

文章编号: 1671-0118(2011)04-0306-06

单交叉口交通信号的模糊控制

李忠勤¹, 范红刚¹, 董金波²

(1. 黑龙江科技学院 电气与信息工程学院; 2. 黑龙江科技学院 机械工程学院, 哈尔滨 150027)

摘 要: 针对最常见的十字路口,以平均延误最小为目标,设计了四相位两级(观测级、决策级)模糊控制器,包括红灯相位选择模块、绿灯相位观察模块、决策模块等三个模块。所建立的交叉口车辆生成模型、交通信号控制模型以及车辆延误模型,通过 MATLAB 7.0 编写的程序,进行仿真分析。结果表明:在同样交通条件下,相对定时控制和感应控制,模糊控制的车辆平均延误时间分别降低了 25.2% 和 16.5%。

关键词: 交通信号; 交叉口; 信号配时; 模糊控制

中图分类号: TP273; U491

文献标志码: A

Fuzzy control for single intersection traffic signal

LI Zhongqin¹, FAN Honggang¹, DONG Jinbo²

(1. College of Electric & Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science & Technology;

2. College of Mechanical Engineering, Heilongjiang Institute of Science & Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: Aimed at minimizing the average delay time for the most common cross intersections, this paper proposes a design of the four phases and two-stage (observation level, decision-making level) fuzzy controller composed of red phase model, green phase model, and decision-making model. The development of the vehicle generation model, the traffic signal control model and the vehicle delays model and the simulation of the corresponding programs produced by MATLAB 7.0 show that with the same traffic conditions, fuzzy control gives vehicle average delay time 25.2% and 16.5% lower than timing control and sensor control.

Key words: traffic signal; intersection; signal timing; fuzzy control

基于交通系统复杂的模糊性、随机性和非确定性,其数学模型时亦非常复杂,很多时候,用已有的数学模型难于对其描述,经典控制方法难以取得满意的效果。传统的交通控制策略主要有定时控制和感应控制,随着控制理论的发展,智能交通系统(ITS)在交通领域发挥着越来越重要的作用^[1-2]。笔者针对最常见的十字路口,以平均延误最小为目标,设计了四相位两级模糊控制器,建立交叉口车辆生成模型、交通信号控制

模型以及车辆延误模型,并通过软件进行仿真验证。

1 单一交叉路口的布置和对应设置

交叉路口组成了复杂的城市交通基础设施。虽然不同城市的地理环境各异,交叉路口也有不同的形状,但通常可以用十字路的方式对其进行描述,具体见图 1^[3]。

收稿日期: 2011-07-10

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究指导项目(11553108); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2008RFQXG110)

第一作者简介: 李忠勤(1980-),男,内蒙古自治区赤峰人,讲师,硕士,研究方向: 智能控制理论及应用, E-mail: lizhongqin 2008@qq.com。

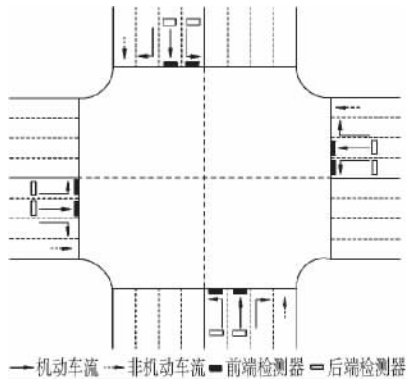


图1 十字路口

Fig. 1 Cross intersection

通过多个交通流状态对单一的交通路口的全部交通流状态进行描述,即指单路口多相位。图2所示为四相位示意。相位越少延迟时间越短,通行效率提高,但危险性增加;相反,相位越多,对于车辆来说会更安全,但通行效率降低。

四相位固定周期的控制方式,可以实现对路口交通流状态的充分描述,也是目前研究最多的控制模式^[4]。基于这4种相位模式,文中采用模糊控制的方法,不仅提高了控制效率,也沿袭了既有的习惯,更易在实际中应用。

