基于综合饱和度的单点信号控制方法

祁宏生[1,2], 王殿海[2], 陈 松[1]

(1. 吉林大学 交通学院, 130025 长春; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 310058 杭州, lordqi@yahoo.cn)

摘 要: 为了提升单点交通控制效果,首先考虑交叉口停车线前车辆排队情况,定义了综合饱和度概念,该指标既能反映车流对交叉口的时间资源利用程度,也能反映其路段空间资源利用程度. 基于综合饱和度概念,研究等综合饱和度的交叉口信号控制参数的优化方法. 针对优化方法的特性,利用迭代法进行求解. 结果表明,基于综合饱和度的单点信号控制方法与传统的等饱和度最小延误控制方法相比,在高峰期间可以显著降低路段排队长度.

关键词: 交通控制;饱和度;交通波;交叉口延误

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0134-04

Isolated intersection control based on integrated saturation degree

QI Hong-sheng[1,2], WANG Dian-hai[2], CHEN Song[1]

(1. Transportation College, Jilin University, 130025 Changchun, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 310058 Hangzhou, China, lordqi@yahoo.cn)

Abstract: In order to improve the intersection control efficiency, the concept of integrated saturation degree is established based on the derivation of traffic wave behind stop line. This index can reflect the temporal resource usage as well as spatial usage. Then delay minimization isolated intersection control method with equal integrated saturation degree constraint was established. The iterative method was used to solve this constraint due to the non linear feature. Numerical example was carried out to compare the control benefit. Results show the proposed method can efficiently decrease queue length during rush hours.

Key words: traffic control; saturation degree; traffic wave; intersection delay

交通控制是应对交通拥堵问题的重要方法之一,其本质是为相互冲突的交通流分配相应的通行权,从而实现冲突车流的分离,以达到提升交叉口运行效率的目的. 从控制范围上划分,可以分为单点控制、干线协调控制和区域信号控制;从控制方式上分,可以分为固定式信号控制、感应式信号控制和实时自适应控制[1]. 周期和绿信比是反应信号交叉口时间资源分配的关键参数. 从效果来看,目前的单点控制策略在常态交通下能取得良好的效果,但却无法适应过饱和情况. 究其原因,现有的控制方法并没有考虑到路段的排队情况,仅仅根据检测到的流量作为系统的输入,并根据现有算法对交叉口空间资源进行分配. 但交叉口各进口道长度并不一定相等,各方向的交通需求也并不一定平衡,在高峰和平峰的某些时段,使得交叉口的控制效果不明显,表现为某些进口道排队过长. 由于信息检测手段的进步(如视频检测[2]等),获取的实时交通信息已经不仅仅局限于流量,其他参数如排队长度等[3-5]也可以获得,因而,在这种形式下,如何充分利用获取的交通参数进行交通控制有着重要的意义. 本文从信号控制下交叉口进口道的车流运动规律出发,提出描述路段交通状态的综合饱和度指标,并以此为基础建立了等综合饱和度的交叉口控制模型. 通过比较可以看出,本文的交通控制模型同时考虑了低峰时的时间资源利用情况和高峰时的空间资源利用状况,因此能综合表达其交通状态.

收稿日期: 2010-08-23.
基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB2006CB705505).
作者简介: 祁宏生(1983—),男,博士;
王殿海(1962—),男,教授,博士生导师.

1　路段状态定义

1.1　到达车流运行过程

对于一股受到信号控制的交通流，假设其三参数关系符合格林希尔治关系，即流量-速度或者流量-密度曲线为二次抛物线，如图 1 所示.

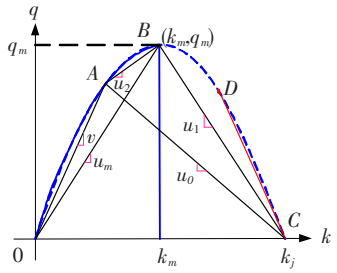

图 1　流量－密度关系

文献[6]给出了信号控制下的交通波变化情况，现简述如下. 在红灯启亮时，停车波产生并向上游传播，经过一段时间绿灯启亮产生启动波并经过 t' 启动波追上停车波，由于停车线处以饱和流量释放，当启动波追上停车波时会产生一个新的交通波，经过 t'' 该交通波到达停车线处（假设绿灯时长 $g \geqslant t' + t''$），此时路段恢复初始状态. 停车波、启动波、停车波与启动波相遇之后新产生的交通波（分别用各自的波速代表）的波速分别用 u_0、u_1 和 u_2 来表示. 根据图 1 可得

$$u_1 = \frac{q_m}{k_j - k_m};u_0 = \frac{q}{k_j - k};u_2 = \frac{q_m - q}{k_m - k}. \quad (1)$$

