

# 时变论域下红绿灯配时的语言动力学分析

莫红<sup>1</sup> 郝学新<sup>1</sup>

**摘要** 城市道路不同时刻的车流量变化很大, 建立与车流量变化相适应的红绿灯动态配时模型有利于缓解交通拥堵, 减少出行者的等待时间. 本文通过综合时变论域、平行控制理论、语言动力系统 (Linguistic dynamic system, LDS), 提出了一种新的红绿灯控制方法. 该方法以红绿灯不同时刻周期时长所形成的序列为时变论域, 由各相位的排队长度确定对应的通行序列与时长, 得到时变论域下红绿灯配时方案. 该方案形成一个由实时车流数据驱动的动态模糊规则库来对红绿灯配时周期及相位通行序列与时长进行动态调整, 进而形成红绿灯配时演化过程的语言动力学轨迹, 最后通过实例验证该方案的有效性.

**关键词** 红绿灯配时, 时变论域, 模糊逻辑, 语言动力系统

**引用格式** 莫红, 郝学新. 时变论域下红绿灯配时的语言动力学分析. 自动化学报, 2017, 43(12): 2202–2212

**DOI** 10.16383/j.aas.2017.c160406

## Linguistic Dynamic Analysis of Traffic Light Timing Design within the Time-varying Universe

MO Hong<sup>1</sup> HAO Xue-Xin<sup>1</sup>

**Abstract** Urban traffic flow always changes sharply at different moments. A dynamic timing design model adapting to the change of traffic flow may alleviate traffic congestion and reduce the waiting time of travelers. In this paper, a new method for traffic light control is presented by synthesizing time-varying universe, parallel control and linguistic dynamic systems (LDS). In the method, the time-varying universe is constructed by the series of cyclic lengths of traffic lights at different times, and the corresponding traffic sequences and durations are decided by their respective phase queue lengths, thus a timing scheme based on time-varying universe is obtained. By this timing scheme, a dynamic fuzzy rule base is formed to adjust the cyclic length and constituent sequence light time dynamically. At the same time the dynamic fuzzy rule base which is driven by real time traffic data adjusts the traffic sequence and duration. Then the linguistic dynamic orbits of time-design for traffic light are analyzed within the time-varying universe. Finally, an example is given to verify the validity of this method.

**Key words** Traffic light timing design, time-varying universe, fuzzy logic, linguistic dynamic system (LDS)

**Citation** Mo Hong, Hao Xue-Xin. Linguistic dynamic analysis of traffic light timing design within the time-varying universe. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(12): 2202–2212

近年来, 交通系统的理论与方法研究受到了人们的广泛关注<sup>[1–3]</sup>. 然而, 交通系统作为一个复杂系统, 行人、机动车辆行为的随机性及不可预测性增加了对其建立精确数学模型的难度, 采用传统的方法对交通系统进行控制很难达到令人满意的效果. 尤其是在车辆及行人集中的交叉路口, 各种交通流 (机动车、非机动车和行人) 反复地合流、分流及交叉, 使得交通状况异常复杂, 所以城市交通拥堵主要集

中在交叉口处, 因此, 提高交叉路口的通行效率是缓解交通拥堵的关键之一.

红绿灯是疏导交叉路口交通流的一种有效方法, 合理的红绿灯配时方案有利于提高道路通行能力, 减少交通事故的发生. 传统的红绿灯控制大都采用固定信号周期、固定时长和固定相位转换次序的方法, 无法对路口信号进行实时、经济的控制, 因而经常出现“绿灯无车红灯堵”的现象, 在早晚高峰期及节假日尤为明显.

随着计算机交通控制系统、传感器技术、电子技术和智能控制的发展, 通过信息化手段实现的智能交通系统<sup>[4]</sup> (Intelligent transport system, ITS) 管理调度交通资源, 为解决当前道路交通拥堵问题提供了一条有效途径. 在智能交通系统中, 先进的信息技术、数据通讯传输技术、电子传感技术、电子控制技术以及计算机处理技术等被集成运用于整个地面交通管理系统, 并建立起一种在大范围内、全方位发

收稿日期 2016-05-18 录用日期 2017-06-22  
Manuscript received May 18, 2016; accepted June 22, 2017  
国家自然科学基金 (61473048, 61074093, 61233008), 长沙理工大学青年英才计划资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (61473048, 61074093, 61233008), Youth Talent Support Plan of Changsha University of Science and Technology  
本文责任编辑 徐昕  
Recommended by Associate Editor XU Xin  
1. 长沙理工大学电气与信息工程学院 长沙 410114  
1. School of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114

挥作用的实时、准确、高效的综合交通运输管理系统<sup>[5]</sup>.

