

兼顾效率与公平的模糊交通控制模型

乔 健, 宣慧玉, 姜锦虎
(西安交通大学管理学院, 710049, 西安)

摘要: 为了在控制过程中既强调交通效率又兼顾交通公平, 提出了一种新的信号交叉口模糊逻辑控制模型, 该模型由 2 个子控制器构成. 当前绿灯结束时, 通行相位控制器根据各车道的车辆数和平均等待时间计算它们的交通紧急度, 然后根据交通紧急度选择下一个通行相位, 通行时间控制器则根据被选相位中车辆数最大车道的交通情况来决定通行时间. 仿真实验结果表明, 该模型与感应控制和 Pappis 模型相比, 在车流量很小时控制效果相近, 但随着各向车流量的增加, 该模型开始优于其他模型, 车流量越大优势越明显, 而且变化十分平稳, 不仅提高了交通效率, 而且使交通供给更加公平.

关键词: 模糊交通控制; 信号交叉口; 效率与公平

中图分类号: U491 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)01-0120-05

Efficiency and Fairness Based Fuzzy Traffic Control Model

Qiao Jian, Xuan Huiyu, Jiang Jinhu
(School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new fuzzy logic control model for signalized intersection is proposed, where the efficiency and the fairness of traffic are considered simultaneously during the control process. The model is composed of two sub controllers. When current green time is over, green phase controller evaluates all lanes' traffic urgency degrees in the light of the number of vehicles and the average waiting time, and then the next green phase gets to be selected by this controller in conformity of the traffic urgency degrees. The green time of the next green phase is determined by green time controller according to the traffic situation of the lane on which the current number of vehicles is the largest among those lanes that belong to this phase. Compared with vehicle actuated control and Pappis' model, the simulation results show that the control effects are similar under the condition of sparse traffic flux; and the proposed model begins to outperform the competing models with the gradual increasing flux, especially in both efficiency and fairness.

Keywords: fuzzy traffic control; signalized intersection; efficiency and fairness

交通控制是缓解城市交通拥堵的重要手段. 自从 Pappis 等人^[1]于 1977 年设计了第 1 个信号交叉口模糊控制模型以来, 该领域的研究发展很快, 控制模型从单车道扩展为多车道^[2]、从两相位扩展为多相位^[3]、从无左转交通扩展为有左转交通^[4]和从相序固定扩展为相序可变^[5-7]等等, 在提高交通效率方面成果显著, 但是这些模型均未考虑交通公平的问题. 由于人是交通系统的重要组成部分, 因此重视交通效率的同时也不应忽视交通公平. 本文以交通安

全为前提, 提出了一种兼顾效率与公平的信号交叉口模糊控制模型, 并通过仿真实验与感应控制和 Pappis 模型进行对比, 证明了该模型的设计是合理且有效的.

1 模型的逻辑结构

假设交叉口每条入口车道上均埋设有 2 个检测线圈: 一个位于上游, 用于检测车辆的到来信息; 一个位于停车线处, 用于检测车辆的离去信息. 模型由

通行相位控制器和通行时间控制器组成. 为了避免引起出行者的错觉和紧张,假定相位构成固定,并通过调整相序和信号配时达到兼顾效率与公平的目的. 控制过程分为 2 个阶段(见图 1): 当前绿灯结束时,由通行相位控制器根据各车道的交通紧急度来选择下一个通行相位; 由通行时间控制器根据该相位中车辆数最多的车道决定绿灯时间.

