

长距离干道混合车流路径分割与绿波协调同步优化

徐建闽¹, 冯斌¹, 林永杰¹, 刘鹏¹, 卢凯^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 城市长距离交通干道中, 小汽车和公交车的运行轨迹存在显著差异, 合理的信号协调控制策略应统筹考虑两类车型的需求。针对包含大流量公交车的长距离干线绿波协调路口传统分组片面化的问题, 分析了带有公交站台的长距离干道上小汽车和公交车时空轨迹特征, 提出了差异化路口分组的信号协调方法。该方法将小汽车和公交车的协调路径分割点分别设置在路口和公交站点, 构建了两类车型干道行驶的延误和等候时间最小化运筹学模型。实际路网的仿真证明: 针对中山市中山路 13 个灯控路口, 提出的长路径差异化分段协调较 Multiband 模型, 其小汽车和公交车平均延误分别减少 34.7% 和 13.7%, 平均停车次数减少 28.7% 和 30.0%。此外, 针对饱和度、公共周期和公交停站时间 3 个关键指标的敏感性分析实验同样证明, 提出的方法能同时为长距离走廊上的小汽车和公交车提供协调服务。

关键词: 智能交通; 长距离路径; 小汽车和公交车; 差异化分段协调

中图分类号: U491.54

文献标志码: A

Synchronous Optimization of Path Partition and Green-band Coordination for Mixed Traffic at Long-distance Arterials

XU Jianmin¹, FENG Bin¹, LIN Yongjie¹, LIU Peng¹, LU Kai^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: There are significant difference between car trajectories and bus ones at urban long-distance arterials, and so the signal coordination strategy should take it into account to balance the progression needs of both vehicles. Such as to tackle with the problem of signalized

intersection grouping at the long arterial with high-demand bus vehicles, this paper analyzed the temporal and spatial trajectory characteristics of cars and buses along the arterial with bus stops and presented a new signal coordination based on differential intersection group partition. The proposed model set the coordinated breaking points of car and bus trajectories at intersections and bus stops, respectively, and built a mixed integer linear programming model to minimize the weighted summation of delay and waiting time for car-users and bus passengers. In simulation tests that used the field arterial of having 13 signalized intersections from Zhongshan, compared with Multiband, the developed model can reduce the average vehicle delay of cars and buses by 34.7% and 13.7%, and the number of average stops by 28.7% and 30.0%, respectively. Further exploration with simulation experiments for sensitivity analysis on saturation, common cycle length and bus dwelling time found that the developed method can provide the synchronous progression for cars and buses on the long arterial.

Key words: intelligent transportation; long-distance arterials; car and bus; differentiated segmentation coordination

公交车作为城市大运量的常见公共交通工具, 具有减少城市拥堵、优化城市客运结构和节能减排等重要作用。为充分发挥公交车大运载量的特点, 在满足小汽车通行需求的前提下, 应保证尽可能多的公交车在短时间内快速通过单个或多个信号交叉口到达下游公交站台。而信号协调控制则是一类合理分配公交车和小汽车在交叉口时间通行权的有效方法。传统干道协调方法能够为小汽车提供双向绿波带宽, 但随着干道交叉口、公交车和站台数量的增

收稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1601600); 国家自然科学基金面上项目(61873098)

第一作者: 徐建闽(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通信息工程及控制。

E-mail: aujmxu@scut.edu.cn

通信作者: 林永杰(1987—), 男, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通数据建模与信号优化。

E-mail: linyjscut@scut.edu.cn



论文
拓展
介绍

加,其有效绿波带宽逐渐变窄甚至没有^[1],这可能会显著降低公交车的运行效率。因此,干道协调急需一类能够满足长干道、多交叉口、大流量公交和小汽车通行需求的绿波协调方法。

关于长距离干道分段和协调绿波的问题, Lin等^[2]发现干道上交叉口数量越多,协调的绿波带宽就越窄,因此解决此类问题的有效办法是实行分段协调;马楠等^[3]研究发现当信号交叉口数量增加到16个时,基本不能获得全局带宽;Yang等^[4]探讨了多路径、大流量下的干道协调算法,提出了一套分段协调绿波模型;唐小军等^[5]在Maxband模型上,建立了干线分子区协调控制模型。模型自动地将干线分为若干控制子区,每个子区具有3~6个交叉口,同时追求子区最大化绿波带宽,不同子区协调方向的直行车辆享有尽可能均等的绿波通行时间,但该模型只适用于两相位的路段;Liu等^[6]改进了Newman快速算法,新算法可以划分加权交通网络,仿真实验表明,改进的Newman快速算法可以取得较好的子网划分结果;Hao等^[7]提出了一种可以实现子区数量最少、同时满足控制需求的长干道子区划分与绿波同步建模,所提出的模型是采用混合整数线性规划,保证全局最优解。潘科^[8]在综合绿波的控制方法上更进一步的把干线划分为各子干线,并加入流量、距离权重来建立了以子干线加权之和最大为控制目标的子干线模型。赵靖等^[9]以宏观基本图为基础,建立控制子区间驶入驶出交通量的协调控制模型,该模型克服了针对单个控制子区的最优化控制可能造成的拥堵转移。乐浩成^[10]使用“粗-细”划分方法对交叉口进行动态子区划分,“粗”划分是依据距离、流量、周期三原则的综合指标,“细”划分以绿波带带宽达到率指标来衡量路段是否需要协调。徐建闽等^[11]提出了基于不同拥挤程度的路网动态分区方法,该算法根据相邻交叉口的交通关联度和相似度,建立了路网动态分区模型,进而结合谱图理论设计了动态分区算法。田秀娟等^[12]利用交叉口关联度改进了传统Newman算法,提出了基于改进的Newman社团快速划分的动态子区划分方法。

针对公交车协调领域, Ma等^[13]以路口小汽车数最大化等六个指标为目标函数,提出了一种分段的多模式带宽(Pmband)模型,旨在解决小汽车和公交车的信号协调问题;王昊等^[14]设计了一种包含有轨电车的多条直行路径干线绿波优化方法,确保干线转向有轨电车与直行社会车辆同时享有绿波协调效果; Lin等^[15]针对交叉口附近的路中型公交站

BRT车辆排队过长的问题,以即将到站的公交车为控制对象,提出了公交优先抑制策略(绿灯缩短和红灯延长)控制站台处的进入车辆数,在反方向上实施公交优先。高柳依^[16]提出了多交叉口分段绿波公交优先联动控制模型,该模型使用数解法得到最优的公交干道绿波信号,最终应用最大绿波带宽度的分段车速计算方法计算出路段最优行驶车速。