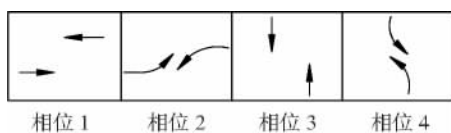


图2 单交叉口四相位

Fig. 2 Four phases of single intersection

2 交通信号模糊控制器

系统采用两级控制方式,具体控制系统见图3。在设置控制器时,不仅要考虑周期和绿信比的长度,还要考虑变化的相位顺序。根据车辆检测器提供的信息,两级模糊控制器选择相应的通行相位。在选中某一个相位后,控制器将对其分配通行权,并分配给这个相位最短的绿灯通行时间,之后会每间隔2s,控制器重新进行信息采集,并进行决策分析以确定是切换相位还是延长绿灯的时间。为了使最后进入路口的车得以顺利进入交叉口,每一次绿灯进行变换之前,都要设置4s的黄灯时间,在该时间内,所有方向的车辆都不准进入交叉路。之所以引入相位最小绿灯时间,是为了保证在这个相位时,已经通过停车线,但还不能安全通过路口的车辆的绝对安全,同时也为了保证非机动车和行人能够安全

通过。在这种设置下,直行相位的绿灯的最短时间为15s,左转相位的时间是17s。而且,每个相位之间,车辆连续等待的时间不能太长,初步设置为120s。

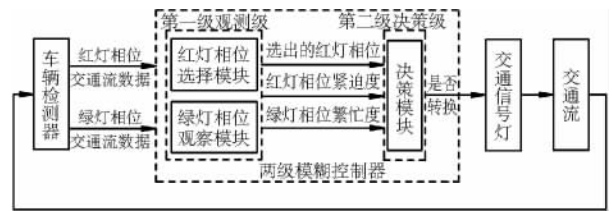


图3 两级模糊控制系统

Fig. 3 Compose of two-stage fuzzy controller

以四相位为例对两级模糊控制器进行论述。第一级模糊控制为观测级,第二级为定位决策级。在观测级中包含有两模块,即绿灯相位观察模块和红灯相位选择模块。决策级只有一个决策模块。一般意义上,每个模块都代表一个子模糊控制器。

2.1 红灯相位选择模块

除了绿灯相位之外的全部的红灯相位的交通流是模块的输入,被选中的相位(P_r)和相应的相位紧迫度(U_r)便是输出。要想选出一个具有较高紧迫度的相位,就要对全部输入相位的紧迫度进行计算分析,选出紧迫度最高的相位并将其定位候选相位。在图2所示的相位1中,包含有两项交通流:东西两个方向的车流。如果需要获得相位1的紧迫度,就要基于模糊推理对东西两个方向的紧迫度进行计算,所得的最大值即为相位1的紧迫度。

2.1.1 模糊推理的输出和输入变量

输出变量: U_r ;

输入变量: q_r 和 t_r 。

U_r 代表交通流的紧迫程度,这是对一个交通流交通状况的切实反应。 q_r 为一个车道中两个检测器之间的车辆的个数, t_r 为在同一个车流方向上,从上一个绿灯结束之后,红灯所持续的时间。

q_r 通过计算可得:

$$q_r = q_{r0} + c$$

式中: q_{r0} ——同一车道内上一个绿灯结束时,两个检测器之间的车辆数;

c ——同车道一个红灯期内的车辆的个数。

2.1.2 模糊变量论域及隶属度函数

定义描述等待车辆数 q_r 的基本论域为 $\{0, 1, 2, 3, \dots, 29, 30\}$, 离散域 M_{q_r} 为 $\{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30\}$ 。切换到离散域便是模糊集合 O_{q_r} 的语言值选取, $\{VF, F, M, E, VE\}$ 表示{很少, 少, 中等, 多, 很多}, 根据经验制定等待车辆数的隶属度

函数。隶属度函数为三角形分布和梯形分布。 q_r 的隶属度如表 1 所示。

表 1 q_r 的隶属度
Table 1 Membership of q_r

O_{q_r}	M_{q_r}										
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
VF	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
M	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0
VE	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	1.0	1.0

