

文章编号:1007-6735(2013)06-0567-05

基于博弈论的信号配时方法研究

杨晓芳¹, 张 盛¹, 付 强²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 针对信号控制的交叉口存在高饱和度的相位,且相位间饱和度不同的情况,提出了一种基于博弈论的信号配时方法,实时缓解了高饱和度进口车道的拥堵,降低了进口道延误.对于不同饱和度下的车道,通过解析流量与信号配时的博弈关系,建立了基于博弈论的信号配时模型,设定了新配时方案的迭代步骤以及相关参数的标定.通过算例分析现状信号配时的效果以及现状车流的需求,饱和度较低的相位博弈分配到的有效绿灯时间降低,进口车道延误上升7.23%;而饱和度较高的相位博弈分配到的有效绿灯时间增加,进口车道延误降低了5.91%;该进口道的总延误降低1.03%,优于原来的信号配时方案.

关键词: 信号配时; 配时方法; 博弈论; 信号交叉口

中图分类号: U 491 **文献标志码:** A

Signal Timing Method Based on Game Theory

YANG Xiao-fang¹, ZHANG Sheng¹, FU Qiang²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the situation that at the intersection of signal control exist high saturation phase as well as different saturation between phases, a kind of signal timing method was put forward based on the game theory to alleviate the traffic congestion of high saturation approaches and to reduce the delay. According to the different saturation of lanes, based on the analysis of game relationship between flow and signal timing, a signal timing model was built in the light of the game theory. Iteration steps of a new timing plan were set up and related parameters were calibrated. The effect of the presented signal timing and the present situation of traffic demand were analysed with practical examples. The results show that the assigned effective green time of low saturation phase reduces, the approach delay rises by 7.23%; the assigned effective green time of high saturation phase increases, the approach delay reduces by 5.91%; and the total delay of approaches reduces by 1.03%, being better than the original signal timing plan.

Key words: signal timing; timing method; game theory; signal intersection

收稿日期: 2013-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008196, 51308409); 上海一流学科(系统学科)建设资助项目(XTKX2012)

第一作者: 杨晓芳(1975-), 女, 副教授. 研究方向: 智能交通、交通管理与控制、交通流理论等.

E-mail: herryfuyang@126.com

随着城市的发展和机动车保有量的增长,交通需求急剧增加,而作为交通节点的交叉口,尤其是信号交叉口的配时是否合理,直接影响交叉口以及周边道路的通行效率^[1-2].交通控制和管理的有效程度将严重影响城市的交通通行质量^[3].

目前,国内外典型的交叉口定时信号配时方法^[4]有英国的 TRRL 法、澳大利亚的 ARRB 法和美国的 HCM 法等. TRRL 法是以车辆延误时间最小为目标,以 webster 对交叉口车辆延误的估计为基础的一种基于稳态的定时信号控制方法.而这种延误计算是根据统计平衡态理论得出的,决定了其只能在交叉口饱和度较小的情况下才有较好的效果,有一定的局限性. ARRB 法是 Akelik 考虑了交叉口超饱和的情况,对 webster 延误模型修正和拓展得来的,只适用于高饱和度的延误及信号配时问题. HCM 法适用于交通流均匀到达的情况,不适合于自适应的交通信号控制系统.基于优化的自适应控制下的配时方法^[5],主要通过对延误和排队等性能指标进行优化计算,此类自适应控制基于多次短期优化而来,并不是全局最优的配时方案.

针对各信号相位下不同的车流饱和度,需寻找一种不同饱和度下车辆能普遍接受、基于道路上的通行需求、对当前信号配时方案进行调整的自适应控制方法.本文借鉴博弈论^[6]的方法,根据实时反映的进口车道饱和度现状,以及交叉口各进口车道检测到的实际车流量,与当前信号配时方案中的各信号相位时长进行博弈,以自适应信号控制策略为基础,实时调整高饱和度的信号相位下的有效绿灯时间,在下一信号配时方案中,缓解该信号相位下的拥堵.

1 信号配时博弈的基本思想

在交叉口的信号配时问题中,将信号相位和车道流量比拟为博弈论中的对阵双方^[7].在博弈的局中双方都是积极的,且在博弈过程中双方预先都不知道对方所要选择的策略^[8].在信号配时中,表现为预先不知道新周期车流量为多少,以及原信号配时能否满足新周期下的车流量通行,即不存在利用对方的博弈失误来扩大自身利益的可能性,并在此基础上寻找双方可接受的合理博弈方案^[9-10].