综上所述,国内外学者对于长距离干线协调绿波和公交绿波有了一定的研究,但关于长距离干道小汽车与大流量公交车之间的同步绿波协调研究成果较少,而传统方法多关注交叉口间距离和直行车流的协调效率,而忽视了公交车停靠站的影响,导致绿波效果变差、通行效率低。另外,传统的分段协调多以路口关联度进行先子区划分再分段协调,未能实现干道路口分组与绿波参数的同步建模优化。

本文在Multiband以及Hao等^[7]提出的长距离干道绿波协调的基础上,分析了公交和小汽车的运行轨迹差异,提出了长距离混合绿波(long mixed band,简称Lmband)模型。该模型考虑了公交和小汽车差异化分组,解决了流公交和小汽车流在协调子区划分不一致的问题,可有效减少车辆延误和停车次数。

1 长距离混合绿波协调

为方便阐述模型,变量下标第一个字母C为小汽车相关变量,下标第一个字母B为公交相关变量。例如, $b_{c,i}$ 表示小汽车在交叉口*i*的上行带宽(单位:cycles)。

图1为小汽车与公交干道分割示例,将小汽车分割点设置在交叉口,相邻分割点内的交叉口为同一协调组,同组内交叉口进行绿波协调,不同组交叉口之间互不影响;考虑到公交的运行模式与小汽车之间的差异,将公交车分割点设置在公交站台,相邻公交站点之间的交叉口进行干道协调,同时在公交站点引入额外停靠时间保证公交带宽的可靠性。

1.1 目标函数

本文提出的模型是最大化干道上小汽车和公交车的5项指标的加权和,分别是乘客(区分小汽车和公交车)绿波带宽、小汽车分割点等待时间、公交乘客额外等待时间、停车损失时间,其表达式为

$$\text{Maximize}(w_1D_1+w_2D_2-w_3D_3-w_4D_4-w_5D_5) \quad (1)$$

式中: w_i 为第*i*项的权重值; D_1 为基于小汽车乘客绿波带宽; D_2 为基于公交车乘客绿波带宽; D_3 为小汽车分割点等待时间; D_4 为公交乘客额外等待时间; D_5 为停车损失时间。

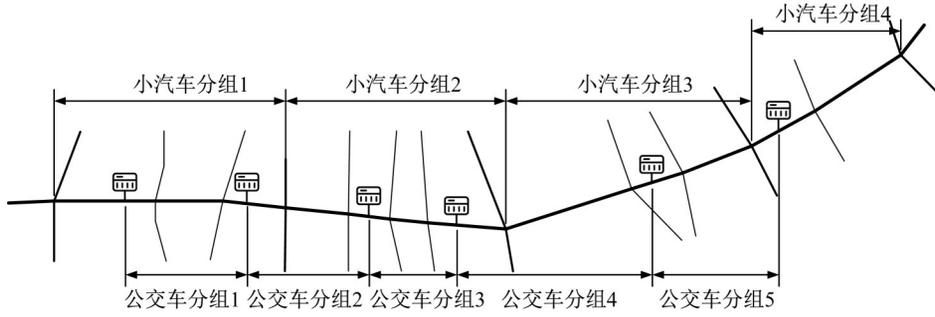


图1 Lmband模型长干道路口分割

Fig.1 Grouping intersection breakpoints on the long arterial under Lmband

(1) 乘客绿波带宽

传统目标多关注于最大化部分流量较大方向的绿波带宽,忽略了大运量公交车在交叉口的带宽,本文利用乘客带宽作为优化目标之一,其小汽车乘客带宽表达式为

$$D_1 = \sum_{i=1}^I N_{car} q_{C,i} b_{C,i} C + \sum_{i=1}^I N_{car} \bar{q}_{C,i} \bar{b}_{C,i} C \quad (2)$$

同理,公交车乘客带宽为

$$D_2 = \sum_{i=1}^I N_{bus} q_{B,i} b_{B,i} C + \sum_{i=1}^I N_{bus} \bar{q}_{B,i} \bar{b}_{B,i} C \quad (3)$$

式中: N_{car} (N_{bus})为平均小汽车(公交)乘客人数; $q_{C,i}$ ($\bar{q}_{C,i}$)为交叉口*i*上(下)行小汽车流量(单位:pcu·h⁻¹); $q_{B,i}$ ($\bar{q}_{B,i}$)为交叉口*i*上(下)行公交车流量(单位:pcu·h⁻¹); $b_{C,i}$ ($\bar{b}_{C,i}$)为小汽车在交叉口*i*的上(下)行带宽(单位:cycles); $b_{B,i}$ ($\bar{b}_{B,i}$)为公交车在交叉口*i*的上(下)行带宽(单位:cycles); C 为交叉口公共信号协调周期(单位:s)。

(2) 小汽车分割点等待时间

当交叉口*i*为干道分割点时,带宽 $b_{C,i}$ 与带宽 $b_{C,i-1}$ 之间存在偏移量 $\tau_{C,i}$,根据偏移量可求得车辆在分割点等待红灯时间为

$$\Delta r_i = \tau_{C,i} - \omega_{C,i} \quad (4)$$

同理,分割点处乘客等待红灯的时间可表示为

$$D_3 = N_{car} C \sum_{i=1}^I [(\tau_{C,i} - \omega_{C,i}) q_{C,i} + (\bar{\tau}_{C,i} - \bar{\omega}_{C,i}) \bar{q}_{C,i}] \quad (5)$$

式中: $\tau_{C,i}$ ($\bar{\tau}_{C,i}$)为交叉口*i*上(下)行方向小汽车绿波带中心偏移量(单位:cycles); $\omega_{C,i}$ ($\bar{\omega}_{C,i}$)为交叉口*i*上(下)行绿波带中心至绿灯相位左侧边缘的偏移量(单位:cycles)。

(3) 公交乘客额外等待时间

因公交车的干道协调断点在站台处,虽然公交站台的额外延长时间能够增加服务时间,但也会直接增加下一站乘客的等待时间。因此,下游公交站

台的等待时间变化为

$$D_4 = \sum_{k=2}^I \left[(N_k \alpha_k) \sum_{i=1}^{k-1} \Delta a_i C \right] \quad (6)$$

式中: N_k 为公交站*k*的平均等待人数; α_k 为二进制常量0和1,用于表示路段*L_k*是否有公交站台, $\alpha_k=1$ 时,有公交站台,反之,没有公交站台; Δa_i 为公交站台*i*的额外延长停靠时间(单位:cycles)。

