

doi: 10. 13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2015. 0727

基于 Markov 模糊控制模型的 交叉口设计与仿真研究

刘赞科¹ 汤旻安^{1,2} 郑悦³

- (1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050;
3. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对城市交叉口交通流的特点, 提出了一种基于 Markov 模型的模糊交叉口信号控制算法。该算法采用模糊逻辑控制, 结合马尔科夫链理论对交通流分布概率进行分析, 通过模糊控制器控制绿灯延时长度, 来解决交通流不平衡以及配时不合理等问题, 该方法能够有效的适应城市交叉口实时变化的交通状况。研究结果表明, 该控制算法能够有效减少车辆平均延误时间, 满足实时控制的要求。

关键词: 智能交通; 信号控制; 模糊逻辑控制; 马尔科夫链

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7445(2015)03-0727-09

Design and simulation analysis of intersection based on Markov model and fuzzy control

LIU Zan-ke¹, TANG Min-an^{1,2}, ZHENG Yue³

- (1. School of Automation and Electrical Engineering Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Mechanical and Electronic Engineering Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
3. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control Ministry of Education
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: According to the characteristics of intersection traffic flow in cities, a kind of fuzzy intersection signal control algorithm based on Markov model is put forward. This algorithm adopts the fuzzy logic control and the theory of Markov chain to analyze the distribution probability of traffic flow. The algorithm regulates the time delay of green light by means of fuzzy controller, in order to deal with the problems of unbalance of traffic flow and unreasonable time allocation. This method can adapt to the real-time changes of traffic situation in city intersection. The results show that the presented control algorithm can reduce the average delay time of vehicles and meet the request of real-time controlling.

Key words: intelligent transportation; signal control; fuzzy logic control; markov chain

收稿日期: 2015-02-21; 修订日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61263004); 甘肃省科技支撑计划项目(090GKCA009, 1304GKCA023); 兰州市科技攻关计划项目(2013-4-18)

通讯作者: 汤旻安(1973-), 男, 陕西勉县人, 兰州交通大学副教授, 博士; E-mail: feiyang_lzk@163.com。

0 引言

随着社会经济的快速发展,以及私家车的普及,交通问题已经成为社会普遍关注的问题。城市道路交叉口是城市道路上各类交通汇合、转换、通过的地点,是管理、组织道路各类交通的控制点,合理利用交叉口交通信号控制已经成为城市道路系统点、线、面交通路网的基础。尤其在非均衡流量交叉口中,已成为城市道路网中的咽喉,合理有效的解决非均衡交叉口交通流量问题,成为重要的课题。张惠玲等^[1]借助 K 近邻预测算法,结合交叉口的流量对下个周期的延误进行预测,并使用预测的延误参数对下个周期的控制方案优化方法进行了研究^[1]; Pappis 等^[2]借鉴了交通警察疏导车流的经验,将模糊控制的概念引入到了交叉口交通信号控制中,设计出了一个单交叉口信号模糊控制器,仿真结果表明比传统控制方法有其优越性。各国学者也相继提出了改进的模糊控制算法^[3-8],控制效果进一步得到改善。

本文将 Markov 链模型引入到交叉口控制中,作为模糊控制器的输入,利用模糊控制器用于四相位交叉口交通信号控制,仿真研究结果表明,与传统模糊控制器相比较,本文提出的方法能有效减少交叉口车辆的平均延误。

1 Markov 交叉口交通状态模型

1.1 非均衡交通流量交叉口特点

狭义上的非均衡交通流量交叉口是指交叉路口几何形状的不规则导致车辆经过交叉口时造成的车流量的非均衡型;而广义上的非均衡交通流量交叉口通常是指各个方向车流量的不同,在途径交叉路口时造成的车流量的非均衡型

交通流存在时变性、随机性和不确定性必然导致交叉口交通流量分布不均衡,不能按照传统的定时、定相序控制以及经典的感应控制方法来对交叉口进行均衡控制,会导致各相位时间分配不合理,造成车辆通行效率的低下。

经分析右转车流可随时通过交叉口,不会对其他方向的通行车辆造成非常大的影响,因此本文在信号控制中不予考虑右转车流。为了研究的方便性,将交叉路口的几何形状进行理想化处理如图 1 所示。