红灯持续时间 t_r 的基本论域为 $(0, 120)$,变换到离散论域 M_{t_r} 为 $\{0, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120\}$ 。模糊集合 O_{t_r} 语言值选取 $\{VS, S, M, L, VL\}$ 表示 $\{ \text{很短, 短, 中等, 长, 很长} \}$ 。 t_r 的隶属度见表 2。

表 2 t_r 的隶属度
Table 2 Membership of t_r

O_{t_r}	M_{t_r}										
	0	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
VS	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
M	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0
VL	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	1.0	1.0

红灯相位紧迫度的 U_r 基本论域为 $(0, 6)$,变换到离散论域 M_{U_r} 为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。模糊集合 O_{U_r} 语言值选取 $\{VL, L, M, H, VH\}$ 表示 $\{ \text{很低, 低, 中等, 高, 很高} \}$ 。 U_r 的隶属度见表 3。

表 3 U_r 的隶属度
Table 3 Membership of U_r

O_{U_r}	M_{U_r}						
	0	1	2	3	4	5	6
VL	0	1.0	0	0	0	0	0
L	0	0	1.0	0	0	0	0
M	0	0	0	1.0	0	0	0
H	0	0	0	0	1.0	0	0
VH	0	0	0	0	0	1.0	0

2.1.3 模糊规则
模糊控制器的核心部分是模糊控制规则,模糊控制规则是实现模糊推理的基础。该模块模糊控制规则基于如下原则: 在一个车道上车辆等待的越多,或者红灯延长持续时间时,会相应的增大车流的紧迫度。根据实践总结和相关的研究,共建立 25 条模糊控制规则,见表 4。

表 4 红灯相位紧迫度模糊控制规则
Table 4 Fuzzy rule of red light phase's urgency

O_{t_r}	Q_{q_r}				
	VF	F	M	E	VE
VS	VL	VL	VL	L	M
S	VL	VL	L	M	H
M	L	M	M	H	VL
L	M	H	H	VH	VH
VL	VH	VH	VH	VH	VH

双输入单输出的模糊控制器,其控制规则可以表示为:

If $q_r = (q_r)_i$ and $t_r = (t_r)_j$ then $U_r = (U_r)_k, i, j, k = \{1, 2, \dots, 5\}$,其中 $(q_r)_i, (t_r)_j, (U_r)_k$ 代表模糊语言变量。按照相应的规则,得到相应的模糊关系:

$$R_{ij} = (q_r)_i \times (t_r)_j \times (U_r)_k。$$

2.1.4 反模糊化和模糊推理

得到 R 值后,基于模糊推理的合成规则运算法则,可以计算相应的控制量的模糊集合 U_r ,即 $U_r = (q_r \times t_r) \cdot R$ 。进行合成运算所得到的结果是模糊子集,它是控制语言不同取值的一系列的 u 和,但是在实际情况下,被控制的对象只能对应一个控制量,所以就需要将模糊子集变换到精确的控制量。如果根据隶属度最大法、中位方法或者重心法等,进行反模糊化控制,便能得到在区间上的精确控制值^[5]。

基于重心法,对输出 U_r 实行反模糊化。进行以上操作,所得到的输出是一个交通流的紧迫度 U_r ,取一个相位的所有交通流的紧迫度的最大值,其结果是得到这个相位的相位紧迫度的值 U_r ,对全部的红灯相位的紧迫度进行比较,所得到的紧迫度值的最大值便是这个模块的输出相位和其紧迫度 U_r 。

根据上述模糊变量隶属度以及表 4 的模糊规则,可以建立等待车辆数 q_r 以及红灯持续时间 t_r 到红灯相位紧迫度 U_r 的映射关系。映射关系的曲面如图 4 所示。

