

窗口流量控制的干线动态协调控制方法

郭海锋

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 城市交通干线在高峰时期经常处于饱和状态, 排队车辆溢出至上游交叉口的“死锁”现象时有发生. 为避免干线阻塞、提高饱和条件下干线交通流的运行效率, 首先提出一种有效带宽评价方法对已有干线绿波协调控制系统的运行状态及控制效果进行监控; 其次借鉴TCP/IP窗口流量控制思想, 设计一种窗口流量控制的干线动态协调控制方法, 控制城市干线拥挤交通流. 模拟试验及对比结果表明, 通过窗口流量通告的方式, 下游交叉口可以向上游交叉口实时告知路段的有效容量, 便于各交叉口信号机根据当前的交通需求及路段的有效容量重新分配各股车流的绿灯时间.

关键词: 交通工程; 干线协调; 窗口流量控制; 有效带宽; 信号控制

中图分类号: U491 文献标识码: A

Traffic signal control for arterial intersections based on flow control of window-advertisement

GUO Hai-feng

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China)

Abstract: The traffic in arterial intersections is usually over-saturated; and gridlock occurs very frequently in rush hours. In order to improve the efficiency of traffic flow control and prevent the arterial system from traffic jam, we propose a method for analyzing the available bandwidth to supervise states of the arterial traffic signal control system. On this basis, we promoted by the idea of window flow control in TCP/IP, present a scheme of traffic signal control for arterial intersections to reduce traffic congestion. Simulation demonstrates that the downstream intersections are continuously providing their effective capacity to the upstream intersections through the flow window; by this information and the current traffic demand, the upstream intersections assign green time to each traffic stream accordingly.

Key words: traffic engineering; arterial coordination; window flow control; available bandwidth; signal control

1 引言(Introduction)

干线协调控制是城市交通控制系统中的主要控制方式之一, 保证干线交通的畅通, 对改善一个区域甚至整个城市的交通状况将起着至关重要的作用.

现有的干线协调控制方法, 主要是通过调整相邻信号交叉口的信号配时参数, 追求在既定交通条件下的绿波带宽最大化^[1~3], 因此又将其称为干线绿波协调控制. 实践证明, 干线绿波协调控制在非饱和情况下控制效果较好, 但是在饱和及过饱和情况下则远未达到预期的控制效果, 甚至出现排队车辆溢出至上游交叉口, 产生上游交叉口绿灯期间车辆无法通过的“死锁”现象.

针对饱和及过饱和干线交叉口, 文献[4~6]在设

计干线绿波协调控制算法时, 提出了以延误最小化为优化目标, 以排队长度作为约束条件, 求解过饱和和干线交叉口的信号配时算法. 这些算法的实施, 需要满足一定的假设条件, 如文献[4]假定饱和期间各信号周期的交通状态完全一致, 且假定下游交叉口停车线前的车辆排队长度远小于路段长度; 文献[5]假定下游路段的有效利用空间为一常量, 足够容纳上游交叉口放行的车辆; 文献[6]仅对一个信号周期的信号配时进行优化, 然后假定该信号周期的信号配时结果适用于整个饱和及过饱和期间. 显而易见, 上述假定条件在实际应用中较难达到, 因此, 这些方法的实施很难发挥其理想的控制效果.

从已有研究的发展趋势看, 研究者在设计干线绿

波协调控制方法时, 已由微观地考虑某一方向、某一交叉口的交通状况, 逐渐转变为宏观地考虑上下游路段、相邻交叉口的交通状况; 已由单纯地以减少停车延误为控制目标, 逐渐转变为考虑排队长度, 降低排队长度, 疏散拥挤为控制目标.

然而, 现有的研究尚有两个方面缺乏考虑, 一方面缺乏对干线绿波协调控制系统运行状态的实时监控; 另一方面缺乏对路段有效空间的实时检测. 前者可用于监控当前执行的干线绿波协调控制方案的有效性; 后者则可从路段容纳车辆数的角度设计信号配时, 以防止前述“死锁”现象的发生.

本文将从这两个角度出发, 首先提出一种用于计算干线绿波协调控制系统有效带宽的方法, 以监控绿波协调控制的有效性; 并以此为基础, 提出一种基于窗口流量控制思想的路段有效容量实时通告方法, 使下游交叉口可以告知上游交叉口路段当前的有效容量, 以便上游交叉口根据路段的有效容量调整信号配时, 以免绿灯时间分配过多, 导致路段排队车辆溢出.

