

过饱和交通状态下的停车延误协调控制模型

卢 凯, 徐建闽, 李 林

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 选取整个过饱和状态持续作用时间作为研究时段, 利用交叉口进口道的车辆到达-驶离图, 根据行驶车队头车到达下游交叉口进口道的不同时刻, 分别针对行驶车队在一个以红灯启亮为起始的信号周期之内到达和跨越一个以红灯启亮为起始的信号周期到达两种情况, 对过饱和和交通状态下行驶车队通过协调信号控制交叉口的停车延误进行了分析研究, 建立了一套过饱和和交通状态下的停车延误协调控制模型, 得到了滞留车辆数、停车次数、延误时间等性能指标与相邻交叉口相对相位差、公共信号周期等协调控制变量之间的相关关系, 并通过交通仿真对控制模型进行了分析验证, 为过饱和和交通状态下的协调控制技术方法研究提供了相关理论依据。

关键词: 交通工程; 停车延误模型; 到达-驶离图; 过饱和; 协调控制

中图分类号: U491.5+4

文献标识码: A

Coordinated control models for stop and delay under over-saturated traffic conditions

LU Kai, XU Jian-min, LI Lin

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: In the duration of over-saturated traffic conditions, this paper studies the approach-delay under coordinated control with cumulative arrival-departure diagram based on the time that platoon reaches downstream intersection: 1) platoon arrives in a cycle with the start of red phase; 2) platoon arrives throughout a cycle with the start of red phase. This paper proposes stop and delay coordinated control models under over-saturated traffic conditions for different arrival types, and obtains conclusions about the relationship between performance indexes (number of detained vehicles, number of stops, and delay) and coordinated control variables (relative offset, common signal cycle). The control models have been analyzed and verified by traffic simulations. This method provides a theoretical basis for the coordinated control technology under over-saturated traffic conditions.

Key words: traffic engineering; stop and delay models; arrival-departure diagram; over-saturated; coordinated control

1 引言(Introduction)

与绿波协调控制方式相比, 停车延误协调控制是以停车次数与延误时间加权和最小作为控制目标的一种区域交通效益整体优化控制方式, 可满足各种交通状态下的干道或区域协调控制需要, 且易于进行交通效益分析评价, 是交通信号协调控制的一个主要研究方向。但现有的交通信号协调控制理论与方法, 与典型交通信号控制系统如TRANSYT, SCATS, SCOOT等, 多适用于未饱和交通状态下的信号协调控制问题, 对于缓解城市CBD地区与部分道路在过饱和状态下产生的交通拥堵则显得力不从心。与未饱和交通状态相比, 过饱和和交通状态下的停车延误协调控制问题将更为复杂多变, 因此对于过饱和和状

态下的停车延误协调控制研究具有十分重要的理论意义和应用价值。

Gazis与Dans等^[1~3]提出以进口道排队长度作为状态变量, 根据停车断面车辆到达驶离关系建立过饱和和交通状况下的状态方程, 利用最优控制理论中的极值原理进行延误最优控制求解; 并将应用范围进一步扩展到具有普遍意义的路网, 采用类似方法建立了相应的动态信号优化控制模型, 通过时间离散化处理将其转化为多个线性规划问题进行优化求解。Michalopoulos等^[4]在Gazis的研究基础上, 通过进一步考虑路段排队长度约束、路段行程时间与交叉口转弯车流比例等因素的作用影响, 提出了路段排队约束条件下的相邻过饱和交叉口最小延误协调

收稿日期: 2009-11-29; 收修稿日期: 2010-07-05。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878088); 教育部高校博士点基金资助项目(200805610005); 广东省工业科技攻关计划资助项目(2008B010200010)。

控制策略,给出了信号周期与绿信比的优化设置方法. Chang等^[5,6]针对整个过饱和状态持续时间,建立了不同信号相位控制方式下的单交叉口离散优化模型,利用最优控制理论中的离散系统极小值原理,得到了离散优化模型的最优控制率,并给出了最佳信号周期与最佳绿信比的实现算法;通过利用离散优化模型预测过饱和交叉口的整体性能指标、确定过饱和区域内的关键交叉口、以关键交叉口作为起点寻找协调路径方向与协调配时参数,实现了一种过饱和区域的信号协调实时优化控制. Rouphail与Fambro等^[7,8]提出利用车辆均匀到达均衡延误模型与协调调整系数PF估算车辆非均匀到达时的均衡延误时间,针对一种车辆均匀到达类型与五种车辆非均匀(车队)到达类型,分析推导了协调调整系数PF的计算公式与取值范围,并为TRB^[9]出版的美国《道路通行能力手册》所用. Benekohal等^[10,11]针对行驶车队与非行驶车队到达下游交叉口时车辆平均到达率的不同,提出利用AB(arrival-based)法直接推导各种车辆到达类型下的延误时间计算公式,并建立了涵盖所有可能到达类型的11种信号交叉口均衡延误模型,实现了多段到达率不同到达类型下的协调信号交叉口均衡延误精确计算. 常云涛等^[12]利用Robertson建立的行驶车流离散模型,对行驶车流在协调控制系统内各交叉口的到达驶离图式进行了分析研究,提出了一种基于遗传算法的城市干道协调控制相位差优化设计方法. 刘广萍等^[13]针对非饱和与过饱和两种不同交通状况,分析了交叉口延误与信号配时、车辆到达率等参数之间的动态关系,研究了信号控制下交叉口延误时间的计算方法.