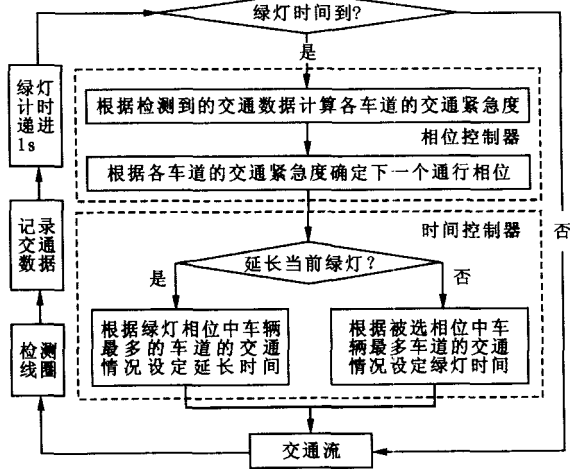


图 1 模型的逻辑结构

2 通行相位控制器

当前绿灯时间结束时,通行相位控制器将被启动以决定下一个通行相位,它有 2 个输入变量,即各车道的加权车辆数和这些车辆的平均等待时间 t_a . 输出变量是各车道的交通紧急度 u ,而加权车辆数

$$n_w = \frac{r_{\max} D}{r} \tag{1}$$

式中: $r_{\max}$ 是所有车道中的最大车辆到达率; r 是当前被计算车道的车辆到达率; n 是该车道的实际车辆数. 以 n_w 作为输入变量的目的是通过加权来处理实际车辆数,使车辆到达率不同的车道拥有同等的通行机会,以确保在各车道之间公平分配通行权. 将以 t_a 作为输入变量的目的是根据红灯相位各车道的平均等待时间,来适当控制绿灯相位的通行时间,以确保在各车道之间公平合理地分配通行时间. n_w 的模糊集为{小,中,大},其实际论域为 $[0, 20]$,计算论域为 $[0, 32]$; t_a 的模糊集为{短,中,长},其实际论域为 $[0, 300]$,计算论域为 $[0, 320]$; u 的模糊集为{很低,低,中,高,很高},其实际论域为 $[0, 60]$,计算论域为 $[0, 64]$. 所有模糊集的隶属度函数均采用梯形形式,可用四元组 $\langle a, b, c, d \rangle$ 表示梯形, a 、 b 、 c

和 d 分别代表 4 个顶点的横坐标,当 $b = c$ 时,梯形将演变为三角形. 规则库中共有 9 条模糊规则,例如:如果 n_w 小且 t_a 短,则 u 为很低. 根据经验确定的隶属度函数如图 2 所示,其中隶属度 μ 的值域为 $[0, 1]$. 模糊规则如表 1 所示. 模糊推理采用 Mamdani 算法,解模糊运算采用中心法^[8].

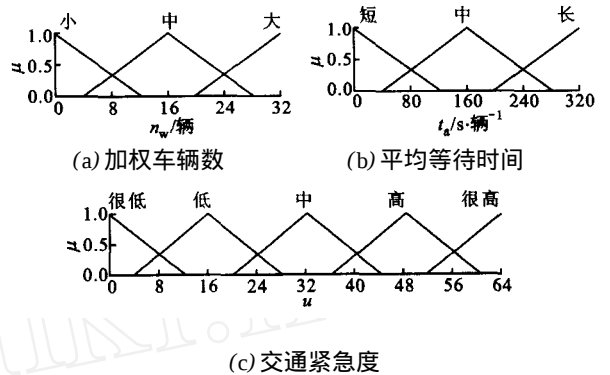


图 2 输入和输出变量语言值的隶属度函数

表 1 控制器的模糊控制规则								
n_w	小	小	小	中	中	中	大	大
t_a	短	中	长	短	中	长	短	长
u	很低	低	中	低	中	高	中	很高

对下一个通行相位的确定过程如下:当前绿灯时间结束时,计算每条车道的交通紧急度,并从中选出交通紧急度最大的车道,然后按照图 3 所示的决策过程确定下一个通行相位. 如果决策结果非惟一,则从结果中随机选择一个相位作为最终决策结果.

