

# 信号灯交叉路口的实时控制模型

A Real-Time Controlling Model for Signiged-Intersections

张邦礼  
Zhang Bangli

刘一武  
Liu Yiwu

(重庆大学电子信息工程学院)

U412.351

**摘 要** 提出了一个交叉路口交通的实时信号控制方法,它以车流密度作为控制目标来寻找最优的绿灯时间。交叉路口各进入段均装设车辆检测器,并仿真动态车流,以预测下一个信号周期内各停车线处的密度分布。具有仿真精度高,控制实时性好的特点。

**关键词** 密度; 信号灯; 目标函数; 实时控制; 仿真 交叉路口  
中国图书资料分类法分类号 TP13

**ABSTRACT** This paper shows a scheme for intersection traffic real-time sign-controlling, by which the most optimized green-time can be achieved during a sign period. The optimized objection is traffic density. A loop-dector is requested for each approach, and the dynamic flow is simulated. So that it is possible for predicting the density disbrution during the next period. The model is characterized by real simulation and real-time.

**KEYWORDS** density; functions; real-time control; simulation signal lights; objective

## 0 引 言

一般地,各个交叉路口的最优不能保证整个路网的最优。最大绿波带算法(MGWB)、最小延误和停车次数算法(MINDS)<sup>[1]</sup>,是先将交叉路口独立优化,再对整个系统进行协调优化,最后得到最优控制参数。但是它们都有许多不足,尤其是MINDS和另一个算法最大绿灯流量算法<sup>[1]</sup>。它们都基于这样的假设:两个相邻交叉路口间的车流、车速近似正态分布。该假设在许多情况下不成立,而上述算法的实时性也不强。

本文提出一种新的算法,将各交叉路口作为独立的路口处理,而且各路口的最优保证整个路网的较优,当各交叉路口相隔较远(如重庆市),这种处理更有意义。这个算法实时性好的代价是对车辆检测器的需求。将检测器装设在离停车线较远的地方,通过对这一路段车流动态仿真,可以预测停车线处交通流分布状况,然后进行优化。

## 1 目标函数分析

\* 收文日期 1992-07-25

图1是典型的交叉路口,各停车线处都设一密度区,记为D区。密度是单位长度上的车辆数(车辆数/km),能反映交通的密集程度。在红灯期间,密度是累积增加的,红灯末的密度值反映进出口交通排队、等待、停车、延误的程度。出于这些考虑,我们选择信号周期内各进出口相应红灯结束时刻各D区的密度的和作为优化目标函数。

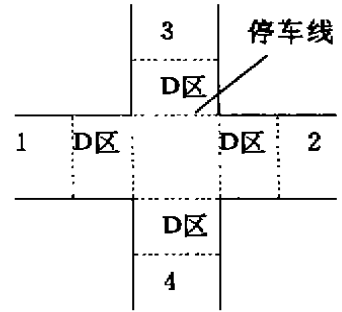


图1 四进出口的交叉路口

假设信号周期为  $C(s)$ , 进出口 1、2 的绿灯时间为  $G$ , 若忽略黄灯时间, 则 1、2 的红灯时间是  $C - G$ . 并设标志  $flag$ , 当  $flag = 1$  时, 表示先向 1、2 开绿灯; 当  $flag = 0$ , 表示先向 1、2 开红灯.  $d_i(t) (i = 1, 2, 3, 4)$  表示  $t$  时刻四个 D 区的密度. 目标函数是

$$flag = 1, J = d_1(C) + d_2(C) + d_3(G) + d_4(G) \tag{1}$$

$$flag = 0, J = d_1(C - G) + d_2(C - G) + d_3(C) + d_4(C) \tag{2}$$

问题是, 选择  $flag$  和最优的  $G$ , 使  $J$  最小。

上述目标允许上一个信号周期的信号状态(绿灯或红灯)延续到本周期内, 只要使得  $J$  最小; 但是一个信号状态持续时间不可能超过  $2C$ , 因为每个周期均有红、绿灯两种状态的切换。这个特性使模型对干道和支道交叉的路口也很适用, 而且因为引入标志  $flag$ , 在一个路网中, 各交叉路口的优化实际上也克服了各交叉路口存在信号相位差的问题, 却避免了信号相位协调的繁杂。虽然某交叉路口在一个信号周期内由于信号状态不同, 其输出变化对下游路口的优化有影响, 但这种影响也仅在一个周期内, 当相邻路口相距较远时更趋微弱。因此, 各交叉路口最优能保证整个路网较优。