2 相关概念的界定(Definitions)

设计阶段, 干线绿波协调控制系统设计的理想带宽一般如图1所示. 在带宽所辖时间内, 自交叉口1驶出的车辆, 如果以指定的速度行驶, 便可以无阻滞地通过交叉口2和交叉口3; 但是, 在实际运行中, 很难实现设计的理想带宽, 通常仅理想带宽中的一部分执行实际的绿波通行, 本文将其称为有效带宽, 如图2所示.

产生图2所示现象的直接原因是, 当参与协调控制的交叉口中一旦下游某个路段或交叉口发生饱和, 则绿灯结束时, 便会有车辆滞留, 等待下一次绿灯放行. 该方向再次获得绿灯通行权时, 饱和交叉口首先放行红灯期间排队等待的车辆, 放行完毕后, 才能放行当前绿灯期间自上游交叉口驶来的车辆, 使其绿波通行. 因此, 实际运行中的有效带宽通常小于设计的理想带宽.

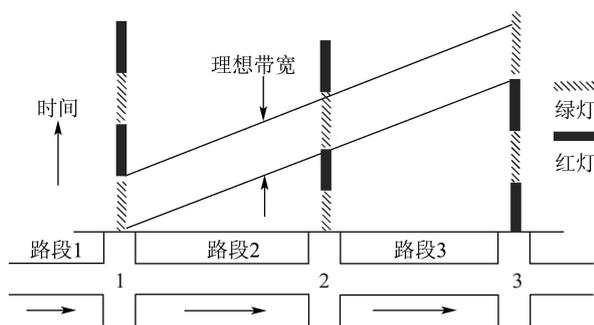


图 1 理想情况下的时间-距离图

Fig. 1 Illustration of theoretic bandwidth in time-space

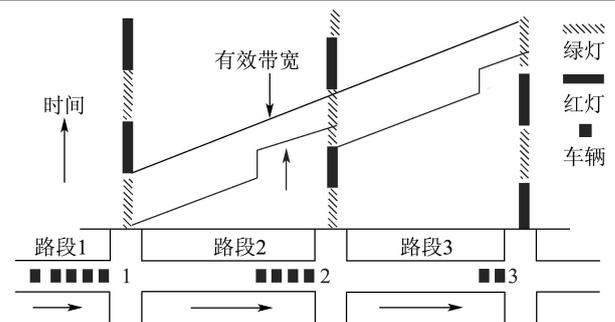


图 2 实际交通运行中的时间-距离图

Fig. 2 Illustration of actual bandwidth in time-space

为便于监控有效带宽的实时状态, 本文给出私有绿灯时间、公有绿灯时间和有效带宽的概念及其计算方法.

2.1 私有绿灯时间(Private green time)

私有绿灯时间, 是指干线绿波协调控制系统中, 目标交叉口仅用于放行绿灯起始时刻停车线前排队车辆的绿灯时间, 其上游交叉口当前绿灯放行的车辆没有在这部分时间内抵达该交叉口.

2.2 公有绿灯时间(Public green time)

公有绿灯时间, 是指干线绿波协调控制系统中, 目标交叉口将绿灯起动时停车线前排队的车辆释放完毕之后剩余的绿灯时间, 该部分绿灯时间可用于释放上游交叉口当前绿灯放行的车辆, 使其无阻滞地通过本地交叉口.

由此可见, 干线绿波协调控制系统的协调效果取决于公有绿灯时间, 在既定的绿灯时间内, 各交叉口公有绿灯时间越长, 可用于信号协调的绿波带越宽. 而公有绿灯时间的长短受制于私有绿灯时间, 私有绿灯时间则取决于绿灯起始时刻停车线前排队的车辆数. 因此, 绿灯起始时刻停车线前排队车辆数的多少将直接影响公有绿灯时间, 进而影响干线绿波协调控制的绿波带宽度. 在实际交通运行中, 由于车队运行时的离散性和随机性, 各交叉口的公有绿灯时间可能不尽相同, 因此每一个信号周期, 各交叉口中最小的公有绿灯时间决定了当前周期绿波通行时所能获得的实际带宽.