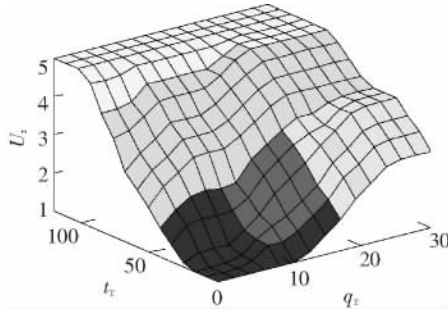


图4 红灯相位选择模块模糊推理的输入输出界面

Fig. 4 Fuzzy I/O interface of red light phase model

2.2 绿灯相位观察模块

模块中,其输入的是绿灯相位交通流数据,输出的是所产生的绿灯相位繁忙度(B_g)。绿灯期间的交通流数据对绿灯相位经过最小绿灯时间后的绿灯延长时(t_g)和绿灯相位剩余车辆数(q_g)进行选择。若绿灯相位所包含的大于一个交通流,则绿灯所持续的时间和各个交通流的最多的剩余车数目是一样的。根据这个模块所确定的控制规则的原则是:在所剩余的车辆数目减少或者单个交通流的绿灯延长时增加了,相应的,繁忙度就会下降。

建立绿灯延长时 t_g 和所剩余的车辆数目 q_g 到绿灯相位繁忙度 B_g 的映射关系,其映射关系的曲面如图5所示。

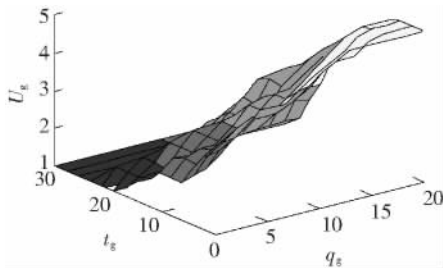


图5 绿灯相位观察模块模糊推理的输入输出界面

Fig. 5 Fuzzy I/O interface of green light phase model

2.3 决策模块

候选相位(P_r)、繁忙度(B_g)及相位紧迫度(U_r)是决策模块的输入,决策(D_c)是输出。 P_r 作为红灯相位对应的选择模块所选出的相位, U_r 作为这个相位的紧迫度。 B_g 作为这个绿灯相位观测模块所输出的绿灯的相位的繁忙程度。只有 D_c 才能确定通行权是否付给候选相位(P_r)。对模糊推理结果进行去模糊化处理,在去模糊化值大于规定的阈值时,就会将当前的绿灯信号转换到候选相位(P_r),与此相反的话,会延长绿灯的持续时间。

通过这个模块进行模糊控制规则所遵循的原则

为:若与候选相位所对应的紧迫度较高,或者即时绿灯的相位有着较低的繁忙度,则当前的绿灯相位会被停止,并向候选相位发布绿灯信号。

红灯相位紧迫度 U_r 及绿灯相位繁忙度 B_g 到决策模块 D_c 的映射关系曲面如图6所示。

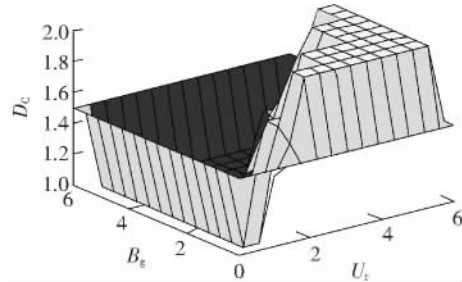


图6 决策模块模糊推理的输入输出界面

Fig. 6 Fuzzy I/O interface of determine model

3 信号交叉口模型

在信号交叉口仿真中,最关键的就是对车辆延迟模型、交通信号控制模型和交叉口车辆生成模型的建立。

3.1 车辆生成模型

进行交通系统仿真的最基本模型是车辆生成模型,它所解决的主要问题是交通流的输入问题。在实际的交通流中,所有车辆何时到达,是不确定和随机的,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。控制系统数学模型基本上是基于统计学所建立的,因此,在统计交通数据时,必须遵循统计学方法。

在某一时间内的交通流中,虽然某一断面处所到达的车辆数目是随意的,但是也会遵循一定的统计学规律,这种分布是离散型分布。

通过分析大量的交通量数据,在一定的观测周期内,交通流中达到的车辆的数目服从泊松分布和二项分布。服从泊松分布说明,所统计的时间间隔非常短,且车辆的密度小,车辆之间的相互影响也较小,而且,其他的外界干扰基本不存在;服从二项分布说明,车辆比较拥挤,自由行驶的机会不多;服从负二项分布说明,车流中的车辆比较少,具有高方差特征的车流。

