

“大路口”交通信号的优化控制

朱文兴, 贾磊, 杨立才

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 针对城市交通网络里传统的交通信号最小控制单元模型的不足, 提出了“大路口”的概念, 给出了“大路口”的几何模型和相位划分, 在此基础上, 建立了以整个“大路口”车辆平均延误最小为目标的优化模型, 得到了目标函数及其约束条件, 采取遗传算法进行优化, 获得了“大路口”各个相位的绿信比. 计算机仿真表明, 引入“大路口”比不引入“大路口”情况下支路方向交通流量基本维持不变, 而主干路方向的交通流量有明显改善, 且总的车辆平均延误明显减少.

关键词: “大路口”; 交通流; 车辆平均延误; 模糊推理; 遗传算法

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A

Optimal control of traffic signal in “big unit”

ZHU Wen-xing, JIA Lei, YANG Li-cai

(School of Control Science and Engineering Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of the traditional least traffic signal control unit model in the urban traffic network, the definition of “big unit” is presented and its geometry model, as well as its phase partition, is also given in this paper. Based on the optimal model of the “big unit” for minimizing the vehicles average delay, the objective function and its constraints are obtained. Then the splits of all phases of “big unit” can be achieved through optimizing the objective function by using genetic algorithm (GA). The computer simulation shows that after introducing the “big unit”, the traffic flows in main road direction are improved obviously, while the traffic flows in the secondary road direction change to only a small degree, and the total vehicles average delay decreases more in comparison with that without introducing “big unit”.

Key words: “big unit”; traffic flows; vehicles average delay; fuzzy reference; genetic algorithm (GA)

0 引言 (Introduction)

城市交通网络里的干线或区域管理(线控或者面控)是通过协调和控制交通网络里的最小控制单元, 来使得总车流平稳顺畅. 交通网络里最小单元的确定既要符合微观交通的实际车流状况, 更要服从和服务于整个宏观交通网络. 传统情况下, 大多是以单交叉路口或两个交叉路口作为控制单元, 用模糊控制算法实时控制信号灯^[1-2]. 两相邻交叉路口的交通模型解决了单交叉路口模型的不足, 但它只考虑了两个相邻路口的相关性, 对 3 个路口甚至更多路口的相关性没有考虑, 如果 3 个路口具有相关性, 则上述的最小单元控制算法无法实现对微观交通流的有效控制.

针对上述情况, 本文提出了“大路口”的概念, 建立了“大路口”的模型, 将具有相关性的 3 个交叉路口作为城市交通网络里最小单元来实现微观控制.

1 交通流模型 (Model of traffic flows)

1.1 “大路口”的定义 (Definition of “big unit”)

“大路口”是指将城市主干路中相邻的距离比较近(一般是不超过 800m)且具有相关性^[2]的几个交叉路口作为主干路交通流控制的一个节点单元(本文以 3 个交叉口为例讨论), 这个节点单元就称之为“大路口”. 规定: “大路口”的内部距离即最左边的交叉路口到最右边交叉路口的距离不超过 1600m.

1.2 “大路口”的几何模型 (Geometry model of “big unit”)

“大路口”的交通流模型如图 1 所示, 它包含 3 个单交叉路口, 分别用 C_1, C_2, C_3 来表示. “大路口”内每个单交叉路口有东、南、西、北 4 个方向, 每个方向均存在右行、直行、左行 3 条车道车流, 其中, 东西方向为主干路方向.

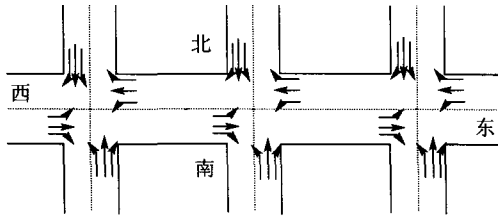


图1 “大路口”的几何模型

Fig. 1 Geometry model of “big unit”

1.3 “大路口”的相位划分 (Phase partition of “big unit”)

根据定义“大路口”的相位划分如图2所示. 图中给出5个相位, 第1, 3, 4, 5相位的划分与单交叉路口的四相位是完全一样的, 分别表示主干路的東西直行相和東西左行相, 支路方向的南北直行相和南北左行相. 第2相位是第①号路口由東向西直行和由東向南左行及在第③号路口由西向東直行和由西向北左行这段时间, 而在第②号路口交通流不受此影响. 第②交叉路口是一个普通的单交叉路口, 它有4个相位分别是東西直行相, 東西左转相, 南北直行相和南北左行相.