启动波 u_1 追上停车波 u_0 所用时间 t'、最大排队队尾位置 $l_{\max}$ 和波 u_2 传播至停车线的时间 t'' 可通过下式求得.

$$\begin{cases} u_0(r + t') = u_1 t' \Rightarrow t' = \dfrac{u_0 r}{u_1 - u_0}, \\ l_{\max} = u_1 t' = \dfrac{u_1 u_0 r}{u_1 - u_0} = \dfrac{u_1 u_0 (C - g)}{u_1 - u_0}, \\ t'' = \dfrac{L_{\max}}{u_2}. \end{cases} \quad (2)$$

当绿灯时长 $g < t' + t''$ 时，每一个周期（假设每一个周期从红灯启亮开始）的停车波的传播轨迹和上一个周期不一样，并且每个周期的排队最远点都比上一个周期长. 在第 2 个周期的停车波出现时其传播的速度等于 u_1，因而，随着时间推移，排队不断变长. 当 $g < t' + t''$ 时，路段处于不稳定状态. 每个周期都会积存一定上一个周期的车辆，进而排队长度会越来越长.

1.2　路段状态定义

交叉口的控制实际上是针对其进口道车流的控制，因而，交叉口的状态分析应和其各个进口道状态分析直接相关. 在 HCM[7] 中，衡量进口道交叉口服务水平（Level of service，LOS）的指标为平均延误. 交叉口的平均延误是各进口道延误的流量加权和. 在进行控制参数优化时，一般以延误最小为目标，同时假设各相位等饱和度[8] 或者不等饱和度[9]，饱和度定义为

$$x = \frac{q}{CAP} = \frac{qC}{Sg}. \quad (3)$$

从式（3）可知，给定流量下（设饱和流率一定）饱和度只和绿信比有关，但同样的绿信比不同的信号周期时长会导致不同的排队长度，由式（2）可知，排队长度和红灯时长成正比，即式（3）的饱和度概念并没有考虑到道路的空间资源利用情况，而当高峰时段恰恰存在着过长的排队. 由于流量为单位时间内到达的车辆数而通行能力为理想条件下单位时间内通过的最大车辆数，因此，饱和度 x 可看作是进口的“时间饱和度”，即进口的时间资源利用效率，对于第 i 相位，用 p_{ti} 表示，即

$$p_{ti} = \frac{q_i C}{Sg_i}. \quad (4)$$

定义“空间饱和度”为最大排队长度和路段长度的比例，用 p_{si} 表示，即

$$p_{si} = \frac{l_{i\max}}{L}. \quad (5)$$

从定义可知，$p_{si} \in [0,1]$，当 $p_{si} = 1$ 时路段已经被排队车辆占满，如果上游来车则可能堵塞上游交叉口. 定义路段综合饱和度 p_i 为

$$p_i = \alpha p_{si} + (1 - \alpha) p_{ti} = \alpha \frac{l_{i\max}}{L} + (1 - \alpha) \frac{q_i C}{Sg_i}. \quad (6)$$

α 为权值，本文希望在低峰时段，综合饱和度能主要体现时间利用效率，而在高峰时段（表现为过长的排队）综合饱和度又能体现空间利用效率，因此，取 $\alpha = l_{i\max}/L$，则

$$p_i = \left(\frac{l_{i\max}}{L}\right)^2 + \left(1 - \frac{l_{i\max}}{L}\right)\frac{q_i C}{Sg_i} = \frac{[u_1 u_0 (C - g_i)]^2}{L^2 (u_1 - u_0)^2} + \left(1 - \frac{u_1 u_0 (C - g_i)}{L(u_1 - u_0)}\right)\frac{q_i C}{Sg_i}. \quad (7)$$

定义交叉口的整体饱和度为

$$P = \sum_i p_i. \quad (8)$$

假设某路段长 400 m，进口道的信号设置为 $g = 40$ s，$C = 100$ s，则几个饱和度随流量变化情况如图 2 所示，由图可见在低峰时段综合饱和度

近似等于时间饱和度,而在高峰时段又近似等于空间饱和度.

