

# 交通强度优先的交叉口模糊控制研究

杨祖元, 刘鸿飞, 杜长海

YANG Zu-yuan, LIU Hong-fei, DU Chang-hai

重庆大学 自动化学院, 重庆 400044

College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China

E-mail: yzy7704@163.com

**YANG Zu-yuan, LIU Hong-fei, DU Chang-hai. Study of fuzzy control for intersections with traffic intensity being priority. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(36): 193-195.**

**Abstract:** In order to decrease the vehicle delay and increase the traffic capacity in intersections, a fuzzy control method for the traffic signal of four-phased intersections is put forward. Traffic intensity is applied to describing the urgency of traffic flow to go through each phase. Extension of the current green phase and the followed green phase are decided through fuzzy inference according to traffic intensity in each phase. Simulation is carried out in order to validate the performance of this traffic method with the average delay of vehicles in the intersection being the performance index. The result indicates that this method is more effective in decreasing the average delay in contrast to traffic-actuated control and fuzzy control that only takes into account the number of vehicles between two detectors.

**Key words:** traffic signals; traffic intensity; fuzzy control; average delay

**摘要:** 为了降低交叉口车辆延误, 提高通行能力, 研究了一个四相位交叉口交通信号的模糊控制方法。用交通强度刻画各相位交通通行需求的紧急程度, 根据各相位的交通强度由模糊推理得到当前相位的绿灯延长时间, 并选取后续绿灯相位。以交叉口车辆平均延误作为交叉口信号控制的性能评价指标, 在相同交通条件下对几种控制方式进行了仿真试验。结果表明, 该文的控制方法相对于感应控制方法和直接采用车辆排队长度作为输入的模糊控制方法, 更能有效减小交叉口的车辆平均延误。

**关键词:** 交通信号; 交通强度; 模糊控制; 平均延误

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.36.056 **文章编号:** 1002-8331(2009)36-0193-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391; TP273

## 1 前言

交通拥堵已严重影响到城市环境质量和生活质量, 各级交通管理部门积极寻求解决办法。交叉口是城市路网的节点, 也是城市道路的瓶颈。交叉口的畅通有利于提高整个城市路网的通行能力, 缓解交通拥堵带来的危害。因此, 城市交通信号控制成为当前控制领域和交通工程领域的研究热点之一, 也是智能交通系统的重要内容。

单交叉口交通信号控制是城市交通信号控制的最基本形式。从上游交叉口驶出的车队, 驶离交叉口后, 由于车辆行驶速度存在差异, 随着行驶距离的增加, 在到达下游交叉口停车线之前便离散成随机状态<sup>[1]</sup>。相邻交叉口之间的距离越长, “离散”现象越明显。研究表明, 对于距离上游交叉口大于 800 米的交叉口, 采用点控方式效果更好<sup>[2]</sup>。

交通系统的随机性、模糊性和不确定性使得经典的反馈控制方法很难取得满意的控制效果。模糊逻辑是一种处理不确定性和非线性等复杂问题的有力工具, 与人类思维的某些特征相一致, 嵌入到推理技术中具有良好效果。模糊控制被认为是城

市道路交通智能控制最有发展前景的研究方向<sup>[3-5]</sup>。

Pappis 和 Mamdani 借鉴交通警察迅速有效地疏导车流的经验, 首次设计了一个模糊控制器用于两条单车道孤立交叉口的信号控制, 仿真结果表明比用传统的控制方法平均减少车辆延误 7% 左右<sup>[6]</sup>。此后, 其他学者相继提出了改进的模糊控制算法, 控制性能得到进一步提高<sup>[7-8]</sup>。这些控制方法有一个特点, 均只考虑两相位的直行车流, 而没有考虑左转弯车流, 因此只适用于没有或者左转弯流量很小的交叉口。当交通量较大时, 在保证安全的前提下, 为提高交叉口的通行能力就需要采用多相位信号控制。B. Madhavan Nair<sup>[9]</sup>和 Hsing-Han Liu<sup>[10]</sup>等提出针对四相位单交叉口的交通信号模糊控制方法, 根据专家经验, 由模糊控制器直接根据各相位的车辆排队长度来决定控制动作的模式。这种控制方式的局限性在于没有考虑各相位饱和和流量的差别, 因而不能客观描述各相位的实际交通需求紧急程度。