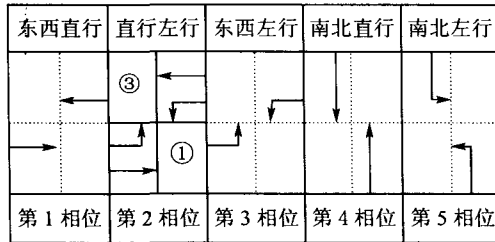


图2 “大路口”五相位示意图

Fig. 2 Five-phase graph of “big unit”

2 指标计算 (Computing the index)

在“大路口”的任意时刻, 有36个车辆等待序列, 用 $D(t)$ 表示第 t 周期内“大路口”所有车辆的总延误, $d_{mjk}(t)$ 表示第 t 周期内第 m 相位通行期间第 j 方向、第 k 交叉口、第 l 车道车辆的总延误, 其中 $m = 1, 2, 3, 4, 5$ 表示5个相位; $j = 1, 2, 3, 4$ 表示“大路口”东、南、西、北4个方向; $k = 1, 2, 3$ 表示“大路口”内的3个交叉路口; $l = 1, 2, 3$ 表示右行、直行、左行3方向的车道, 分别表示为各个相位时间的函数如下(仅表示 $m = 1$ 的情况, 其余类似):

$$d_{1jkl}(t) = Q_{1jkl}^w \left\{ Z \left[(Q_{5jkl}(t-1) - L_{1jkl}(t) + \frac{1}{2} A_{1jkl}(t)) t_1 + \frac{L_{1jkl}(t)(L_{1jkl}(t) - 1)}{2} \frac{1}{s} \right] + (1-z) \left[\max(0, \sum_{y=1}^l (Q_{5jkl}(t-1) + y - 1) \frac{1}{s} - \right. \right.$$

$$\left. \left(y - \frac{1}{2} \right) \frac{t_1}{A_{1jkl}(t)} \right) + \sum_{y=l+1}^{A_{1jkl}(t)} \frac{1}{2} (A_{1jkl}(t) - l) \cdot \left(1 - \frac{l}{A_{1jkl}(t)} \right) t_1 + d_{go}(t) \} + (1 - Q_{1jkl}^w) * (Q_{5jkl}(t-1) + \frac{1}{2} A_{1jkl}(t)) t_1. \quad (1)$$

其中: Q_{1jkl}^w 表示在第1相位时间里第 j 方向、第 k 交叉口、第 l 车道有无通行权, 有通行权为1, 无通行权为0; $q_{5jkl}(t-1)$ 表示第 t 周期初各方向各交叉口各车道排队车辆数; $A_{1jkl}(t)$, $L_{1jkl}(t)$ 分别表示在第1相位时间内第 j 方向、第 k 交叉口、第 l 车道到达和离开的车辆数;

$$l = L_{1jkl}(t) - Q_{5jkl}(t-1) \text{ 且 } Z = \begin{cases} 1, & \text{当 } l \geq 0 \text{ 时,} \\ 0, & \text{当 } l < 0 \text{ 时.} \end{cases}$$

$d_{go}(t)$ 表示在第1相位时间里, 离开“大路口”所有车辆的时间延误; s, y 是中间参数.

第 t 周期内, “大路口”所有车道的车辆总延误为

$$D(t) = \sum_{m=1}^5 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 d_{mjkl}(t). \quad (2)$$

“大路口”一个周期内的车辆平均延误为

$$d(t) = \frac{D(t)}{\sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 (q_{5jkl}(t-1) + A_{jkl}(t))}. \quad (3)$$

其中: $q_{5jkl}(t-1)$ 表示第 t 周期初各方向各交叉口各车道排队车辆数; $A_{jkl}(t)$ 表示在整个周期 t 内第 j 方向、第 k 交叉口、第 l 车道到达的车辆数.

根据前面的计算可以得出, $d(t)$ 是5个相位时间的函数^[3], 表示如下:

$$d(t) = p(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5). \quad (4)$$

3 交通流优化控制 (Optimal control of traffic flows)

本文采用的算法是利用本周期及前一个周期“大路口”各个方向、各个交叉路口、各条车道交通流信息, 对下一个周期各个方向、各个交叉路口、各条车道交通流信息进行预估^[4], 根据预估信息采取模糊推理确定下个周期的 t 值, 然后用遗传算法优化得到绿信比.

3.1 “大路口”交通流的预测 (Traffic flows pre-estimation of “big unit”)

设 $q_{jkl}(t)$ 为第 t 周期第 j 方向、第 k 交叉口、第 l 车道实际到达车辆数量, 其中 j, k, l 表示意思同前. 设定交叉路口各个方向到达车流按以下线性预估方法^[4]:

$$q_{jkl}(t) = q_{jkl}(t-1) + \alpha(q_{jkl}(t-1) - q_{jkl}(t-2)). \quad (5)$$

其中 α 为修正系数 ($0 \leq \alpha \leq 1$) 且 α 随 $q_{jkl}(t-1) - q_{jkl}(t-2)$ 的绝对值增大而增大, 随其绝对值减小而减小.