针对交通灯配时不合理这一现象, Pappis 等在 1977 年开始智能红绿灯的研究<sup>[6]</sup>, 提出了通过建立模糊规则库或者专家系统对各种交通状况进行控制<sup>[7]</sup>, 并取得了很好的效果. Bi 等<sup>[8]</sup> 和 Balaja 等<sup>[9-10]</sup> 针对路网中多个路口建立二型模糊控制器, 然而二型模糊集合控制器增加了计算的复杂性, 且不适用于单交叉路口. Collotta 等<sup>[11]</sup> 通过无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSN) 收集路口车流数据, 对多相位路口建立多个平行模糊控制器, 分别进行模糊决策. Abbas 等<sup>[12]</sup> 提出了一种改进的车流数据收集及红绿灯配时方法, 并通过仿真验证了该方法的优越性. 在国内, 陈洪等在 Pappis 的基础上, 设计了多级模糊控制器<sup>[13]</sup>, Li 等讨论了深度增强学习与平行系统理论在红绿灯配时及交通流控制中的应用<sup>[14-15]</sup>, Abdi 等研究了模糊集合在交通方面的应用主要针对短时交通流量的预测<sup>[16-17]</sup> 和实时控制计算<sup>[18]</sup>.

另外, 国内还运行着一些自适应信号控制系统, 如 SCOOT (Split-cycle-offset optimization technique) 与 SCATS (Sydney coordinated adaptive traffic system) 等, 但由于其控制原理等多方面的限制, 在过饱和状态下的控制效果不佳, 其目前的版本 SCOOT MC3<sup>[19]</sup> (Managing congestion, communication and control) 中, 虽然加入了拥堵监控模块, 但也只能处理常发性拥堵, 不能很好地处理异常情况导致的偶发性拥堵. 针对实时路况, 一些自适应学习算法也被广泛应用于路口的信号控制, 如 Wiering 等研究了基于车辆投票的强化学习优化模型, 通过估计每个车辆的等待时间决定配时方案<sup>[20]</sup>, Box 等将具有人工干预的监督学习和时间差分强化学习应用于信号配时优化<sup>[21-22]</sup>, 刘脐锤等提出将改进的遗传算法用于区域交通信号的优化控制模型中<sup>[23]</sup>, Bingham 使用神经网络调整模糊交通信号控制器的成员函数, 使用强化学习评估神经网络采用行为的效用, 改进了模糊控制的效果<sup>[24]</sup>, 以上研究结果均证明自适应控制效果优于定时控制、感应式控制等.

针对复杂系统建模、分析、控制与管理问题, 国内学者于 1995 年提出了语言动力系统 (Linguistic dynamic systems, LDS) 理论. 在 LDS 理论中, 词计算代替常规的数值与符号计算, 以期从语言的层次上解决复杂系统的建模、分析、控制与评估问题, 形成关于复杂系统状态演化的动态描述, 并在 2004 年提出了平行系统理论<sup>[25-26]</sup>, 构建了平行交通管理系统的体系框架<sup>[27]</sup>. 为了有效解决交叉路口红绿灯配时问题, 建立与交通流状况相一致的红绿灯配

时方案, 本文通过综合时变论域<sup>[28]</sup>、语言动力学理论<sup>[29]</sup> 及平行控制理论<sup>[26]</sup>, 提出了平行红绿灯的理论与方法, 来对红绿灯的配时策略进行实时调整, 并提出平行控制策略. 本文中, 时变论域理论被用来描述其周期及定义在该周期上的各相位配时的模糊集合.

本文的红绿灯配时具有以下特点: 首先, 模糊集合所在论域随时间变化而改变, 以描述红绿灯的配时周期随交通流的变化而改变的情形, 且模糊集合的隶属函数根据周期的变化状况进行实时调整; 其次, 本文配时方案对应的模糊规则库由人工红绿灯在各种交通流状况下, 以出行者平均等待时间最短为目标经过计算实验的结果而得; 再次, 本文的配时方案是实时的, 即在不同的时间, 随着交通流的变化, 配时周期及各相位的时长与交通流的状况相适应; 最后, 本文采用时变论域下的语言动力系统结合平行控制理论来对红绿灯配时的演化过程进行动态描述, 这也是本文独有的. 对交通流进行有效的引导和调度, 能够使交通流保持在一个平稳的运行状态, 避免或者缓和交通拥挤, 有利于提高交通通行效率, 减少交通事故, 降低污染与能源消耗.

本文安排如下, 第 1 节介绍相关定义与术语; 第 2 节针对红绿灯配时设计, 给出了基于平行控制的红绿灯系统的结构方案及数据处理流程; 第 3 节建立了人工红绿灯系统的配时方案; 第 4 节根据某交叉路口 24 小时内不同时间段的配时方案进行动态设计及语言动力学演化分析; 第 5 节为本文小结.

## 1 预备知识

### 1.1 一型模糊集合与隶属函数

1965 年, Zadeh 提出模糊集合理论<sup>[30]</sup>. 设  $\omega$  为论域  $\Omega$  上的模糊集合, 表示为

$$\omega = \{(x, \mu(x)) | \forall x \in \Omega, \mu(x) \subseteq [0, 1]\} \quad (1)$$

这里, 称  $\omega$  为  $\Omega$  上的一型模糊集合,  $\mu_\omega(\cdot)$  被称为模糊集合  $\omega$  的隶属函数,  $\mu_\omega(x)$  称为  $x$  对于  $\omega$  的隶属度, 且  $0 \leq \mu_\omega(x) \leq 1$ .