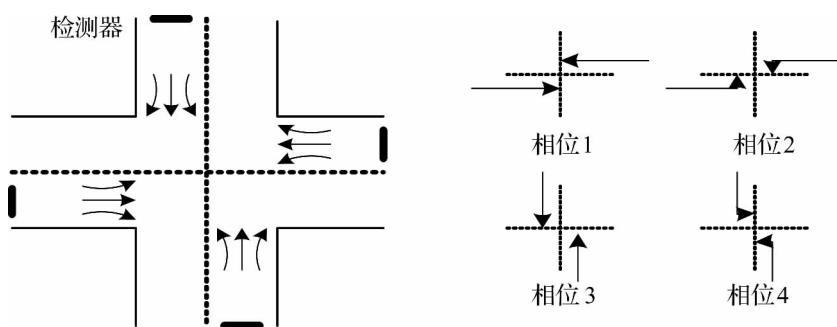


图 1 交叉口四相位控制图

Fig. 1 Four phase signal control for a single intersection

1.2 Markov 交叉口预测模型

通常情况下,交叉口交通流量具有明显的随机性、时变性,导致每个周期内车辆在各相位内分布也具有明显的随机性。而 Markov 理论可以分析随机事件变化并且 Markov 过程描述了一个系统的状态及其状态与状态之间转移的理论,能够通过 Markov 过程来获取到不同状态之间的转移概率,进而能够预测系统状态未来的变换趋势,采用模糊控制的算法,对交叉口进行控制。因此可以将 Markov 理论引入道路交叉口控制中^[9-10]。

用 P_{ij} 表示对象由状态 S_i 经过一步转移至状态 S_j 的概率,即一步转移概率矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

称为一步转移概率, 其中元素具有如下性质:

- ① $0 \leq p_{ij} \leq 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)$;
- ② $\sum_j p_{ij} = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

如果系统从状态 S_i 恰好经 k 步转移到状态 S_j 的概率为 $p_{ij}^{(k)}$, 建立 k 步转移矩阵:

$$P^{(k)} = \begin{bmatrix} p_{11}^{(k)} & p_{12}^{(k)} & \cdots & p_{1n}^{(k)} \\ p_{21}^{(k)} & p_{22}^{(k)} & \cdots & p_{2n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1}^{(k)} & p_{n2}^{(k)} & \cdots & p_{nn}^{(k)} \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

假设初始状态分布为 $X^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$, 则 k 步概率分布表示为 $X^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$, 由上述可知, 马尔科夫预测模型为:

$$\begin{bmatrix} x_1^{(k)} \\ x_2^{(k)} \\ \vdots \\ x_n^{(k)} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \\ \vdots \\ x_n^{(0)} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}^k。 \quad (3)$$

2 模糊交叉口交通信号控制建模

本文设计的控制器为两级模糊控制^[11-12], 系统包含三个模块: 当前相位控制模块、下一相位控制模块和决策模块, 其中每个模块都包含一个模糊控制器, 如图 2 所示。