2.3 有效带宽(Available bandwidth)

本文研究中, 有效带宽(available bandwidth, ABW)是指干线绿波协调控制系统在控制过程中能够真正起到绿波通行作用的那部分带宽. 显然, 当有效带宽为零时, 可以认为当前干线绿波协调控制的效果较差, 已经不能发挥其应有的功效. 因为, 干线绿波协调控制的有效带宽逐渐减小时, 能够从上游交叉口驶出并顺利通过下游交叉口的车辆数将越来越少. 由此可见, 通过实时计算有效带宽, 便可以

实现对当前干线绿波协调控制系统的控制效果进行监督评价,如果发现当前的控制方案不理想,便可以更换为其他的控制方案,以确保干线畅通,预防交通阻塞.

2.4 路段有效容量(Available storage of a link)

路段有效容量(available storage of a link, ASL)是指路段当前可以容纳的来自上游交叉口的最大车辆数. 饱和条件下,交叉口放行的车辆数不仅仅与绿灯时间长短有关,还受到车辆行进方向下游路段有效容量的制约. 如果下游路段排队的车辆数较多,则其有效容量较少,能够容纳来自上游交叉口的车辆数也较少;此时上游交叉口在该方向给予的绿灯时间越多,导致浪费的绿灯时间便越多,严重影响交叉口的时空效益. 因此上游交叉口在给予某一方向绿灯时间时,应该充分考虑下游路段的有效容量,应根据路段有效容量计算放行的车辆数,进而确定给予的绿灯时间,以便充分利用交叉口的时空资源.

2.5 窗口流量控制(Control based on window flow)

在计算机网络中,当发送方机器欲发送报文至接收方机器时,发送方机器首先向接收方机器发送一个请求,接收方机器上的TCP则会返回一个确认,包括一个窗口通告(window advertisement),使发送方得知接收方还有多大的缓冲空间用以存放新增的数据. 窗口通告总是指出接收方还可以接受多少数据^[7]. TCP/IP网络中,通过窗口通告实现源端和接收端之间的流量控制,以避免发生网络阻塞.

本文借鉴TCP/IP网络中窗口流量控制的思想,将其用于干线协调控制系统中. 上游交叉口在赋予干线方向绿灯通行权时,下游交叉口通过计算,向上游交叉口发送一个流量通告,告知上游交叉口,该方向下游路段所能容纳的车辆数,上游交叉口收到流量通告后,则综合考虑当前请求放行的车辆数以及下游路段能容纳的车辆数,优化分配绿灯时间.

3 计算基础(Computing preconditions)

本文设计的方法,需要在道路上安装车辆检测器,在计算时将检测器检测到的不同类型的车辆,以4~5座的小客车为标准换算为当量小汽车,因此,本文算法中用到的车辆数据均指换算后的当量小汽车的数据.

3.1 各车道排队车辆数的计算方法(Computing queued vehicles for a lane)

饱和情况下,各相位绿灯结束时,红灯期间等待放行的车辆不能全部通过交叉口,滞留车辆将与新到达的车辆一起等待下一次绿灯放行. 基于道路上交通检测器提供的数据,在每一次绿灯放行初始时,

可以计算出各车道等待放行的车辆数.

以图3为例,说明各车道排队长度的计算方法. 在图3中,车道3为左转专用车道,车道2为直行车道,车道1为直行右转车道. 检测器分别置于停车线附近以及左转专用车道末端和直行车道上游位置. 左转车道两检测器之间的距离为 L_{LT} ,可用于统计左转排队车辆数;直行及直右两检测器之间的距离为 L_{RT} ,可用于统计直行排队车辆数.

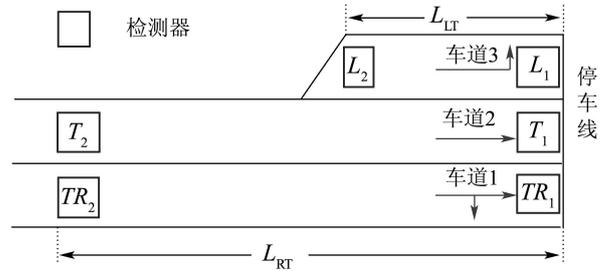


图3 车道示意图

Fig. 3 Illustration of lanes

1) 左转车道的排队车辆数.

