

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.09.017

城市交通信号控制与仿真

许伦辉, 刘邦明

(江西理工大学 电气工程及其自动化学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 基于模糊控制在城市交通信号控制中的应用, 以减少交叉口的车辆延误时间、排队长度和行程时间等为目标, 提出一种实用的单交叉口多级模糊控制模型。介绍交叉口基本概况并且提出基本主相位和分相位的概念, 在此基础上建立了多级的模糊控制模型。控制器第1级为主相序优化层; 第2级为分相序优化层; 第3级为绿灯时间优化层, 实现信号周期时长、绿信比和相序3个信号配时参数同时优化。最后, 利用 Visual Studio 6.0 和 MATLAB 软件开发了交叉口的微观仿真系统。仿真结果表明, 与传统的定时控制和普通的模糊控制相比较, 所提出的多级模糊控制模型具有相对较好的控制效果。

关键词: 交通工程; 信号交叉口; 交通仿真; 信号控制; 多级模糊控制

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2013)09-0108-08

Urban Traffic Signal Control and Simulation

XU Lun-hui, LIU Bang-ming

(School of Automation and Electronic Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: According to the application of fuzzy control in urban traffic signal control, for the purpose of reducing delay time, queue length and travel time of vehicles at intersection, a practical single intersection multi-level fuzzy control model is proposed. It introduced basic situation of intersection and proposed the concepts of main phase and branch phase. On this basis, a multi-level fuzzy control model is established. The controller is divided into three parts: the first one is used for optimizing the main phase sequence; the second one is used for optimizing branch phase sequence; the last one is used for optimizing green time, thus, the parameters of cycle time, green split and phase sequence are optimized at the same time. Finally, in combination with Visual Studio 6.0 and MATLAB software, an intersection microscopic simulation system is developed. The simulation result shows that compared with traditional fixed-time control and ordinary fuzzy control, the proposed multi-level fuzzy control model has relatively good control effect.

Key words: traffic engineering; signalized intersection; traffic simulation; signal control; multi-level fuzzy control

0 引言

交叉口作为城市交通网络中的重要组成部分, 是城市交通瓶颈的所在地, 也是形成交通拥堵的主要发生地之一, 其中有 80% 以上的拥挤集中在交叉口处^[1]。单交叉口交通信号控制是城市交通控制的基

础^[2], 交叉口信号控制方案的优劣影响着干道和区域信号协调控制的效果。单个交叉口的性能恶化会波及相邻交叉口甚至整个控制区域, 进一步引发交通拥堵和交通事故等问题, 同时又增加了能源的消耗和污染物的排放, 严重阻碍了城市的发展。因此, 组织合理的交叉口控制就需要同时考虑车辆延误、

收稿日期: 2013-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61263024)

作者简介: 许伦辉 (1965-), 男, 江西南康人, 教授, 博导. (lhxu@scut.edu.cn)

通行能力、排队长度、停车次数、能源消耗和污染物排放等评价指标的优化^[3]。传统的交通控制方法(如最优控制)首先要建立精确的交通流数学模型,再求解数学模型,从而得到红绿灯信号配时方案。由于道路交通系统具有很强的模糊性,随机性和非确定性^[4],难以用精确的数学模型对其进行描述。因此,传统的定时控制和感应控制对于时刻在变化的交通流,其灵活性与适应性无法保证,难以取得满意的效果^[5]。自适应控制根据连续检测的交通状况生成实时的控制方案,能够使控制效果达到最优或次优。目前国内在这方面已经有了一定的基础研究。文献[6]构建了单路口交通信号多相位实时配时模型,并采用蚁群算法寻优策略求解;文献[7]以交叉口通行能力最大为目标,构建了过饱和条件下的动态线性规划优化模型;文献[8-10]提出了基于遗传算法实现信号控制多目标优化的方法。

模糊控制作为自适应控制方法中一种基于规则的控制方法,不需要建立被控对象的精确数学模型,能够模仿有经验的交警指挥交通时的思想,获得良好的控制效果。早在1977年,Pappis等人就将模糊控制方法运用到交通控制中,通过对各种交通状况进行模糊控制,并取得了较好的效果。近些年,交通模糊控制已经成为了交通信号控制的主流方向之一,国内外有很多学者对此进行了研究和探讨^[11-14],均证明了模糊控制方法的有效性和实用性。本文以提高通行能力、行程车速以及减少车辆平均延误时间、平均停车次数、排队长度和行程时间等为目标,建立了多级模糊控制模型,仿照有经验的交警指挥交通的思想控制交通信号,能够自适应调整各相位放行的顺序和绿灯时间。