(4) 停车损失时间

尽管式(5)中 D_3 已经计算了等待红灯时间,但车辆停车还会造成一定程度加减速和交互干扰,从而增加额外的延误。因此,其停车损失时间计算方法设定为

$$D_5 = \sum_{i=1}^I K p_i (q_{C,i} + \bar{q}_{C,i}) \quad (7)$$

式中: p_i 为二进制变量,用于判断交叉口*i*是否为干道分割点; K 为停车惩罚系数,根据文献[17],在一般城市道路中取值范围为[10,30]。

1.2 小汽车绿波带

图2为小汽车在Lmband模型下的时空运行轨迹。该模型将小汽车的协调交叉口分割点设置为路口,通过在交叉口引入绿波带中心偏移量 $\tau_{C,i}$ 和二进制分割变量 p_i ,实现长距离多交叉口分割,同一分割子系统各交叉口之间获得相等带宽,不同子系统的不同行驶方向上带宽不同。因两类车辆行驶方式以及干道分割策略不同,参考Multiband以及文献[13]等的混合整数线性规划建模,构建小汽车协调模型中的绿灯时长、循环整形、行程时间以及带宽等约束。

(1) 绿灯时长约束

绿波带宽出现在交叉口*i*的绿灯时间内,满足绿灯时间约束(8)如下:

$$\begin{cases} \frac{b_{C,i}}{2} \leq \omega_{C,i} \leq 1 - r_i - \frac{b_{C,i}}{2} \\ \frac{\bar{b}_{C,i}}{2} \leq \bar{\omega}_{C,i} \leq 1 - r_i - \frac{\bar{b}_{C,i}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

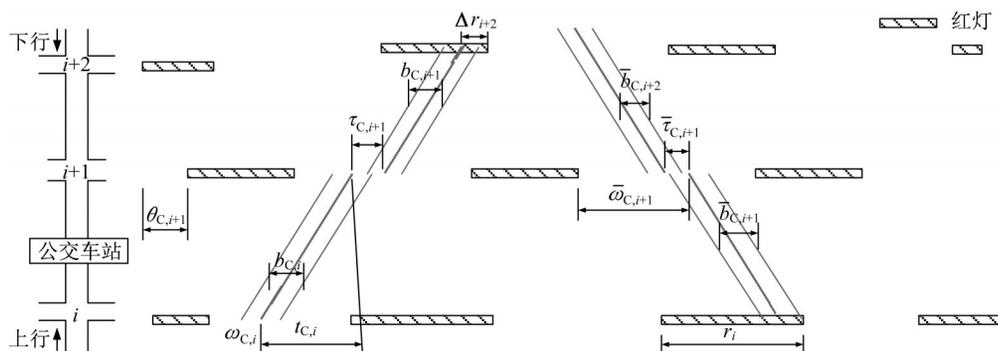


图2 Lmband模型下小汽车时空运动轨迹

Fig.2 Time-space diagram of car trajectory in long arterial under Lmband

式中: r_i 为交叉口 i 的红灯(单位: cycles)。同时, 绿波带宽应在交叉口 $i+1$ 的绿灯时间内, 满足约束(9)和(10), 即

$$\begin{cases} \frac{b_{C,i}}{2} - Mp_{i+1} \leq \omega_{C,i+1} - \tau_{C,i+1} \leq \\ 1 - r_{i+1} - \frac{b_{C,i}}{2} + Mp_{i+1} \\ \frac{\bar{b}_{C,i}}{2} - Mp_i \leq \bar{\omega}_{C,i} - \bar{\tau}_{C,i} \leq \\ 1 - r_i - \frac{\bar{b}_{C,i}}{2} + Mp_i \end{cases} \quad (9)$$

$$p_i = \begin{cases} 1 & \text{如果交叉口 } i \text{ 是分割点} \\ 0 & \text{如果交叉口 } i \text{ 不是分割点} \end{cases} \quad (10)$$

式中: p_i 控制式(9)的有效性, 当交叉口 i 不是分割点时, 约束成立; 否则, 约束不成立。 M 为足够大的正数。

为保证小汽车能够顺利通行, 各交叉口带宽 $b_{C,i}$ ($\bar{b}_{C,i}$) 需满足最小带宽约束(11), 即

$$\begin{cases} b_{C,i} \geq b_{\min} \\ \bar{b}_{C,i} \geq \bar{b}_{\min} \end{cases} \quad (11)$$

式中: b_{\min} (\bar{b}_{\min}) 为交叉口 i 上(下)行最小有效带宽(单位: cycles)。

(2) 循环整形约束

相邻交叉口的相位差应满足一定条件, 才能保证干道各交叉口的协调, 具体约束为

$$\begin{cases} \theta_{C,i} + r_i + \omega_{C,i} + t_{C,i} + \tau_{C,i+1} = \\ \theta_{C,i+1} + r_{i+1} + \omega_{C,i+1} + n_{1i} \\ \theta_{C,i} + r_i + \bar{\omega}_{C,i} + n_{2i} = \\ \theta_{C,i+1} + r_{i+1} + \bar{\omega}_{C,i+1} + \bar{t}_{C,i} + \bar{\tau}_{C,i} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\theta_{C,i}$ 为交叉口 i 初始时刻距红灯开始时刻的时间差(单位: cycles); n_{1i} (n_{2i}) 为信号周期 C 的整数倍(单位: cycles); $t_{C,i}$ ($\bar{t}_{C,i}$) 为小汽车在路段 L_i 上(下)行方向的行程时间(单位: cycles); L_i 为交叉口 i 与交叉口 $i+1$ 之间的路段长度(单位: m)。

(3) 行程时间约束

在现实中, 小汽车和公交的行驶速度受到多方面的限制, 路段行程时间一般限制在特定区间内^[13]。如图2所示, 当交叉口 i 为分割点时, 车辆遇红灯而减速停车, 而绿灯开始时, 加速驶离交叉口。传统方法在行驶时间约束中, 没有考虑加减速过程, 忽略了车辆在分割点的时间差异, 造成部分带宽的浪费。式(13)为小汽车行程时间计算公式, 其主要包括路段行驶时间以及分割点加减速时间; 式(14)与式(15)分别为路段速度限制与速度变化范围限制。

$$\begin{cases} t_{C,i} = \frac{L_i}{v_{C,i}} Z + p_i t_a + p_{i+1} t_d \\ \bar{t}_{C,i} = \frac{L_i}{\bar{v}_{C,i}} Z + p_{i+1} \bar{t}_a + p_i \bar{t}_d \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{L_i}{v_{C,\max}} Z \leq t_{C,i} - p_i t_a - p_{i+1} t_d \leq \frac{L_i}{v_{C,\min}} Z \\ \frac{L_i}{\bar{v}_{C,\max}} Z \leq \bar{t}_{C,i} - p_{i+1} \bar{t}_a - p_i \bar{t}_d \leq \frac{L_i}{\bar{v}_{C,\min}} Z \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{L_i}{\Delta v_{C,\max}} Z \leq \frac{L_i}{L_{i+1}} (t_{C,i+1} - p_{i+1} t_a - p_{i+2} t_d) - \\ (t_{C,i} - p_i t_a - p_{i+1} t_d) \leq \frac{L_i}{\Delta v_{C,\max}} Z \\ \frac{L_i}{\Delta \bar{v}_{C,\max}} Z \leq \frac{L_i}{L_{i+1}} (\bar{t}_{C,i+1} - p_{i+2} \bar{t}_a - p_{i+1} \bar{t}_d) - \\ (\bar{t}_{C,i} - p_{i+1} \bar{t}_a - p_i \bar{t}_d) \leq \frac{L_i}{\Delta \bar{v}_{C,\max}} Z \end{cases} \quad (15)$$