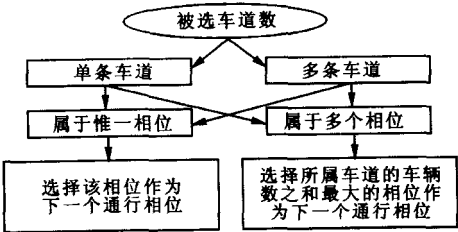


图 3 选择通行相位的决策过程

3 通行时间控制器

当下一个通行相位被通行相位控制器选定之后,通行时间控制器将被启动为该相位设定绿灯的时间. 如果绿灯相位被选为下一个通行相位,以清空该相位车辆数最多的车道为目标,延长绿灯时间

$$G = \min\{G + \max(1, D_{\max}/\bar{v}, n/s), G_{\max}\} \tag{2}$$

式中: $D_{\max}$ 表示该车道最后一辆车与停车线之间的距离; $\bar{v}$ 表示平均车速; s 为车道的饱和车流量; $G_{\max}$

表示绿灯时间的上限. 如果绿灯时间已到达上限, 则由通行相位控制器从其他相位中选择下一个通行相位. 如果红灯相位被选为下一个通行相位, 则

$$G = \min\{\max(G_{\min}, D_{\max}/\bar{v}, n/s), G_{\max}\} \quad (3)$$

式中: $G_{\min}$ 表示绿灯时间的下限.

4 仿真实验

为验证不同交叉口结构和交通流条件下模型的有效性, 采用 Visual C++ 7.0 编写仿真程序, 通过 2 个仿真实验进行感应控制、Pappis 模型和本文模型的性能对比. 基本仿真参数为: 每条车道上 2 个检测线圈之间的距离为 120 m, 平均车长为 5 m, 相邻车辆的最小间隙为 1 m; 绿灯下限为 10 s, 绿灯上限为 60 s, 黄灯间隔为 2 s, 车辆的平均加速度为 2 m/s^2 , 平均减速度为 -2 m/s^2 . 在现实交通流中, 车辆的到达是随机和离散的, 观测结果表明, 交通流拥挤程度和观测周期不同, 车辆到达数的分布特点^[9]也不同, 当交通流的拥挤程度较低且观测周期较短时, 车辆到达数的分布符合泊松分布. 本文研究的是交通流的非拥挤情况, 因此假定车辆的到达规律服从泊松分布.

感应控制采用递进方式, 当前绿灯结束时, 如果通行车道的上游检测线圈检测到有车辆到来, 而且当前绿灯时间未到达上限时, 绿灯时间则延长 3 s; 否则将通行权交给下一个相位, 并以 $G_{\min}$ 作为初始绿灯时间.

交叉口的通行能力即反映了交通效率, 通常用平均延误、停车率 p_s 等指标衡量, 但交通公平问题一直未受到关注, 直到目前还缺乏衡量标准. 在不考虑其他因素的情况下, 可从时间消耗的角度来理解交通公平, 如果所有车辆在交叉口处车辆被检测区域内的延误时间完全相等, 理论上就可认为交通控制的结果是完全公平的(因交通流变化极其复杂, 所以不可能存在完全公平). 由于个体车辆之间时间消耗的均等程度可直接体现交通公平程度, 因此可用延误均差作为评价指标, 即

$$\sigma = \sum_i \sum_j \frac{|d_{ij} - d_a|}{\sum_i p_i} \quad (4)$$

式中: l 表示入口车道数; p_i 为已通过车道 i 离开交叉口的车辆数; d_{ij} 为车道 i 上车辆 j 的延误时间; d_a 为交叉口处车辆的平均延误时间.

4.1 单车道交叉口实验

实验仿真了 Pappis 假设的两路直行单向单车

道交叉口, 两条道路的饱和车流率均为 1 辆/s, 平均车速为 36 km/h, 共 2 个相位, 分别由北→南(N→S)向道路和东→西(E→W)向道路组成.

共进行了 13 组不同车辆到达率(R)组合的仿真实验, 每一组实验的仿真时间 t 均为 120 min, 仿真结果见表 2. 在反映交通效率的平均延误、停车率和通过车辆数 n_b 的指标中, 除了在个别车流量较小时, 感应控制或 Pappis 模型稍好(但结果很接近)以外, 在绝大多数情况下, 本文模型都优于感应控制和 Pappis 模型, 尤其是车流量较大时更是如此. 反映交通公平的延误均差指标中也有类似特点, 即本文模型的大多数结果都优于感应控制和 Pappis 模型. 另外, 从仿真结果中还可以看出, 当车流量依次递增时, 本文模型的平均延误增加得缓慢而且平稳, 感应控制也较平稳, 而 Pappis 模型在大流量时延误陡然增加, 其控制性能明显下降. 因此, 本文模型能够较好地兼顾效率与公平.