假设当前第 t 次绿灯结束时,左转车道两个检测器 L_1 和 L_2 间的排队车辆数为 $Q(\eta, L, t)$,其中 $\eta \in \{E, S, W, N\}$,表示交叉口东(E)、南(S)、西(W)、北(N)4个进口方向. 车辆的运行方向可表示为 $\theta \in \{L, T, R\}$,其中 L 表示左转, T 表示直行, R 表示右转. L_2 继续对新到车辆进行检测,则车道3上的车辆获得 $t + 1$ 次绿灯通行权时, L_1 和 L_2 检测器间的排队车辆数为原有排队车辆数 $Q(\eta, L, t)$ 与新到达车辆数 $QN(\eta, L, t)$ 之和,即

$$N(\eta, L, t) = Q(\eta, L, t) + QN(\eta, L, t). \quad (1)$$

当该车道再次获得绿灯通行权时, L_1 开始对离开的车辆进行检测, L_2 继续检测新到达的车辆. 当第 $t + 1$ 次绿灯结束时, L_2 检测绿灯期间到达的车辆数为 $QA(\eta, L, t + 1)$, L_1 检测绿灯期间离开的车辆数为 $QD(\eta, L, t + 1)$,此时两个检测器之间的剩余车辆数为

$$Q(\eta, L, t + 1) = N(\eta, L, t) + QA(\eta, L, t + 1) - QD(\eta, L, t + 1). \quad (2)$$

由上述迭代公式,便可计算出该车道再次获得绿灯时需要放行的车辆数.

2) 直右流向各车道的排队车辆数.

车道1的排队车辆数的计算原理与车道3相同,见公式(2). 对于车道2而言,由于路段上游的检测器 T_2 不仅仅检测直行的车辆,同时还有左转的车辆,因此计算车道2上的排队车辆较为复杂. 计算车道2的排队车辆数时应去除左转的车辆数,左转车辆

的比例则可通过 L_1 和 L_2 实时检测的数据计算得到. 假设当前车道2第 t 次绿灯结束, 则车道2上滞留的车辆数为

$$N(\eta, T, t) = Q(\eta, T, t) + QN(\eta, T, t) \times (1 - P_{LT}^t), \quad (3)$$

其中 P_{LT}^t 为第 t 次绿灯结束至 $t+1$ 次绿灯开始时累计到达车辆数中左转车辆所占的百分比:

$$P_{LT}^t = \frac{Q(\eta, L, t)}{Q(\eta, T, t)}. \quad (4)$$

当第 $t+1$ 次绿灯结束时, 车道2上 T_1 和 T_2 两个检测器之间的排队车辆为:

$$Q(\eta, T, t+1) = Q(\eta, T, t) + (QN(\eta, T, t) + QA(\eta, T, t+1)) \times (1 - P_{LT}^t) - QD(\eta, T, t+1), \quad (5)$$

$$N(\eta, R, t) = Q(\eta, R, t) + QN(\eta, R, t). \quad (6)$$

3.2 路段有效容量的计算方法(Method for computing available storage of a link)

路段有效容量的计算方法见公式(7)所示:

$$ASL(i) = SL(i) - NQ(i), \quad (7)$$

其中: $SL(i)$ 为路段 i 的容量, 指路段 i 排满车辆时所能容纳的最大车辆数; $NQ(i)$ 是指当前时刻路段 i 上的车辆数.

$$SL(i) = n \times \frac{L(i)}{LV + SV} + m \times \frac{l(i)}{LV + SV}, \quad (8)$$

其中: $L(i)$ 为基本路段长度, $l(i)$ 为渠化路段长度, LV 为平均车辆长度, SV 为饱和车头间距, n 为非渠化部分车道数, m 为渠化部分车道数.

路段 i 上的车辆数由两部分组成, 一部分是上个时间间隔内剩余的车辆数, 另一部分是本时间间隔内累计进入该路段的车辆数减去本时段内累计通过交叉口的车辆数, 其计算方法可由各车道排队车辆数统计获得.

3.3 窗口流量通告方法(Method of window advertisement)

各信号交叉口根据检测器检测到的交通数据, 实时计算所辖路段的有效容量, 当上游交叉口向其发出请求时, 下游交叉口则向其发送一个窗口流量通告. 其窗口格式为: $\{T_{state}^i, T_{remain}^i, ASL(i)\}$, 其中 $T_{state}^i \in \{\text{Red, Green, Yellow}\}$, 分别表示当前第 i 个交叉口干线方向为红灯, 绿灯和黄灯; T_{remain}^i 表示某一灯色的剩余时间, $ASL(i)$ 为当前路段的有效容量.

