处饱和车流通过交叉口的速度,同样, τ_j 可由下式表示:

$$\tau_j = \frac{L_j}{W_j} + \frac{L_j}{V_j}, \quad (15)$$

式中: W_j 表示交叉口*j*处启动波速, V_j 表示交叉口*j*处饱和车流通过交叉口的速度.

对于饱和车流方向1的路段行程时间 t_{ij} ,同样其由两部分构成,第1部分为从上游交叉口*i*到下游交叉口*j*最大排队长度点的行驶时间,第2部分为从最大排队长度点跟随排队车辆行驶,直至通过交叉口所需的时间,可以下式表示:

$$t_{ij} = \frac{L - L_j}{V_1^s} + \frac{L_j}{V_j}, \quad (16)$$

$$V_{\min} \leq V_1^s \leq V_{\max}. \quad (17)$$

同样

$$t_{ji} = \frac{L - L_i}{V_2^s} + \frac{L_i}{V_i}, \quad (18)$$

$$V_{\min} \leq V_2^s \leq V_{\max}. \quad (19)$$

对于上游绿灯后期驶出的非饱和车流 f_q 的引导车速计算方法,以方向1为例,首先计算下游交叉口清空排队与饱和车流 f_s 后的绿灯剩余时间 g_j^q ,从图4中可以看出

$$g_j^q = g_j - g_j^s, \quad (20)$$

其中 g_j^s 可以由下式计算:

$$g_j^s = \tau_j + \frac{Q_1^s}{l_a} h_s, \quad (21)$$

式中: l_a 表示方向1的进口道车道数, h_s 表示饱和车头时距.则非饱和车流从交叉口*i*到下游交叉口*j*的时空轨迹图如图5所示.

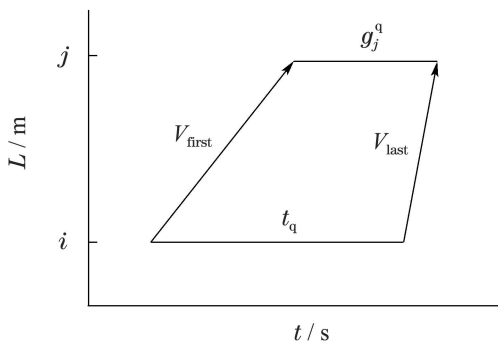


图5 非饱和车流时空轨迹图

Fig. 5 Time-trajectory figure for non-saturation flow

图5中: V_{first} 表示非饱和车流的头车的引导车速, V_{last} 表示非饱和车流尾车的引导车速,则非饱和车流的平均车速 V_1^q 可用下式估计:

$$V_1^q = \frac{V_{\text{first}} + V_{\text{last}}}{2}. \quad (22)$$

从图4-5中可得出, V_{first} , V_{last} 可分别表示为

$$V_{\text{first}} = \frac{L}{g_j^s + r_j + O_{ij} - r_i - t_i^s}, \quad (23)$$

$$V_{\text{last}} = \frac{L}{O_{ij}}. \quad (24)$$

将式(23)-(24)代入式(22)并整理得

$$V_1^q = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{g_j^s + r_j + O_{ij} - r_i - t_i^s} + \frac{L}{O_{ij}} \right), \quad (25)$$

$$V_{\min} \leq V_1^q \leq V_{\max}. \quad (26)$$

同理,方向2的非饱和车流车速 V_2^q 可由下式表示:

$$V_2^q = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{r_i + g_i^s + O_{ji} - r_j - t_j^s} + \frac{L}{O_{ji}} \right). \quad (27)$$

同样,

$$V_{\min} \leq V_2^q \leq V_{\max}. \quad (28)$$

4 优化模型(Optimization model)

综上,本文基于车路协同环境的整合动态车速与相位差的集成优化模型,可表示如下.

目标函数:

本文的目标函数可表示为

$$\max (Q_1^s V_1^s + Q_1^q V_1^q + Q_2^s V_2^s + Q_2^q V_2^q),$$

即本文的目标函数为双向干道协调方向的流量与行驶车速的乘积之和最大.在模型实现的过程中,如果在优化后有车辆不能在本周期绿灯时间内不停车通过下游交叉口,则在目标函数中将该车辆的目标函数贡献值记为零.

决策变量:

相位差: O_{ij} ;

车辆速度: 双向饱和车流车速: V_1^s, V_2^s , 双向非饱和车流车速: V_1^q, V_2^q .

约束条件: 式(1)-(28).