1 单交叉口路口设置

路口为东南西北4个方向,每个方向有直行和独立左转车道(根据交规,右转可不作考虑)。在每条进口车道的上游和下游(停车线处)埋放车辆检测器以构成一个检测区,上游检测器用于检测车辆到达数下游检测器用于检测车辆的离开数,检测器对各个进口车道的交通流进行实时检测,获取车流的信息,为控制系统提供必要的的数据,两检测器之间的距离设为100 m^[12]。在交通流量较大的情况下,为了保证行驶安全和提高通行能力,交叉口需要进行多相位的信号控制。本文以4相位双向左转为例介绍模糊控制器,相位如图1所示。

将交叉口分为东西方向和南北方向2部分交通

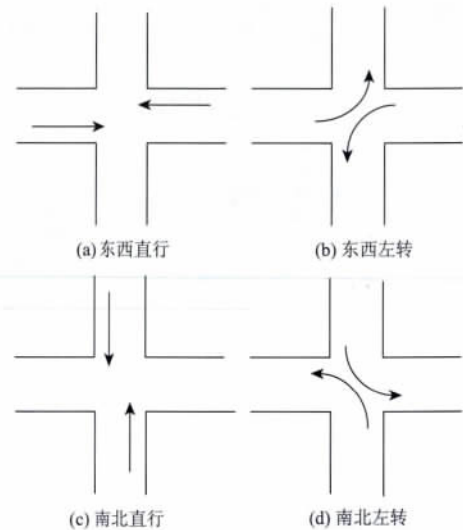


图1 交叉口4相位

Fig. 1 Four phases of an intersection

流,将东西方向直行、左转交通流以及南北方向直行、左转交通流分别用A、B、C、D代表。将信号相位划分为2个主相位:东西主相位(EW)和南北主相位(SN),主相EW下级含A分相和B分相,主相SN下级含C分相和D分相。故1个周期内可以有的主相相序组合有2种:EW→SN和SN→EW。当主相相序为EW→SN时可能的4相位相序组合为ABCD、ABDC、BACD、BADC;当主相相序为SN→EW时可能的4相位相序组合为:CDAB、CDBA、DCAB、DCBA。

2 模糊控制器的设计

本文设计的控制器为多级模糊控制器,第1级决定主相相序;第2级决定主相下的分相相序;第3级决定延时时间。模糊控制器的结构如图2所示,可见为闭环控制。

具体的控制过程:(1)将检测到的东西方向和南北方向各分级相位交通流数据分别送到控制器第1级的东西相位选择模块和南北相位选择模块,输出各分级相位的紧迫度,将分相相位中紧迫度最大所在的主相作为主相相序决策模块的输出,从而得到主相的放行相序(EW→SN或SN→EW)。(2)确定放行主相后,由各分相相位的紧迫度来决定分相的放行相序。(这里注意:主相下级的2个分相是紧接着放行的;在切换主相前一刻,检测本次周期未放行主相的各分相的交通流数据,将其作为控制器第2级的分相相位选择模块的输入,再由分相相序决策模块来确定分相的放行相序。)这样才能根据实时交