若  $\Omega$  为一个连通的单因素论域, 表示为  $\Omega = [x_1, x_n]$ , 对应的模糊集合通常为一个分段连续函数, 即

$$\mu_\omega(x) = \begin{cases} f_1(x), & x \in [x_1, x_2] \\ f_2(x), & x \in [x_2, x_3] \\ \vdots & \vdots \\ f_3(x), & x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 时变论域

论域为研究对象全体构成的集合, 若集合中的元素随时间改变, 则称该论域为时变论域<sup>[28]</sup>, 记为

$\Omega_t$ . 若对任意  $t$ , 都有  $\Omega_t = \Omega$ , 则称恒定论域. 一般情况下, 取  $t = 1, \dots, n, \dots$ , 则形成一个时变论域序列

$$\Omega_1, \dots, \Omega_n, \dots \quad (3)$$

简记为  $\{\Omega_n, n \in N\}$ ,  $N$  为自然数. 若论域  $\Omega_n$  是离散的, 记为

$$\Omega_n = \{a_1, \dots, a_{k_n}, \dots\} \quad (4)$$

称  $\Omega_n$  为离散时变论域. 若每一个  $\Omega_n$  连通, 即

$$\Omega_n = [a_n, b_n], \quad n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

则称  $\Omega_n$  为连通时变论域.

当论域随时间发生变化时, 对应的模糊集合的隶属函数随之改变, 根据论域变化的特点, 时变论域被分成递增型、递减型及波动型三种情况.

### 1.3 语言动力系统

在 LDS 中, 词计算代替了常规的数值符号计算. 对于一个控制系统来说, 其状态方程、输出方程、反馈方程经过抽象化以转化为对应的语言形式, 即语言动力系统的状态方程、输出方程与反馈方程<sup>[29]</sup>:

LDS 的状态方程

$$X(k+1) = F(X(k), U(k), k), F : I^N \times I^M \rightarrow I^N \quad (6)$$

LDS 的输出方程

$$Y(k) = H(X(k), k), H : I^N \times Z \rightarrow I^P \quad (7)$$

LDS 的反馈方程

$$U(k) = R(Y(k), V(k), k), R : I^P \times I^Q \rightarrow I^N \quad (8)$$

其中,  $Z = \{0, 1, \dots, K\}$ ,  $X(k) \in I^N$  为系统的状态词,  $Y(k) \in I^P$  为输出词,  $V(k) \in I^Q$  为输入词,

$U(k) \in I^P$  为控制词,  $k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\}$  为离散的时间序列, 且  $F, H, R$  均为模糊逻辑算子, 分别定义了 LDS 的系统、输出及控制映射. 若该系统为自治系统, 当  $U(k) = F^*(X(k))$  时, 将输出方程代入反馈方程, 再代入状态方程, 则

$$X(k+1) = H^*(X(k), k) \quad (9)$$

给定初始状态  $X(0)$ , 由式 (9) 可得  $X(1)$ , 如此下去, 有

$$X(0), X(1), \dots, X(k), \dots \quad (10)$$

这样形成了关于初始状态的语言动力学轨迹.

### 1.4 平行交通系统

平行交通系统 (ACP) 由人工交通系统 (Artificial systems)、计算实验 (Computational experiment) 及平行执行 (Parallel execution) 三部分组成<sup>[25]</sup>. 综合考虑各方面的因素, 采用理论建模等方法建立与实际系统“等价”的人工系统, 解决实际交通系统无法用传统方法建模的难题<sup>[31]</sup>, 通过二者的相互作用, 完成对实际交通系统的管理与控制, 对相关行为和决策的实验与评估, 相应地调节各自的控制与管理方式. 本文结合时变论域、平行交通系统及语言动力系统开展红绿灯配时方面的工作.

## 2 红绿灯配时系统结构

为了实现对单交叉路口红绿灯时长的实时调整, 本文提出一种根据实时车流数据调整配时周期、相位顺序及各相位绿灯时长的平行 (ACP) 控制方案, 结构如图 1 所示, 该系统包括人工红绿灯、计算实验和平行执行三个层次.

人工红绿灯为与实际红绿灯“等价”的虚拟

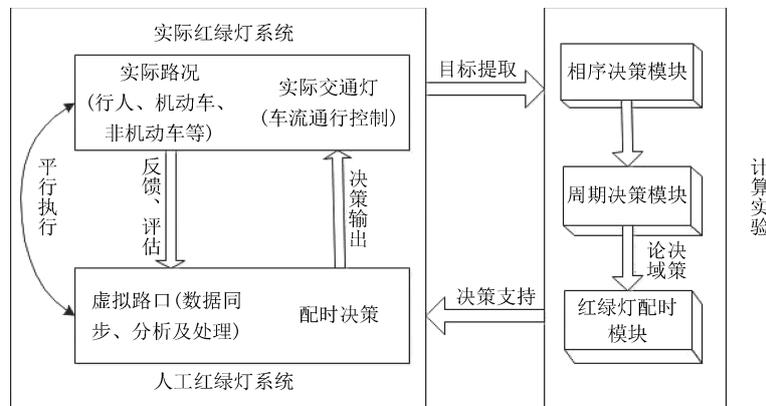


图 1 红绿灯系统结构

Fig. 1 Architecture of traffic light timing system

系统, 包括与实际路况同步运行的虚拟路口与虚拟的交通流, 通过数据采集传输等将实时路况数据传输至虚拟路口, 包括实际路况运行情况、配时决策模块, 其中, 配时决策模块为平行系统中的计算实验模块, 具体分为以下几个模块:

1) 相序决策模块, 根据各相位实时车流数据计算相位优先级, 作为下一周期相位执行顺序;

2) 周期决策模块, 由该路口历史车流数据经模糊决策确定该时段内周期所在区间, 作为各相位配时的论域;

3) 红绿灯配时模块, 根据时变论域理论及模糊集合的词计算, 由实时数据计算各相位绿灯时长.