本文仅讨论一个交叉路口的控制模型。

## 2 动态车流仿真

优化目标需要预测一个信号周期内各 D 区的密度分布。改进仿真模型 FREFLD<sup>[2]</sup>, 能够实现预测的要求。

FREFLO 介绍了三个基本方程式, 并采用道路分段的方法将之离散化。图2就是道路分段后的第  $j$  段, 称为路段  $j$ 。

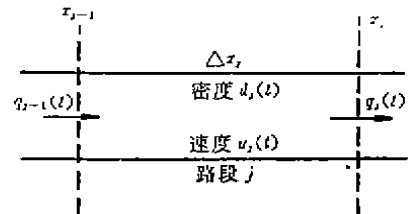


图2 道路分段示意图

车辆守恒方程

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

式中  $t$  是时间(h),  $x$  是位置(km),  $d$  是  $x$  处  $t$  时刻的密度(车辆数/km),  $q$  是  $x$  处  $t$  时刻的流量(车辆数/h)。

动态速度—密度关系

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{T} [u - u_0(d) + \gamma \frac{\partial d}{\partial x}] \tag{4}$$

第一项      第二项      第三项

式中  $u$  表示  $x$  处  $t$  时刻的车流速度(km/h), 右边第一项考虑了后方车流速度传递;  $u_0(d)$  是交

通流平稳时密度  $d$  对应的速度,  $T$  称为缓和系数(h), 第二项根据  $u_s(d)$  调正车速,  $\gamma$  是前方密度变化对车速影响的估计系数( $\text{km}^3/\text{h}$  车辆数)。

流量方程

$$q(t) = d(t) \cdot u(t) \quad (5)$$

假设图 2 所示的路段  $j$ , 其密度  $d_j$  和速度  $u_j$  在时间段  $n$  内是均衡的, 取仿真时间间隔为  $\Delta t$ , 将式(3)、(4)、(5) 离散化

$$d_j^{n+1} = d_j^n + \frac{\Delta t}{l_j \cdot \Delta x_j} (q_{j-1}^n - q_j^n) \quad (6)$$

$$u_j^{n+1} = u_j^n + \Delta t \cdot \left[ -u_j^n \frac{(u_j^n - u_{j-1}^n)}{\Delta x_j} - \frac{1}{T} \left( u_j^n - u_s(d_j^n) \right) + \gamma \frac{(d_{j+1}^n - d_j^n)}{\Delta x_j} \right] \quad (7)$$

$$q_j^{n+1} = d_j^{n+1} \cdot u_j^{n+1} \quad (8)$$

式中各参数下标表示路段, 上标表示仿真时间段,  $l_j$  是路段  $j$  的车道数,  $\Delta x_j$  是路段  $j$  的长度。

上述离散公式<sup>[2]</sup>有欠考虑, 式(6)中  $q$  的上标应改为  $n+1$ , 因为  $d_j, u_j$  在时间段  $n$  内均衡, 所以  $q_j^{n+1}$  应表示  $n+1$  时间段开始时刻的输出流量, 那么  $n+1$  时间段的密度  $d_j^{n+1}$  应根据上时段的  $d_j$  和该时段开始时刻的输入、输出流量确定, 即

$$d_j^{n+1} = d_j^n + \frac{\Delta t}{l_j \cdot \Delta x_j} (q_{j+1}^n - q_j^{n+1}) \quad (6')$$

下面讨论交叉路口的一个进入段(图 3)。将它分成  $N$  个路段。车辆检测器安装在点  $O$  处, 每隔一个仿真时间间隔  $\Delta t$  取一次测量数据。设路段长都为  $\Delta x$ 。