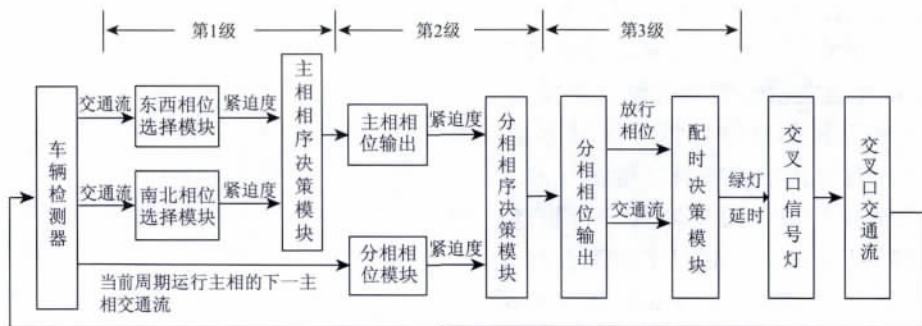


图2 模糊控制器结构

Fig.2 Structure of fuzzy controller

通流将通行权给最紧迫的相位。(3) 根据当前将要放行的相位的交通流数据来决定绿灯时间。上述为一个信号周期的控制过程。

控制器在一个信号周期内使每个相位只获得一次连续的绿灯时间,但绿灯持续时间可以改变。因此,控制器既优化了配时,也优化了相序,又能有效地避免其他自适应控制器相位无序轮换带来的缺点。本文控制器,一个周期内第1级运行1次,在周期切换前一刻进行检测和运行;第2级运行2次,第1次在第1级结束时新的周期开始前运行(此时不运行分相相位选择模块),第2次在主相切换时运行(此时不运行主相相位输出模块);第3级运行4次,在分相相位切换时运行。

2.1 相位选择模块的设计

本文以东西直行相位为例进行具体的设计,其他模块可以仿照其进行设计。这里要注意:在相同的交通状况下,先让左转的车流通过。下面介绍具体的设计步骤:

(1) 输入输出变量

输入变量: QL (排队车辆数) 和 AR (车辆到达率); 输出变量: U (紧迫度); 其中各相位的排队长度取其2个方向车流的平均值,计算公式如下:

$$QL = QL_0 + C, \quad (1)$$

式中, QL_0 为上一次绿灯结束时刻检测区剩余车辆数; C 为红灯期间车辆到达数。

(2) 模糊化

QL 的基本论域: $\{0, 1, 2, \dots, 20\}$; 模糊集: $\{\text{很少}, \text{少}, \text{一般}, \text{多}, \text{很多}\}$ 。 AR 的基本论域: $(0, 1)$; 模糊集: $\{\text{很低}, \text{低}, \text{一般}, \text{高}, \text{很高}\}$ 。 U 的基本论域: $(0, 6)$; 模糊集: $\{\text{很轻}, \text{轻}, \text{一般}, \text{重}, \text{很重}\}$ 。离散后, QL 的论域: $\{0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20\}$; AR 的论域: $\{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9,$

$1.0\}$; U 的论域: $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; 比例因子均取1。

(3) 隶属函数

输入输出变量的模糊隶属度函数均取三角隶属函数,公式如下:

$$f(x|a|b|c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases}, \quad (2)$$

式中,参数 a 和 c 确定三角形的脚,而参数 b 确定三角形的峰。各个变量的隶属函数如图3(a)、(b)、(c)所示。

(4) 模糊控制规则建立

通过总结专家经验获得相位选择模块的模糊控制规则,如表1所示。

表1 相位选择模块的控制规则

Tab.1 Control rules of phase selection module

AR	QL				
	很少	少	一般	多	很多
很低	很轻	很轻	轻	一般	重
低	很轻	很轻	轻	重	重
一般	很轻	轻	一般	一般	重
高	轻	一般	一般	重	很重
很高	一般	一般	重	很重	很重

(5) 模糊推理

根据 Mamdani 推理法,模糊语句 “If A and B then C ” 其关系矩阵 R 为: $R = (A \times B)^{T_1} \times C$; $(A \times B)^{T_1}$ 为模糊关系矩阵构成的 $(A \times B)_{m \times n}$ 列向量, T_1 为列向量转换。

对于第 i 条规则, “若 QL 为 QL_i 且 AR 为 AR_i , 则 U 为 U_i ” 其蕴含的模糊关系 R_i 为: $R_i = (QL_i \times AR_i)^{T_1} \times$