事实上,在过饱和状态与协调控制作用下,下游交叉口进口道到达车流的随机波动性将明显减弱,随机停车延误也显著减少. 但现有相关研究成果多为过饱和状态下的单交叉口延误模型与未饱和状态下的多交叉口延误模型,对于信号协调控制方式下处于过饱和状态的均衡相位停车延误模型研究甚少,且研究时段多局限于单个信号周期之内. 因此,本文将通过分析研究整个过饱和作用时间段内行驶车队在下游信号控制交叉口的停车延误,建立起一套过饱和和交通状态下的停车延误协调控制模型.

2 行驶车队停车延误分析(Stop and delay analysis of vehicle platoon)

通过对上游交叉口进行合理的信号相位与相序设计,使上游交叉口连续运行驶向同一下游交叉口的车流放行相位,可以有效减弱下游交叉口相关进口道到达车流的分散性,有利于取得较少停车次数与延误时间的协调控制效果^[14]. 实际观测数据表明,

上游交叉口驶出车流行经不同断面的流量-时间变化图式将随行驶距离的增长而趋于平缓,其流量峰值逐渐削弱,到达过程持续时间逐渐加长^[15],可以假设车队在行驶过一段距离后,相邻车辆之间的车头时距保持为某一常数,即通过相应的车辆到达率简化描述车队行驶的离散特性.

由于过饱和和交通状态下的交叉口进口道过剩滞留车辆将不断累积,使得整个过饱和状态持续作用时间段内各个信号周期的停车延误不断变化,直至未饱和交通状态持续恢复且所有进口道滞留排队车辆全部消失. 因此,在研究过饱和和交通状态下的停车延误模型时,整个研究时间段应从初始排队车辆数为零并出现过饱和状态的时刻开始,一直持续到滞留排队车辆完全消失. 假设协调信号控制交叉口进口道在整个过饱和状态持续作用时间段内的信号配时参数设置保持不变,在前 n_1 个信号周期内处于过饱和和交通状态且满足假设条件: 1) 车辆到达率 q_1 稳定不变; 2) 进口断面通行能力 Q 为常数; 3) 起始红灯时刻的初始排队车辆数为0; 4) 过饱和和滞留排队车辆数随时间的增长线性增加,而在后 n_2 个信号周期内处于未饱和和交通状态且满足假设条件: 1) 车辆到达率 q_2 稳定不变; 2) 进口断面通行能力 Q 为常数; 3) 结束时刻的剩余排队车辆数为0. 根据行驶车队到达下游交叉口进口道的不同时刻,利用下游交叉口进口道车辆停车延误分析图,可以推导出相应状态下的协调信号控制交叉口进口道停车延误计算公式.

2.1 行驶车队在一个以红灯启亮为起始的信号周期之内到达(Platoon arriving in a cycle with the start of red phase)

当行驶车队头车到达下游交叉口进口道时正遇红灯启亮,对应的停车延误情况将如图1(a)中的网格线与水平线区域所示;当行驶车队尾车到达下游交叉口进口道时正遇红灯启亮,对应的停车延误情况将如图1(b)中的网格线区域所示. 对比图1(a)(b)可知,行驶车队到达下游交叉口进口道的时刻将对平均延误时间 d_{LA} 产生一定影响,但却不会影响到平均过剩滞留车辆数 N_S 与平均停车次数 h_{LA} 的大小. 当行驶车队头车到达下游交叉口进口道的时刻由 T_0 向 T_1 移动时,行驶车队所受总延误将由最大值向最小值线性变化,其平均值对应为图1(a)中的网格线区域面积或图(b)中的网格线与垂直线区域面积之和,图1(a)中的水平线区域与图(b)中的垂直线区域关于折线OAB对称.

在图1中: t_T 表示行驶车队到达过程持续时长, Δt_0 表示行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻滞后于 T_0 的时间差, $\Delta t_0 \in [0, C - t_T]$, q_1^* 表示

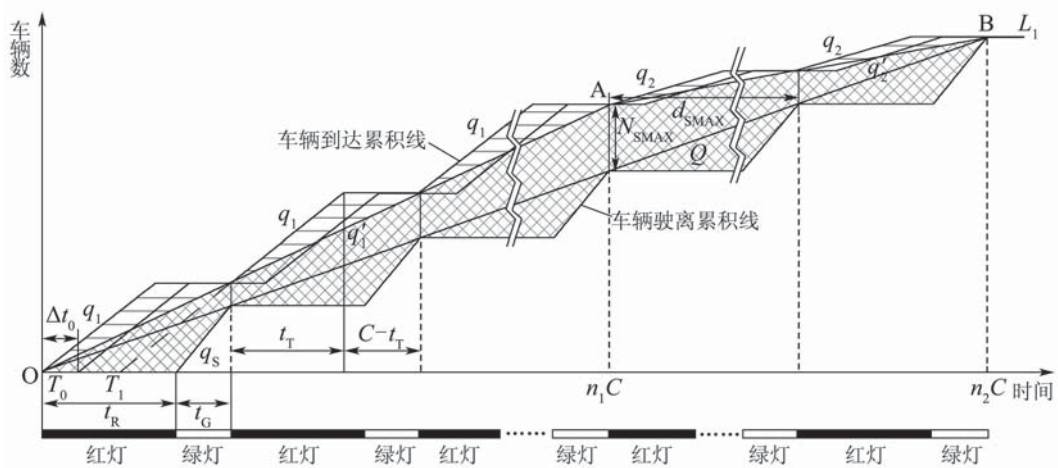
前 n_1 个信号周期内的等效车辆平均到达率, q'_2 表示后 n_2 个信号周期内的等效车辆平均到达率, q_s 表示进口断面饱和和流量, $N_{S\text{MAX}}$ 表示最大过剩滞留车辆数, $d_{S\text{MAX}}$ 表示最大车辆延误时间, 折线 L_1 表示滞后时间差 Δt_0 所对应的车辆到达积累线. 利用图1中线段与面积的可叠加性, 可以推出交叉口进口道平均过剩滞留车辆数 N_S 、平均停车次数 h_{LA} 以及平均延误时间平均值 $\bar{d}_{\text{LA}}$ 的计算公式如式(1)~(3)所示, 式中 $Z = x - 1 = \frac{q'_1}{Q} - 1$.