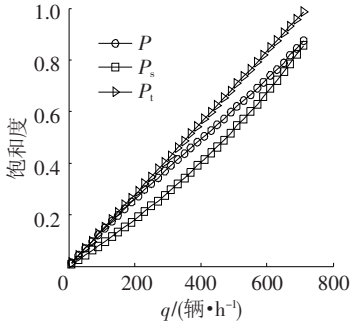

图 2 路段各个饱和度指标与车流量的关系

2 控制参数优化方法

整个交叉口的平均延误定义为

$$D = \sum_i d_i q_i. \tag{9}$$

同时,应以各个相位的综合饱和度相等作为一个约束,相应的信号控制策略可以表达为

$$\min_C \bar{d} = \sum_i q_i d_i / \sum_i q_i = \frac{\sum_i q_i \left[\frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-y_i)} + \frac{x_i^2}{2q(1-x_i)} \right]}{\sum_i q_i}. \tag{10}$$

约束条件为

$$\frac{p_i}{P} = \frac{g_i}{C}, \tag{11}$$

$$g_{\min} < g_i < g_{\max}, \tag{12}$$

$$C_{\min} < C < C_{\max}. \tag{13}$$

其中,式(11)为等综合饱和度约束,式(12)为最大绿灯、最小绿灯约束,式(13)为最大周期、最小周期约束. 将式(11)展开得

$$\frac{p_i}{P} = \frac{g_i}{C} \Rightarrow \frac{\frac{[u_1 u_0 (C-g_i)]^2}{L^2 (u_1-u_0)^2} + \left(1 - \frac{u_1 u_0 (C-g_i)}{L(u_1-u_0)}\right) \frac{q_i C}{S g_i}}{\sum_i \frac{[u_1 u_0 (C-g_i)]^2}{L^2 (u_1-u_0)^2} + \left(1 - \frac{u_1 u_0 (C-g_i)}{L(u_1-u_0)}\right) \frac{q_i C}{S g_i}} = \frac{g_i}{C}. \tag{14}$$

利用迭代法求解式(14),可得出相位的绿灯时间,然后计算出目标函数值即延误,对周期从小到大进行枚举,最后选择最小者作为优化结果,设某 4 相位交叉口的到达流量分别为[60 35 20 5],单位:辆/h,按照枚举法获得的延误-周期关系如图 3 所示,流量系数为在基准流量基础上乘以相应的系数得到实际的输入流量.

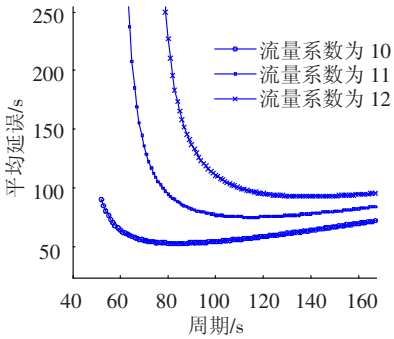

图 3 延误与周期时长关系

3 数值算例

等饱和度最小延误控制方法可表示为

$$\min_C \bar{d} = \sum_i q_i d_i / \sum_i q_i = \frac{\sum_i q_i \left[\frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-y_i)} + \frac{x_i^2}{2q(1-x_i)} \right]}{\sum_i q_i}. \tag{15}$$

设某交叉口为普通 4 相位. 交叉口有 4 个进口,每个进口道有 3 条车道并且有左转专用车道,交叉口结构见图 4,相位相序设计如图 5,每个车道的饱和流率为1 800 辆/h;每个信号阶段损失时间为 3 s,则周期的总损失时间 l = 12 s;车流均匀到达. 最大和最小信号周期分别为 50、180 s,绿灯时间的上下限分别为 10、100 s.

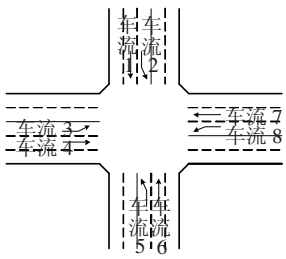

图 4 交叉口结构

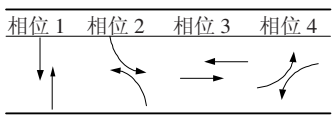

图 5 信号交叉口相位相序设计

假设信号交叉口进口路段长度全都相等,长度均为 400 m,各个相位流量也完全相等. 在流量变化条件下,对比分析本文提出的单点控制方法和等饱和度最小延误方法的交叉口运行效率参数. 图 6 给出了 4 个相位的关键流量相同、路段长度都为 400 m 情况下的控制效果比较,可以看出 2 种情况下的控制效果相差不大.

为了比较不同流量情况下的控制效益,设定基准流量为[60 35 20 5],单位:辆/h,交叉口的实际输入流量在基准流量基础上乘以大于 1 的系数得到.

图 7 给出了交叉口负荷(用交叉口相位饱和度的最大值代表)和控制效益的关系图. 在低流量情况下,2 种控制方法的控制效果相差不大,但是当交叉口饱和度增大时,本文提出的方法能够显著降低交叉口的排队长度,同时从图 8 中可以看出,延误也有一定程度的降低,交叉口饱和度接近 1 时,等饱和度最小延误控制方法很快就达到了最大周期,无法进行周期的优化.