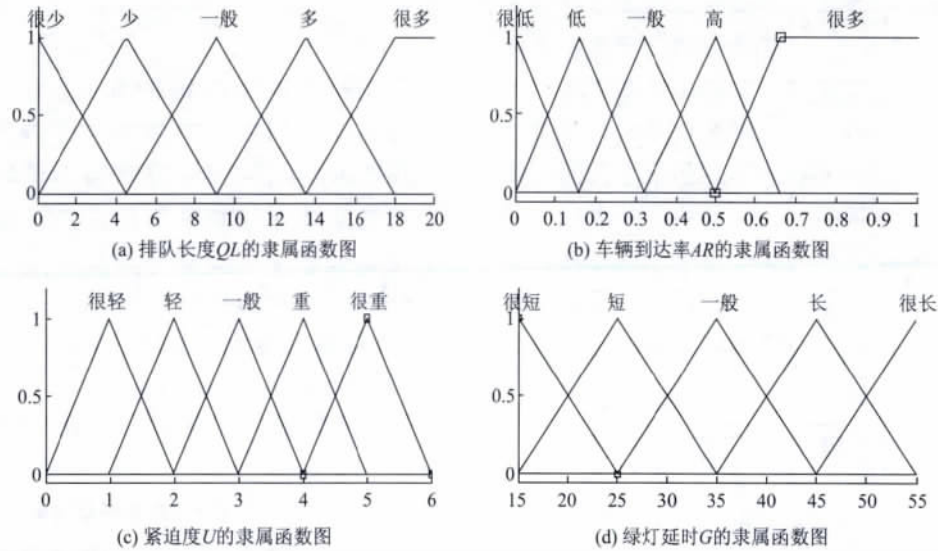


图3 各变量的隶属函数图

Fig.3 Membership function of each variable

U_i ; 那么所有 25 条模糊规则的总模糊关系为:

$$R = \bigcup_{i=1}^{25} R_i. \quad (3)$$

(6) 解模糊化

本文采用重心法对输出 U 进行解模糊。

重心法是指取模糊集隶属函数曲线同基础变量所围面积的重心对应的基础变量作为精确值的方法, 其计算公式为:

$$U = \frac{\int_0^6 U\mu(U) d(U)}{\int_0^6 \mu(U) d(U)}. \quad (4)$$

2.2 配时模块的设计

放行相位绿灯延时时间由车辆排队长度及到达率确定。取最小绿灯延时为 15 s, 考虑到后续到达车辆, 最大绿灯延时取 55 s 较为合理。设定各相位最小绿灯延时时间为 15 s, 则对应 15、25、35、45、55 s 延时时间, 分别对应模糊论域 { 很短、短、一般、长、很长}。具体延时时间可以根据不同的交叉路口进行修改。图 3 (d) 和表 2 为绿灯延时输出的隶属函数图和规则表。

表2 绿灯配时模块控制规则

Tab.2 Control rules of Green timing module

AR	QL				
	很少	少	一般	多	很多
很低	很短	很短	短	一般	长
低	很短	短	短	一般	长
一般	短	短	一般	长	长
高	短	一般	一般	长	很长
很高	一般	一般	长	很长	很长

配时模块的输入为车辆排队长度和车辆到达率, 故该模块输入与前文相同, 解模糊采用最大隶属度法。

输出变量, G 模糊语言: { 很短, 短, 一般, 长, 很长}; 论域: { 15, 25, 35, 45, 55}。

3 交叉口模型建立

通过对城市交叉口的路口环境及车流到达、排队、跟驶、冲突、拐弯、驶离等各种交通流微观运行特性的分析, 构建仿真模型体系, 并基于模型开发一种交叉口微观仿真系统。仿真整体模型由 7 个基本模型组成, 其中关键的是车辆生成模型、交通信号控制模型和评价指标模型的建立, 本文的信号控制模型为前文所建立的模糊控制器模型。体系结构如图 4 所示。

3.1 车辆生成模型

车辆生成模型是进行交通仿真的最基本模型, 它解决的是整个系统的输入问题。在实际交通流中, 车辆的到达具有非确定性和随机性, 对这样的系统进行仿真分析, 需要解决的一个基本问题就是怎样才能得到一个遵循一定概率分布的随机变量。在统计交通流数据时, 必须遵循统计学的方法。

通过对大量的交通流数据分析, 在一定的时间间隔内到达的车辆数, 或在一定的路段上分布的车辆数, 是随机变数, 描述这类随机变数的统计规律用的是离散型分布。常用的离散型分布有如下 2 种: 泊松分布和二项分布。

(1) 泊松分布

需要采取减速操作以保持期望速度,其减速度为:

$$a = \frac{v_{\text{des}} - v}{T}, \quad (11)$$

式中 T 为恢复到期望速度所需的时间。

红灯时在停车线处的减速时跟驰行驶的特殊情况,此时可以假设前车速度为 0。 v_0 为当前车距离停车线 D_{turn} 处的速度,则减速度为:

$$a = \frac{-v_0^2}{2D_{\text{turn}}}, |a| < |a_{\text{max}}|. \quad (12)$$

3.3 平均车辆延误

车辆平均延误是评价交叉口服务水平的最重要指标之一。以每个绿灯相位为单位,在这个绿灯相位内,对通过交叉口的每一辆车的延误时间和通过的车辆数目进行累加计算,直到仿真时间结束时统计出总的延误时间和总的通过路口的车辆数。最后用总延误时间去除总的车辆数目,其结果就是这个仿真时间内的平均车辆延误。每一辆车从进入交叉口到出交叉口的延误:

$$d = t - (l/v), \quad (13)$$

式中, d 为车辆通过交叉口的延误; t 为车辆从进入交叉口到出交叉口所用的总时间; l 为车辆从进入交叉口到出交叉口所行驶的路程; v 为车辆自由通过交叉口的正常平均速度。