$$N_S = \frac{1}{2} N_{S\text{MAX}} = \frac{1}{2} (q'_1 \cdot n_1 \cdot C - Q \cdot n_1 \cdot C) =$$

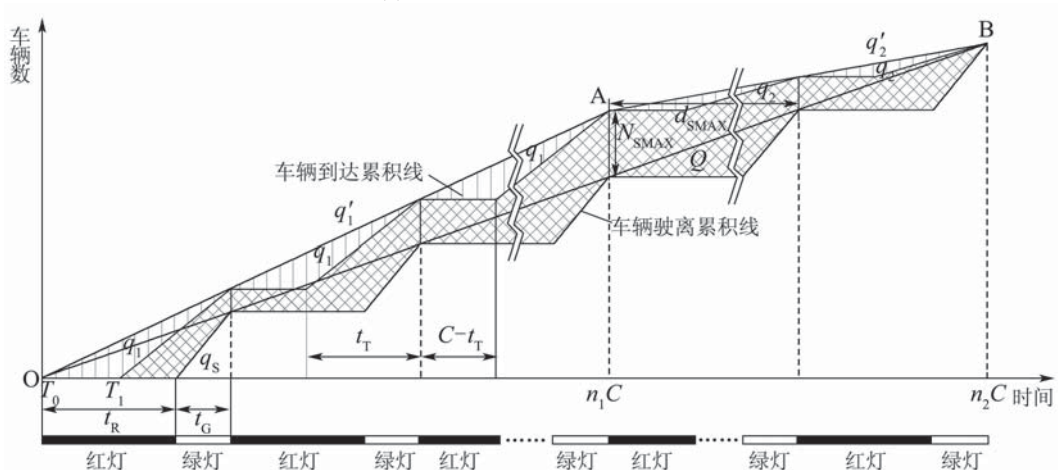
$$\frac{(q'_1 - Q) \cdot n_1 \cdot C}{2} = \frac{Z \cdot Q \cdot n_1 \cdot C}{2}, \quad (1)$$

$$h_{\text{LA}} = 1 + \frac{(n_1 + n_2) \cdot N_S}{Q \cdot (n_1 + n_2) \cdot C} = 1 + \frac{N_S}{Q \cdot C} = 1 + \frac{Z \cdot n_1}{2}, \quad (2)$$

$$\bar{d}_{\text{LA}} = \frac{1}{2} t_R + \frac{1}{2} d_{S\text{MAX}} = \frac{1}{2} t_R + \frac{1}{2} \cdot \frac{N_{S\text{MAX}}}{Q} = \frac{t_R}{2} + \frac{N_S}{Q} = \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2}. \quad (3)$$



(a) 车队头车红灯启亮时到达



(b) 车队尾车红灯启亮时到达

图 1 行驶车队在一个信号周期之内到达时的停车延误分析图

Fig. 1 Cumulative arrival-departure diagram for a platoon arrived in a cycle

假设交叉口各进口道绿信比分配比例不变, 过饱和状态持续时间 t_1 一定, 且选取的信号周期时长 C_a, C_b, C_c, C_d 满足关系式

$$C_a \cdot n_{1a} = C_b \cdot n_{1b} = C_c \cdot n_{1c} = C_d \cdot n_{1d} = t_1,$$

$$C_a \cdot n_{2a} = t_{2a}, C_b \cdot n_{2b} = t_{2b},$$

$$C_c \cdot n_{2c} = t_{2c}, C_d \cdot n_{2d} = t_{2d},$$

其中: $n_{1a}, n_{1b}, n_{1c}, n_{1d}, n_{2a}, n_{2b}, n_{2c}, n_{2d}$ 取正整数, $t_{2a}, t_{2b}, t_{2c}, t_{2d}$ 分别对应为信号周期取值 C_a, C_b, C_c, C_d 时消散过剩滞留车辆所需持续的未饱和状态时间. 当忽略损失时间对交叉口进口道

通行能力的影响时,进口道平均过剩滞留车辆数 N_S ,平均停车次数 h_{LA} 以及平均延误时间平均值 $\bar{d}_{LA}$ 与不同信号周期取值 C_a, C_b, C_c, C_d 之间的对应关系如图2所示;当考虑损失时间对交叉口进

口道通行能力的影响时,进口道平均过剩滞留车辆数 N_S ,平均停车次数 h_{LA} 以及平均延误时间平均值 $\bar{d}_{LA}$ 与不同信号周期取值 C_a, C_b, C_c, C_d 之间的对应关系如图3所示。