4 有效带宽计算方法(Method for computing available bandwidth)

设计干线协调控制系统应该考虑系统的鲁棒性, 即针对不同的交通状况, 控制系统能够动态地调整信号控制方案. 为增强现有干线协调控制系统的鲁棒性, 本文提出了对有效带宽进行动态评价的思想. 即以当前干线协调控制系统的信号周期为时间间隔, 在每个周期结束时, 筛选公有绿灯时间最短的交叉口, 并给予其数值为1分的惩罚. 当干线协调控制系统的有效带宽低于某一阈值时, 则表明当前的干线协调控制失效, 此时获得惩罚分数最大的交叉口即为该系统拥挤原点. 拥挤原点交叉口将及时地向上游交叉口发送窗口流量通告, 干线协调控制系统可以切换控制方案执行本文提出的协调控制方法.

为实现上述功能, 则需设计有效带宽评价算法(algorithm of searching available bandwidth, ASAB), 以实现已有干线协调控制系统中的有效带宽进行实时计算.

本文ASAB算法的设计条件包括: 1) 参与干线协调的交叉口数量为 N , $N \geq 2$; 2) 参与协调控制的末端交叉口与其下游相邻交叉口间的路段较长, 能够容纳末端交叉口释放的车辆而不会排队溢出; 3) 通过车辆检测器信号机能够实时获取到达车辆的车速、车型信息和累计通过检测器的车辆数; 4) 信号机执行ASAB的时间间隔与当前干线协调控制系统的周期相同.

由前述分析可知, 为了获得有效带宽, 需知道各交叉口的公有绿灯时间, 有效带宽的计算公式见式(9):

$$ABW = \min\{G_{pub}(i)\}, \quad (9)$$

其中: ABW 为干线协调系统的有效带宽, $G_{pub}(i)$ 为第 i 个交叉口的公有绿灯时间. 各交叉口的公有绿灯时间可由式(10)计算得到:

$$G_{pub}(i) = G(i) - G_{priv}(i), \quad (10)$$

其中: $G(i)$ 为第 i 交叉口干线方向的绿灯时间, $G_{priv}(i)$ 为第 i 交叉口的私有绿灯时间. 各交叉口的私有绿灯时间可由式(11)计算得到:

$$G_{priv}(i) = N(\eta, \theta, i) \times h, \quad (11)$$

其中: $N(\eta, \theta, i)$ 为交叉口 i 干线方向绿灯起始时刻停车线前的排队车辆数, 其计算方法见公式(1)和公式(3), h 为饱和车头时距.

ASAB算法的计算过程如下:

1) 获得当前信号周期交叉口 i 干线方向的绿灯

时间 $G(i), i = 1, 2, \dots, N$;

2) 监测交叉口 i 干线方向红灯时间是否结束, 如果是则转向3), 否则继续监测, $i = 1, 2, \dots, N$;

3) 计算交叉口 i 干线方向绿灯起始时刻停车线前的排队车辆数 $N(\eta, \theta, i), i = 1, 2, \dots, N$;

4) 计算交叉口 i 的私有绿灯时间 $G_{\text{priv}}(i), i = 1, 2, \dots, N$;

5) 计算交叉口 i 的公有绿灯时间 $G_{\text{pub}}(i), i = 1, 2, \dots, N$;

6) 计算 N 个交叉口的最小公有绿灯时间 $\min\{G_{\text{pub}}(i)\}$, 即有效带宽 ABW .

7) 输出当前周期干线信号协调控制系统的有效带宽, 并对 $\min\{G_{\text{pub}}(i)\}$ 所属的交叉口 i 给予1分惩罚, 即 $\text{punish}(i) = \text{punish}(i) + 1$;

8) 如果 ABW 小于阈值 δ , 则当前干线信号协调控制失效, 输出 $\max\{\text{punish}(i)\}$ 所属的交叉口; 否则转步骤1), 对下一信号周期进行监测.