4 微观交通仿真实现及结果输出

4.1 仿真系统开发

在 WinXP 的编程环境下,结合构建的交叉口模型,基于 Visual Studio 6.0 开发平台,利用 VC++ 编程技术与 MATLAB 技术集成开发了单个信号交叉口微观仿真系统,系统主界面如图 6 所示。

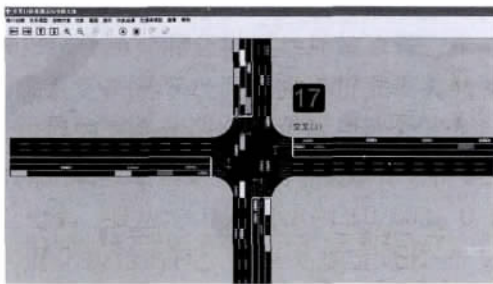


图6 单交叉口微观仿真系统界面图

Fig. 6 Interface of micro simulation system for single intersection

4.2 仿真参数

本文以赣州市客家大道和飞龙大桥交界路口为实际数据的采集对象,其交通流数据如表 3 所示。

表3 路口机动车交通流量(单位: $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$)

Tab. 3 Traffic flow of motor vehicles at intersection
(unit: $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$)

时段	转向	东	南	西	北
低流量	左转	235	176	228	187
	直行	476	283	373	328
	右转	158	114	160	130
	总计	869	573	761	645
早高峰	左转	414	277	262	416
	直行	728	558	599	729
	右转	241	148	188	203
	总计	1 383	983	1 049	1 348
晚高峰	左转	381	240	297	256
	直行	649	496	773	503
	右转	243	168	191	198
	总计	1 273	904	1 261	957

仿真参数的设置如下:(1) 系统车辆的生成服从泊松分布^[16],仿真的推进选用时间步长法。(2) 车头时距为 3~6 s 之间的均匀随机数,最小安全距离为 1.5 m,驾驶员反应时间取 1~1.5 s 之间的均匀随机数。(3) 车辆进入交叉口时刻速度为 5 m/s,交叉口车辆平均速度为 10 m/s,最高限制速度为 11.1 m/s。(4) 由于仿真结果的准确性受到输入随机种子的影响^[17],并且模糊控制每个周期的时间不一样,因此,相同输入进行多次仿真,每次仿真的时间取为 60 min。(5) 本文设计的控制器同定时控制、普通模糊控制对比。信号控制参数如下:每个相位的最小绿灯时间为 15 s;直行相位最大绿灯时间为 60 s,左转相位最大绿灯时间为 40 s;黄灯时间为 5 s,全红时间取为 2 s。

4.3 仿真结果

选取信号交叉口的平均延误、平均排队队长度、平均停车次数、平均行程速度、平均行程时间和交叉口平均通过量为控制效果评价指标。低交通量、早高峰期和晚高峰期 3 方法下的仿真效果分别如表 4、表 5 和表 6 所示。

从仿真结果可以看出,相对于定时控制而言,模糊控制在减少平均延误、行程时间,疏散排队长度和提高行程车速方面有更好的优势,在交叉口平均交通量方面也有提高,而本文设计的多级模糊控制又比普通的模糊控制效果更好。从采集到的数据表中可以知道在高峰时期的路口进口车道到达车辆数还是存在较大的差异,本文控制模型的相序优化

表 4 低交通流控制效果

Tab. 4 Control effect of low traffic flow

仿真 次数	控制 方法	平均通 过量/ ($\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)	停车 率	平均 延误/ s	平均行 程时间/ s	平均行 程车速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均 队长/ pcu
1	定时	2 536	0.767	26.3	37.2	16.2	7
	普通模糊	2 534	0.775	22.0	32.1	17.4	5
	本文方法	2 542	0.758	20.3	29.7	18.6	4
2	定时	2 525	0.761	28.9	38.5	16.7	6
	普通模糊	2 541	0.757	23.3	32.3	17.7	4
	本文方法	2 553	0.752	20.0	30.1	18.7	3
3	定时	2 543	0.748	28.5	38.6	16.7	7
	普通模糊	2 560	0.753	22.8	32.5	17.9	5
	本文方法	2 567	0.747	20.6	30.4	18.8	4