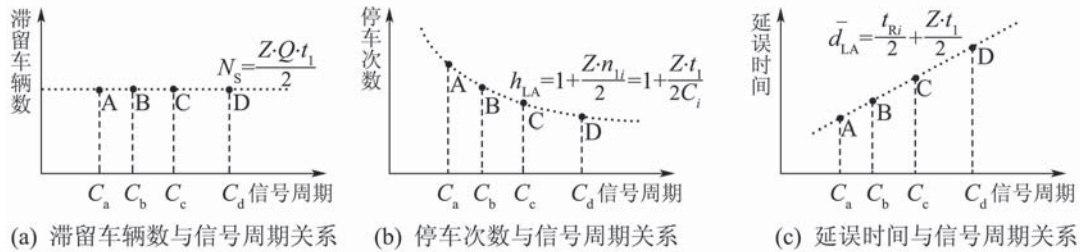


图2 忽略损失时间影响时进口道性能指标与信号周期之间的对应关系

Fig. 2 Relationship between performance index and cycle time ignoring lost time

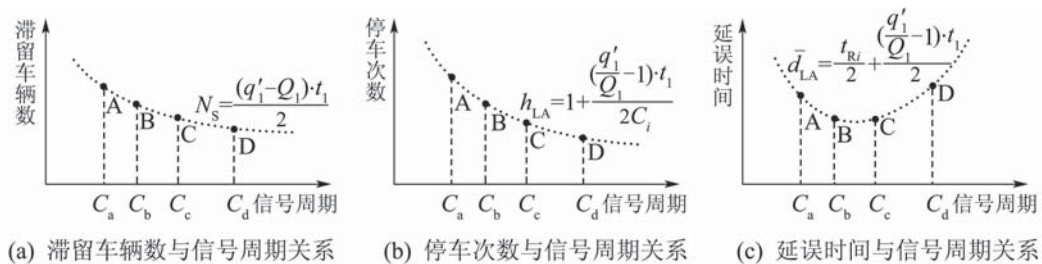


图3 考虑损失时间影响时进口道性能指标与信号周期之间的对应关系

Fig. 3 Relationship between performance index and cycle time considering lost time

由图2与图3可知,公共信号周期的选取将对控制区域内协调信号控制交叉口的运行效果产生重要作用,信号周期取值越大,则越有利于减少交叉口进口道的停车次数与过剩滞留车辆数,但却可能导致部分交叉口进口道的延误时间显著上升.事实上,图2与图3中A, B, C, D点连成的平滑曲线仅反映相关性能指标随信号周期变化的总体趋势,而实际关系曲线在节点A, B, C, D之间可能呈现出一定的波动性^[16].

相邻交叉口之间的相对相位差将直接决定行驶车队头车到达下游交叉口进口道的时刻,对行驶车队的平均延误产生相应影响.例如,当下游交叉口进口道相对相位差 $O = O_0 = \frac{s}{v} + t_R - Z' \cdot C$ 时,行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻恰为 T_0 ,车队受阻停车延误分析如图1(a)所示,其中 O_0 为行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻恰为 T_0 时所对应的相对相位差, s 为下游交叉口进口道停车线与上游交叉口起始放行相位进口道停车线之间的距离, v 为驶向下游交叉口进口道的车队平均行驶速度, Z' 为与之对应的整数解;当相对相位差 $O = O_1 = \frac{s}{v} - (C - t_T) + t_R - Z' \cdot C$ 时,行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻恰为 T_1 ,车

队受阻停车延误分析如图1(b)所示,其中 O_1 为行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻恰为 T_1 时所对应的相对相位差;当相对相位差 O 满足不等式 $\frac{s}{v} - (C - t_T) + t_R - Z' \cdot C \leq O \leq \frac{s}{v} + t_R - Z' \cdot C$ 时,行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻将介于 T_0 与 T_1 之间,行驶车队平均延误时间 $\bar{d}_{LA}$ 的计算公式如式(4)所示:

$$\begin{aligned} d_{LA} &= \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} + \frac{C - t_T}{2} - \Delta t_0 = \\ &= \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} + \frac{C - t_T}{2} - (O_0 - O) = \\ &= \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} + O - \frac{O_0 + O_1}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 行驶车队跨越一个以红灯启亮为起始的信号周期到达(Platoon arriving throughout a cycle with the start of red phase)

假若过饱和状态持续时间较长,简化始末信号周期停车延误变化对总体性能指标的影响.当第一个信号周期绿灯结束时存在滞留车辆,对应的停车延误情况近似如图4(a)中的网格线区域所示;当第一个信号周期绿灯结束时不存在滞留车辆,对应的停车延误情况近似如图4(b)中的网格线与水平线区域所示。