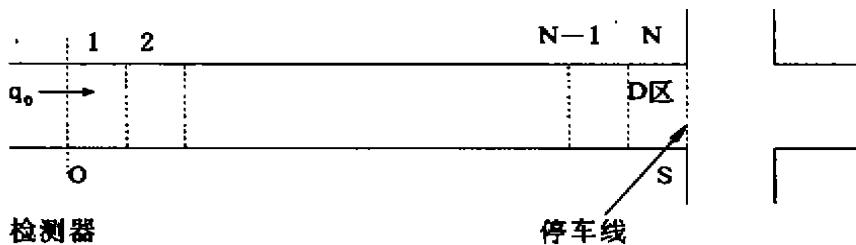


图 3 交叉路口一进口分段示意图

由于模型的实时性要求, 需要根据  $q_0(t)$  计算  $d_N(t+c)$ , 因为从  $O$  到  $S$  有一段距离, 从物理意义上讲这是可行的。根据式(6')、(7)、(8), 由  $(d_{j-1}^n, u_{j-1}^n, q_{j-1}^n)$ 、 $(d_j^{n-1}, u_j^{n-1}, q_j^{n-1})$  两组值和  $d_{j+1}^n$  就可以算出  $(d_j^n, u_j^n, q_j^n)$ 。整个计算是一个递推过程。假设  $u_0 = u_1$ , 如图 4, 第一行是初始值,  $q_0^0$  是检测值。根据图 4 依次由  $q_0^0$  推出  $d_1^0$ , 由  $q_0^0$  推出  $d_2^0$ , ..., 由  $q_0^{n-1}$  推出  $d_N^{n-1}$ 。取  $\Delta t = c/(N-1)$ 。就可以由  $q_0(t)$  计算出  $d_N(t+c)$ ,  $t \in [t_0, t_0+c]$ 。

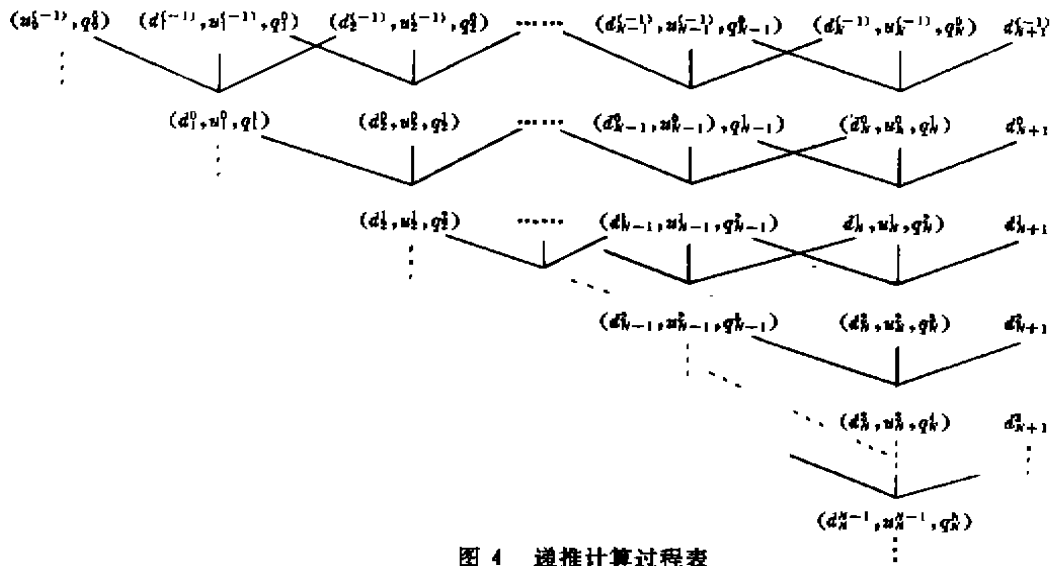


图4 递推计算过程表

实际仿真中,根据图4两相邻对角线上的值和一个检测值,计算 \$F\$ 一对角线上的值。仿真模型的基本公式是式(6')、(7)、(8),另外需要确定三个边界条件

①  $u_0^k = u_1^k$  (9)