表 5 早高峰期交通流控制效果

Tab. 5 Control effect of traffic flow in morning peak period

仿真 次数	控制 方法	平均通 过量/ ($\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)	停车 率	平均 延误/ s	平均行 程时间/ s	平均行 程车速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均 队长/ pcu
1	定时	3 907	0.876	45.7	54.8	10.5	14
	普通模糊	4 036	0.869	38.9	47.7	12.2	10
	本文	4 145	0.857	36.1	44.2	13.5	9
2	定时	3 926	0.868	45.5	54.9	10.1	15
	普通模糊	4 061	0.876	39.3	49.4	12.8	11
	本文	4 153	0.857	35.8	44.2	13.9	8
3	定时	3 917	0.877	46.8	55.7	10.9	14
	普通模糊	4 016	0.873	39.1	50.4	12.7	10
	本文方法	4 132	0.861	35.9	45.6	13.6	8

表 6 晚高峰期交通流控制效果

Tab. 6 Control effect of traffic flow in evening peak period

仿真 次数	控制 方法	平均通 过量/ ($\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)	停车 率	平均 延误/ s	平均行 程时间/ s	平均行 程车速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均 队长/ pcu
1	定时	3 678	0.843	41.7	53.1	11.6	12
	普通模糊	3 789	0.851	32.4	42.1	13.4	8
	本文	3 833	0.837	29.6	38.3	14.7	6
2	定时	3 651	0.839	42.4	53.6	10.9	12
	普通模糊	3 823	0.843	32.7	42.6	13.4	7
	本文	3 862	0.831	28.9	39.8	14.5	7
3	定时	3 677	0.843	42.3	53.9	11.4	11
	普通模糊	3 791	0.846	32.6	42.5	13.2	8
	本文方法	3 884	0.834	30.3	38.9	14.6	7

模块采用基本主相的相序不变的方式，因此，在减少延误方面有相对更好的优势。至于停车率方面，

定时控制的停车率并不是任何情况都比模糊控制模型来的高，主要是车道上一次排队的车辆没有全部疏散完毕的原因，致使使模糊控制下的停车率有时较高。同时，由于系统输入模型采用的是随机分布，同样的参数在执行的不同的仿真次数对仿真结果有一定的影响，但本文仿真时间为 60 min，相对较长，因此，其对最后的结果影响并不明显。

5 结论

文中基于现有国内外学者对交叉口信号模糊控制研究的基础上，对单个交叉口的模糊控制进行了系统的分析和研究。提出了一种信号控制多级模糊控制模型，考虑了交通流的变化对信号配时的影响，采用多层模糊控制易于规则的提取，且采用基本主相相序不变可以克服相位无序轮换带来的缺点，在保证交通安全的基础上使信号控制可以较好地适应普通相位车流量不平衡的状况，提高了控制效率。最后，根据交叉口系统模型建立交叉口的微观仿真系统，仿真结果表明，本文提出的控制模型能够根据交通状况自适应调节相序和绿灯时间，有效的减少了车辆平均延误，能够满足交叉口控制器实时性的要求，并且较于定时控制模型和一般的模糊控制模型都有改进。另外，本文仅考虑机动车流，没有考虑混合交通的问题，这与国情不符，还需进一步研究交叉口下的混合交通模糊控制问题。

参考文献:

References:

[1] 杨兆升. 新一代智能化交通控制系统关键技术及其应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
YANG Zhao-sheng. Key Technologies and Applications of a New Generation Intelligent Traffic Control System [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.

[2] 梁晓, 殷勇辉, 吴颜. 单交叉口信号配时的动态优化 [J]. 公路交通技术, 2010 (2): 125 - 127.
LIANG Xiao, YIN Yong-hui, WU Yan. Dynamic Optimization for Signal Timing at Single Crossings [J]. Technology of Highway and Transport, 2010 (2): 125 - 127.