式中: $v_{C,i}$ ($\bar{v}_{C,i}$) 为小汽车在路段 L_i 上(下)行方向的行驶速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $v_{C,\max}$ ($\bar{v}_{C,\max}$) 为小汽车上(下)行方向最大行驶速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $v_{C,\min}$ ($\bar{v}_{C,\min}$) 为小汽车上(下)行方向最小行驶速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); Z 为信号周期的倒数; t_a (t_d) 上行车辆加(减)速时间(单位: cycles), \bar{t}_a (\bar{t}_d) 下行车辆加(减)速时间(单位: cycles); $\Delta v_{C,\max}$ ($\Delta \bar{v}_{C,\max}$) 为小汽车上(下)行方向相邻路段之间的速度

变化最大值(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); $\Delta v_{C,\min}(\Delta \bar{v}_{C,\min})$ 为小汽车上(下)行方向相邻路段之间的速度变化最小值(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

(4) 偏移量计算

图2中, $\tau_{C,i}(\bar{\tau}_{C,i})$ 由两部分组成,即左右转向带宽初始排队清空时间 $\gamma_{C,i}(\bar{\gamma}_{C,i})$ 和交叉口*i*上(下)行方向不包含清空时间的绿波带中心偏移量 $\mu_{C,i}(\bar{\mu}_{C,i})$,单位:cycles,满足约束(16)和(17)如下:

$$\begin{cases} \tau_{C,i} = \mu_{C,i} - \gamma_{C,i} \\ \bar{\tau}_{C,i} = \bar{\mu}_{C,i} - \bar{\gamma}_{C,i} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \epsilon p_i \leq \mu_{C,i} \leq p_i \\ \epsilon p_i \leq \bar{\mu}_{C,i} \leq p_i \end{cases} \quad (17)$$

式中: ϵ 为极小的正数。若 $p_i=1$, $\mu_{C,i}>0$ 和 $\bar{\mu}_{C,i}>0$;反之,若 $p_i=0$,则 $\mu_{C,i}=0$ 和 $\bar{\mu}_{C,i}=0$ 。在不考虑上一周期滞留车辆的情况下,清空时间主要为上游交叉口左转和右转驶入小汽车以及支路驶入小汽车的通行时间,参考文献[18],计算如下:

$$\gamma_{C,i+1} = \frac{(q_{C,i,L}t_{C,i,L} + q_{C,i,R}t_{C,i,R} + q'_{C,i})k'_{i+1}C}{S_{i+1}} \quad (18)$$

式中: $q_{C,i,L}(q_{C,i,R})$ 为交叉口*i*左转(右转)驶入小汽车流量(单位: $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$); $q'_{C,i}$ 为路段*L_i*上支路汇入小汽车流量(单位: $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$); $t_{C,i,L}(t_{C,i,R})$ 为信号交叉口*i*左转(右转)通行绿灯时间(单位:cycles); k'_{i+1} 为驶入交叉口*i+1*小汽车中的直行比率; S_{i+1} 为交叉口*i+1*的饱和通行能力(单位: $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)。

(5) 带宽约束

为保证带宽的有效性与一致性,相同子区的交叉口应具有相同的带宽,不同子区的交叉口具有不同的带宽,约束表述为

$$\begin{cases} -Mp_{i+1} \leq b_{C,i+1} - b_{C,i} \leq Mp_{i+1} \\ -Mp_i \leq \bar{b}_{C,i+1} - \bar{b}_{C,i} \leq Mp_i \end{cases} \quad (19)$$

若交叉口*i+1*不是分割点,则路段*L_i*与路段*L_{i+1}*的绿波带宽应相等;通过式(16)~式(17)与式(19)可实现干道分割点以及相邻路段带宽限制,实现长干道自动分割。

1.3 公交车绿波带

本文提出的公交车绿波带是以公交站台作为分割点,通过延长公交停靠时间以实现公交带宽与小

$$\begin{cases} \frac{L_i}{\Delta v_{B,\max}} Z \leq \frac{L_i}{L_{i+1}} [t_{B,i+1} - \alpha_{i+1}(a_{i+1} + t_a + t_d) - \Delta a_{i+1}] - [t_{B,i} - \alpha_i(a_i + t_a + t_d) - \Delta a_i] \leq \frac{L_i}{\Delta v_{B,\min}} Z \\ \frac{L_i}{\Delta \bar{v}_{B,\max}} Z \leq \frac{L_i}{L_{i+1}} [\bar{t}_{B,i+1} - \alpha_{i+1}(\bar{a}_{i+1} + \bar{t}_a + \bar{t}_d) - \Delta \bar{a}_{i+1}] - [\bar{t}_{B,i} - \alpha_i(\bar{a}_i + \bar{t}_a + \bar{t}_d) - \Delta \bar{a}_i] \leq \frac{L_i}{\Delta \bar{v}_{B,\min}} Z \end{cases} \quad (25)$$

汽车带宽之间的协调。从图3中可知,相邻公交站台之间的交叉口获得相同带宽,上下行公交获得不同带宽。

(1) 循环整形约束

公交干道协调分割约束与小汽车类似,考虑到长干道公交车辆运行的复杂性,修改循环整形约束如下:

$$\begin{cases} \theta_{B,i} + r_i + \omega_{B,i} + t_{B,i} + \tau_{B,i+1} = \\ \theta_{B,i+1} + r_{i+1} + \omega_{B,i+1} + n_{3i} \\ \theta_{B,i} + r_i + \bar{\omega}_{B,i} + n_{4i} = \\ \theta_{B,i+1} + r_{i+1} + \bar{\omega}_{B,i+1} + \bar{t}_{B,i} + \bar{\tau}_{B,i} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $n_{3i}(n_{4i})$ 为信号周期*C*的整数倍(单位:cycles)。