3.1.1 泊松分布

泊松分布所描述的交通流一般是指车流的密度小,车辆之间几乎没有相互影响,基本不受其他外界干扰的情况,也就是说车流是随机的。在这种情况下,采用泊松分布处理交通观测数据比较正确,能够

得到较准确的拟合数据。

其计算公式为

$$p(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \quad x=0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

式中: $p(x)$ ——在计数周期 t 内所到达 x 辆车的概率情况;

λ ——单位时间内的平均车辆到达率;

t ——每个计数周期内的时间间隔大小。

若 $m = \lambda t$, m 表示在计数周期 t 内平均到达的车辆数, 则可将式(1)变换为

$$p(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad x=0, 1, 2, \dots$$

3.1.2 二项分布

在车辆比较拥挤时, 车辆不能自由的行驶, 所观测的数据的方差比较小。此时, 车辆到达数的分布符合二项分布, 即

$$p(x) = C_n^x p^x (1-p)^{n-x} \quad x=0, 1, 2, \dots$$

式中 n, p 叫做二项分布参数。 $P = \lambda t / n$ 代表某一辆车出现的概率值大小, 且分布在 $0 \sim 1$ 内; n 是大于零的整数, 代表在所进行仿真的时间间隔 t 内能够到达的最多车辆的数目。

为了保证仿真模型更具实际意义, 实地考察了道路周围的实际车流状况, 通过分析和统计实际的观测数据, 建立了车辆生成模型。在车辆的到达率低于 0.4 辆/s 时服从泊松分布, 在其大于 0.4 辆/s 时服从二项分布。具体的车辆生成模型的仿真流程如图7所示。

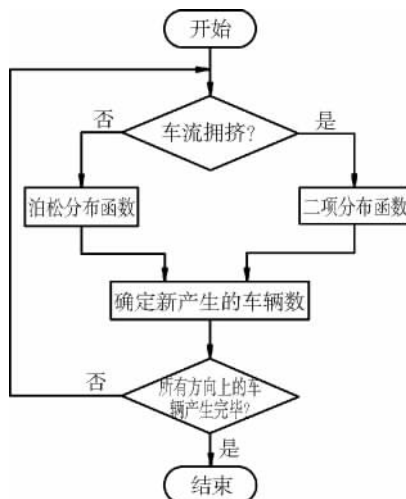


图7 车辆生成模型的仿真流程

Fig. 7 Simulation of vehicle generation model

3.2 交通信号控制模型

针对单路口的交通流特点, 在 MATLAB 环境下, 运用模糊控制工具箱对采用二级模糊控制的交叉口信号控制建立了系统控制模型。基于 MATLAB

模糊工具箱中的图形用户界面工具 (GUI), 文中建立了科学的模糊推理系统, 通过分别建立 Busy_Green.fis、Urgency_Red.fis 和 Decision.fis 3 个模糊推理程序, 实现了二级模糊控制器中的 3 个模块。图8所示为 3 个模块的模糊推理系统编辑器。所有的模块都有一个输出系统和两个输入系统。在 3 个模块的模糊推理系统中, 其基本属性的设定均是: “或”运算采用极大运算, “与”运算采用极小运算, 模糊规则综合采用极大运算, 模糊蕴涵采用极小运算, 去模糊化采用重心法的原则。