红绿灯配时模块中, 给出交叉路口人工红绿灯配时方案, 根据交叉路口特征及车辆排队长度  $W_i, i = 1, \dots, n$ , 给出各种不同的配时周期与各相位时长的配时方案, 并将各种不同的配时周期与相位时长加载于人工红绿灯, 通过计算实验得出不同配时周期及相位时长下的出行者平均等待时间, 进一步得出各相位在给定排队长度下, 以出行者等待时间最短为目标的配时周期与相位时长的方案, 所有不同排队长度下的最优配时周期与相位时长形成模糊配时规则库, 也就是说, 本文中红绿灯配时方案是由交通流状况预先决定的.

计算实验层中, 根据收集到的交通流数据确定各相位在本周期内采集到的最大车流排队长度, 该数据经过两次计算处理, 如图 2 所示, 通过相序决策模块计算相位优先等级, 将红绿灯配时模块作为模糊控制器的输入, 经模糊化、模糊决策及逆模糊化等过程计算得到各相位绿灯时长. 计算得到的配时方案经平行执行层输入到实际红绿灯中, 红绿灯执行层通过实际红绿灯与人工红绿灯的相互连接, 对二者之间的行为进行对比和分析, 完成对各自未来的状况的“借鉴”和“预估”, 相应地调节各自的控制方式, 进而实施有效的配时方案.

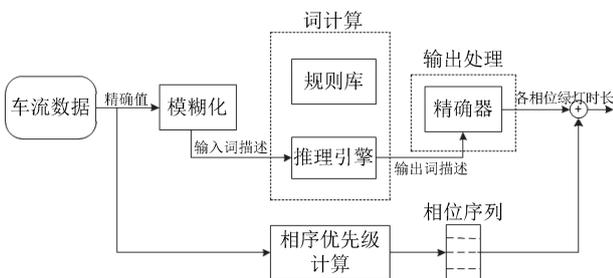


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Data processing procedure

### 3 时变论域下红绿灯配时的计算实验

根据实际情况, 一天内的不同时间段, 交通流量的变化十分明显, 红绿灯的配时周期需要进行相应

调整, 以提高交通通行效率. 本文以配时周期为论域, 给出时变论域下配时周期的词描述及平行控制策略, 并结合相位优先级计算动态配时方案.

#### 3.1 时变论域下红绿灯周期及配时的词描述

设  $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_k, \dots\}$  为波动型连通时变论域序列, 且  $\Omega_k$  连通, 记为

$$\Omega_k = [a_k, b_k], \quad k = 1, 2, \dots \quad (11)$$

对于三叉路口来说, 通常设置为三个相位  $P^1, P^2, P^3$ . 实际情况下, 每个相位的绿灯时间不低于 7s, 黄灯时间设置为 3s. 因此, 一个周期的配时最少为 30s. 考虑到驾驶员的心理承受能力及其他因素, 正常情况下, 一个周期时长不多于 150s, 早晚高峰期可以适当延长, 以适应车流量较大的状况. 设  $\Omega(t)$  为论域,  $T(t)$  为持续时间,  $t$  为  $\Omega(t)$  上的时间变量,  $t = 0, 1, 2, \dots$ , 形成时变论域序列

$$\Omega(0), \Omega(1), \dots, \Omega(t), \dots \quad (12)$$

令  $\Omega_k = [0, 30 + 20k], k = 0, 1, 2, \dots, 6$ , 有:

$$\Omega(t) \in \{\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_6\}$$

其中

$$\Omega_0 = [0, 30], \quad \Omega_1 = [0, 50]$$

$$\Omega_2 = [0, 70], \quad \Omega_3 = [0, 90]$$

$$\Omega_4 = [0, 110], \Omega_5 = [0, 130], \Omega_6 = [0, 150]$$

令  $T^i$  为各相位  $P^i$  分配的通行时间, 有  $T = T^1 + T^2 + T^3$ , 其中,  $T^i = T_g^i + T_y^i, T_g^i, T_y^i$  分别为相位  $P^i$  的绿灯和黄灯时间,  $i = 1, 2, 3$ . 综上, 有:

$$[0, 30] \subseteq \Omega_k \subseteq [0, 150] \quad (13)$$

设  $\{\omega_k^j, j \in Z^+\}$  为定义在对应论域上的模糊集合, 其隶属函数随着论域的变化而改变:

$$\omega_k^j = \begin{cases} f_0(x), & x \in [c_0, c_1] \\ \vdots & \vdots \\ f_m(x), & x \in (c_m, c_{m+1}] \\ \vdots & \vdots \\ f_{m_0}(x), & x \in (c_{m_0}, c_{m_0+1}] \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $C_0 = 0, C_{m_0+1} = 30 + 20k$ , 且

$$\bigcup_{m=0}^{m_0} [c_m, c_{m+1}] = [0, 30 + 20k] \quad (15)$$

$f_0(x), \dots, f_m(x), \dots, f_{m_0}(x)$  分别为对应论域  $[c_0, c_1], \dots, (c_m, c_{m+1}], \dots, (c_{m_0}, c_{m_0+1}]$  上的连续函数.