5 窗口流量控制的干线协调控制方法 (Method of traffic signal control for arterial intersections based on flow control of window-advertisement)

实际应用中, 许多城市交通干线的控制方法采用绿波协调控制. 由前述分析可知, 绿波协调控制在饱和情况下, 其控制效果将受到很大的影响. 当干线绿波协调控制系统中的有效带宽 ABW 较小时, 甚至无法实现绿波通行, 此时如果不采用更为有效的控制方案, 则会产生排队车辆溢出至上游交叉口的“死锁”现象. 本文针对此种交通状况, 设计一种窗口流量控制的干线动态协调控制方法, 以避免饱和情况下排队车辆溢出现象的发生, 确保干线的畅通.

5.1 车流的重新组织(Traffic reorganizing)

饱和情况下, 疏导拥挤交通流的有效手段应该如交警一样, 打破原先既定的控制过程, 减少上游交叉口放行至下游拥挤路段的车辆数, 增加下游交叉口拥挤方向的绿灯时间, 以加快拥挤疏导.

来源于交警的实战思想, 并借鉴文献[8]提出的适用于饱和情况下的交通控制方式, 本文根据检测器实时检测到的交通数据, 以优先放行拥挤方向车流为目标, 根据获得的窗口流量通告, 每次发放绿灯通行权时通过优化计算, 重新给予待放行车流的绿灯时间, 以达到快速疏导交通拥挤的目的.

5.2 窗口流量控制算法(Algorithm of window flow control)

窗口流量控制的干线动态协调控制原理:

1) 获得当前干线协调控制的各交叉口的相关静

态交通数据和动态交通数据;

2) 获得各交叉口的相位、相序;

3) 以时间间隔 T 采集的动态交通数据为基础, 计算当前运行的干线协调控制系统的有效带宽 ABW , 如果 ABW 小于阈值 δ , 则转4), 否则不改变当前信号控制方式, 转10);

4) 各交叉口根据检测器检测到的数据计算路段有效容量, 并以窗口格式向上游交叉口发送窗口流量通告;

5) 上游交叉口收到窗口流量通告后, 将改变当前的信号控制方案, 根据检测器数据计算的当前各车道排队车辆数和窗口流量通告中告知的相关信息, 重新分配干线方向绿灯时间;

6) 如果上游交叉口待放行的车辆数小于窗口流量通告中的 $ASL(i)$, 则以待放行的车辆数为依据计算其所需要的绿灯时间 $G(i)$, 否则转7);

7) 以窗口流量通告中的 $ASL(i)$ 为依据, 计算放行 $ASL(i)$ 车辆数所需的绿灯时间, 并考虑下游交叉口当前的灯色状态及其剩余时间, 优化分配该方向最终的绿灯时间;

8) 根据6)或7)的计算结果, 为该方向发放绿灯通行权, 其他竞争方向则为红灯;

9) 该方向即将再次获得通行权时重复步骤4)~8);

10) $T = T + 1$, 转3).

其中, 步骤6)绿灯时间的计算方法如下:

$$G(i) = L(i) + (N(\eta, \theta) + N_{\Delta}) \times h. \quad (12)$$

$L(i)$ 为起动损失时间, h 为饱和车头时距, $N(\eta, \theta)$ 为待放行的排队车辆数, N_{Δ} 为绿灯放行期间新加入的车辆.

步骤7)若放行 $ASL(i)$ 车辆数所需的绿灯时间计算如下:

$$G_{ASL} = L_{ASL} + \frac{ASL(i)}{n} \times h. \quad (13)$$

L_{ASL} 为起动损失时间, 步骤7)的最终绿灯时间计算方法如下:

$$G(i) = G_{ASL} + T_{\text{remain}}, T_{\text{state}} \in \{\text{Green}, \text{Yellow}\}, \quad (14)$$

$$G(i) = G_{ASL} - T_{\text{remain}}, T_{\text{state}} \in \{\text{Red}\}. \quad (15)$$

上述窗口流量控制的干线动态协调控制方法适用于饱和条件, 分配干线方向多少绿灯时间, 完全取决于当前的交通需求以及窗口流量通告中的有效空间供给, 对疏导拥挤交通流较为有效.

6 模拟分析(Simulation analysis)

6.1 模拟方案设计(Simulation scheme)

本文以连续的3个交叉口为研究对象,交叉口的进口渠化结构如图4所示.3个交叉口所在的西-东方向路段为城市主干路,各交叉口间距离约为600 m.实验以德国PTV公司的VISSIM模拟软件为工具,利用VB调用VISSIM的COM接口,读取检测器数据及信号控制机参数,编制程序实现有效带宽的计算,同时用VAP实现控制逻辑.模拟方案中小车比例90%,速度45~60 km/h,大车比例10%,速度25~30 km/h,共计模拟了3600 s,前600 s流量较小,用于平衡路网,设置的高峰期持续时长为2400 s,即第600 s到第3000 s为高峰时间,剩余时间为平峰时间,模拟时高峰时间的交通量为平峰时间的1.2~1.5倍.