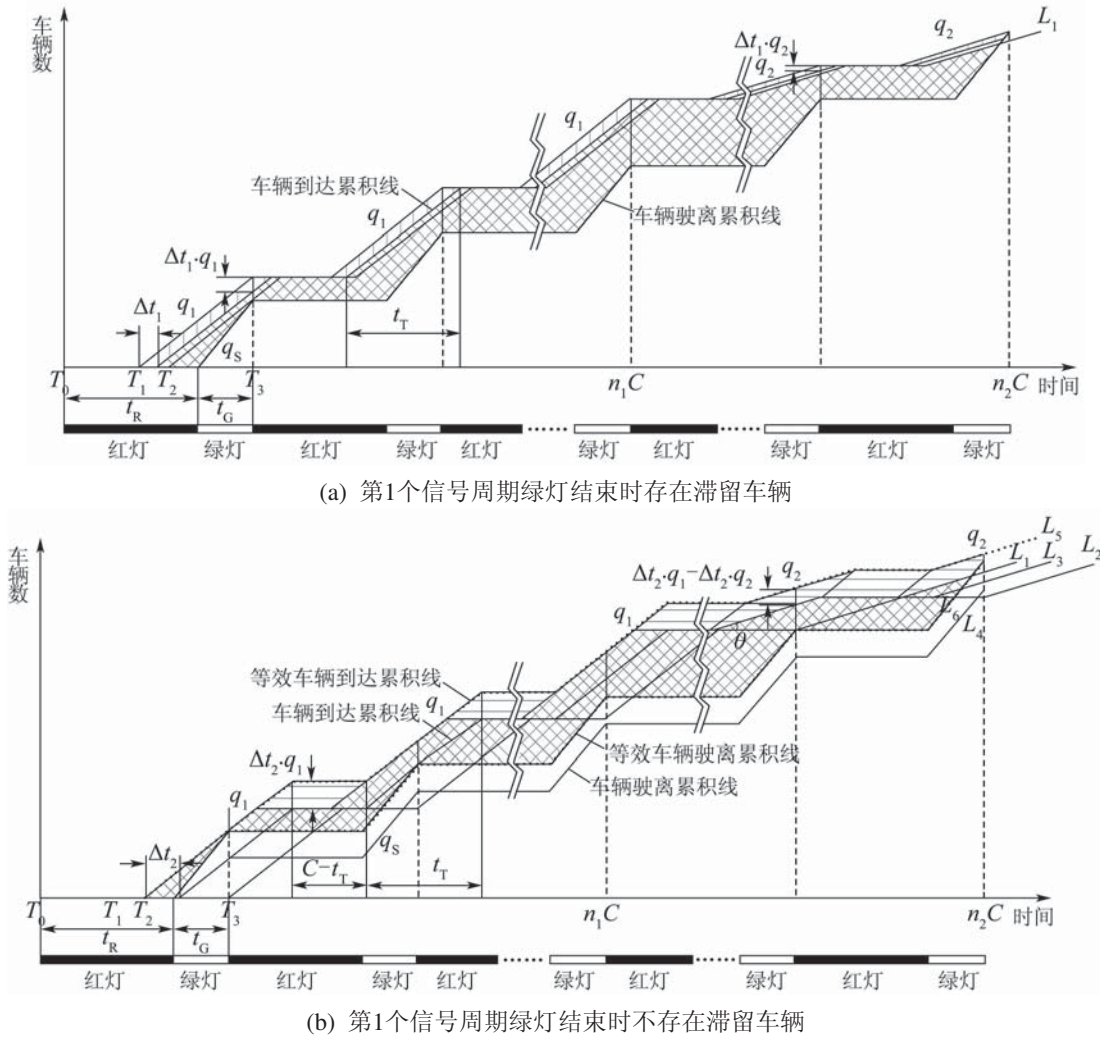


图 4 行驶车队跨越一个信号周期到达时的停车延误分析图

Fig. 4 Cumulative arrival-departure diagram for a platoon arrived crossing a cycle

在图4(a)中: Δt_1 表示行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻滞后于 T_1 的时间差, $\Delta t_1 \in [0, \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{q_1}]$, 垂直线区域表示滞后时间差 Δt_1 所产生的停车延误负增量, 折线 L_1 表示滞后时间差 Δt_1 取值最大时所对应的车辆到达累积线. 利用图形中线段与面积的可叠加性和数学关系式(5), 可以推出滞后时间差 Δt_1 所对应的平均过剩滞留车辆数增量 ΔN_S 、平均停车次数增量 Δh_{LA} 以及平均延误时间增量 Δd_{LA} 的计算公式如式(6)~(8)所示:

$$Q \cdot (n_1 + n_2) \cdot C = q'_1 \cdot n_1 \cdot C + q'_2 \cdot n_2 \cdot C = q_1 \cdot n_1 \cdot t_T + q_2 \cdot n_2 \cdot t_T, \quad (5)$$

$$\Delta N_S = -\frac{\Delta t_1 \cdot q_1 \cdot n_1 + \Delta t_1 \cdot q_2 \cdot n_2}{n_1 + n_2} = -\frac{\Delta t_1 \cdot Q \cdot C}{t_T}, \quad (6)$$

$$\Delta h_{LA} = \frac{(n_1 + n_2) \cdot \Delta N_S}{Q \cdot (n_1 + n_2) \cdot C} = -\frac{\Delta t_1}{t_T}, \quad (7)$$

$$\Delta d_{LA} = -\frac{\Delta t_1 \cdot q'_1 \cdot n_1 \cdot C + \Delta t_1 \cdot q'_2 \cdot n_2 \cdot C}{Q \cdot (n_1 + n_2) \cdot C} = -\Delta t_1. \quad (8)$$

在图4(b)中: Δt_2 表示行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻滞后于 T_2 的时间差, $\Delta t_2 \in [0, \frac{Q \cdot C}{q_1}]$, 水平线区域表示滞后时间差 Δt_2 所产生的停车延误正增量, 折线 L_1, L_2 分别表示滞后时间差 Δt_2 取值最小、最大时所对应的车辆到达累积线, 折线 L_3, L_4 分别表示滞后时间差 Δt_2 所对应的车辆到达、驶离累积线, 折线 L_5, L_6 分别表示滞后时间差 Δt_2 所对应的等效车辆到达、驶离累积线, θ 表示车辆到达率 q_2 所对应的斜率角. 利用图形中线段与面积的可叠加性和数学关系式(9), 可以推出滞后时间差 Δt_2 所对应的平均过剩滞留车辆数