例如, 论域  $\Omega_k$  上 5 个基词“很短”、“短”、“中”、“长”、“很长”(分别表示为  $VS$ 、 $S$ 、 $M$ 、 $L$ 、 $VL$ ). 如在论域  $[0, 30 + 20k]$  ( $k = 0, 1, \dots, 6$ ) 上的模糊集合“很长”(VL) 定义为

$$\omega_k(VL) = \begin{cases} 0, & x \in [0, 26 + 20k], \\ 0.5x - (13 + 10k), & x \in (26 + 20k, 28 + 20k] \\ 1, & x \in (28 + 20k, 30 + 20k] \end{cases} \quad (16)$$

### 3.2 配时方案

令  $L^i$  为相位  $P^i$  的等候车辆排队长度, 用 5 个模糊集合(基词)“很短、短、中、长、很长”( $\widetilde{S}^*$ 、 $\widetilde{S}$ 、 $\widetilde{M}$ 、 $\widetilde{L}$ 、 $\widetilde{L}^*$ ) 覆盖, 每一相位  $P^i$  的排队长度  $L^i$  可以通过摄像头采集得到.  $T^i$  为相位  $P^i$  分配的绿灯与黄灯时间之和, 5 个模糊集合“很短、短、中、长、很长”( $S^*$ 、 $S$ 、 $M$ 、 $L$ 、 $L^*$ ) 定义在对应论域上. 令  $\omega_t^i$  为定义在论域  $\Omega(t)$  上的各相位配时的模糊集合, 对于三相位的 T 型交叉路口, 考虑所有可能的情况, 建立模糊规则  $R$ , 模糊规则由模糊规则  $R^i, i = 1, \dots, 5$  构成, 每个  $R^i$  包含 25 条规则, 表示如下(以  $R^1$  为例):

$R^1$ : 则  $L^1$  为  $\widetilde{S}^*$ , 且  $R^{11}: L^2$  为  $\widetilde{S}^*$  时,  $r_1^1$  如下:  
 $r_{11}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(0)$ ,  $\omega_0^1 = \omega_0^2 = \omega_0^3 = S^*$ ;  
 $r_{12}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(1)$ ,  $\omega_1^1 = \omega_1^2 = S^*$ ,  $\omega_1^3 = S^*$ ;  
 $r_{13}^1: L^3$  为  $\widetilde{M}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(1)$ ,  $\omega_1^1 = \omega_1^3 = S^*$ ,  $\omega_1^2 = M$ ;  
 $r_{14}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(2)$ ,  $\omega_2^1 = \omega_2^2 = M$ ,  $\omega_2^3 = L$ ;  
 $r_{15}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(3)$ ,  $\omega_3^1 = \omega_3^2 = S^*$ ,  $\omega_3^3 = L^*$ .

$R^{12}: L^2$  为  $\widetilde{S}$  时,  $r_2^1$  如下:  
 $r_{21}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(1)$ ,  $\omega_1^1 = \omega_1^3 = S^*$ ,  $\omega_1^2 = S$ ;  
 $r_{22}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(2)$ ,  $\omega_2^1 = \omega_2^2 = S^*$ ,  $\omega_2^3 = M$ ;  
 $r_{23}^1: L^3$  为  $\widetilde{M}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(2)$ ,  $\omega_2^1 = S^*$ ,  $\omega_2^2 = S$ ,  $\omega_2^3 = M$ ;  
 $r_{24}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(3)$ ,  $\omega_3^1 = S^*$ ,  $\omega_3^2 = \omega_3^3 = M$ ;  
 $r_{25}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(4)$ ,  $\omega_4^1 = S^*$ ,  $\omega_4^2 = M$ ,  $\omega_4^3 = S$ .

$R^{13}: L^2$  为  $\widetilde{M}$  时,  $r_3^1$  如下:  
 $r_{31}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(2)$ ,  $\omega_2^1 = \omega_2^3 = S^*$ ,  $\omega_2^2 = M$ ;  
 $r_{32}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(2)$ ,  $\omega_2^1 = S^*$ ,  $\omega_2^2 = M$ ,  $\omega_2^3 = S$ ;  
 $r_{33}^1: L^3$  为  $\widetilde{M}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(3)$ ,  $\omega_3^1 = S^*$ ,  $\omega_3^2 = \omega_3^3 = M$ ;  
 $r_{34}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(4)$ ,  $\omega_4^1 = S^*$ ,  $\omega_4^2 = M$ ,  $\omega_4^3 = L$ ;  
 $r_{35}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(4)$ ,  $\omega_4^1 = S^*$ ,  $\omega_4^2 = M$ ,  $\omega_4^3 = L^*$ .