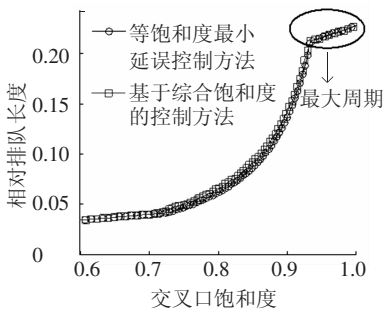

图 6　相对排队长度和饱和度关系

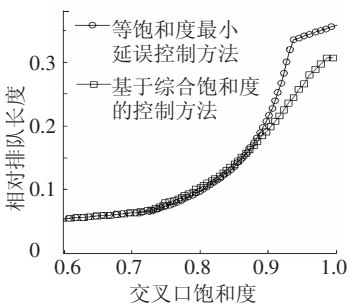

图 7　流量不平衡下的相对排队长度

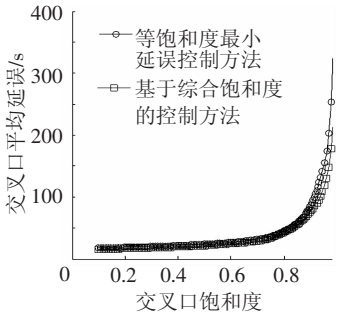

图 8　流量不平衡下的车均延误

当交叉口各路段长度不相等时,在流量变化条件下对比分析这 2 种单点控制方法的交叉口运行效率参数. 假设 L = [400 300 350 250],与路段长度都为 400 m 情况下进行比较. 图 9 和图 10 给出了比较结果,可见控制效果呈现低饱和度时 2 种方法接近、高饱和度时相差较大. 在低饱和度时,基于等综合饱和度的控制方法的相对排队长度比等饱和度最小延误控制大,但是差别很小.

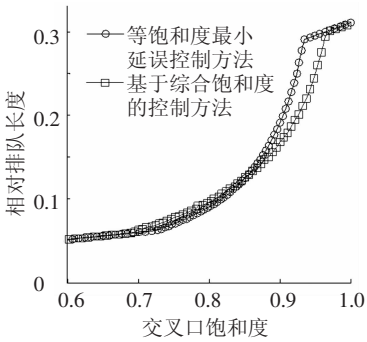

图 9　路段长度不同下的相对排队长度

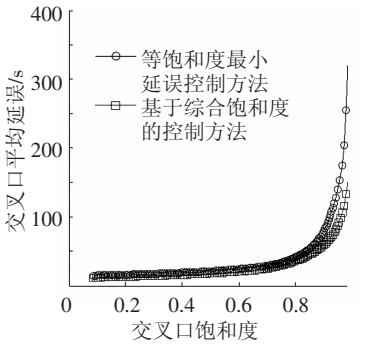

图 10　路段长度不同下的车均延误

4　结　论

1)基于交通波方法,建立了路段空间饱和度指标表达路段空间资源的利用程度,并构建了综合饱和度概念,该指标既能反应相位时间资源利用情况,也能反应空间资源利用情况.

2)基于综合饱和度的单点信号控制方法能恰当地分配交叉口时间和空间资源. 而交通需求大于交通供给时,路段的交通排队情况呈现复杂的特征,在多车道路段上表现为多股车队的相互作用,这种情况下的控制是下一步的研究工作.

参考文献:

[1] 栗红强，城市交通控制信号配时参数优化方法研究[D]. 长春：吉林大学,2004：136.

[2] HOOSE N KEEN K, Direct queue detection using computer image processing[C]//Proceedings of 22nd International Symposium on Automotive Technology and Automation. Florence：Italy, 1990：245－252.

[3] LIU H X, WU X, MA W, *et al.* Real-time queue length estimation for congested signalized intersections[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies, 2009, 17(4)：412－427.

[4] SHEU J B. A stochastic modeling approach to dynamic prediction of section-wide inter-lane and intra-lane traffic variables using point detector data[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice, 1999, 33(2)：79－100.

[5] VIGOS G, PAPAGEORGIOU M, WANG Y. Real-time estimation of vehicle-count within signalized links[J]. Transportation Research Part C：Emerging Techhnologies, 2008,16(1)：18－35.

[6] 王殿海，祁宏生. 信号控制下动态行程时间[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(3)：655－660.

[7] Transportation Research Board. Highway capacity manual (2000)[M]. Washington：TRB,2000.

[8] 全永燊. 城市交通控制[M]. 北京：人民交通出版社, 1989.

[9] 裴玉龙,蒋贤才. 饱和交通状态下的绿信比优化及其应用研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005,37(11)：1549－1552.

(**编辑**　魏希柱)