增量 ΔN_S 、平均停车次数增量 Δh_{LA} 以及平均延误时间增量 Δd_{LA} 的计算公式如式(10)~(12)所示:

$$n_2 = \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{Q \cdot C - q_2 \cdot t_T} \cdot n_1, \quad (9)$$

$$\Delta N_S = \frac{(\Delta t_2 \cdot q_1 - \Delta t_2 \cdot q_2) \cdot n_2}{n_1 + n_2} =$$

$$\Delta d_{LA} = \frac{(C - t_T) \cdot q_1 \cdot \Delta t_2 \cdot (n_1 + n_2) + \frac{t_T}{\cos \theta} \cdot (\Delta t_2 \cdot q_1 - \Delta t_2 \cdot q_2) \cdot \cos \theta \cdot n_2}{Q \cdot (n_1 + n_2) \cdot C} = \frac{\Delta t_2 \cdot (q_1 - Q)}{Q}. \quad (12)$$

3 停车延误协调控制模型(Stop and delay coordinated control models)

假设行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻滞后于该进口道红灯启亮时刻 Δt , $\Delta t \in [0, C]$,

$$\frac{\Delta t_2 \cdot (q_1 \cdot t_T - Q \cdot C)}{t_T}, \quad (10)$$

$$\Delta h_{LA} = \frac{(n_1 + n_2) \cdot \Delta N_S}{Q \cdot (n_1 + n_2) \cdot C} = \frac{\Delta t_2 \cdot (q_1 \cdot t_T - Q \cdot C)}{t_T \cdot Q \cdot C}, \quad (11)$$

综上所述可以推出交叉口进口道平均过剩滞留车辆数 N_S 、平均停车次数 h_{LA} 以及平均延误时间 d_{LA} 随 Δt 连续变化的分段计算公式, 如式(13)~(15)所示:

$$N_S = \begin{cases} \frac{Z \cdot Q \cdot n_1 \cdot C}{2}, & 0 \leq \Delta t < C - t_T, \\ \frac{Z \cdot Q \cdot n_1 \cdot C}{2} - [\Delta t - (C - t_T)] \cdot \frac{Q \cdot C}{t_T}, & C - t_T \leq \Delta t < C - \frac{Q \cdot C}{q_1}, \\ \frac{Z \cdot Q \cdot n_1 \cdot C}{2} - \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{q_1} \cdot \frac{Q \cdot C}{t_T} + [\Delta t - (C - \frac{Q \cdot C}{q_1})] \cdot \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{t_T}, & C - \frac{Q \cdot C}{q_1} \leq \Delta t < C, \end{cases} \quad (13)$$

$$h_{LA} = \begin{cases} 1 + \frac{Z \cdot n_1}{2}, & 0 \leq \Delta t < C - t_T, \\ 1 + \frac{Z \cdot n_1}{2} - \frac{\Delta t - (C - t_T)}{t_T}, & C - t_T \leq \Delta t < C - \frac{Q \cdot C}{q_1}, \\ 1 + \frac{Z \cdot n_1}{2} - \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{q_1 \cdot t_T} + [\Delta t - (C - \frac{Q \cdot C}{q_1})] \cdot \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{t_T \cdot Q \cdot C}, & C - \frac{Q \cdot C}{q_1} \leq \Delta t < C, \end{cases} \quad (14)$$

$$d_{LA} = \begin{cases} \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} + \frac{C - t_T}{2} - \Delta t, & 0 \leq \Delta t < C - t_T, \\ \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} - \frac{C - t_T}{2} - [\Delta t - (C - t_T)], & C - t_T \leq \Delta t < C - \frac{Q \cdot C}{q_1}, \\ \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} - \frac{C - t_T}{2} + \frac{Q \cdot C}{q_1} - t_T + [\Delta t - (C - \frac{Q \cdot C}{q_1})] \cdot \frac{q_1 - Q}{Q}, & C - \frac{Q \cdot C}{q_1} \leq \Delta t < C. \end{cases} \quad (15)$$

假定行驶车队头车到达下游交叉口进口道时刻恰为 T_0, T_1, T_2, T_3 时所对应的相对相位差为 O_0, O_1, O_2, O_3 , 其中相对相位差 O_0 与 O_3 相差一个信号周期, 即到达时刻 T_0 与 T_3 对应同一受阻情况. 将关系式

$$\begin{aligned} O_0 - O_1 &= C - t_T, \\ O_1 - O_2 &= \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{q_1}, \end{aligned}$$

$$O_2 - O_3 = \frac{Q \cdot C}{q_1},$$

$$\Delta t = O_0 - O$$

代入上述计算公式(13)~(15), 可以得到过饱和交通状态下的进口道停车延误协调控制模型, 如式(16)~(18)所示, 进口道性能指标与相对相位差之间的对应关系如图5所示.