$R^{14}: L^2$  为  $\widetilde{L}$  时,  $r_4^1$  如下:  
 $r_{41}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(2)$ ,  $\omega_2^1 = \omega_2^3 = S^*$ ,  $\omega_2^2 = L$ ;  
 $r_{42}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(3)$ ,  $\omega_3^1 = S^*$ ,  $\omega_3^2 = L$ ,  $\omega_3^3 =$

$S$ ;  
 $r_{43}^1: L^3$  为  $\widetilde{M}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(4)$ ,  $\omega_4^1 = S^*$ ,  $\omega_4^2 = L$ ,  $\omega_4^3 = M$ ;

$r_{44}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(4)$ ,  $\omega_4^1 = S^*$ ,  $\omega_4^2 = \omega_4^3 = L$ ;  
 $r_{45}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(5)$ ,  $\omega_5^1 = S^*$ ,  $\omega_5^2 = L$ ,  $\omega_5^3 = L^*$ .

$R^{15}: L^2$  为  $\widetilde{L}^*$  时,  $r_5^1$  如下:  
 $r_{51}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}^*$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(3)$ ,  $\omega_3^1 = \omega_3^3 = S^*$ ,  $\omega_3^2 = L^*$ ;  
 $r_{52}^1: L^3$  为  $\widetilde{S}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(4)$ ,  $\omega_4^1 = S^*$ ,  $\omega_4^2 = L^*$ ,  $\omega_4^3 = S$ ;

$r_{53}^1: L^3$  为  $\widetilde{M}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(4)$ ,  $\omega_4^1 = S^*$ ,  $\omega_4^2 = L^*$ ,  $\omega_4^3 = M$ ;

$r_{54}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}$ , 则  $\Omega$  为  $\Omega(5)$ ,  $\omega_5^1 = S^*$ ,  $\omega_5^2 = L^*$ ,  $\omega_5^3 = L$ ;

$r_{55}^1: L^3$  为  $\widetilde{L}^*$  则  $\Omega$  为  $\Omega(5)$ ,  $\omega_5^1 = S^*$ ,  $\omega_5^2 = \omega_5^3 = L^*$ .

同理, 当  $L^1$  分别取模糊值  $\widetilde{S}$ 、 $\widetilde{M}$ 、 $\widetilde{L}$ 、 $\widetilde{L}^*$  时, 对应的模糊规则分别为  $R^2$ 、 $R^3$ 、 $R^4$ 、 $R^5$ . 综上, 有:

$$R^{1i} = \bigcup_{j=1}^5 r_{ij}^1 \quad (17)$$

$$R^1 = \bigcup_{i=1}^5 R^{1i} = \bigcup_{i=1}^5 \bigcup_{j=1}^5 r_{ij}^1 \quad (18)$$

$$R = \bigcup_{n=1}^5 R^n = \bigcup_{n=1}^5 \bigcup_{i=1}^5 \bigcup_{j=1}^5 r_{ijn}^n \quad (19)$$

通过路口摄像头对路况的采集, 将得到的车流长度数据模糊化后输入模糊控制器, 从而相应的模糊规则被激活, 由匹配度法, 计算出下一时刻的配时周期及各相位的配时时长. 针对实时交通流量的各种情况, 模糊规则给出了相应的配时周期及各相位时长, 根据实时数据对模糊控制规则进行调整, 由运算结果对实时交通流量进行控制, 从而形成闭环控制策略, 能够达到较好的控制效果.

### 3.3 相位优先级的计算

对于同一交叉路口, 不同时刻各个相位的交通流量呈现出不同的规律, 因此, 根据交叉路口交通流量实时调整相位序列有利于提高交通通行效率. 本文根据实时排队长度来计算相位优先级.

对某三叉路口设置  $p = 3$  个相位(假设右转不受红绿灯限制), 如图 3 所示, 每个相位有  $l$  条车道, 则各相位的优先级可由以下公式计算得到:

$$P1 = \frac{\sum_{n=1}^{N_{A1}} L_n + \sum_{m=1}^{N_B} L_m}{N_{A1} + N_B}$$

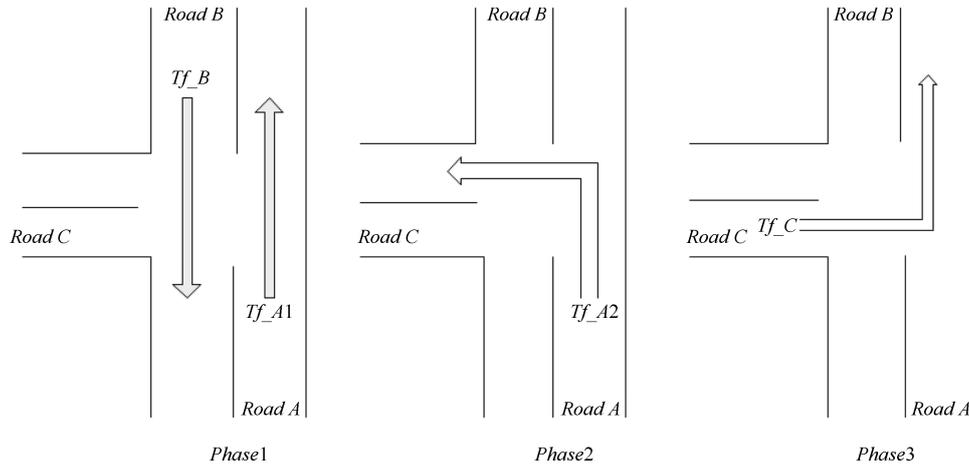


图 3 路口相位设置

Fig. 3 Traffic light phases

$$\begin{aligned}
 P2 &= \frac{\sum_{i=1}^{N_{A2}} L_i}{N_{A2}} \\
 P3 &= \frac{\sum_{j=1}^{N_C} L_j}{N_C}
 \end{aligned} \tag{20}$$