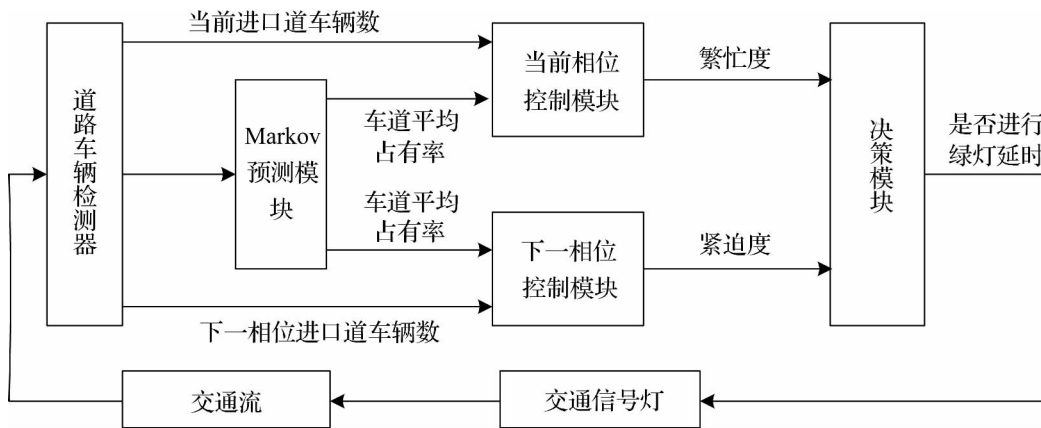


图 2 交叉口两级模糊控制系统结构图

Fig. 2 Fuzzy control system's structure of intersection

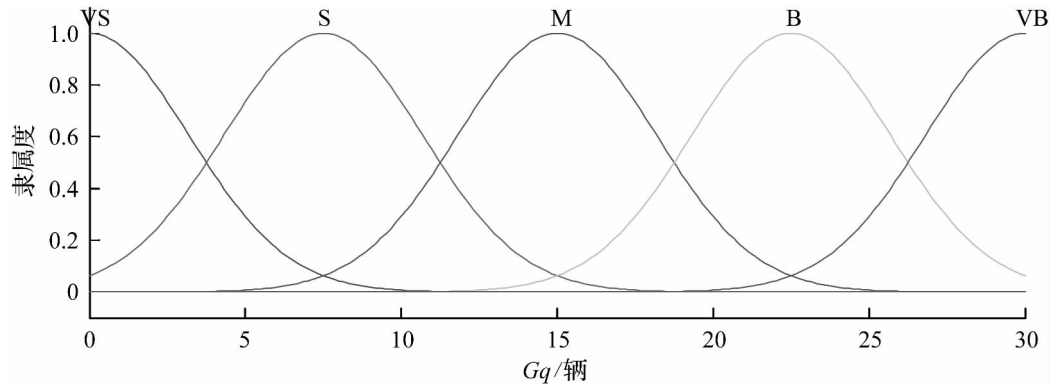
2.1 当前相位模糊控制器

以当前相位进口道的车辆数 G_q 和车道车辆平均占有率 G_v 作为模糊控制器的输入量, 当前相位的繁忙度 G_u 作为输出变量。

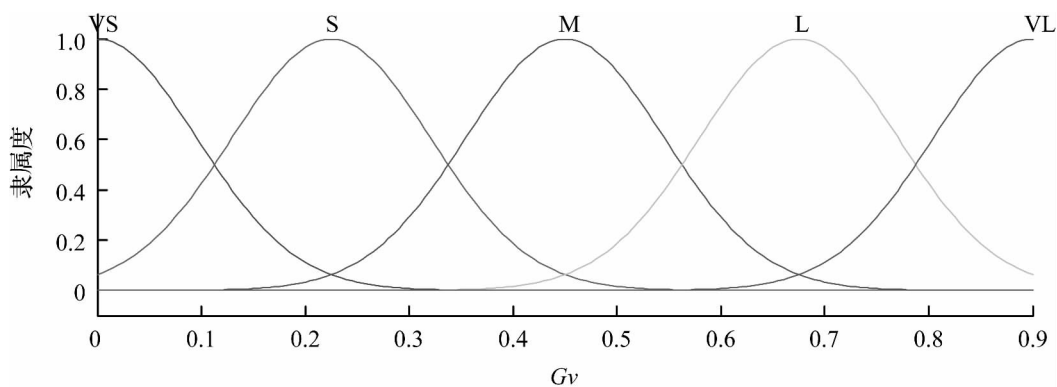
2.1.1 模糊化

模糊控制器的设计主要包括如下步骤:

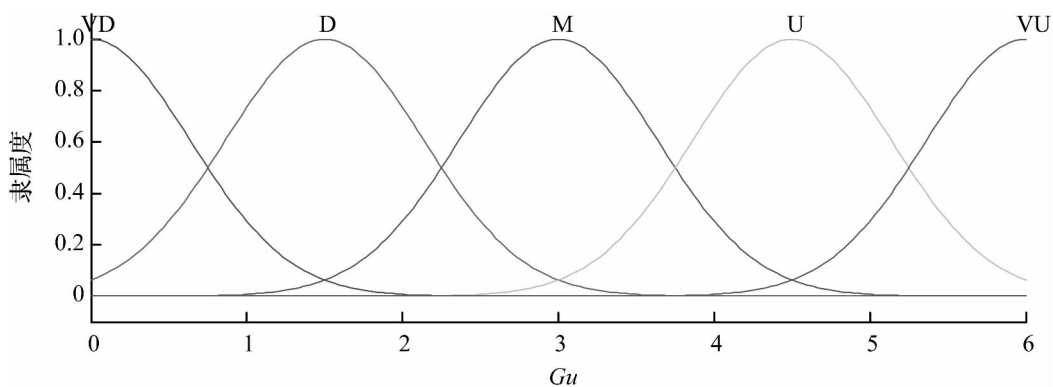
G_q 的基本论域为 $\{1, 2, 3, \dots, 30\}$; 模糊集: {很少(VS), 少(S), 中等(M), 多(B), 很多(VB)}。 v 的基本论域为 $\{0, 0.1, \dots, 0.9\}$; 模糊集: {很低(VS), 低(S), 中等(M), 高(L), 很高(VL)}。 G_u 的基本论域为 $\{0, 1, 2, \dots, 6\}$; 模糊集: {很低(VD), 低(D), 中等(M), 高(U), 很(VU)}。离散后, G_q 的论域 $\{0, 3, 6, \dots, 27, 30\}$; G_v 的论域 $\{0, 0.09, 0.18, \dots, 0.45\}$; G_u 的论域 $\{0, 1, 2, \dots, 6\}$; 比例因子均取 1。隶属度函数均为高斯函数。当前进口道车辆数、车道车辆平均占有率和当前相位的繁忙度隶属度函数曲线如图 3 所示。



(a) 当前相位进口道车辆数的隶属度函数



(b) 当前相位车道车辆平均占有率的隶属度函数



(c) 当前相位繁忙度的隶属度函数

图3 各变量的隶属度函数

Fig. 3 Membership function of each variable

2.1.2 模糊推理

模糊推理采用 Mamdani 推理法, 即模糊语句为 “if A and B then C”, 对于第 i 条规则, 若 G_q 为 G_{q_i} 且 G_v 为 G_{v_i} , 则 G_u 为 G_{u_i} , 其模糊关系 $R_i = (G_{q_i} \times G_{v_i})^{T_1} \times G_{u_i}$, 通过总结专家获得当前相位的模糊控制规则, 如表 1 所示。

表 1 当前相位模糊控制规则
Tab. 1 Fuzzy control rules of current phase

G_u		G_q				
		VS	S	M	B	VB
G_v	VS	VD	VD	D	M	U
	S	VD	VD	D	M	U
	M	VD	D	M	U	VU
	L	D	D	M	VU	VU
	VL	D	M	U	VU	VU

2.1.3 解模糊化

与最大隶属度法相比较,重心法具有更平滑的输出推理控制,因此本文采用重心法对输出 G_u 进行解模糊。

重心法是取隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心为模糊推理的最终输出值,其计算公式为:

$$G_u = \frac{\int_0^6 G_u \mu(G_u) d(G_u)}{\int_0^6 \mu(G_u) d(G_u)}$$

2.2 下一相位模糊控制器

以下一相位进口道的车辆数 R_q 和车道车辆平均占有率 R_v 作为模糊控制器的输入量,以红灯相位交通流的紧迫度 R_u 作为输出变量。其中,变量 R_q 、 R_v 和 R_u 的论域和隶属度函数与“2.1 节”所述相同。根据专家经验获得下一相位的模糊控制规则,如表 2 所示。

表 2 下一相位模糊控制规则
Tab. 2 Fuzzy control Rules of next phase

R_u		R_q				
		VS	S	M	B	VB
R_v	VS	VD	VD	D	D	M
	S	VD	D	D	M	M
	M	D	D	M	U	U
	L	M	M	U	VU	VU
	VL	M	VU	VU	VU	VU

2.3 决策模糊控制器

以当前相位的繁忙度 G_u 和下一相位的紧迫度 R_u 作为决策模糊控制器的输入变量,当前相位的绿灯延长时间 J_s 为输出变量,其中 J_s 的模糊隶属度函数如图 4 所示。