(2) 行程时间约束

公交行程时间受停靠站影响,其路段行程时间应包括行驶时间和停靠时间,计算方式为

$$\begin{cases} t_{B,i} = t_{B,i,r} + t_{B,i,p} \\ \bar{t}_{B,i} = \bar{t}_{B,i,r} + \bar{t}_{B,i,p} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $t_{B,i,r}(\bar{t}_{B,i,r})$ 为车辆在路段*L_i*上(下)行方向行驶时间(单位:cycles); $t_{B,i,p}(\bar{t}_{B,i,p})$ 为车辆在公交站台*i*上(下)行方向的停靠时间(单位:cycles)。

在Lmband模型中,公交站台被设置为分割点,原公交车在交叉口等候时间将转移至站台处的停靠服务时间,参考文献[13],计算如下:

$$t_{B,i,p} = a_i + \Delta a_i \quad (22)$$

式中: a_i 为公交站台*i*的平均等待时间(单位:cycles)。过长的公交等待时间将增加乘客延误,为防止额外等候过长,应设置最长额外等待时间约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta a_i \leq \alpha_i \Delta a_{\max} \\ 0 \leq \Delta \bar{a}_i \leq \alpha_i \Delta a_{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: Δa_{\max} 为公交最大额外停靠时间(单位:cycles)。

参考式(13)~式(14),可计算出公交车行程时间与速度变化之间的约束为

$$\begin{cases} \frac{L_i}{v_{B,\max}} Z \leq t_{B,i} - \alpha_i(a_i + t_a + t_d) - \Delta a_i \leq \frac{L_i}{v_{B,\min}} Z \\ \frac{L_i}{\bar{v}_{B,\max}} Z \leq \bar{t}_{B,i} - \alpha_i(\bar{a}_i + \bar{t}_a + \bar{t}_d) - \Delta \bar{a}_i \leq \frac{L_i}{\bar{v}_{B,\min}} Z \end{cases} \quad (24)$$

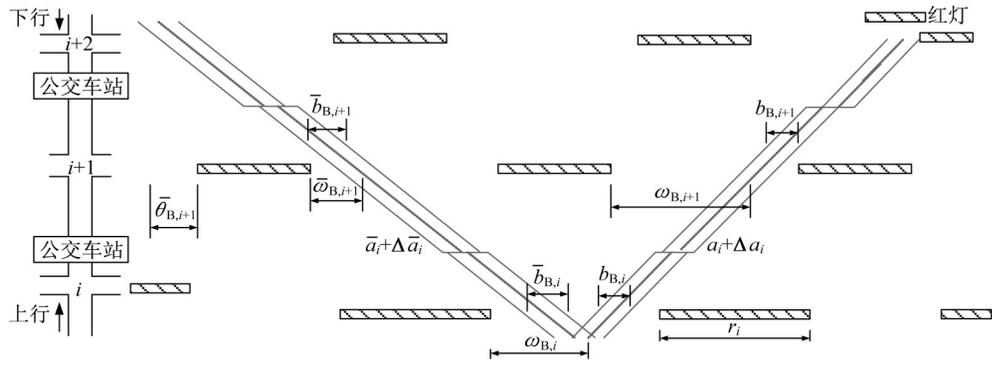


图3 Lmband模型下公交车时空运动轨迹

Fig.3 Time-space diagram of bus trajectory on the long arterial under Lmand

式(24)与(25)表示若路段 L_i 上存在公交站台,则公交车存在加减速和停靠过程;利用 a_i 与 Δa_i 表示公交在站的平均停靠时间与额外停靠时间,以表征公交在路段上的不同行驶方式。

(3) 偏移量计算

由于公交的分割点位置在站台处,交叉口处无偏移量绿波带中心偏移量 $\mu_{B,i}(\bar{\mu}_{B,i})$,所以偏移量 $\tau_{B,i}$ 可表示为

$$\tau_{B,i} = -\gamma_{B,i} = \beta_{i-1} \frac{(q_{B,i-1,L} t_{B,i-1,L} + q_{B,i-1,R} t_{B,i-1,R} + q'_{B,i}) k' C}{S_i} + (1 - \beta_{i-1}) \gamma_{C,i} \quad (26)$$

式中: β_i 为二进制常量,用于判断路段上是否有公交专用道, $\beta_i = 1$ 表示有公交专用道;反之, $\beta_i = 0$ 表示没有公交专用道。

(4) 带宽约束

因公交带宽分割点在站台处,所以相邻站台间的交叉口应该满足带宽一致性和协调性约束:

$$\begin{cases} -M\alpha_{i+1} \leq b_{B,i+1} - b_{B,i} \leq M\alpha_{i+1} \\ -M\alpha_i \leq \bar{b}_{B,i+1} - \bar{b}_{B,i} \leq M\alpha_i \end{cases} \quad (27)$$

与式(19)不同,式(27)利用公交站台作为分割点,各站台之间获得不同的行驶带宽,以保证公交车能够顺利通过交叉口尽快到达下游站台。

2 仿真案例分析

为了验证模型的适用性,本文以中山市中山路从悦来南路到濠东路段(共12个信控交叉口和1个信控行人过街)作为分析对象,通过Lmband与改进型Multiband模型进行对比分析。研究路段主线横断面为双向八车道或十车道,设置了路中公交专用道,沿途共8条公交线路。本文采用离线固定配时,周期100s,最小绿波带宽为8s,公交平均等待时间15s,最大额外停靠时间10s。权值 w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 分别取值为0.65、0.65、0.2、0.125、0.025。本文利用Python对混合整形线性规划模型建模,并调用CPLEX求解,对应计算机运行环境为64位Win 10操作系统、I7-6500U、8G运行内存、2.5GHz主频。通过将各交叉口基础数据输入模型求解,耗时3.35min。图4为Lmband长距离干道分段结果,图片背景源自于高德地图,本文提出的方法将13个路口划分为6个子区。同时,利用VISSIM软件建立了前述13个路口的仿真路网,用于分析进口方向绿灯时间、进口饱和度和各流向仿真延误等信息。

若直接将13个路口作为整体进行Multiband建模,发现无可行解,需要先进行路口分组再进行Multiband协调(即:改进型Multiband)。本文引用文

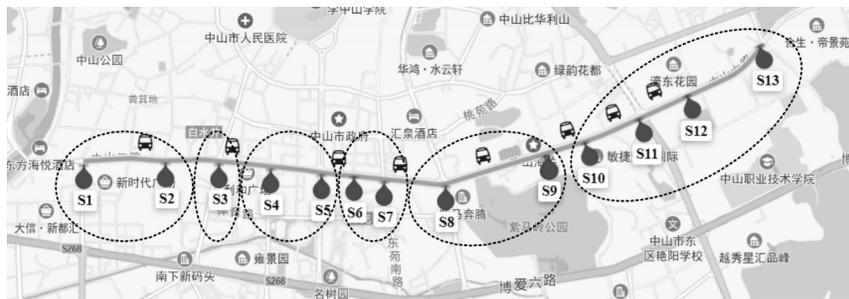


图4 Lmband控制下交叉口分组结果

Fig.4 Intersection grouping under the Lmband control

献[19]定义的关联度将部分情况相同或相似的路口进行合并,具体关联度计算方法为

$$B = \frac{0.5}{1 + t_{c,i}} \left(\frac{q_{\max} n}{\sum_{i=1}^n q_i} - 1 \right) \quad (28)$$