基于以上分析, 提出了一种针对多相位单交叉口的交通信号模糊控制方法。该方法以交通强度来刻画交叉口交通通行需求的紧急程度, 增加了对各相位交通强度评估的模块, 提高

**基金项目:** 重庆市自然科学基金(the Natural Science Foundation of Chongqing of China under Grant No.CQ CSTC, 2008BB2324)。

**作者简介:** 杨祖元(1974-), 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为智能控制, 智能交通; 刘鸿飞(1974-), 男, 博士生, 讲师, 主要研究领域为智能交通, 无线网络; 杜长海(1977-), 男, 博士生, 主要研究领域为智能交通。

**收稿日期:** 2008-12-30 **修回日期:** 2009-02-06

了交通信号控制性能。

## 2 四相位交叉口几何模型描述

一个典型的四相位单交叉口如图 1 所示, 相位分配如图 2 所示。该交叉口有 4 个进口道, 每个进口道有 3 支车流(左转、直行和右转)。实施多相位控制后, 可以消除直行车辆和左转车辆的冲突, 提高行车安全。在每条车道上安装两个检测器以获取实时交通流信息。交叉口车辆检测器的安装如图 1 所示, 第一个检测器安装在停车线的位置, 第二个检测器安装在距离第一个检测器 180 米的位置。设小汽车的平均长度为 4.5 米, 行车安全距离为 5.5 米, 停车时的间距为 1.5 米, 则检测器可以检测到的车辆数多达 30 个 PCU(标准当量小汽车), 能够满足实际交叉口排队长度的要求。

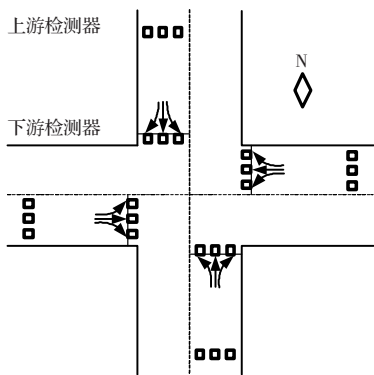


图 1 四相位交叉口几何模型及检测器设置

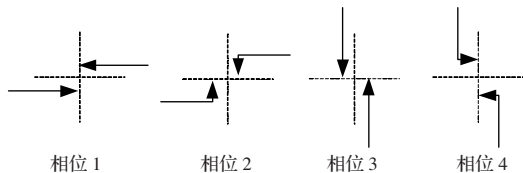


图 2 交叉口相位分配示意图

## 3 交叉口车辆平均延误计算模型

车辆平均延误在很大程度上反映了交叉口的通行能力, 该文以车辆平均延误作为交叉口信号控制的性能评价指标。

设到达交叉口各个方向上的车辆是随机的, 非拥挤交通流的车辆到达数服从泊松分布, 拥挤交通流的车辆到达数服从二项分布<sup>[1]</sup>。对每个相位来说, 整个信号周期分为“有效红灯”、“有效绿灯”和“黄灯”。设红灯转变为绿灯后排队车辆以饱和流量驶离交叉口。车辆的延误计算模型如下<sup>[6]</sup>:

$$q_m = \begin{cases} 1, & \text{如果在第 } m \text{ 秒内有 } 1 \text{ 辆车到达} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