这里,  $P1, P2, P3$  分别为相位 1, 2, 3 的优先级别,  $N_{A1}, N_{A2}, N_B, N_C$  分别表示交通流方向  $Tf_{A1}, Tf_{A2}, Tf_B, Tf_C$  上的车道数量,  $L_n, L_m, L_i, L_j$  分别为方向  $Tf_{A1}$  第  $n, Tf_{A2}$  第  $m, Tf_B$  第  $i, Tf_C$  第  $j$  条车道的排队长度。

相位优先级是根据该时刻周期内检测到的最大车流长度在该周期将要结束时计算得到, 得到各相位的优先等级后, 相序决策模块将确定下一周期内的相位运行顺序. 结合时变论域下的红绿灯的模糊配时算法得到下一周期内的配时方案。

### 4 实例分析

本文以北京市海淀区某 T 型路口为例, 南北直行的双向四车道为主干道, 东西双向二车道为次干道, 如图 4 所示. 相关设定如表 1 所示. 该路口交通状况较为复杂, 且呈现出一定的规律性。

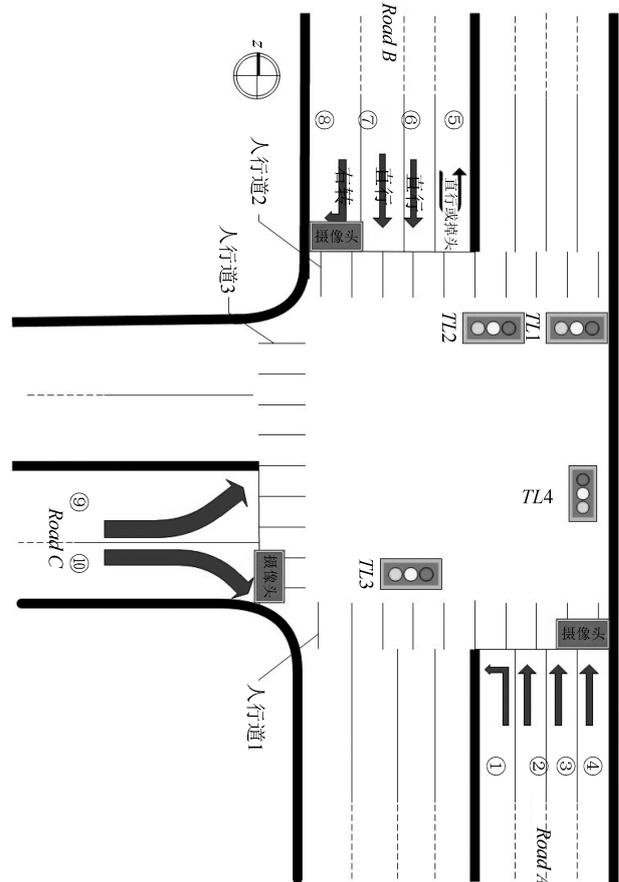


图 4 T 型路口示意图

Fig. 4 The intersection under study

表 1 交叉路口相关设定  
Table 1 Related notations

红绿灯编号	受控车道	通行方向
TL1	RoadA.2, 3, 4	北向南直行
TL2	RoadA.1	北向南左转
TL3	RoadB.5, 6, 7	南向北直行
TL4	RoadC.9	西向东左转

#### 4.1 周期时长的语言动力学分析

通过对上述路口进行数据采集, 将一天的时间以 5 分钟为单位, 划分为 288 个时间段, 检测每个时间段内通过该路口的车流总量, 通过摄像头每隔 5 分钟从现场获取一组交通流数据, 该组数据就表示

当前时刻所处时间段的实时交通数据. 本文对全年数据进行抽样调查, 抽取不同月份 (2、3、12 月份) 其中三个星期 (不包括节假日) 的数据, 求其平均值, 得到流量变化曲线如图 5~7 所示.

由图 5 可知, 工作日内在凌晨 1:30~6:00,

各相位车流量“极小”, 6:01~6:30, 各相位车流量为“很小”, 6:31~7:00, 各相位车流量为“中”, 7:00~8:30 各相位车流量为“极大”, 8:31~12:00 各相位车流量为“很大”, 12:01~13:30, 车流量为“大”, 13:31~16:30, 为“很