式中: n 为交叉口进口道上游关联流向数; q_{\max} 上游

交叉口最大流量(单位: $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)。利用上式可将干道上的小汽车直行路径划分为4段,公交车直行路径划分为2段,如图5所示。该方案中,每一个划分的子区间小汽车互不干扰,获得独立的带宽,公交车与小汽车在交叉口同时获得协调带宽,故小汽车与公交车之间采用一致的绝对相位差。

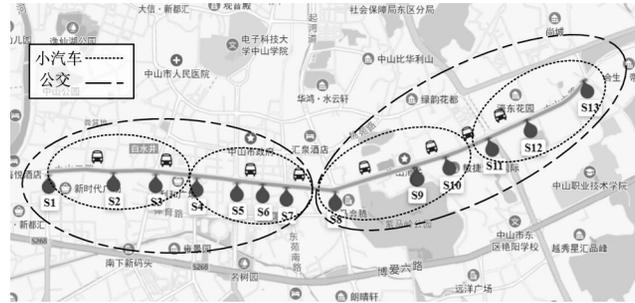


图5 改进型Multiband控制下交叉口分组结果

Fig.5 Intersection grouping under the improved multiband control

2.1 有效性分析

根据表1所示的道路交叉口绿灯时间和进口饱和度,在不改变相交道路的相位、相序和绿信比情况下,仅对干道交叉口子区划分方式和交叉口相位差进行优化求解,得到如图6所示的绿波带宽图。结果显示,本文提出的方法将13个信号交叉口划分为6个子区,小汽车在不同子区内享有不同带宽。子区之间的分割点处会出现绿波带偏移,其偏移量与各子区的协调关系有关。同时,该模型也为公交车提供了站台到站台的绿波通行,主要通过适当延长公交停靠时间,保持与小汽车的相位差一致,使公交

获得足够的带宽。针对上述13个信号交叉口组成的干道,本文提出的Lmband比改进型Multiband提供给公交车和小汽车的平均带宽分别增加了65%和71%。具体而言,Lmband模型能够为小汽车上行与下行方向分别提供约22s与30s的平均带宽,最小上行带宽为13s,最小下行带宽为20s;能够为公交上行方向与下行方向提供20s平均带宽,最小上下行带宽均为8s;改进型Multiband部分子系统的绿波带宽较窄,尤其是上行方向从路口S1到S10和下行方向从路口S5到S11的小汽车带宽仅8-13s,而上行方向从路口S1到S6和下行方向从路口S1到S8的公

表1 Lmband模型在13个路口的基本信息与仿真结果

Tab.1 Simulation results of Lmband at 13 intersections

评价指标	方向/流向	交叉口编号												
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
进口绿灯时间/s	东	38	59	39	35	23	65	31	21	38	38	49	38	35
	南	20	20	26	25	44	—	40	28	22	28	13	—	25
	西	38	59	39	35	23	65	31	21	38	38	49	38	21
	北	20	20	26	22	16	—	41	28	39	—	14	28	21
进口饱和度	东	0.48	0.37	0.37	0.22	0.72	0.40	0.49	0.52	0.25	0.24	0.25	0.56	0.37
	南	0.54	0.35	0.87	0.29	0.21	—	0.49	0.53	0.52	0.35	0.75	—	0.84
	西	0.46	0.29	0.50	0.31	0.53	0.29	0.47	0.39	0.38	0.54	0.23	0.35	0.58
	北	0.63	0.60	0.64	0.46	0.92	—	0.46	0.57	0.27	—	0.74	0.17	0.82
各流向延误/s	东至南	40.6	65.3	51	35.5	59.8	—	51.2	37	53.4	84.6	46.1	—	37.2
	东至西	29.1	7.9	17.3	8.1	41.4	3.1	36.1	30.5	9.6	85.5	6	12.7	30.4
	东至北	50.7	—	6.4	0.8	3	—	22.3	0.2	0.3	—	1.8	2.1	21
	西至南	19.1	6	4.5	0.4	0.6	—	12	13.9	8.7	12.5	5.1	—	16.8
	西至东	27.6	9.7	22	22.8	40.3	10	12.1	51.3	16.2	24.4	10.3	2.2	29.7
	西至北	39.9	—	36.4	43.2	33.2	—	56.9	34.4	50	—	11.2	—	34.7
	南至西	48.2	33.8	122.9	36.8	19.5	—	27.6	30.9	24.6	28.7	58.8	—	41.7
	南至东	2.4	38.2	73.3	0.7	1	—	20.4	3.7	24.9	0.4	4.3	—	37.1
	南至北	40.5	—	120.5	30.6	19.5	—	24.3	27.2	15.2	—	53.4	—	42.5
	北至东	45.8	34.3	40.3	35	114.9	—	25.6	34.7	24	—	47.8	—	42.1
	北至西	1.3	2.3	1.1	0.4	49.3	—	20.5	4.2	12.5	—	0.6	9.8	32.2
	北至南	38	34	43.2	37.4	105.4	—	27.2	32.1	21.3	—	47.3	—	45.9