总车流量的计算值为

$$q = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 q_{jkl}(t). \quad (6)$$

3.2 周期的确定 (Algorithm of cycle)

经过研究知道,“大路口”车流量对周期 T 的大小具有直接的影响:如果“大路口”未来的总车流量大,则要求周期尽可能的长,如果“大路口”未来的总车流量小,则对周期的长度要求则相反. 基于这种想法,用预估的总车流量和近两个周期的车流变化量来模糊推理下一个周期的 T 值 (见图 3).

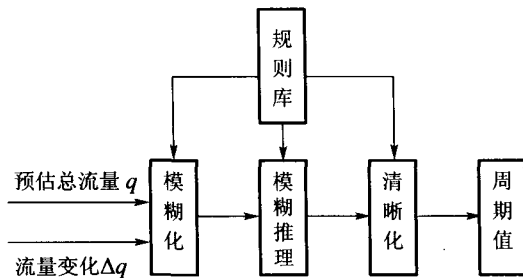


图3 周期的模糊推理框图

Fig. 3 Fuzzy reference chart of cycle

3.3 “大路口”绿信比的确定 (Split algorithm of “big unit”)

绿信比是指“大路口”交通流在每个相位的有效通行时间与周期的比值,是一个重要的交通流参数.

3.3.1 绿信比的描述 (Description of split)

已知“大路口”的周期为 T , 表示为

$$T = \sum_{m=1}^5 t_m. \quad (7)$$

对同一个“大路口”来说,如果各个相位时间已知,则绿信比 g_m 可以表示为

$$g_m = \frac{t_m}{T}. \quad (8)$$

其中 $m = 1, 2, 3, 4, 5$ 表示相位.

“大路口”5个相位中的第2相位是由“大路口”内的交通流来决定,它的长度是两个方向的交通流出“大路口”的时间长者. 而“大路口”内的相位差同样由路口内两两路口间的交通流时间来确定,它可以通过高阶广义神经网络^[5]预测的3个交叉路口之间的交通流计算出来.

在“大路口”处,对每一个相位(第2相位不考

虑)的绿灯时间 t_m 来说,它们有一个下限,取为 $t_{\min}$ (实际取值要考虑行人过马路等安全因素),这样每一相位的配时必须满足下面的条件

$$t_{\min} \leq t_m \leq T - t_2 - 3t_{\min}, \quad m = 1, 3, 4, 5. \quad (9)$$

绿信比满足下列条件

$$\frac{t_{\min}}{T} \leq g_m \leq \frac{T - t_2 - 3t_{\min}}{T}, \quad m = 1, 3, 4, 5. \quad (10)$$

3.3.2 绿信比的算法 (Algorithm of split)

根据上面的描述,“大路口”车辆平均延误的表达式(4)可表示为

$$d(t) = p(g_1, g_2, g_3, g_4, g_5). \quad (11)$$

为了简化问题,以 g_3, g_4, g_5 为自变量, (其中: $g_1 = 1 - \sum_{m=2}^5 g_m, g_2$ 为已知) 将5变量求极小值问题简化为3变量求极小值问题,则目标函数和约束条件为

$$\begin{aligned} \min d(t) &= P(g_3, g_4, g_5) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \frac{t_{\min}}{T} \leq g_3 \leq \frac{T - t_2 - 3t_{\min}}{T}, \\ \frac{t_{\min}}{T} \leq g_4 \leq \frac{T - t_2 - 3t_{\min}}{T}, \\ \frac{t_{\min}}{T} \leq g_5 \leq \frac{T - t_2 - 3t_{\min}}{T}. \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

采用遗传算法优化可以得到绿信比.

4 计算机仿真 (Computer simulation)

计算机仿真是以济南市经十路的历山路口、千佛山路口、舜耕路口从东到西3个路口作为研究对象,两两路口之间的距离分别为700m和400m,符合“大路口”的条件. 仿真程序采用VC++6.0语言编程,在AMD64微型计算机上运行通过. 遗传算法的种群数取150,染色体长度取30,总迭代代数取50,复制率取0.2,交叉率取0.1,变异率取0.01,南北各路口各个方向各条车道的车辆到达率服从泊松分布,东西两端入口各个方向各条车道的车辆到达率也服从泊松分布,路口各个方向(左、直、右)预测车流分流比为0.2, 0.5, 0.3, 自由车流速度为36 km/h,平均车流密度为100 veh/km,“大路口”一条车道在允许放行情况下的最大流量为4800 veh/h. 仿真程序在3个交叉口相互独立和作为“大路口”两种情况下各自运行10个周期,得到表1、表2所示的结果(单位是veh/s, s/veh). 通过对两个表数据的比较,容易看出:在支路方向两种情况下的交通量变化不大,几乎是一样的;在主干路方向的两种情况下的交通量则差别较大,3个路口作