②  $d_{N+1}^k = \begin{cases} 0, & \text{绿灯期间} \\ d_{max} \text{ (一般取 200)}, & \text{否则} \end{cases}$  (10)

③ 绿灯期间  $q_N^k = \begin{cases} S, & \text{在疏散时间 } t_s \text{ 内} \\ \text{按仿真公式计算}, & \text{否则} \end{cases}$  (11)

红灯期间  $q_N^k = 0$  (12)

\$S\$ 是最大通过能力(车辆数/h),也称饱和流量,它的估算参见[3].式(11)的条件也可以改为 \$d\_N^{k-1} > 10\$. 在路口不堵塞的情况下,用下式<sup>[1]</sup>计算 \$t\_s\$,

$$t_s = f \cdot (C - G) / (S - f) \tag{13}$$

\$f\$ 为平均到达率,采用历史数据。

### 3 系数 \$T, \gamma\$ 和平稳速度 - 密度关系的确定

将实测数据(或经验数据)代入式(7),通过二次拟合得到 \$T, \gamma\$. 而平稳速度 - 密度关系 \$u\_s(d)\$,可采用经验数据,通过多项式回归得到。

本文取仿真时间间隔 \$\Delta t = 4s\$. 初步估计

$$T = 4 s, \quad \gamma = 1.8 \text{ km}^2/\text{h 车辆数}.$$

根据[4]中的数据,多项式回归得到

$$u_s(d) = 68.9623 - 0.08085d + 0.020963d^2 - 0.00112d^3$$

## 4 算 法

交叉路口交通实时控制算法 RTCOIT (Real-time Control of Intersection traffic) 用 Turbo C 语言写成程序并实现。用 Turbo C 写中断服务程序十分方便。

- 1) 各路段数据初始化。
  - 2) 通讯口、中断控制器初始化, 设置定时数据采集中断向量。中断服务子程序 cdata() 的功能是采取检测器的数据, 依次送入一全程数组变量, 当一周数据采集完, 则采数指针复位, 用于下一周期采数。
  - 3) 信号周期开始计时。
  - 4) 优化程序 optim():
    - 1° 比较标志  $J_1 \leftarrow 500$ , 绿灯时间标志  $green \leftarrow G_{min}$ ,  $flag1 \leftarrow 1$ 。
    - 2°  $G \leftarrow G_{min}$ 。
    - 3° 调仿真子程序 simulate(flag1, G), 边界条件根据 flag1 和 G 确定, 各路段初始数据是上一信号周期优化的结果。
    - 4° 计算目标函数  $J$ ,  $J < J_1$  吗? 是, 则  $J_1 \leftarrow J$ ,  $green \leftarrow G$ ,  $flag \leftarrow flag1$ 。保存各路段仿真数据。
    - 5°  $G \leftarrow G + \Delta t$ ,  $G > G_{max}$  吗? 否, 返回 3°,  $flag1 \leftarrow flag1 - 1$ ,  $flag1 < 0$  吗? 否, 返回 2°。
    - 6° 修改各路段初始数据, 输出 flag 和 green。
  - 5) 一周时间是否到? 否, 等待; 是, 返回 3), 开始下一周期的优化。仿真子程序 simulate(flag1, G) 的功能是已知信号状态的次序 flag1 和绿灯时间 G 的情况下, 计算一个周期内各路段的数据, 并返回各进口红灯末 D 区的密度值。
- 这个算法最大的问题是, 优化结果的计算时间可能与信号控制器实时切换信号状态相矛盾。一个解决方法是将路段数增加为  $2N - 1$ , 而仍设  $\Delta t = C / (N - 1)$ , 那么本周期计算的结果实际上是下一周期的最优参数。