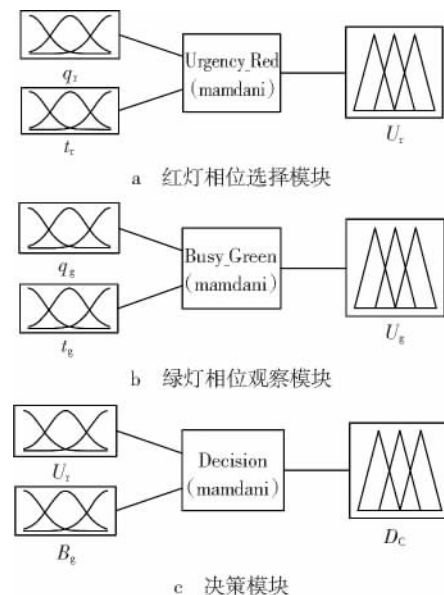


图8 模糊推理系统编辑器

Fig. 8 Editor of FIS

3.3 车辆延误模型

在研究中, 所用到的两级模糊控制器保证了绿灯时间、相位顺序和周期都伴随着交通状况变化而变化, 这就与之前的平均车辆延误模型之间存在差异。以每个绿灯相位为单位, 在完成一个绿灯相位切换时, 对这个绿灯相位内的车辆的延误时间和到达的车辆数目进行计算, 并对车辆到达数目和一次延误进行累加计算, 一直到仿真时间结束为止。最后用总的车辆数目去除总延误时间, 其结果就是这个仿真时间内的平均车辆延误值。

$$d_i = \begin{cases} (q_{gi0} + 0.5 \times c_i) \times t_g, & \text{第 } i \text{ 车道为红灯,} \\ \max(q_{gi0} - g, 0) \times t_g + 0.5 \times \\ (c_i - \max(g - q_{gi0}, 0)) \times t_g, & \text{第 } i \text{ 车道为绿灯,} \end{cases}$$

式中: d_i ——当前绿灯相位第 i 个车道的车辆延误, $i=1, 2, \dots, 8$;

q_{gi0} ——初始的排队车辆数;

c_i ——在即时绿灯相位上, 第 i 道所到达的车辆数目;

g ——即时绿灯相位上,绿灯车流中所离开
的车辆数目;

t_g ——即时绿灯相位的绿灯持续时间。

用 d_p 来表示一个绿灯相位的车辆延误,记为

$$d_p = \sum_{i=1}^8 d_i,$$

用 D 来表示仿真时间内的总延误,则有

$$D = \sum d_p,$$

用 c_p 表示一个绿灯相位内到达的车辆总数

$$c_p = \sum_{i=1}^8 c_i,$$

用 C 表示仿真时间内到达的总的车辆数,

$$C = \sum c_p,$$

用 q_{fi} 表示仿真分析刚刚开始时,所有车道上的初始
车辆数目,则其和计为 Q_0 ,则有

$$Q_0 = \sum_{i=1}^8 q_{fi},$$

用 d 表示仿真时间内的平均车辆延误,则有

$$d = D / (Q_0 + C)。$$

4 仿真流程及结果

单交叉口两级模糊控制仿真流程如图 9 所示。

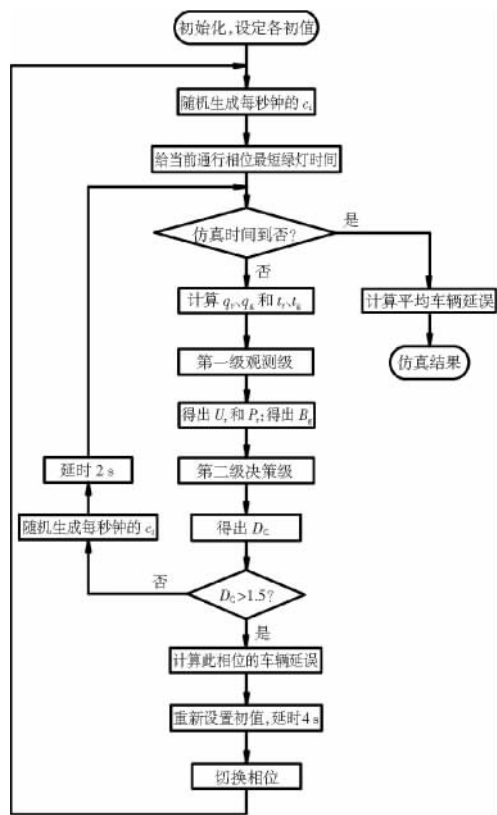


图 9 单一交叉口二级模糊控制流程

Fig. 9 Simulation of two-stage fuzzy control on intersection

仿真参数: 时间间隔的长度为 4 s,每车道最大可检测的排队长度 20 辆,每个相位的损失时间 4 s,饱和流量为 1 800 辆/(道·h),绿灯最大的直行方向时间为 72 s,左转方向时间是 16 s,最小绿灯时间是 8 s,每个方向上的初始进行排队的车辆的数目为 1,驶离率是 1 辆/s。