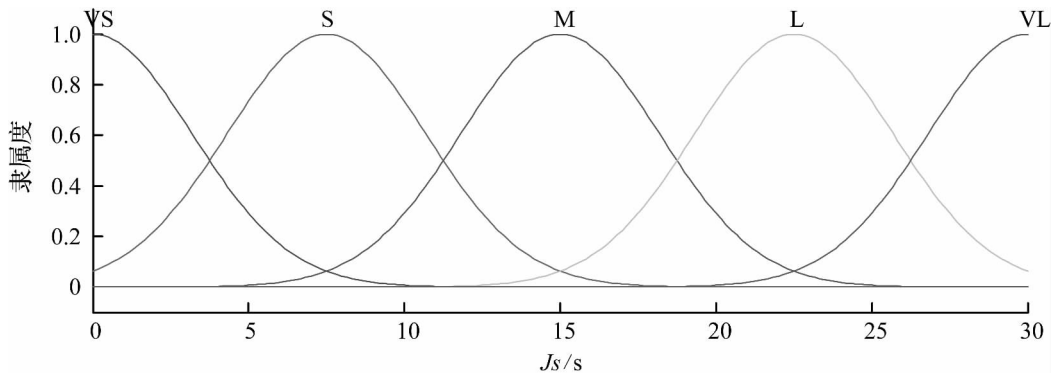


图 4 绿灯延时隶属度函数

Fig. 4 Function of subjection green time

去模糊化仍采用重心法。根据专家经验及实践经验,对当前相位繁忙度和下一相位紧迫度进行模糊推理。其模糊规则如表3所示。

表3 决策模块模糊控制规则

Tab.3 Rules of fuzzy control

J_s		R_u				
		VD	D	M	U	VU
G_u	VD	S	S	VS	VS	VS
	D	S	S	S	VS	VS
	M	M	L	M	S	S
	U	VL	L	L	M	S
	VU	VL	VL	VL	L	M

输出变量 J_s 模糊集: {很短(VS), 短(S), 中等(M), 长(L), 很长(VL)}; 论域: {0, 1, 2, ..., 30}, 离散论域: {0, 3, 6, ..., 30}。

2.4 控制算法

控制算法如下:

Step 1: 从绿灯相位开始, 分别指定各相位的最短绿灯时间 G_{\min} 和最大绿灯时间 G_{\max} ;

Step 2: 给各通行相位开始时最短绿灯时间 $T = G_{\min}$;

Step 3: 在一定时间段内测得当前相位和下一相位车道上的车辆数, 分别记为 G_q 和 R_q , 通过 Markov 转移矩阵分别测得当前相位和下一相位车道车辆平均占有率, 分别记为 G_v 和 R_v , 其中 G_q 、 G_v 和 R_q 、 R_v 分别作为一级模糊控制器的当前相位和下一相位模糊控制器的输入。

Step 4: 根据 step 3 中的相关变量经过模糊推理后得一级模糊控制器的输出——当前相位的繁忙度 G_u 和下一相位的紧迫度 R_u , 并作为二级模糊控制器的决策模块模糊控制器的输入。

Step 5: 决策模糊控制器根据 G_u 和 R_u , 再次经过模糊推理后得到二级模糊控制器的输出——当前绿灯相位的延长时间 J_s ; 系统再根据 J_s 的大小来确定相邻相位是否切换。如果切换返回 step2, 如果不切换, 保持当前相位不变, 绿灯时间变为 $G = G_{\min} + J_s$, 返回 step 3。

3 实例研究

3.1 实验数据

本文以兰州市城关区南关什字为研究对象, 根据文献《兰州市综合交通规划》^[13] 中的数据, 建立数据集, 对南关什字交通信号控制进行分析研究和评价。

3.2 实验方法和步骤

① 分别建立交叉口四个进口道的车辆进入时原始数据集; ② 为研究方便, 选取交叉口西进口部分周期车辆进入数据, 运用 Markov 模型预测各个车道的车辆占有率; ③ 根据检测器检测到的车辆数据, 得到各个车道具体的车辆数, 同时运用模糊控制对交叉口交通信号进行实时控制; ④ 以车辆平均延误时间为评价目标函数, 得到平均延误时间。对调查到的交通数据进行统计分析, 记录兰州市南关什字某一时段西进口两个周期内的车行流量, 如表4所示。

表4 西进口车流量

Tab.4 Traffic of west

行驶方向	前一周期/辆	当前周期/辆
直行	50	44
左转	35	37
右转	30	34

表 5 中的数据记录了当前周期第一相位内,直行、左转、右转方向之间的车辆转移。

表 5 西进口各行驶方向的车辆转移

Tab. 5 Vehicle transfer of west

行驶方向	直行/辆	左转/辆	右转/辆
直行	39	6	5
左转	2	30	3
右转	3	1	26

根据表 4 可知,当前周期直行方向上将有 38.3% 的车辆,左转方向上将有 32.2% 的车辆进入,右转方向上将有 29.5% 的车辆进入,假定短期内转移概率矩阵保持不变,根据式(3)可以预测出几个周期内交通流量占有率,如下公式可知:

$$X^{(k)} = X^{(0)} P^{(k)} \rightarrow \begin{bmatrix} x_s^{(k)} \\ x_l^{(k)} \\ x_r^{(k)} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_s^{(0)} \\ x_l^{(0)} \\ x_r^{(0)} \end{bmatrix}^T P^{(k)},$$