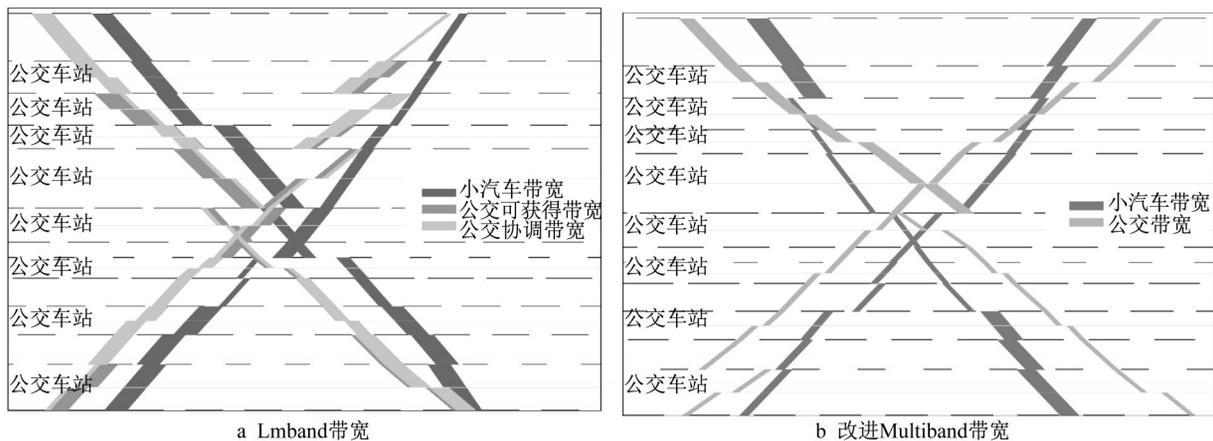


图6 Lmband与改进型Multiband绿波带宽图

Fig.6 Green wave of Lmband and Improved Multiband

交车带宽仅8-10s,接近最小带宽,因而难以为车辆提供有效的协调服务。

表1给出了13个交叉口各流向的仿真延误,可知干道各方向延误总体上保持在[20s, 60s]区间范围内,部分交叉口进口方向因道路饱和度较高,延误达到100s以上,但该类交叉口较少,车辆能够在两个信号周期内驶离交叉口。因此,模型能够在不增加干道交叉口其他方向通行压力的情况下,为干道主要通行方向提供有效的绿波带宽。

表2为Lmband与改进型Multiband模型仿真对比结果,相比于改进型Multiband, Lmband模型能够有效减少干线小汽车的延误和停车次数约为34.7%和28.7%,能够降低公交车延误和停车次数

约13.7%和30.0%。针对公交车而言,两类模型中车辆行程时间几乎相等,其原因是Lmband将公交在交叉口的延误时间转移至公交站台处,使得延误时间转化为停靠站时间,延长了停靠站时间,延长公交停靠时间保持与小汽车的相位差一致,公交车可以在绿波带中行驶,从而减少了停车次数,有利于更好的服务乘客。通过仿真结果对比:构建以乘客带宽、延误、停车次数等多维目标模型,使模型在求解过程中动态考虑干道延误与停车次数,最终得到能够一个延误与停车次数最小、乘客带宽最大的方案。同时,将公交的干道分割点设置在公交车站,能够减少公交在交叉口的停车时间,降低公交的延误与停车次数。

表2 Lmband与改进型Multiband模型仿真对比方案

Tab. 2 Simulation results under the Lmband and improved Multiband control

指标	小汽车仿真结果		公交仿真结果	
	Lmband	改进型Multiband	Lmband	改进型Multiband
平均延误/s	233.4(-34.7%)	357.0	323.0(-13.7%)	374.4
平均停车时间/s	147.5(-40.5%)	248.1	168.7(-19.7%)	210.9
平均停车次数/次	6.6(-28.7%)	9.3	4.2(-30.0%)	6.0
平均行程时间/s	804.0(-8.8%)	881.6	1 232.9(-0.8%)	1 243.2

2.2 灵敏度分析

本文从饱和度、信号周期、公交停站时间三个方面进一步分析长距离干道Lmband协调效果的参数敏感性。

(1) 饱和度

图7为小汽车和公交车在交叉口的延误随小汽车饱和度变化的趋势。当饱和度小于1时,小汽车延误保持在[300s, 350s],公交延误处于一个较低的水平;随着饱和度增加,小汽车延误显著增加,说明饱和度的增长会严重影响干道的协调效果,尤其是分割点的识别,而公交延误主要集中在250-300s之

间波动,主要受益于公交专用道降低了小汽车流量增长对公交车的影响。

(2) 信号周期

图8为信号周期对干道的延误和行程时间的影响。可见,干道延误随周期增加而显著降低,当周期大于180s时,小汽车与公交延误均处于较低水平,其原因是随着周期的增加,干道主要方向的通行时间增加,从而车辆能够获得更多的带宽,主要通行方向车辆延误降低;而当周期大于150s时,小汽车行程时间基本趋于稳定。

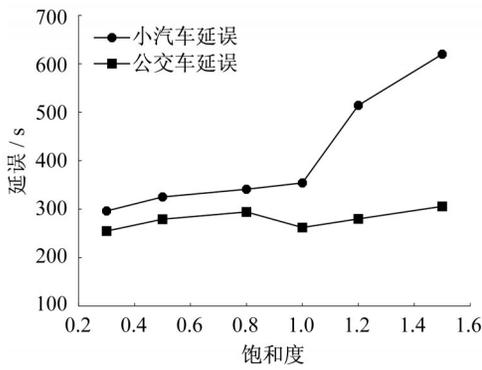


图 7 干道车辆延误随小汽车饱和度的变化趋势

Fig.7 Variation trends of delays at different saturation levels

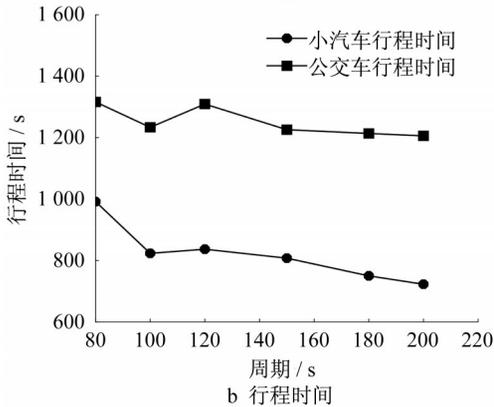
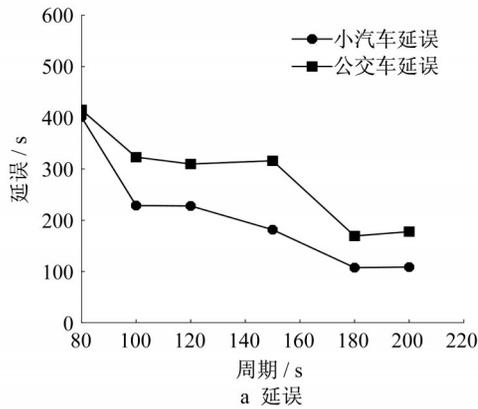


图 8 干线车辆延误与行程时间在不同信号周期的趋势
Fig.8 Variation trend of delay and travel time in different signal periods

(3) 公交停靠时间

图 9 为平均公交停站时间对模型的影响,文中公交实际停靠时间等于平均停站时间和额外延长时之和。随着平均停站时间的增加,公交延误缓慢上升,当平均停靠时间为 16s 时趋近平稳,而小汽车平均延误呈波动下降的趋势,其原因可能是,随着公交平均停靠时间增加,全线小汽车和公交车同时协调的难度随之增大,影响了小汽车的带宽。