首先,信号配时中的两个方向的车流都是驾驶员在当下的交通环境中,根据自己的经验综合性地选择通行路径,因此可以把所分配的信号时长都看作是符合驾驶员需求的;其次,在博弈配时中,参与

双方都有若干供自己选择的可行方案,称为策略,即不同的信号相位分配的时间和左转、直行及右转等不同车道的车流量;最后,参与双方会各自选定一个策略与对方博弈,这样就构成了一个局势,局势一定博弈的结果也随之确定,所以博弈的结果是局势的函数,描述这个结果就是赢得函数或支付函数.在这里当两股车流在交叉口交汇时,博弈的结果就是不同相位的信号时长的分配比例,应该根据各个局势产生的交通流量来决定.

2 信号配时的博弈分配

2.1 基于博弈论的信号配时

已知一个平面交叉路口信号周期一定,有东西和南北两个方向的车流.东西方向和南北方向的信号总时长分别为 T_{EW} 和 T_{SN} ,构成了信号时长的策略集 S_1 ;总流量分别为 Q_{EW} 和 Q_{SN} ,构成了车流量的策略集 S_2 ,则此时可构成该问题的赢得(损失)矩阵为

$$\begin{matrix} & Q_{EW} & Q_{SN} \\ \begin{matrix} T_{EW} \\ T_{SN} \end{matrix} & \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

式中, λ 为流量值的多少; λ_{11} 为东西方向信号总时长和东西方向车流量博弈的结果值; λ_{12} 为东西方向信号总时长和南北方向车流量博弈的结果值; λ_{21} 和 λ_{22} 分别指南北方向信号总时长和东西以及南北车流量博弈的结果值.

一般形式的多相位交叉口可先基于各行驶方向下进口道的整体流量进行博弈分配时间,再根据各方向进口道的不同信号相位下的实际流量,进行二次博弈分配时间,得到新的配时方案,来调整车流饱和度和.

在以上平面交叉路口的基础上,假设东西方向有 N 个信号相位,此方向有 M 个车道,设东西方向上的不同相位分别为 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$,构成了东西方向上相位的策略集 S_1 ;而东西方向上每个车道分别为 $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$,构成了东西方向上车道的策略集 S_2 ,则此时可构成该问题的赢得(损失)矩阵为

$$\begin{matrix} & \beta_1 & \dots & \beta_m \\ \begin{matrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda_{n1} & \dots & \lambda_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

式中, λ_{ij} 为该方向各相位 α 和车道 β 在交通流量上

博弈的结果值,为第 i 个相位流量下车道 j 的交通流量.

由博弈论可知,在上述矩阵中若存在

$$\max_i \min_j \lambda_{ij} = \min_j \max_i \lambda_{ij} = \lambda_{uv} \quad (3)$$

则说明上述博弈问题存在纯策略解,此时 (α_u, β_v) 为配时的最优局势,那么保持原来的信号配时方案.如果此式不成立,即找不到纯策略解时,则该问题必定存在混合策略解.混合策略解在信号配时问题中,指每个方向中每个信号相位在其方向时长内博弈分配到的比例.此时,该问题可以通过 $2 \times n$ 和 $m \times 2$ 图解法来获取局中因素 α 和局中因素 β 的最优混合策略.若有

$$\begin{aligned} \max_{i \in S_1^*} \min_{j \in S_2^*} E(X, Y) = \\ \min_{j \in S_2^*} \max_{i \in S_1^*} E(X, Y) = E(X^*, Y^*) \quad (4) \end{aligned}$$

则配时的混合局势 $E(X^*, Y^*)$ 就是配时方案在混合策略意义下的解,配时比例 X^* 和 Y^* 分别为局中因素 α 和局中因素 β 的最优配时混合策略.配时的混合局势,是指在博弈分配后的新配时方案中,一个能令每个信号相位的驾驶员都能普遍接受的一个通行状态;而配时得到的最优混合策略,是指每个信号相位在这个新配时方案下博弈分配到的通行时间比例.

2.2 约束条件

第一个约束条件就是问题所构成的赢得(损失)矩阵不满足优越原理.如果满足优越原理,在求解时,则可将上述 α_k 从策略集中删去,或将 β_k 从策略集中删去,即相应把矩阵中第 k 行或第 k 列元素划去,缩小矩阵的规模,简化计算,但这样就无法通过混合策略的方法进行概率计算和博弈分配.