令  $Q_m$  为红灯相位在第  $m$  秒的排队车辆数, 则

$$Q_m = \sum_{i=1}^k \left( Q_{i^*} + \sum_{j=1}^m q_{ij} \right) \quad (2)$$

式中,  $Q_{i^*}$  为当前红灯相位中第  $i$  支车流在前绿灯信号结束时滞留的车辆数;  $q_{ij}$  为当前红灯相位第  $i$  支车流在红灯信号第  $j$  秒内到达的车辆数;  $k$  为红灯相位车流数, 对于四相位交叉口, 不考虑右转车流, 则  $k=6$ 。

若  $n$  为当前红灯相位本周期的红灯时间(秒), 则红灯相位的车辆总延误  $D_r$  为:

$$D_r = \sum_{m=1}^n \left[ \sum_{i=1}^k \left( Q_{i^*} + \sum_{j=1}^m q_{ij} \right) \right] \quad (3)$$

设  $q_s$  为饱和流量, 则当前绿灯相位在绿灯信号第  $m$  秒时, 未通过交叉口车辆数为:

$$Q_{ng} = \sum_{i=1}^k z_i \left( Q_{i^*} + \sum_{j=1}^m q_{ij} - q_s m \right) \quad (4)$$

式中,  $Q_{i^*}$  为当前绿灯相位第  $i$  支车流在前红灯时间等候的车辆数;  $q_{ij}$  为当前绿灯相位第  $i$  支车流在本周期绿灯信号第  $j$  秒内到达的车辆数;  $k$  为绿灯相位车流数, 对于四相位交叉口, 不考虑右转车流,  $k=2$ 。

$$z_i = \begin{cases} 1, & Q_{i^*} + \sum_{j=1}^m q_{ij} - q_s m > 0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

绿灯相位车辆总延误  $D_g$  为:

$$D_g = \sum_{m=1}^g \left[ \sum_{i=1}^k z_i \left( Q_{i^*} + \sum_{j=1}^m q_{ij} - q_s m \right) \right] \quad (6)$$

式中,  $g$  为该周期内绿灯时间(秒)。

第  $x$  个周期的总延误为:

$$D_x = D_r + D_g \quad (7)$$

$y$  个周期的车辆平均延误为:

$$d = \frac{\sum_{x=1}^y D_x}{A} \quad (8)$$

式中:  $A$  为  $y$  个周期交叉口所有方向到达的车辆数。

## 4 交叉口交通信号模糊控制策略

### 4.1 模糊控制算法

单交叉口信号控制的基本原则: 信号周期一般不能小于  $P \times (10+3)$  秒( $P$  为相位数, 10 秒为某一相位的绿灯时间, 3 秒为黄灯时间), 以免某一相位的绿灯时间过小, 使车辆不能及时通过交叉口; 信号周期也不能过长, 一般不超过 220 秒, 否则会由于某一相位的绿灯时间太长使得其他相位上驾驶员焦躁不安, 甚至因此而闯红灯<sup>[11]</sup>。

该文的模糊控制思路: 根据交通流信息, 由交通强度评估模块评估各相位的交通强度, 并从当前红灯相位中选择交通强度最大的相位作为下一绿灯相位, 在当前绿灯相位绿灯时间结束前, 由决策模块确定当前绿灯相位的绿灯延长时, 具体如下:

**步骤 1** 根据交通情况分别给定各相位的最小绿灯时间  $g_{i \min}$ 、最大绿灯时间  $g_{i \max}$ , 确定最小信号周期  $C_{\min}$  和最大信号周期  $C_{\max}$ ;

**步骤 2** 先给获得通行权的相位以该相位的最短绿灯时间  $g_i = g_{i \min}$ ;

**步骤 3** 在当前绿灯相位绿灯时间结束前计算各相位的交通强度;

**步骤 4** 从当前红灯相位中选择交通强度最大的相位作为下一绿灯相位;

**步骤 5** 以当前绿灯相位和下一绿灯相位交通强度作为模糊控制器的输入变量, 经过模糊推理, 得到当前绿灯相位的绿灯延长时  $g_{ie}$ , 且有:

- (1) 如果  $g_{ie} > 5$ , 且  $g_i + g_{ie} < g_{i \max}$ ,  $g_i + g_{ie} \rightarrow g_i$ , 转步骤 3;
- (2) 如果  $g_{ie} > 5$ , 且  $g_i + g_{ie} \geq g_{i \max}$ , 则  $g_{ie} = g_{i \max} - g_i$ ,  $g_{i \max} \rightarrow g_i$ , 转步骤 6;
- (3) 如果  $g_{ie} < 5$ , 则转步骤 6;

**步骤 6**  $g_{ie}$  秒后切换到下一绿灯相位, 回步骤 2。

### 4.2 模糊控制器的设计

模糊控制器结构如图 3 所示, 包含 3 个模块: (1) 红灯相位交通强度评估模块: 对当前各红灯相位进行交通强度评估, 选择交通强度最大的相位作为下一绿灯相位; (2) 绿灯相位交通强度评估模块: 对当前绿灯相位进行交通强度评估; (3) 决策模块: 根据当前绿灯相位交通强度和最大的红灯相位交通强度, 确定当前绿灯相位的延长时间。

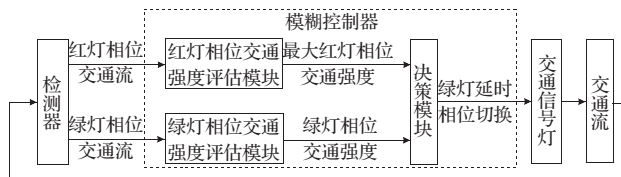


图 3 模糊控制器结构

#### 4.2.1 红灯相位交通强度评估模块

红灯相位交通强度评估模块有 2 个输入变量, 分别为当前各红灯相位上下游检测器之间的车辆数  $Q_r$  和当前红灯相位的红灯持续时间  $t_r$ , 输出变量为当前各红灯相位的交通强度  $I_r$ 。 $Q_r$  的论域为  $[0, 30]$ , 划分为 5 个模糊子集, {很短, 短, 中, 长, 很长}, 简记为 {VS, S, M, L, VL}。 $t_r$  的论域为  $[0, 210]$ , 分为 5 个模糊子集, {很短, 短, 中, 长, 很长}, 简记为 {VS, S, M, L, VL}。 $I_r$  的论域为  $[0, 1.0]$ , 划分为 5 个模糊子集, {很小, 小, 中, 大, 很大}, 简记为 {VS, S, M, B, VB}。模糊规则如表 1 所示。

表 1 红灯相位交通强度模块模糊规则

	VS	S	M	L	VL
VS	VS	VS	S	S	M
S	VS	S	S	M	M
M	S	S	M	M	B
L	S	M	M	B	VB
VL	S	M	B	VB	VB

#### 4.2.2 绿灯相位交通强度评估模块

绿灯相位交通强度评估模块有 2 个输入变量, 分别为绿灯时间内车辆到达的平均流率比  $\lambda_g$  (由式(9)计算所得) 和当前绿灯相位上下游检测器之间的车辆数  $Q_g$ , 输出变量为当前绿灯相位的交通强度  $I_g$ 。 $\lambda_g$  的论域为  $[0, 1.0]$ , 划分为 5 个模糊子集, {很小, 小, 中, 大, 很大}, 简记为 {VS, S, M, B, VB}。 $Q_g$  的论域为  $[0, 20]$ , 划分为 5 个模糊子集, {很短, 短, 中, 长, 很长}, 简记为 {VS, S, M, L, VL}。 $I_g$  的论域为  $[0, 1.0]$ , 划分为 5 个模糊子集, {很小, 小, 中, 大, 很大}, 简记为 {VS, S, M, B, VB}。模糊规则如表 2 所示。