5 模型验证(Model validation)

5.1 实验设计(Experimental design)

为验证本节模型的有效性,考虑两相邻交叉口*i*与*j*,交叉口间距为700 m,设置两交叉口的共同协调周期为120 s,每周期的总损失时间为12 s,饱和流量为1800 cpu/h,则饱和车头时距为2 s;设置路段车流合理的速度变化范围为4.7 ~ 12.5 m/s(17 ~ 45 km/h),启动波的传递速度为4.9 m/s;按各进口道饱和度分配绿灯时间,设置各交叉口进口道的饱和度为0.7,考虑两交叉口双向流量相等,计算得到协调方向1、方

向2的流量为625 pcu/h, 则每个方向每周期到达的车流数为饱和车流17辆, 非饱和车流3辆. 两交叉口的交叉口进口道编号, 车道功能划分与相位相序、流量分配以及信号配时如图6所示.

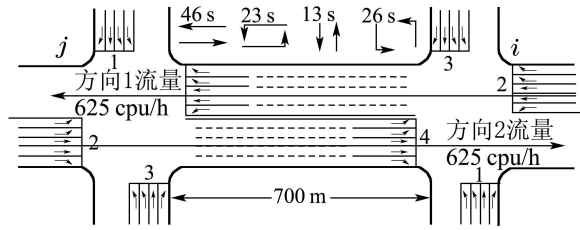


图6 研究区域基本参数配置图

Fig. 6 Basic layout and parameters of the study area

5.2 模型结果对比分析(Comparison and analysis of the results)

为验证本文模型的有效性, 实证分析对比了3种方案的控制效果.

方案1: Maxband方案;

方案2: Synchro方案;

方案3: 本文模型方案.

其中, 设置Manband方案的目标函数为双向带宽之和最大. 为了保证方案1与方案2的最佳效果, 将其行驶车速设置为最大值12.5 m/s, 结果如表1所示. 表1中: 行驶速度包括饱和和车流速度与括号中的非饱和车流速度; 不停车车辆数包括饱和车流与括号中的非饱和车流的车辆数.

表1 某周期优化结果对比表

Table 2 Comparison of results in one cycle

方案	方向1			方向2		
	相位差/s	行驶车速/(m/s)	不停车车辆数	相位差/s	行驶车速/(m/s)	不停车车辆数
Maxband	60	12.5(12.5)	9(3)	60	12.5(12.5)	9(3)
Synchro	57	12.5(12.5)	11(3)	63	12.5(12.5)	7(3)
本文模型	56	10.8(12.5)	17(3)	64	9.6(10.9)	17(3)

从表1中可以看出, 各模型优化的相位差各不相同; 在行驶车速方面, 区别于Maxband方案与Synchro方案的路段固定车速, 本文模型的优化结果显示饱和车流与非饱和车流需采用不同的行驶车速. 通过每周期不停车车辆数的对比可以看出, 3种方案的非饱和车流全都能顺利不停车通过交叉口, 而饱和车流只有本文模型能全部不停车通过交叉口, 说明Maxband方案与Synchro方案上游交叉口绿灯初期流出的交通流在下游交叉口将由于红灯或排队而经历停车, 而本文模型通过降低车速有效的避免了此不足. 3种方案协调方向的绿波带宽、不停车车辆百分比、不停车通过效益值(本文目标函数值)的对比如图7-9所示.

从图7可以看出, 本文模型优化方案则可以提高双向绿波带宽, 对比Maxband方案与Synchro方案, 方向1分别提高绿波带宽12.7%与3%; 方向2分别提高绿波带宽12.7%与24.5%. 双向共提高带宽约12%.

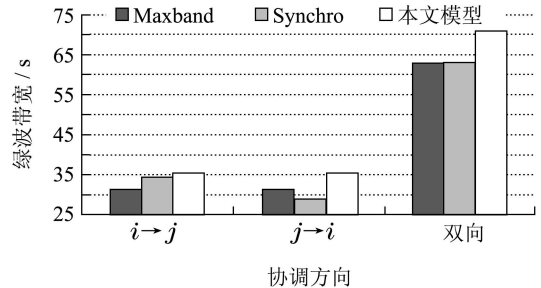


图7 不同模型带宽优化对比图

Fig. 7 Comparison of green bandwidth for different models

从图8中可以看出, 本文模型协调方向的不停车车辆百分比为100%, 即所有到达车辆都能不停车顺利通过下游交叉口, 对比Maxband方案与Synchro方案, 共减少约40%的停车次数.