第二个约束条件就是在赢得(损失)矩阵中,元素 λ_{kk} 比较特殊,在整体分配中,表示第 k 个方向在一个周期内通过的最小的流量;而在每个方向的信号相位中,表示在第 k 个方向中,放行车道上通过的最小流量.以上这些流量都需根据每个相位的最小绿灯时长给出一个定值.此定值设为 Q_j^k , Q_j^k 理论的取值范围为 $[0, S_\lambda]$, 其中 S 为饱和流量, λ 为最小绿信比.

第三个约束条件就是通过对策论所进行的博弈分配,这里取 β 的分配概率 P_{Y^*} 为最终的分配概率.因为, α 的分配概率 P_{X^*} 表示的是该信号相位在最坏的情况下,即配时最少,的情况下,所能得到最好结果策略的概率;而 β 的分配概率 P_{Y^*} 表示的是该方向或车道的流量在最坏的情况下,即流量损失最大

的情况下,所能得到最好结果的策略概率.信号时长的配时是基于流量而进行概率分配的,所以这里采用 β 的分配概率 P_{Y^*} .

2.3 黄灯时间和实际绿灯时间

黄灯是信号控制中绿灯向红灯的过渡信号,黄灯间隙所持续的时间为 T_Y .现行的交通法规对黄灯的规定被建议改为:“黄灯亮时,接近停车线的车辆,可以安全停车的应该停车,无法安全停车的应该继续通行,但须在黄灯时间内通过停止线.”本文通过博弈算法所获得的信号时长的分配是按比例分配的,而其中各信号相位间并没有考虑到黄灯时间的重要作用,只给出了各信号相位分配的总时间比例.

根据最小黄灯时间按限速取值的概念,限速小于 40 km/h 时,取 3 s;限速在 40~70 km/h 时,取 4 s.用 T_Y 表示对应的黄灯时长,用 T_G^i 表示第 i 个信号相位对应的实际绿灯时长,并把 T_Y 按各信号相位通过博弈分配好的比例,分配到各个信号相位中去.以一个十字交叉口为例,东西和南北方向各有两个信号相位,那么

$$\begin{aligned} T_G^i &= P_i (T_{EW} - T_Y) - P_1^* T_Y = \\ &P_i T_{EW} - T_Y (P_i + P_1^*) \quad (5) \end{aligned}$$

$$T_G^i = P_i (T_{SN} - T_Y) - P_2^* T_Y \quad (6)$$

式中, P_i 为第 i 个信号相位时长通过博弈所分配到的概率; P_1^* 和 P_2^* 为东西和南北方向信号时长通过博弈所分配到的概率.如果此相位属于东西方向,有效绿灯时间为式(5);如果此相位属于南北方向,则为式(6).此种信号相位配时情况如图1所示.

其中, T_R 为红灯时间; T_G^i 为第 i 个信号相位的有效绿灯时间,其余为博弈概率分配的黄灯时间.

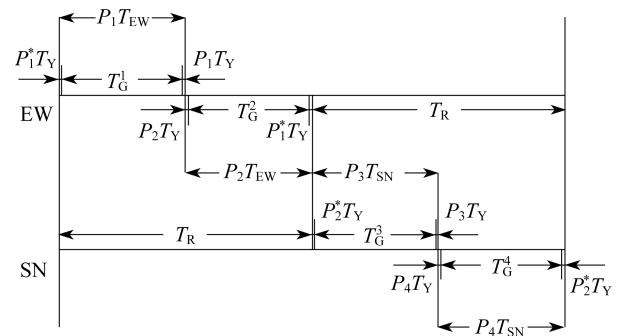


图1 博弈配时信号相位图

Fig.1 Game timing signal phase

2.4 博弈配时的具体步骤

Step 1 给出交叉口某个方向上每个相位的最小绿灯时长 $T_{\min}^i (i = 1, 2, \dots, n)$, 对应的是每个相位下车道上的最小交通流量 $Q_j^k (j = 1, 2, \dots, m)$,

$k \in i$), 其中 i 代表第 i 个相位, j 代表该相位下不同的车道.