## 5 仿真示例

本模型的准确性取决于仿真的精度, 对仿真精度要求较高。

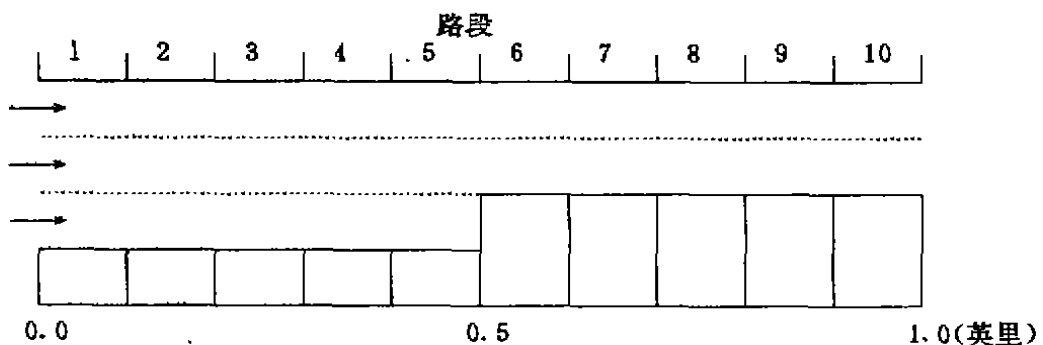


图 5 瓶颈状测试网络

图5是一个测试网络<sup>[2]</sup>, 路段5到路段6由三车道减为二车道。假设车道容量为2000车辆数/h, 进入流量为4500车辆数/h, 对车流进行仿真, 图5~图9分别是路段4、路段5、路段6、路段7的密度的仿真结果。由图可以看出, 路段6、路段5的密度最先达到饱和, 即产生交通拥挤现象, 此后, 密度在饱和值上下波动, 这实际上反映了交通拥挤时车流“走走停停”的情况, 一会儿进入车辆较多, 一会儿离开车辆较多。下游的拥挤要传递到上游, 路段4的密度(图6)跟随路段5稍后上升到饱和值。因为上游堵塞, 进入路段7的车流较小, 所以路段7很疏散, 密度很小(图9)。

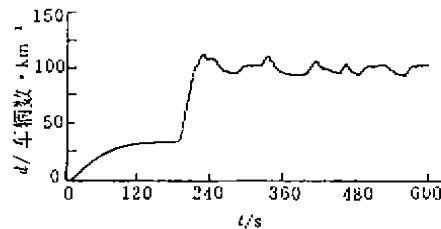


图6 路段4的密度曲线

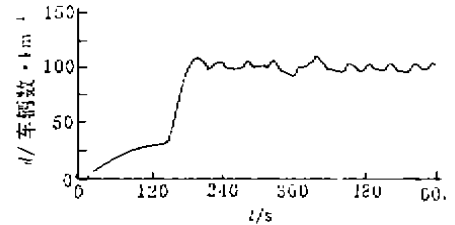


图7 路段5的密度曲线

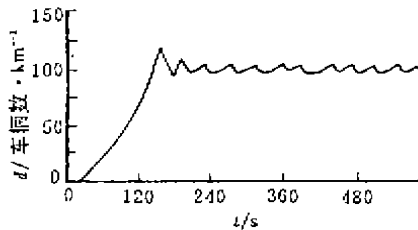


图8 路段6的密度曲线

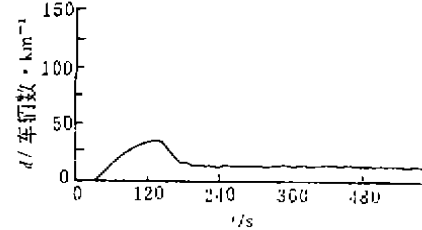


图9 路段7的密度曲线

## 6 结 论

本控制模型实时性好, 其准确性取决于仿真的精度, 因此通过实测方法进一步修正和改进仿真模型、校准仿真公式中的基本参数是十分必要的。

## 参 考 文 献

- 1 徐吉万, 徐冬玲. 城市交通的计算机控制和管理. 北京: 测绘出版社, 1988
- 2 Ajay K. Rathi, Edward B. Lieberman and Mark Yedlin Enhanced FREFLO, Modeling of Congested Environments. In Transportation Research Record 1112, TRB, National Research Council, Washington, D. C. 1990, 61~71
- 3 Rahmi Akcelik. Opposed Turns of Signalized Intersections; The Australian Method. ITE JOURNAL, June 1989, 21~26
- 4 郑祖武. 城市道路交通. 北京: 人民交通出版社, 1982