[3] 徐建闽, 杨兆升. 交通管理与控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
XU Jian-min, YANG Zhao-sheng. Traffic Management and Control [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[4] 邵春福. 交通流理论 [M]. 北京: 电子工业出版

- 社, 2012.
- SHAO Chun-fu. The Theory of Traffic Flow [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [5] 牛虎, 李桂萍, 林磊. 城市单点交叉口信号灯模糊控制建模与仿真 [J]. 交通标准化, 2009 (17): 32 - 36.
- NIU Hu, LI Gui-ping, LIN Lei. Fuzzy Control Modeling and Simulation for Urban Traffic Lights at Signal Intersection [J]. Transport Standardization, 2009 (17): 32 - 36.
- [6] 徐勋倩, 黄卫. 单路口交通信号多相位实时控制模型及其算法 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22 (3): 413 - 416.
- XU Xun-qian, HUANG Wei. Multiphase Traffic Signal Real-time Controlling Model of Isolated Intersection and Its Algorithm [J]. Control Theory and Applications, 2005, 22 (3): 413 - 416.
- [7] LIU Hong-chao, BALKE K N, LIN Wei-hua. A Reverse Causal-effect Modeling Approach for Signal Control of an Oversaturated Intersection [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2008, 16 (6): 742 - 754.
- [8] 李瑞敏, 陆化普. 基于遗传算法的交通信号控制多目标优化 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29 (5): 85 - 88.
- LI Rui-min, LU Hua-pu. Traffic Signal Control Multi-object Optimization Based on Genetic Algorithm [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29 (5): 85 - 88.
- [9] 何兆成, 曾伟良. 变权系数遗传算法在交叉口信号控制中的应用 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (11): 121 - 125.
- HE Zhao-cheng, ZENG Wei-liang. Genetic Algorithm Based on Variable Weighting Coefficient and Its Application in Traffic Signal Control [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (11): 121 - 125.
- [10] 首艳芳, 徐建闽. 信号交叉口多目标动态决策模型及其优化方法 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (11): 92 - 97.
- SHOU Yan-fang, XU Jian-min. Multi-objective Dynamic Decision-making Model of Signalized Intersection and Its Optimization Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (11): 92 - 97.
- [11] BEAUCHAMP-BAZE G. A Fuzzy Logic Based Phase Control for Traffic Control [C]//FUZZ-IEEE 97. Spain: The IEEE Neural Network Council, 1997, 1533 - 1539.
- [12] 李瑞敏, 陆化普. 基于交通需求强度的路口多层模糊控制模型研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30 (1): 1 - 4.
- LI Rui-min, LU Hua-pu. Research of Multilayer Fuzzy Control Model Based on Traffic Demand Intensity [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2006, 30 (1): 1 - 4.
- [13] 许伦辉, 习利安, 袁路生. 孤立交叉口多相位自适应模糊控制及其神经网络实现 [J]. 中国公路学报, 2005, 18 (3): 90 - 93.
- XU Lun-hui, XI Li-an, ZHONG Lu-sheng. Adaptive Multiphase Fuzzy Control of Single Intersection Based on Neural Network [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (3): 90 - 93.
- [14] 段后利, 李力, 李志恒, 等. 城市交叉口自学习模糊控制策略 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50 (5): 709 - 713.
- DUAN Hou-li, LI Li, LI Zhi-heng, et al. Learning Based Fuzzy Control Strategy Design for a Signalized Intersection [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2010, 50 (5): 709 - 713.
- [15] BHAN G H, BENEKOHAL R F. A High Fidelity Traffic Simulation Model Based on Cellular Automata and Car-following Concepts [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2004, 12: 1 - 32.
- [16] 邝先验, 邹小洪. 微观交通仿真车辆随机生成模型分析与设计 [J]. 江西理工大学学报, 2006, 27 (3): 20 - 23.
- KUANG Xian-yan, ZOU Xiao-hong. The Analysis and Design of Stochastic Generation Car Model in Microscopic Traffic Simulation [J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2006, 27 (3): 20 - 23.
- [17] 杨文臣, 张轮, 何兆成, 等. Matlab 与 VC++ 混合编程及其在交通信号两级模糊控制中的应用 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (9): 123 - 128.
- YANG Wen-chen, ZHANG Lun, HE Zhao-cheng, et al. Matlab & VC++ Hybrid Programming and Its Application in Two-stage Fuzzy Control for Urban Traffic Signals [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (9): 123 - 128.