Step 2 计算此方向上不同相位下最大可加载时长 $T_{\max}^i = T_{EW} - T_{\min}^i$, 其中 T_{EW} 代表东西方向的相位时长; 分别加载到此方向上除此相位外其它相位所在车道上, 对应可产生的是较大实际流量 Q_{kj}^0 ($j = 1, 2, \dots, m, k \in i$), 其中 0 为迭代次数.

Step 3 通过 Step 1~2 得到对策矩阵 G , 利用 $2 \times n$ 和 $m \times 2$ 图解法得出最优混合策略 X^* 和 Y^* , 即可得到该计算方向相位配时的分配概率 P_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Step 4 分别比较 $P_i T_{EW}$ 与 $T_{\min}^i$, 如果方向上任意相位的 $P_i T_{EW} \geq T_{\min}^i$, 则取 $P_i T_{EW}$ 为新的相位配时方案; 反之, 则保持原来的信号配时方案.

Step 5 新的配时方案下, 会产生新的较大实际流量 Q_{kj}^k , 从 Step 2 重新计算迭代.

3 算例分析

调查了沪太路和广中西路的平面交叉口, 共有 4 个信号相位, 广中西路所在的東西方向有 2 个信号相位, 分别为直行相位和左转相位. 此方向有 3 条车道, 2 条直行车道和 1 条左转车道. 直行相位为低饱和度相位, 左转相位为高饱和度相位. 现状配时方案中, 直行和左转的有效绿灯时间分别为 35 s 和 20 s. 直行车道的流量分别为 35 pcu 和 25 pcu, 左转车道的流量为 20 pcu. 另外, $T_{EW} = 63$ s, $T_{\min}^1 = 27$ s, $T_{\min}^2 = 17$ s, 东西方向上的不同相位分别为 (α_1, α_2) , 构成了东西方向上相位的策略集 S_1 ; 而东西方向上各个车道分别为 $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$, 构成了东西方向上车道的策略集 S_2 , 则此时可构成该问题的赢得(损失)矩阵为

$$\begin{array}{ccc} & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \alpha_1 & (35 & 25 & 10) \\ \alpha_2 & (10 & 15 & 20) \end{array} \quad (7)$$

其中, $Q_{13} = 10$, 是左转相位的最小绿灯时间下对应的最小交通流量; $Q_{21} = 10$, $Q_{22} = 15$ 分别为直行相位的最小绿灯时间下行驶的两条车道上的最小交通流量; 这 3 个值为固定值. 设各信号相位 α 的混合策略为 $X = (x_1, x_2)^T = (x, 1-x)^T$, x 为信号相位的配时比例, 则 α 期望的赢得为

$$\max_{0 \leq x \leq 1} \min \left[35x + 10(1-x), 25x + 15(1-x), 10 + 20(1-x) \right] = \max_{0 \leq x \leq 1} f(x)$$

上述问题就是一个 $2 \times n$ 型, 可建立一个 $\alpha x v$ 平面直角坐标系, 取 $x \in [0, 1]$, 画直线如图 2 所示.

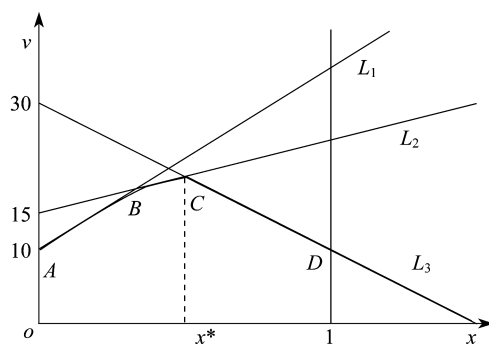


图 2 $2 \times n$ 型坐标系图解

Fig.2 $2 \times n$ coordinate system

其中, $L_1 = 25x + 10$, $L_2 = 10x + 15$, $L_3 = 30 - 20x$.

于是, $v = f(x)$ 的图形就是折线 ABCD, 因为点 C 是折线的最高点, 所以 $v = f(x^*)$. 注意到点 C 是 L_2 和 L_3 的交点, 求解可得 $x^* = 0.5$, $v = 20$. 则局中人 α 的最优混合策略 $X^* = (1/2, 1/2)^T$.