$$\lambda_g = \frac{q_g}{q_{sg}} \quad (9)$$

式中,  $q_g$  为当前绿灯相位绿灯时间内的小时流量 (PCU/h);  $q_{sg}$  为当前绿灯相位饱和流量 (PCU/h)。

表 2 绿灯相位交通强度模块模糊规则

	VS	S	M	L	VL
VS	VS	VS	S	S	M
S	VS	S	S	M	M
M	S	S	M	M	B
L	S	M	M	B	VB
VL	M	M	B	VB	VB

#### 4.2.3 决策模块

决策模块有 2 个输入变量, 分别为绿灯相位交通强度  $I_g$  和

最大红灯相位交通强度  $I_{r,max}$ , 输出变量是当前绿灯延长时间  $g_e$ 。如果延长时间小于 5 秒, 模糊控制器在一定时间后停止当前绿灯相位的放行, 在黄灯时间后放行下一个绿灯相位。 $I_g$  和  $I_{r,max}$  的模糊划分同前。 $g_e$  的论域为  $[0, 20]$ , 划分为 5 个模糊子集, {很短, 短, 中, 长, 很长}, 简记为 {VS, S, M, L, VL}。模糊规则如表 3 所示。

表 3 决策模块模糊规则

	VS	S	M	L	VL
VS	VS	VS	VS	VS	VS
S	S	S	VS	VS	VS
M	M	M	S	VS	VS
L	L	L	M	S	VS
VL	VL	VL	L	M	S

#### 4.2.4 模糊推理及解模糊

采用 MIN-MAX 方法进行模糊推理, 应用重心法反模糊化, 按加权平均法进行解模糊, 得到相应的精确控制量<sup>[12]</sup>:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^I (u_i \mu_i)}{\sum_{i=1}^I (\mu_i)} \quad (10)$$

式中,  $u^*$  为清晰化输出量,  $u_i$  为输出变量,  $\mu_i$  为模糊子集隶属度,  $I$  为模糊子集数, 文中  $I=5$ 。

### 5 仿真分析

为了检验该文方法的控制效果, 在相同交通条件下对感应控制、普通模糊控制和该文提出的控制方法进行计算机仿真。

交通信号感应控制器初始绿灯时间、单位绿灯延长时间和最大绿灯时间分别为 15 秒、2 秒和 80 秒。当某相位得到通行权时, 先运行初始绿灯时间; 当运行结束时, 绿灯信号延长一个单位时间, 当延时期间检测到有车辆时, 则绿灯信号再次延长一个单位时间; 若没有车辆到达或绿灯时间达到最大值, 则不再延长。

仿真参数设置如下: 假设交叉口各方向车辆到达是随机的, 所有车辆都换算成当量小汽车。相位 1 和相位 3 的饱和流量为 3 600 PCU/h, 相位 2 和相位 4 的饱和流量为 2 880 PCU/h。车辆到达率小于 900 PCU/h 时服从泊松分布, 大于 900 PCU/h 时服从二项分布; 以各相位到达流量为 180~2 160 PCU/h 进行仿真, 结果如图 4 所示。

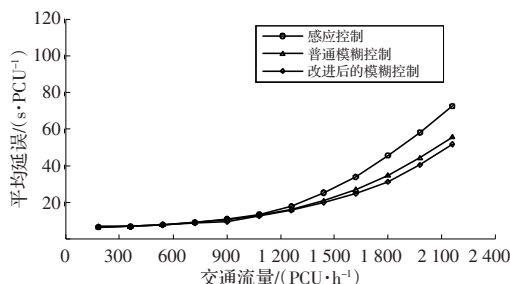


图 4 三种控制方式的仿真结果

图 4 可以看出, 当交通流量很小时, 几种控制方法的车辆平均延误差别不大。随着交通流量的增加, 模糊控制方法的效果越来越明显。交通流量很小时, 车辆到达交叉口的间隔时间相对较长, 到达的车辆能及时通过交叉口, 因此车辆平均延误