4.2 多车道交叉口实验

该实验仿真了一个四路多车道交叉口, 各向左转车辆和右转车辆均占该方向到来车辆的 20%, 直行、左转和右转饱和车流率分别为 1、0.8 和 1 辆/s, 相位分配见图 4.

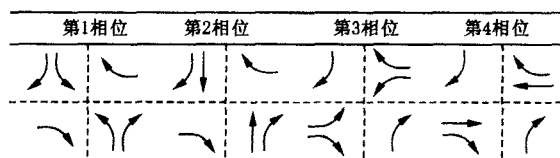


图4 信号交叉口的相位分配图

在第 4.1 节中, 车辆车速和各向车辆到达率是不变的, 为验证在交通状况变化时模型的有效性, 假定各条道路的车辆到达率曲线如图 5 所示, 平均车速分别取 20、30 和 40 km/h 进行仿真, t 仍设为 120 min.

将 Pappis 的单车道模型应用于本实验时, 根据绿灯相位中车辆数最多车道车辆的到来情况, 以及下一个相位中车辆数最多车道车辆的排队情况, 按照 Pappis 的模糊控制方法来决定通行权的切换时刻. 如图 6 所示, 因直行车辆到达率远远大于左转和右转车辆, 故 2、5、8 和 11 等直行车道的车辆数和平均等待时间明显大于其他车道. 从车辆数来看, 当车辆到达率较小时, 虽然直行车道车辆数有时较多, 但都未达到 20 辆的上限, 说明交叉口没有出现饱和拥挤状况; 在车辆到达率逐渐增大的过程中, 直行车辆

表 2 d_a 、 p_s 、 σ 和 η_b 的仿真结果

序 号	$R/\text{辆}\cdot\text{h}^{-1}$		$d_a/\text{s}\cdot\text{辆}^{-1}$	改进率/ %		$p_s/\%$	改进率/ %		$\sigma_s\cdot\text{辆}^{-1}$	改进率/ %		$\eta_b/\text{辆}$	多通过数量/ 辆	
	N→S	E→W		感应	Pappis		感应	Pappis		感应	Pappis		感应	Pappis
1	360	360	15.66	16.05	5.36	1.70	-1.49	-1.56	4.55	6.39	-4.87	1411	0	0
2	360	720	16.81	12.43	1.34	2.82	-1.79	-2.02	5.22	-4.25	-13.82	2228	1	1
3	360	1080	17.93	11.13	-2.61	2.86	1.41	-0.92	5.33	-0.39	-9.87	2827	2	-1
4	360	1440	19.59	35.47	-3.22	7.03	37.13	-1.03	6.12	39.97	-7.90	3590	4	-1
5	360	1800	23.38	40.27	9.01	17.51	60.19	13.99	6.49	30.95	30.90	4267	10	-2
6	720	720	17.68	9.39	0.50	3.10	-2.20	-1.88	5.46	-8.78	-13.62	2865	6	3
7	720	1080	18.47	13.94	0.49	3.28	4.36	-0.44	5.37	8.24	-4.11	3621	4	0
8	720	1440	20.38	30.15	4.22	5.85	32.28	5.92	5.69	44.32	16.73	4265	7	3
9	720	1800	23.80	37.47	81.68	19.01	55.19	53.27	6.72	29.91	91.09	5053	7	113
10	1080	1080	19.29	13.87	2.82	3.90	6.43	1.11	5.41	5.40	-1.86	4214	-2	-1
11	1080	1440	21.78	28.93	37.02	10.84	32.72	25.41	6.06	39.63	67.38	5004	7	10
12	1080	1800	27.41	37.79	94.31	32.59	52.67	31.20	7.48	28.50	98.30	5775	15	806
13	1440	1440	26.64	39.57	85.66	28.98	53.12	39.19	7.62	30.60	95.54	5603	9	209