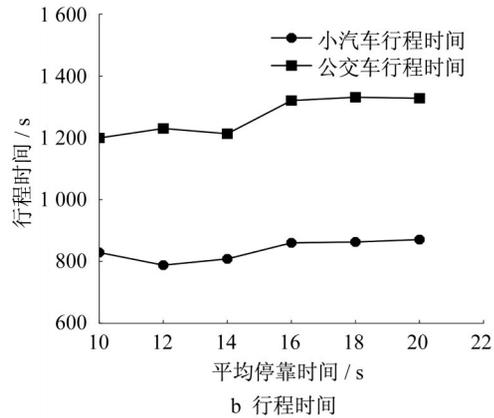
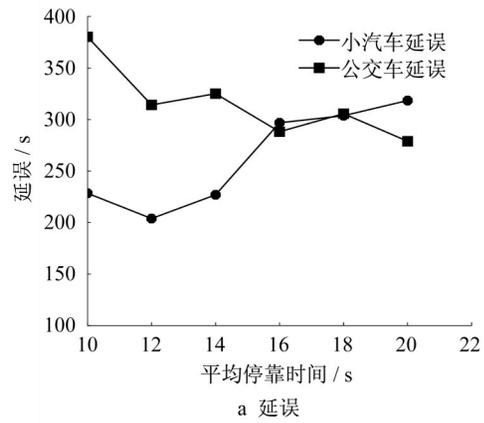


图 9 干线车辆延误与行程时间在不同公交停靠时间的趋势

Fig.9 Variation trends of delay and travel time in different bus stop times

3 结论

为了同时协调长距离干道上社会车辆和公交车辆,提出了一种带有差异化路口分割的公交和小汽车绿波 Lmband 控制方法,实现了长路段子区划分与相位差优化统一建模与求解。该方法首先分析了小汽车与公交车各自时空轨迹,提出了两类车型不同的协调路口分组的分割方法,构建了路口分组个数、社会车辆和公交车的各段相位差同步优化的运筹学模型,实现了路口划分和信号参数同步建模,避免了传统先划分路口再协调的异步问题,并能实现两类车型的同步绿波。仿真结果表明,提出的 Lmband 在带宽、延误、停车次数和停车时间等指标上均优于改进型 Multiband 模型。后续,将进一步考虑模型中路段旅行时间和公交停站时间等参数的不确定性影响。

作者贡献声明:

- 徐建闽:提出研究思路、模型优化与论文审阅。
- 冯斌:构建模型、数据分析与撰写文稿。
- 林永杰:指导模型构建、论文审阅与经费资助。

刘鹏:模型优化、算例分析与撰写文稿。

卢凯:模型优化与论文修编。

参考文献:

- [1] KIM Hyeonmi, CHENG Yao, CHANG Ganglen. Variable signal progression bands for transit vehicles under dwell time uncertainty and traffic queues [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019, 20(1): 109.
- [2] LIN Liangtay, TUNG Liwei, KU Hsinchuan. Synchronized signal control model for maximizing progression along an arterial [J]. *Journal of Transportation Engineering*. 2009, 136(8): 727.
- [3] 马楠, 邵春福, 赵熠. 干道信号交叉口群协调控制系统中的影响因素[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(6): 112.
- MA Nan, SHAO Chunfu, ZHAO Yi. Influence factors of coordination control system in signalized intersections [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(6): 112.
- [4] YANG Xianfeng, CHENG Yao, CHANG Ganglen. A multi-path progression model for synchronization of arterial traffic signals [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 53: 93.
- [5] 唐小军, 赵胜川, 章立辉. 基于带宽最大化的城市干线子区划分技术研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(3): 100.
- TANG Xiaojun, ZHAO Shengchuan, ZHANG Lihui. System partition of urban arterials based on bandwidth maximization [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(3): 100.
- [6] LIU Qiang, WANG Qing, LIU Shu'an. An improved sub-networks partitioning method for urban traffic networks [C]// 2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Nanchang: IEEE, 2019.
- [7] HAO Wei, Lin Yongjie, CHENG Yao, *et al.* Signal progression model for long arterial: intersection grouping and coordination[J]. *IEEE ACCESS*, 2018, (6), 30128.
- [8] 潘科. 基于子干线模型的网络绿波带研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2016
- PAN Ke. The research of network of green wave based on sub trunk model [D]. Beijing: North China University of Technology, 2016.
- [9] 赵靖, 马万经, 汪涛, 等. 基于宏观基本图的相邻子区协调控制方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(1): 78.
- ZHAO Jing, MA Wanjing, WANG Tao, *et al.* Coordinated perimeter flow control for two subareas with macroscopic fundamental diagrams [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(1): 78.
- [10] 乐浩成. 基于子区动态划分的城市交通信号协调控制[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- LE Haocheng. Urban traffic signal coordination control based on sub-area dynamic division [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [11] 徐建闽, 鄢小文, 荆彬彬, 等. 考虑交叉口不同饱和度的路网动态分区方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(4): 145.
- XU Jianmin, YAN Xiaowen, JING Binbin, *et al.* Dynamic network partitioning method based on intersections with different degree of saturation [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(4): 145.
- [12] 田秀娟, 于德新, 周户星, 等. 基于改进Newman算法的动态控制子区划分[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(5): 950.
- TIAN Xiujuan, YU Dexin, ZHOU Huxing, *et al.* Dynamic network dynamic control subdivision based on improved newman algorithm [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(5): 950.
- [13] MA Wanjing, ZOU Li, AN Kun, *et al.* A Partition-enabled multi-mode band approach to arterial traffic signal optimization [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019, 20(1): 313.
- [14] 王昊, 李昌泽. 考虑转向有轨电车线路的干线绿波优化[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(1): 204.
- WANG Hao, LI Changze. Optimization of arterial green-wave considering turning tram lines [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(1): 204.
- [15] LIN Yongjie, YANG Xianfeng, WANG Qinzhen. New transit signal priority scheme for intersections with nearby bus rapid transit median stations [J]. *IET Intelligent Transport Systems*. 2020, 14(12): 1606.
- [16] 高柳依. 干线分段绿波公交优先通行协同控制技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- GAO Liuyi. A study on sectional green wave model with transit signal priority and coordinated control on arterials [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [17] RAHMI A. Traffic signals: capacity and timing analysis [J]. *Transportation Research Part A: General*. 1981, 15(6): 108.
- [18] 林永杰, 杨险峰, 邹难, 等. 城市交通干道上被动式公交信号优先控制[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(9): 1227.
- LIN Yongjie, YANG Xianfeng, ZOU Nan, *et al.* New passive transit signal priority control strategy for the bus vehicles at urban arteries [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2013, 34(9): 1227.
- [19] 孙晨. 基于多源数据的区域交通信号控制动态子区划分方法研究[D]. 北京: 中国人民公安大学, 2020.
- SUN Chen. Research on the method for dynamic subdivision of regional traffic signal control based on multi-source data [D]. Beijing: People's Public Security University of China, 2020.