根据如图 2 所示的方案,交叉口处各个车道进口的分配如表 5。

表 5 交叉路口各进口车道分配
Table 5 Lane allocation of intersection's approach

方位	左转/道	直行/道	右转/道
东进口	1	3	1
南进口	1	2	1
西进口	1	3	1
北进口	1	2	1

该研究在 MATLAB 进行了程序编写并对其进行了仿真分析,与传统的全感应控制和定时控制进行比较。具体的仿真比较结果见表 6。

表 6 模糊控制与定时控制、感应控制效果对比

Table 6 Performance's comparison among fuzzy control, time control and induction control

T	$d/s \cdot \text{辆}^{-1}$		
	定时控制	感应控制	模糊控制
1	43.30	36.20	27.40
2	56.50	50.80	41.60
3	49.60	44.10	35.30
4	51.40	46.70	38.90
5	56.20	48.90	39.20
6	49.80	44.50	40.30
7	53.60	47.40	41.20
8	58.40	51.70	43.10
9	57.80	52.30	45.60
10	51.30	45.90	38.50
\bar{d}	52.79	46.85	39.11

表 6 中,相对于感应控制方法,两级模糊控制方法更能有效减少平均车辆的延误。在 10 次仿真中,模糊控制车辆延误的平均值为 39.11 s/辆,全感应控制的平均值是 46.85 s/辆,定时控制的平均值为 (下转第 320 页)

- [3] 郭大刚,何 炜,许文祥. 双层幕墙性能化消防设计初探[J]. 消防科学与技术,2004,23(4):341-344.

[4] 陈 海,姜清海,郭金基,等. 太阳辐射作用下双层玻璃幕墙热通道的节能计算与实验研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2006,45(6):35-39.

[5] 霍 然,胡 源,李元洲. 建筑火灾安全工程导论[M]. 2版. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009.

[6] 范维澄,王清安,姜冯辉,等. 火灾学简明教程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995:243-325.
- [7] BRITISH STANDARDS INSTITUTE. Fire safety engineering in building: guide to the application of fire safety engineering principles[S]. London: British Standards Institute,1997.

[8] 冯文兴,牛海霞,杨立中. 火灾烟气毒性成分向远距离走廊传播危害性分析[J]. 消防科学与技术,2009,28(8):551-555.

[9] 张靖岩. 高层建筑竖井内烟气流动特征及控制研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2006.
- (编辑 荀海鑫)

(上接第311页)

52.29 s/辆。相对于定时控制、全感应控制,两级模糊控制的车辆平均延误时间分别得到降低。

5 结束语

城市交通系统影响因素繁杂,随机性大,很难用纯数学方法对其进行定量描述。笔者基于模糊控制理论进行系统研究,采用可以提高车流效率的智能交通系统,其车辆平均延误时间相对于定时控制和全感应控制分别降低了25.2%和16.5%。

参考文献:

- [1] 徐建闽. 交通管理与控制[M]. 北京:人民交通出版社,

2007:198-214.

- [2] 李自成. 单交叉口交通信号灯模糊控制系统的研究与实现[J]. 阜阳师范学院学报:自然科学版,2010,27(2):32-35.
- [3] 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.
- [4] 卫小伟,常 博. 一种城市单路口交通两级模糊控制方法[J]. 电子设计工程,2010,18(1):81-83.
- [5] 吴晓莉,林哲辉. MATLAB辅助模糊系统设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [6] 卢兰萍,李毅杰,张忠达. 基于干线延误最小的线控系统相位差优化研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2008,25(4):41-44.

(编辑 徐 岩)