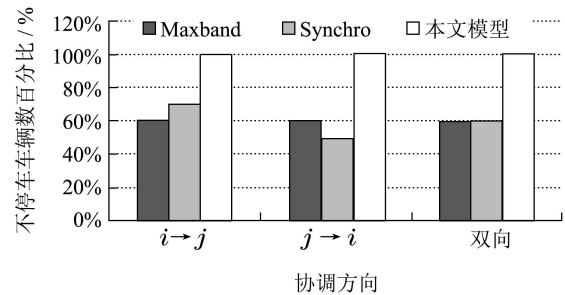


图8 不同模型停车次数百分比对比图

Fig. 8 Comparison of percentage of number of stops for different models

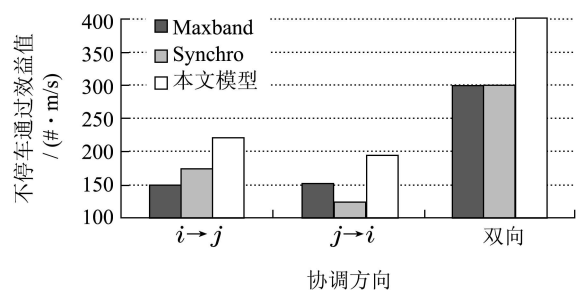


图9 不同模型协调方向不停车通过效益值

Fig. 9 Comparison of mobility benefits for different models

虽然本文模型效益值的计算等于速度乘以车辆数, 且Maxband方案与Synchro方案都采用最大限速而大于本文模型的速度取值, 而从图9中可以看出, 不论是方向1或方向2, 本文模型的不停车通过效益值对比Maxband方案与Synchro方案都有明显提高, 双向都提高约39%的效益值. 这是因为在本文模型优化的方案虽然降低了路段车速, 但能使更多的车辆不停车通过下游交叉口, 说明本文模型在优化效益值时, 能做到最优的行驶车速与通过车辆数的组合.

6 结论(Conclusions)

交叉口间的路段行驶车速随道路与交通条件如饱和度、排队长度、信号状态等的不同而改变,并显著影响干道协调控制模型的效益.本文基于车路协同环境,建立了基于动态车速的干道双向相位差协调优化模型.模型能根据不同的初始道路与交通条件,针对饱和和车流与非饱和和车流,动态优化路段行驶车速与交叉口间的相位差,以实现最大的协调效益.案例分析表明,本文模型相对于经典Maxband模型和Synchro模型,能提高双向带宽约12%,降低停车次数约40%,提高协调效益值约39%.本文是将车辆运行速度与信号相位差集成优化的初步探索,后续的研究将分析本文模型在动态响应交通流变化方面的效果,并在更大范围的路网上进行效果分析.

参考文献(References):

- [1] KOONCE P, RODEGERDTS L, LEE K, et al. *Traffic Signal Timing Manual* [R]. Washington DC: Department of Transportation Federal Highway Administration, 2008.
- [2] HU P, TIAN Z Z. A new approach to variable-bandwidth progression optimization [C] // *The 89th Transportation Research Board Annual Meeting, Transportation Research Board*. Washington DC: [s.n.], 2010.
- [3] ZHAO Y. Influence of signal phasing sequence and spacing on signal coordination [J]. *Traffic Engineering and Control*, 2012, 53(3): 101 – 106.
- [4] PARR S A, KAISAR E. Critical intersection signal optimization during urban evacuation utilizing dynamic programming [J]. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2011, 3(1): 59 – 76.
- [5] 邝先验, 许伦辉, 黄艳国. 交通信号公交优先控制策略及智能控制方法 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(10): 1284 – 1290.
- (KUANG Xianyan, XU Lunhui, HUANG Yanguo. Traffic signal bus-priority control strategy and intelligent control method [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1284 – 1290.)
- [6] HAJBABAIE A, MEDINA J C, BENEKOHAL R F. *Traffic signal coordination and queue management in oversaturated intersections* [R]. Report No. 047IY02. Champaign: University of Illinois at Urbana Champaign, 2011.
- [7] 卢凯. 交通信号协调控制基础理论与关键技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
(LU Kai. Research on the foundational theory and key techniques of coordinate signal control in urban traffic network [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.)
- [8] ARDEKANI S A, SHIVAGANGAIAH H U. A mean speed prediction model for surface streets [J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2012, 2(3): 541 – 552.
- [9] TARKO A P, CHOCHARUKUL K, BHARGAVA A, et al. A simple method of predicting travel speed on urban arterial streets for planning applications [J]. *Journal of Transportation Research Record*, 2006, (1988): 48 – 55.
- [10] ABU-LEBDEH G, CHEN H. Exploring the potential benefits of Intellidrive-enabled dynamic speed control in signalized networks [C] // *The 89th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC: [s.n.], 2010.
- [11] ABU-LEBDEH G. Integrated adaptive-signal dynamic-speed control of signalized arterials [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2002, 128(5): 447 – 451.

作者简介:

- 吴伟 (1987–), 男, 讲师, 博士, 研究方向为交通信息工程及控制, E-mail: wuwei-8702@163.com;
- 马万经 (1980–), 男, 副教授, 博士生导师, 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, 研究方向为交通系统分析、智能交通与智慧城市, E-mail: yangxg@tongji.edu.cn.