式中: x_s, x_l, x_r 分别为西进口直行车道、左转车道、右转车道车辆的占有率。

3.3 实验结果

3.3.1 Markov 模型预测车辆占有率

由表 5 可以得出车辆的转移概率矩阵为:

$$P = \begin{bmatrix} 0.780 & 0 & 0.120 & 0 & 0.100 & 0 \\ 0.057 & 1 & 0.857 & 1 & 0.085 & 8 \\ 0.100 & 0 & 0.033 & 3 & 0.866 & 7 \end{bmatrix},$$

因此,多步转移概率矩阵为:

$$P^{(2)} = \begin{bmatrix} 0.625 & 3 & 0.199 & 8 & 0.175 & 0 \\ 0.102 & 1 & 0.744 & 3 & 0.153 & 6 \\ 0.166 & 6 & 0.069 & 4 & 0.764 & 0 \end{bmatrix},$$

$$P^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.516 & 6 & 0.252 & 1 & 0.231 & 3 \\ 0.137 & 5 & 0.655 & 3 & 0.207 & 2 \\ 0.210 & 3 & 0.104 & 9 & 0.684 & 8 \end{bmatrix},$$

$$P^{(4)} = \begin{bmatrix} 0.440 & 5 & 0.285 & 8 & 0.273 & 8 \\ 0.165 & 4 & 0.585 & 1 & 0.249 & 6 \\ 0.238 & 5 & 0.138 & 0 & 0.623 & 5 \end{bmatrix},$$

...

$$P^{(k)} = PP^{(k-1)}。$$

由此可知,西进口各车道未来一段时间内车道占有率。如表 6 所示:

表 6 车道占有率

Tab. 6 Lane share

周期	x_s	x_l	x_r
1	0.383 0	0.322 0	0.295 0
2	0.346 6	0.331 8	0.321 6
3	0.321 5	0.336 7	0.341 9
4	0.304 2	0.338 5	0.357 3
5	0.292 3	0.338 5	0.369 2
⋮	⋮	⋮	⋮

按照同样的方法,分别可以得到南进口、东进口和北进口的车辆情况。同时,利用交叉路口中的检测器检测出各进口道的车辆数,最后利用模糊逻辑控制对交叉口交通信号进行实时控制。

3.3.2 结果对比分析

为验证该方法的可行性,以交叉口的平均延误为控制效果评价指标,用 Matlab 进行仿真,每次仿真时间设置为 1 200 s,选取南关什字某一时段进行仿真分析,如表 7 和图 5 所示。

表 7 仿真结果
Tab. 7 The simulation result

方法	仿真次数														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
模糊控制	31.5	30.89	32.27	31.93	31.28	32.97	31.18	31.77	31.19	32.64	30.77	30.18	31.09	30.57	31.78
本文方法	26.3	27.23	25.56	24.4	27.8	23.22	25.12	25.87	27.05	24.55	26.22	24.69	26.99	25.76	24.16
提高/%	16.5	11.85	20.79	23.58	11.13	30.57	19.43	18.57	13.27	24.79	14.79	18.19	13.19	15.73	23.98