$$N_S = \begin{cases} \frac{Z \cdot Q \cdot n_1 \cdot C}{2}, & O_1 < O \leq O_0, \\ \frac{Z \cdot Q \cdot n_1 \cdot C}{2} - (O_1 - O) \cdot \frac{Q \cdot C}{t_T}, & O_2 < O \leq O_1, \\ \frac{Z \cdot Q \cdot n_1 \cdot C}{2} - \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{q_1} \cdot \frac{Q \cdot C}{t_T} + (O_2 - O) \cdot \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{t_T}, & O_3 < O \leq O_2, \end{cases} \quad (16)$$

$$h_{LA} = \begin{cases} 1 + \frac{Z \cdot n_1}{2}, & O_1 < O \leq O_0, \\ 1 + \frac{Z \cdot n_1}{2} - \frac{O_1 - O}{t_T}, & O_2 < O \leq O_1, \\ 1 + \frac{Z \cdot n_1}{2} - \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{q_1 \cdot t_T} + (O_2 - O) \cdot \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{t_T \cdot Q \cdot C}, & O_3 < O \leq O_2, \end{cases} \quad (17)$$

$$d_{LA} = \begin{cases} \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} + \frac{C - t_T}{2} - (O_0 - O), & O_1 < O \leq O_0, \\ \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} - \frac{C - t_T}{2} - (O_1 - O), & O_2 < O \leq O_1, \\ \frac{t_R}{2} + \frac{Z \cdot n_1 \cdot C}{2} - \frac{C - t_T}{2} + \frac{Q \cdot C}{q_1} - t_T + (O_2 - O) \cdot \frac{q_1 - Q}{Q}, & O_3 < O \leq O_2. \end{cases} \quad (18)$$

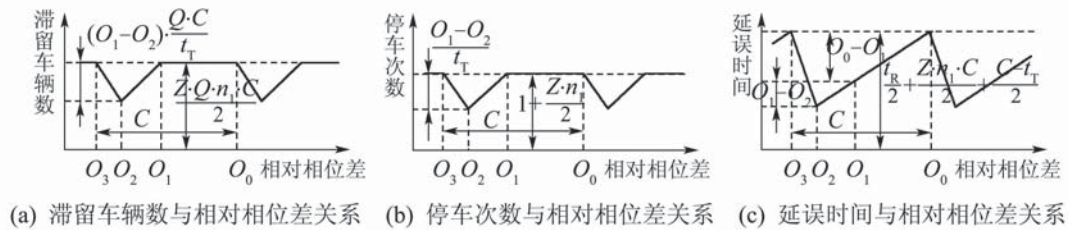


图 5 进口道性能指标与相对相位差之间的对应关系

Fig. 5 Relationship between performance index and offset

4 仿真分析(Simulation analysis)

假设一条三车道路段的上下游交叉口进口道停车线相距1000 m, 交叉口公共信号周期为80 s, 上游交叉口路段方向绿灯时间为40 s, 下游交叉口路段方向绿灯时间为32 s, 起始时刻初始排队车辆数为0, 在前10个信号周期即[0,800] s内上游交叉口的车辆到达率为3600 pcu/h, 在后20个信号周期即[800,2400] s内上游交叉口的车辆到达率为1200 pcu/h, 车队平均行驶速度为36 km/h. 利用微观交通仿真软件VISSIM对其进行仿真分析, 测得 $q_1 \cdot t_T = 66$ pcu, $t_T = 48$ s, $q_1 = 4950$ pcu/h, $q'_1 = 2970$ pcu/h, $Q \cdot C = 53$ pcu, $Q = 2385$ pcu/h, $n_1 \approx 13$ (由于前10个信号周期结束后上游交叉口将存有较多滞留车辆, 致使下游交叉口到达车流过饱和持续时间相应加长), $n_2 \approx 7$, $Z = 0.245$.

可以推算:

$$\begin{aligned} O_0 = O_3 &= \frac{s}{v} + t_R - Z' \cdot C = 68 \text{ s}, \\ O_1 &= O_0 - (C - t_T) = 36 \text{ s}, \\ O_2 &= O_1 - \frac{q_1 \cdot t_T - Q \cdot C}{q_1} = 26.55 \text{ s}, \\ 10 \cdot 80 \cdot \frac{3600}{3600} + (n_1 - 10) \cdot 80 \cdot \frac{1200}{3600} &= \\ n_1 \cdot 66 &\Rightarrow n_1 \approx 13, \\ 10 \cdot 80 \cdot \frac{3600}{3600} + (3 + n_2) \cdot 80 \cdot \frac{1200}{3600} &= \\ (13 + n_2) \cdot 53 &\Rightarrow n_2 \approx 7, \end{aligned}$$

$$N_S \approx$$

$$\begin{cases} 84.4, & 36 < O \leq 68, \\ 84.4 - 1.1 \cdot (36 - O), & 26.55 < O \leq 36, \\ 74 + 0.27 \cdot (26.55 - O), & -12 < O \leq 26.55. \end{cases}$$

$$h_{LA} \approx$$

$$\begin{cases} 2.59, & 36 < O \leq 68, \\ 2.59 - 0.02 \cdot (36 - O), & 26.55 < O \leq 36, \\ 2.4 + 0.005 \cdot (26.55 - O), & -12 < O \leq 26.55. \end{cases}$$

$$d_{LA} \approx$$

$$\begin{cases} 167.4 - (68 - O), & 26.55 < O \leq 68, \\ 125.95 + 1.08 \cdot (26.55 - O), & -12 < O \leq 26.55. \end{cases}$$

在过饱和和交通状态下, 仿真软件通常难以直接测取到过剩滞留车辆数; 且假设车辆驶近交叉口时驾驶员的驾驶行为(加减速)只受前车行驶状况的影响, 致使部分车辆将增加一次不必要的完全停车, 与实际行驶状况不符^[17]; 但对于延误时间的测量则仍较为精准(受阻车辆通过路段和交叉口的总延误时间仅取决于其上游驶入与下游驶出的时间差, 而与车辆行驶途中的具体运行状况无关). 因此, 选取延误时间作为评价指标, 分析比较模型推导与仿真结果之间的一致性如图6所示.