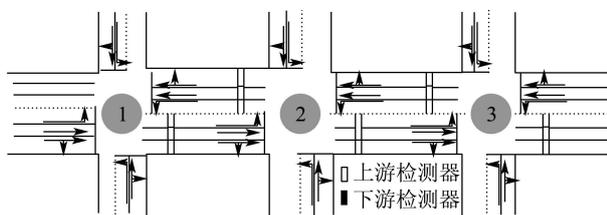


图4 交叉口的渠化结构示意图

Fig. 4 Illustration of arterial intersections

模拟方案分为两个,方案1整个模拟期间均采用绿波协调控制;方案2模拟初期采用绿波协调控制,同时采用有效带宽计算方法进行监控,当发现有效带宽小于阈值时,便转换为窗口流量控制方案.为简化计算,仅对干线由西向东方向进行绿波控制;绿波协调控制方案中,3个交叉口共用信号周期时长为95 s,设计的带宽为20 s,有效带宽的阈值设为5 s.

6.2 模拟结果分析(Discussion for simulation result)

方案1: 为了分析干线绿波协调控制的执行效果,在模拟期间采用有效带宽搜索算法对其进行全程监控,模拟期间有效带宽的变化见图5所示.图中,横轴为干线系统的共用信号周期,纵轴为每一信号周期干线系统的有效带宽.

由图5所示,方案1干线协调控制系统在模拟期间的前部分时间由于车流量较小,干线系统的交通负荷较低,系统的有效带宽较大,在此期间该干线系统实现的绿波控制效果较好;但是随着车流量的增加,

整个干线系统的交通负荷不断升高,系统的有效带宽逐渐减少直至为0,说明此期间干线绿波协调控制已很难实现实际的绿波通行,干线系统处于饱和状态.

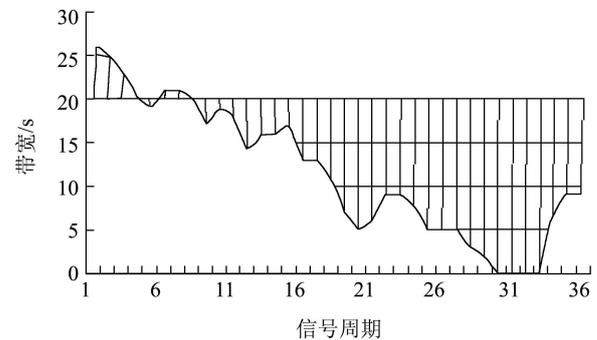


图5 固定配时干线信号协调系统有效带宽

Fig. 5 Illustration of available bandwidth for fixed-time control

方案2: 初期依然采用方案1中的绿波协调控制方案,当监控到干线系统的有效带宽阈值低于5 s时,便停止绿波协调控制方案,切换为本文提出的窗口流量控制方案.编号为3和2的交叉口,适时地向其上游交叉口发送窗口流量通告,交叉口1和交叉口2根据该方向的排队车辆数和接收到的窗口流量通告,计算分配的绿灯时间.

表1和表2是两种方案控制效果的性能评价对比结果.

从VISSIM输出的性能指标对比可以看出,实施窗口流量控制的控制方案之后,可以有效减小干线拥挤流向的平均排队长度和最大排队长度,干线上的车辆平均延误有很大的降低,通过的车辆数相对增加,说明拥挤条件下实施窗口流量控制的干线协调控制方案可以有效地缓解干线方向的交通拥挤状况.虽然实施窗口流量控制的干线协调控制方案后,各交叉口南北进口的平均延误有所增加,但是与干线绿波协调控制方式相比,排队长度增幅不大,说明没有因释放干线方向车流而导致其他竞争方向车流过度拥挤.从整个系统的角度考虑,虽然牺牲了一些其他竞争方向车流的利益,但是整个系统的利益获得了最大化,且能够有效保证干线的畅通,避免“死锁”现象的发生.通过各项评价指标显示,饱和条件下实施窗口流量控制的干线动态协调控制方式较为有效.