为“大路口”进行信号灯优化控制时的交通量比3个路口信号灯相互独立控制时的交通量提高了约6.90%。这说明,把3个路口作为一个“大路口”进行优化控制交通流,将会改善主干路方向的交通状况,有助于主干路方向车流的疏导和流通。另外,两

种情况下车辆平均延误也表现迥异,第2种情况下每个周期的车辆平均延误要少于第1种情况,第2种情况10个周期的总平均延误要比第1种情况减少37.4%。总而言之,“大路口”的引入不仅改变了交通流量,而且使得车辆平均延误大大减小。

表1 3个路口相互独立时的交通量和车辆平均延误

周 期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
支路交通量	2.774	2.832	2.796	2.768	2.731	2.811	2.765	2.719	2.807	2.798
干路交通量	2.975	3.198	3.004	2.988	2.921	3.156	2.973	2.913	3.089	3.057
车辆平均延误	19.93	16.78	18.31	20.01	17.77	14.21	15.84	16.28	19.22	18.35

表2 3个路口作为“大路口”时的交通量和车辆平均延误

周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
支路交通量	2.813	2.795	2.822	2.755	2.749	2.824	2.743	2.716	2.814	2.801
干路交通量	3.114	3.225	3.264	3.218	3.209	3.306	3.217	3.206	3.316	3.298
车辆平均延误	11.12	10.33	9.36	12.57	13.31	9.83	10.14	11.32	12.16	10.55

5 结语(Conclusion)

城市交通的智能控制是时代发展的趋势,本文算法就是一种有效的控制方法。如果在主干路上的“大路口”之间配以合适的相位差,建立多目标的优化模型,采取合理的算法来优化目标函数,可以实现对主干路交通信号的有效控制^[6],大大减少车辆通过整条主干路时的停车次数和车辆延误。

参考文献(References):

- [1] 陈淑燕, 陈森发, 吴明赞. 单路口交通的多相位实时模糊控制[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(1): 110-115.
(CHEN Shuyan, CHEN Senfa, WU Mingzan. Real-time fuzzy control for multiphase traffic signals in isolated intersection [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2003, 23(1): 110-115.)
- [2] 李灵犀, 高海军, 王飞跃. 两相邻路口交通信号的协调控制[J]. 自动化学报, 2003, 29(6): 946-952.
(LI Lingxi, GAO Haijun, WANG Feiyue. Control signal coordination of two adjacent traffic intersection [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(6): 947-952.)
- [3] 朱文兴, 贾磊. 单路口信号灯模糊-遗传算法优化配时研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 1173-1178.
(ZHU Wenxing, JIA Lei. Research on the assignment of traffic signal in isolated intersection based on fuzzy-genetic algorithms optimization [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(6): 1173-1178.)

- [4] 黄辉先, 史忠科. 城市单交叉路口交通流实时遗传算法优化控制[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(3): 102-106.
(HUANG Huixian, SHI Zhongke. Real-time control of traffic signal with genetic algorithms optimizing in urban intersection [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2001, 21(3): 102-106.)
- [5] 杨兆升, 谷远利. 实时动态交通流预测模型研究[J]. 公路交通科技, 1998, 15(3): 4-7.
(YANG Zhaosheng, GU Yuanli. A study on the model for real-time dynamic traffic flows forecasting [J]. *J of Highway Transportation Research and Development*, 1998, 15(3): 4-7.)
- [6] 朱文兴, 贾磊. 城市主干路交通流多目标优化控制[J]. 山东大学学报(工学版), 2004, 34(4): 72-78.
(ZHU Wenxing, JIA Lei. Control of the urban main road traffic flows based on multi-objective optimization [J]. *J of Shandong University (Engineering Science)*, 2004, 34(4): 72-78.)

作者简介:

朱文兴 (1971—),男,博士研究生,1994年毕业于山东大学控制科学与工程学院并留校任教,发表论文10余篇,研究方向为计算机控制技术、智能交通,E-mail:zhuwenxing@sdu.edu.cn;

贾磊 (1959—),男,教授,博士生导师,发表论文80余篇,研究方向为鲁棒控制、预测控制、智能控制,E-mail:jialei@sdu.edu.cn;

杨立才 (1962—),男,博士,副教授,主要研究方向为系统工程理论与应用、智能交通系统、复杂系统理论与应用。