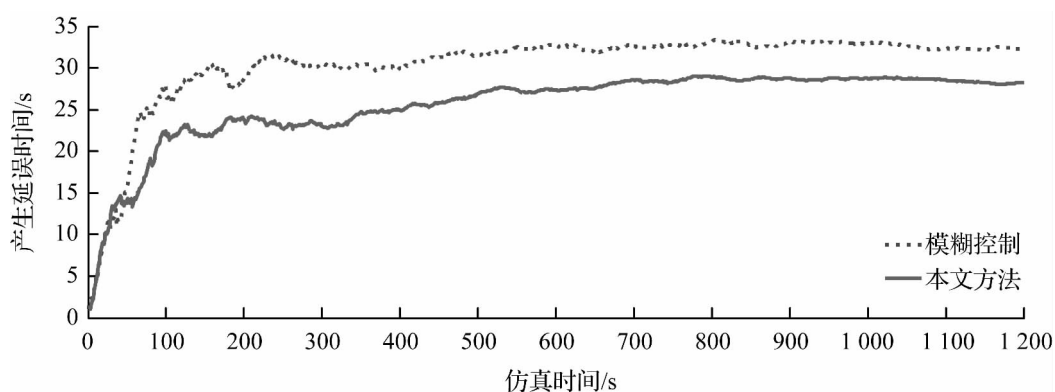


图 5 平均延误比较

Fig. 5 On average delay of group

从仿真结果可以看出,相对模糊控制,本文方法在减少车辆延误时间有较大的优势,每次仿真车辆平均延误均能减少 10% 以上。主要是在模糊控制算法中引进了 Markov 模型对当前相位的车道车辆占有率提前预判,同时考虑了下一相位的车辆数以及车道车辆平均占有率,从而保证了模糊控制器能够协调各方向车辆平均延误时间,防止某一方向等待的车辆数过多而导致整体平均延误时间过大。相比较,其他学者大多是将 Markov 方法用于短时交通流预测,很少结合控制算法进行交通信号的控制,而本文采用模糊控制与 Markov 模型相结合,实现了专家的控制经验,实现了交通系统的智能控制,从而验证了本文方法具有一定优越性,该方法是可行的。

4 结 语

由于交通流的随机性、时变性和难以建立准确的数学模型等特点,使得 Markov 模型能够成功应用到交通控制领域中。本文通过研究了典型的四相位交叉口,运用 Markov 链分析了车辆分布,建立各相位时间分配模型,同时以交叉口车辆平均延误作为性能评价指标,进行仿真实验。结果表明,相比于模糊控制,本文提出的方法能够有效减少交叉口的平均延误。

下一步将本文方法应用与城市干道交通信号中,进一步提高干道协调控制效率。

参考文献:

- [1] 张惠玲,王益,尹宝计,等. 基于实时延误的交叉口控制方案优化分析[J]. 广西大学学报:自然科学版,2015,40(1): 149-154.
- [2] PAPPIS C P, MAMDANI, EBRAHIM H. A fuzzy controller for a traffic junction[J]. IEEE Transactions on Systems, Man

and Cybernetics ,1977 ,7(10) :707-717.

- [3] 郭旭明,李瑞敏,张雄飞. 基于遗传算法的交叉口信号控制可靠优化模型研究[J]. 公路工程,2012,37(4):44-46.
- [4] ONIEVA E, OSABA E, ZHANG X, et al. GABF: Genetic algorithm with base fitness for obtaining generality from partial results: Study in autonomous intersection by fuzzy logic[J]. Applied Intelligence, 2014, 41(1): 1-12.
- [5] 许伦辉,刘邦明. 城市交通信号控制与仿真[J]. 公路交通科技,2013,30(9):108-115.
- [6] HENRY J J, FARGES J L, GALLEGRO J L. Neuro-fuzzy techniques for traffic control[J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(6):755-761.
- [7] 陈小红,钱大琳,石冬花. 基于慢行交通的交叉口信号配时多目标优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(2):106-111.
- [8] 于泉,戴帅,任福田. 信号交叉口固定配时控制方案可靠度研究[J]. 北京工业大学学报,2007,33(10):1066-1069.
- [9] 胡枫. 基于马尔科夫模型的短时交通流预测研究[D]. 南京邮电大学自动化学院,2013.
- [10] 姜彦江,马艳丽,韩丽飞. 基于马尔科夫链的区域综合交通客运结构预测[J]. 交通运输系统工程与信息,2012,12(3):1-5.
- [11] 吴银凤,邝先验,许伦辉. 信号交叉口模糊逻辑自适应控制[J]. 微计算机信息,2007,23(4):103-105.
- [12] 臧利林,贾磊,林忠琴. 基于模糊逻辑的交通信号控制与仿真研究[J]. 公路交通科技,2006,23(4):124-127.
- [13] 清华大学交通研究所. 兰州市综合交通规划报告[R]. 兰州:兰州市规划土地管理局,2003.

(责任编辑 梁碧芬)