从图6可以看出, 仿真曲线与理论曲线拟合较好, 相对相位差取值对延误时间大小的影响非常明显, 其中最小平均延误比最大平均延误约减少25%.

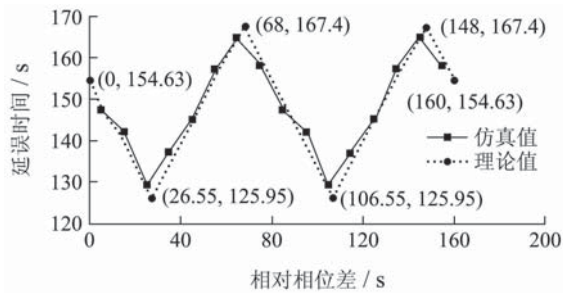


图6 模型推导与仿真结果之间的对比

Fig. 6 Comparison between model derivation and simulation

5 结语(Conclusion)

本文根据过饱和交通状态下的信号协调控制特点,以整个过饱和状态持续作用时间为研究时段,根据上游交叉口驶出车队到达下游交叉口进口道的不同情况,分析了行驶车队通过下游交叉口的基准阻滞停车延误,建立了过饱和交通状态下的停车延误协调控制模型,并通过仿真分析验证了控制模型的准确有效性,为过饱和交通状态下的信号协调配时优化设计提供了理论依据与解决思路。但如何细化初始排队车辆与车队非均匀到达等因素影响,进一步完善过饱和状态下的停车延误协调控制模型,并推导出信号协调控制作用下的均衡阻滞过渡函数,建立起可通用于不同交通状态的信号配时优化模型,还需要继续开展深入细致的研究工作。

参考文献(References):

- [1] GAZIS D C. Optimum control of a system of oversaturated intersections[J]. *Operations Research*, 1964, 12(6): 815 – 831.
- [2] GAZIS D C, POTTS R B. The oversaturated intersection[C] // *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow*. Paris, France: Organisation for Economic Cooperation and Development, 1965: 221 – 237.
- [3] DANS G C, GAZIS D C. Optimal control of oversaturated store-and-forward transportation networks[J]. *Transportation Science*, 1976, 10(1): 1 – 19.
- [4] MICHALOPOULOS P G, STEPHANOPOULOS G. Oversaturated signal systems with queue length constraints-II: systems of intersections[J]. *Transportation Research*, 1977, 11(6): 423 – 428.
- [5] CHANG T H, LIN J T. Optimal signal timing for an oversaturated intersection[J]. *Transportation Research Part B*, 2000, 34(6): 471 – 491.
- [6] CHANG T H, SUN G Y. Modeling and optimization of an oversaturated signalized network[J]. *Transportation Research Part B*, 2004, 38(8): 687 – 707.
- [7] ROUPHAIL N M. Progression adjustment factors for signalized intersections[J]. *Transportation Research Record*, 1989, Issue 1225: 8 – 17.
- [8] FAMBRO D B, CHANG E C P, MESSER C J. *Effects of the quality of traffic signal progression on delay: national cooperative highway research program report 339*[R]. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1991.
- [9] TRB. *Highway Capacity Manual 1994 (HCM 1994)*[M]. Washington, D.C.: National Research Council, 1994.
- [10] BENEKOHAL R F, ZOHAIRY Y M E. A new uniform delay model for signalized intersections[C] // *Proceedings of the American Society of Civil Engineers Conference: Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century*. New York, USA: American Society of Civil Engineers, 1997: 626 – 632.
- [11] BENEKOHAL R F, ZOHAIRY Y M E. Multi-regime arrival rate uniform delay models for signalized intersections[J]. *Transportation Research Part A*, 2001, 35(7): 625 – 667.
- [12] 常云涛, 彭国雄. 基于遗传算法的城市干道协调控制[J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(2): 106 – 112.
(CHANG Yuntao, PENG Guoxiong. Urban arterial road coordinate control based on genetic algorithm[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(2): 106 – 112.)
- [13] 刘广萍, 裴玉龙. 信号控制下交叉口延误计算方法研究[J]. *中国公路学报*, 2005, 18(1): 104 – 108.
(LIU Guangping, PEI Yulong. Study of calculation method of intersection delay under signal control[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2005, 18(1): 104 – 108.)
- [14] 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.)
- [15] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
(WANG Dianhai. *Traffic Flow Theory*[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.)
- [16] 袁长亮. 过饱和道路交通控制信号周期优化解分析[J]. *道路交通与安全*, 2008, 8(6): 19 – 24.
(YUAN Changliang. Cycle solution analysis in oversaturated network traffic control[J]. *Road Traffic & Safety*, 2008, 8(6): 19 – 24.)
- [17] 全永荣. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
(QUAN Yongshen. *Urban Traffic Control*[M]. Beijing: China Communications Press, 1989.)

作者简介:

卢凯 (1979—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为交通信号控制、智能控制理论与应用等, E-mail: kailu@scut.edu.cn;

徐建闽 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交通信息工程及控制、控制理论与控制工程等, E-mail: aujmxu@scut.edu.cn;

李林 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通信号控制、智能交通系统, E-mail: linlee020@gmail.com.