设局中人 β 的最优混合策略 $Y^* = (y_1^*, y_2^*, y_3^*)^T$, 由最优混合策略的定理可知

$$\begin{cases} 35y_1^* + 25y_2^* + 10y_3^* = 20 \\ 10y_1^* + 15y_2^* + 20y_3^* = 20 \end{cases} \quad (8)$$

由于点 C 只与 L_2, L_3 有关且此处 L_1 高于点 C, 即只与 β_2, β_3 有关且 β_1 不必考虑, 所以 $y_1^* = 0$, 代入上式, 可解得 $y_2^* = 4/7$, $y_3^* = 3/7$. 于是局中人 β 的最优混合策略 $Y^* = (0, 4/7, 3/7)^T$, 即可得 $P_1 = 4/7$, $P_2 = 3/7$.

这里可计算出 $P_1 T_{EW} = 36$ s, $P_2 T_{EW} = 27$ s, $P_i T_{EW}$ 均大于 $T_{\min}^i$, 所以采取新的配时方案 (32, 23) 为东西方向两个相位的有效绿灯通行时间.

根据博弈配时所得数据, 与原信号相位配时相比, 基于信号控制的稳态和定数理论, 对其不同信号相位在各自的通行状态下产生的车辆平均延误进行了计算, 如图 3 所示.

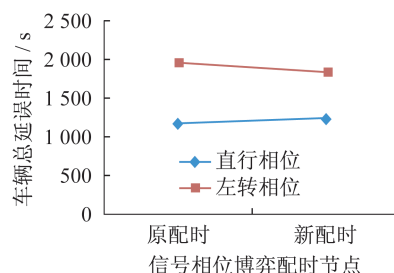


图 3 配时前后的车辆平均延误时间

Fig.3 Average vehicle delay time before and after the timing

左转的信号相位的车均延误大于直行的信号相位,交通状态处于饱和,在保障直行相位稳态通行的前提下,通过信号配时的博弈分配,直行非饱和相位的车辆总延误提高了 7.23%,为 83.2 s;而左转饱和相位的车均延误降低了 5.91%,为 114.9 s,该进口道的总延误降低 1.03%。这样新的信号配时方案有效缓解了该交叉口饱和度较大的进口车道的车辆通行压力,以控制进口道的车辆总延误为前提,降低饱和度大的进口车道的车辆总延误为目标。

4 结束语

本文主要对信号交叉口不同饱和度下的信号配时问题进行了研究,基于博弈论的配时方法,优化了配时方案,使进口道的车辆总延误降低。与经典的交叉口配时方法相比,各经典的配时法之间相对独立和理想化,适用饱和度范围也有限,而博弈配时法适用的饱和度范围更宽广,能解决的问题更实际和复杂。

但在实际应用中,该博弈配时法还存在一定的局限性。基于当前检测流量,博弈配时具有一定的滞后性。当遇到过饱和,甚至饱和车流存在溢流等不同交通情况,配时模型需要进一步修正,引入的修正项或修正参数还需要进一步研究。

在后续研究中,将会继续分析博弈配时法模型的适用范围,例如基于不同类型交叉口的适应性研究;验证博弈配时法模型得到的概率的有效性;分析交叉口的饱和流量、进口道的车辆到达率对配时结

果的影响等。

参考文献:

- [1] 徐建闽. 交通管理与控制[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [2] Shefli Y. Urban transportation networks[M]. London: Prentice-hall,1984.
- [3] 高自友,龙建成,李新刚. 城市交通拥堵传播规律与消散控制策略研究[J]. 上海理工大学学报,2011,33(6):701-707.
- [4] 信号周期时长优化方法研究[J]. 交通信息与安全,2009,27(3):35-38.
- [5] 自适应信号控制下交叉口延误计算方法[J]. 公路交通科技,2005,2(7):110-114.
- [6] 马良. 基础运筹学教程[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [7] Kostić-Ljubisavljević A, Radonjić V, Mladenović S, et al. An application of game theory for the selection of traffic routing method in interconnected NGN[J]. Digital Information Processing and Communications, 2011(189):107-122.
- [8] 崔洪军,陆建,王伟. 基于对策理论的交通流分配新方法[J]. 公路交通科技,2004,21(7):108-110.
- [9] 何胜学,范炳全. 基于有效路径的交通流博弈分配算法[J]. 交通运输系统工程与信息,2007,7(1):115-119.
- [10] 肖海燕,刘炳全. 一种基于最短路博弈分配的交通配流新算法[J]. 华南师范大学学报,2009(1):34-38.

(编辑:丁红艺)