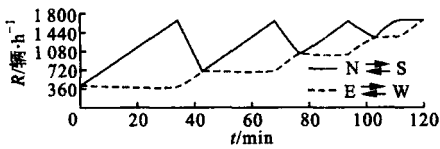


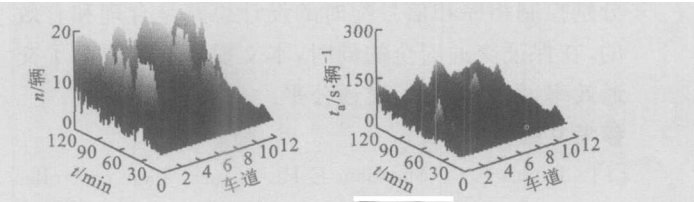
图 5 多车道交叉口的各向车辆到达率曲线

数也不断增加,图 6a 和图 6c 最终出现了持续的饱和和拥挤现象,而图 6e 则间断性地触及车辆数的上限,没有形成持续饱和和拥挤情况.从平均等待时间来看,当车辆到达率较小时,图 6 中的 3 种控制模型的情况都较好.在车辆到达率逐渐增大的过程中,图 6b 在较缓慢地增加,图 6d 在最后阶段增加很快,图 6f 则变化不明显,而且分布比前两者均匀,这些变化都揭示了本文模型在交通效率和公平时间方面均优于感应控制和 Pappis 模型.

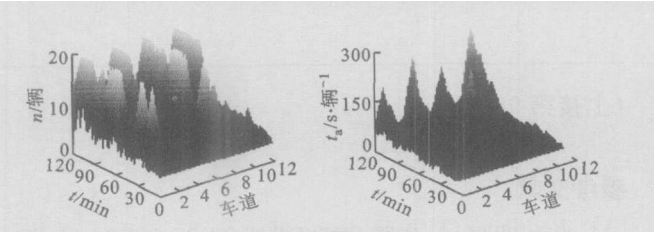
如图 7 所示,从平均延误时间和停车率来看,在开始阶段各向交通流量很小时,几种控制方法的结果很接近,但随着各向交通流量的增加,本文模型开始好于感应控制和 Pappis 模型,而且增加缓慢而平稳.从剩余车辆数 n_r 中看到,在大多数时间里本文模型控制下的车辆数最少,而且交通流量越大优势越明显.从延误均差中看到,在开始阶段 3 种控制方法的结果很接近,随着车辆到达率的递增,本文模型开始好于感应控制和 Pappis 模型,而且变化非常平稳,说明车辆之间的延误差异性较小,交通供给更加公平.

当 $v=20\text{ km/h}$, 40 km/h 时, n 和 t_a 的仿真结果与图 6 非常类似,从仿真结果中同样可得出图 7

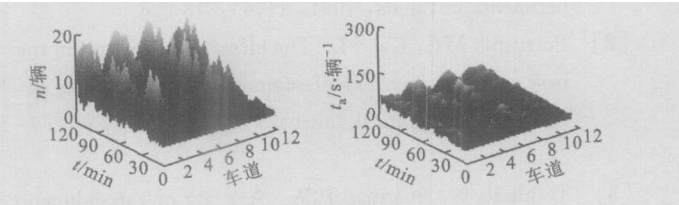
所示的结论.



(a) 感应控制中 n 的变化 (b) 感应控制中 t_a 的变化



(c) Pappis 模型中 n 的变化 (d) Pappis 模型中 t_a 的变化



(e) 本文模型中 n 的变化 (f) 本文模型中 t_a 的变化

图 6 n 和 t_a 的 3 种控制模型效果 ($v=30\text{ km/h}$)

5 结束语

在城市道路交通系统中,交通效率与交通公平对于人类都很重要.通过仿真实验,表明本文提出的以兼顾效率与公平为目标的信号交叉口模糊控制模型,比感应控制和 Pappis 模型有明显改进.可见,采