表1 两种干线信号控制方案排队长度的比较
Table 1 Comparison of queue length for two schemes

交叉口	平均排队长度/m		最大排队长度/m		
	方案1	方案2	方案1	方案2	
1	东进口	47	41	197	178
	西进口	43	33	186	123
	南进口	33	44	91	88
	北进口	29	27	87	91
2	东进口	37	31	177	153
	西进口	39	29	133	116
	南进口	14	28	67	80
	北进口	21	23	78	88
3	东进口	49	40	220	177
	西进口	51	39	240	188
	南进口	17	23	78	89
	北进口	19	21	86	103

表2 两种方案延误和通过车辆数的比较
Table 2 Delay and capacity of intersections for two schemes

交叉口	平均延误/s		通过车辆数/veh		
	方案1	方案2	方案1	方案2	
1	东进口	31.2	25.9		
	西进口	38.9	35.8	6723	6819
	南进口	20.3	21.1		
	北进口	27.1	27.9		
2	东进口	34.6	33.9		
	西进口	37.5	34.3	6817	6850
	南进口	21.3	20.1		
	北进口	23.1	25.9		
3	东进口	41.6	38.1		
	西进口	40.3	36.5	7702	7918
	南进口	25.1	24.5		
	北进口	19.6	21.1		

7 结论(Conclusions)

本文分析了饱和情况下,干线绿波协调控制系统控制效果变差的原因,然后以城市道路交通检测器采集到的实时交通数据为基础,提出了一种有效带宽评价方法对干线绿波协调控制系统的运行状态及控制效果进行实时监控,并借鉴TCP/IP窗口流量控制思想,设计了一种窗口流量控制的干线动态协调

控制方法,实现对城市干线拥挤交通流进行有效控制.模拟试验及对比结果表明,通过窗口流量通告的方式,下游交叉口可以向上游交叉口实时告知路段的有效容量,便于各交叉口信号机根据当前的交通需求及路段的有效容量重新组织各股车流的绿灯时间,更好地防止干线阻塞.

在实际应用中,文中提出的计算方法会有一些的累计误差存在,如何克服甚至消除累计误差的影响是本文下一步需要改进的地方;此外,避免干线“死锁”的同时,如何对竞争方向也进行较好的优化,也是需要进一步探讨的.

参考文献(References):

- [1] 沈国江,许卫明.交通干线动态双向绿波带控制技术[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(9):1625-1630.
(SHEN Guojiang, XU Weiming. Study on traffic trunk dynamic two-direction green wave control technique[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(9): 1625-1630.)
- [2] 陈娟,徐立鸿,袁长亮.分层控制算法在过饱和和交通干线控制中的应用[J].系统仿真学报,2008,20(15):4122-4131.
(CHEN Juan, XU Lihong, YUAN Changliang. Hierarchy control algorithm and its application in urban arterial control problem[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(15): 4122-4131.)
- [3] 王俊刚,褚世新,余泉,等.干线协调控制系统的绿信比协同优化模型研究[J].交通运输工程与信息学报,2005,3(2):13-18.
(WANG Jungang, CHU Shixin, YU Quan, et al. Split coordination optimization model of arterial coordination control system[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2005, 3(2): 13-18.)
- [4] SINGH M G, TAMURA H. Modeling and hierarchical optimization of oversaturated urban road traffic networks[J]. *International Journal of Control*, 1974, 20(6): 913-934.
- [5] RATHI A K. A control scheme for high traffic density sectors[J]. *Transportation Research, Part B*, 1988, 22B(2): 81-101.
- [6] GARTNER N H, STAMATIADIS C. Arterial-based control of traffic flow in urban grid networks[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2002, 35(5/6): 657-671.
- [7] COMER D E, STEVENS D L. *Internetworking with TCP/IP Volume II: ANSI C Version: Design, Implementation, and Internals*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2008: 231-232.
- [8] 郭海锋.局部拥挤条件下城市道路交通信号控制方法研究[D].长春:吉林大学,2008:31-32.
(GUO Haifeng. Study on the methods of urban traffic signal control for congested condition[D]. Changchun: Jilin University, 2008: 31-32.)

作者简介:

郭海锋 (1977—),男,博士,讲师,目前研究方向为交通信号控制、交通信息、交通建模仿真等, E-mail: guohf@zjut.edu.cn.