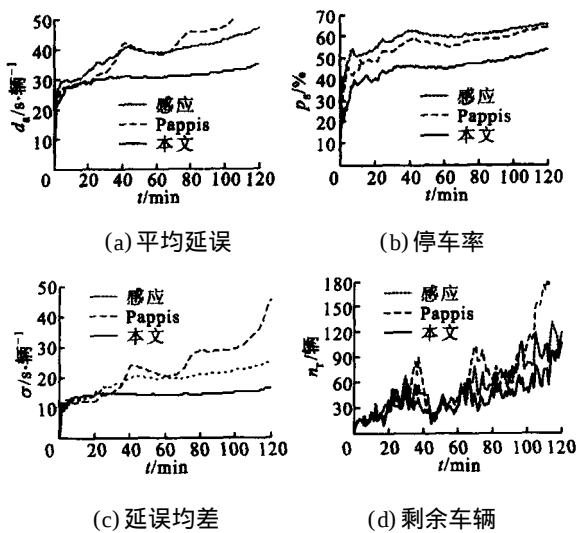


图7 平均车速为30 km/h时的仿真结果

取相位构成固定,根据各入口车道的车辆数、平均等待时间和车辆到达率的变化情况,采用2个控制器分别控制相序和信号配时的设计思路是合理和有效的.在保证交通安全的同时,本文模型不仅提高了交通效率,而且增强了交通公平.

参考文献:

- [1] Pappis C P, Mamdani E H. A fuzzy logic controller for a traffic junction[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1977, 7(10): 707-717.

- [2] Favilla J, Machion A, Gomide F. Fuzzy traffic control: adaptive strategies[A]. Proceedings of the Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems [C]. San Francisco, USA: IEEE, 1993. 506-511.
- [3] Hoyer R, Jumar U. Fuzzy control of traffic lights [A]. Proceedings of the Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems [C]. Orlando, USA: IEEE, 1994. 1526-1531.
- [4] Trabia M B, Kaseko M S, Ande M. A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals[J]. Transportation Research: Part C, 1999, 7(6): 353-367.
- [5] Niittymäki J, Pursula M. Signal control using fuzzy logic[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116(1): 11-22.
- [6] Chou C H, Teng J C. A fuzzy controller for traffic junction signals[J]. Information Sciences, 2002, 143(1-4): 73-97.
- [7] Murat Y S, Gedizlioglu E. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions[J]. Transportation Research: Part C, 2005, 13(1): 19-36.
- [8] 张曾科. 模糊数学在自动化技术中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 159-168.
- [9] 刘运通, 石建军, 熊 辉. 交通系统仿真技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. 86-87.

(编辑 管咏梅)

(上接第96页)

参考文献:

- [1] Rodriguez O. Base drag reduction by control of the three-dimensional unsteady vortical structures[J]. Experiments in Fluids, 1991, 11(4): 218-226.
- [2] Petrusma M S, Gai S L. The effect of geometry on the base pressure recovery of segmented blunt trailing edges[J]. Aeronautical Journal, 1994, 98(977): 267-274.
- [3] Tombazis N, Bearman P W. A study of three-dimensional aspects of vortex shedding from a bluff body with a mild geometric disturbance[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 1997, 330(Jan): 85-112.
- [4] Bearman P W, Owen J C. Suppressing vortex shedding from bluff bodies by the introduction of wavy separation lines[A]. Proceedings of the 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting[C]. Washington, DC: Pinehurst Technologies Inc, 1998. 21-23.

- [5] Owen J C, Bearman P W. Passive control of VIV with drag reduction[J]. Journal of Fluids and Structures, 2001, 15(3-4): 597-605.
- [6] So R M C, Savkar S D. Buffeting forces on rigid circular cylinders in cross flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 105(Apr): 397-425.
- [7] Wieselsberger C. Neuere feststellungen ber die Gesetze des Flssigkeits und Luftwiderstandes [J]. Physikalische Zeitschrift, 1921, 22(3): 321-328.

(编辑 王焕雪)