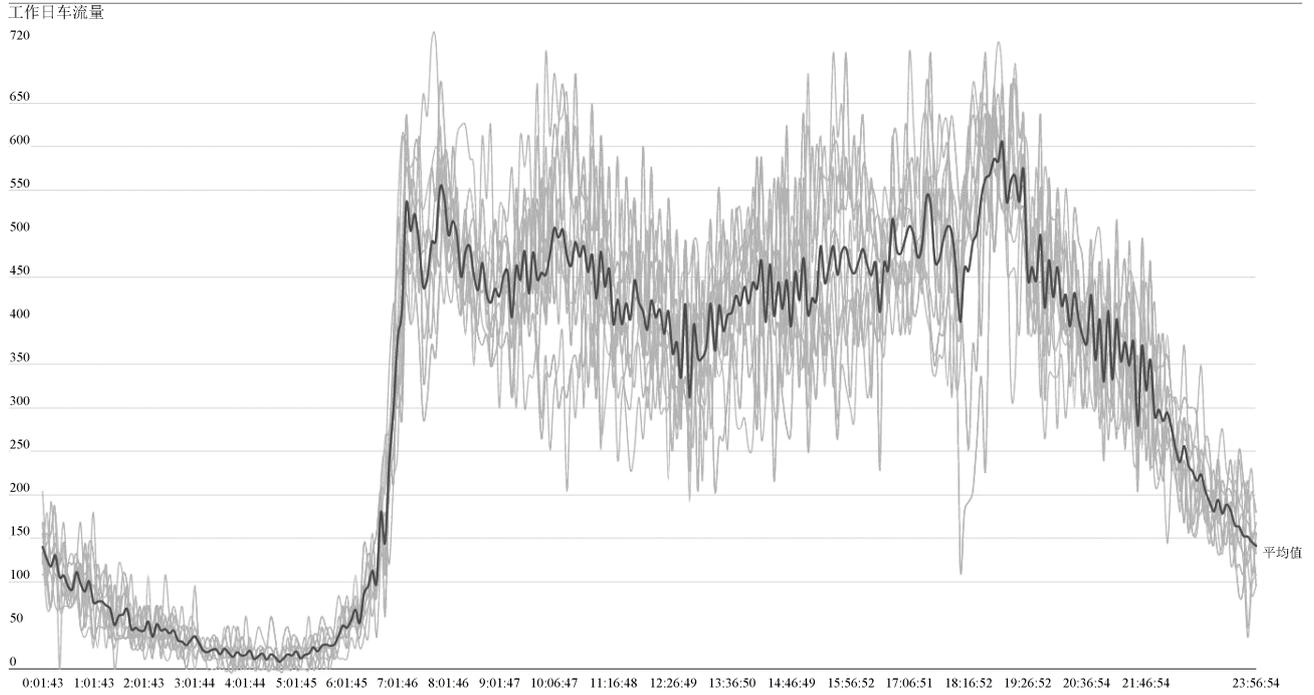


图 5 工作日车流量

Fig. 5 Traffic flow of workdays

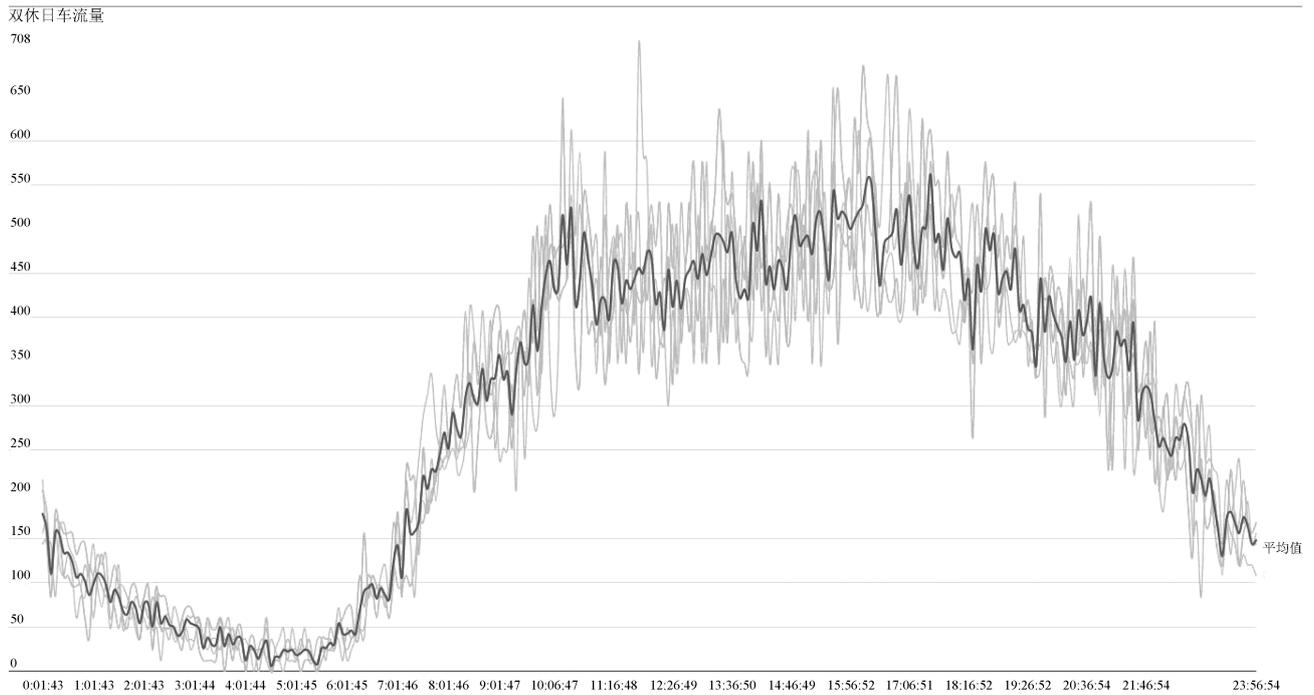


图 6 双休日车流量

Fig. 6 Traffic flow of weekends

工作日与双休日车流量对比  
604.80

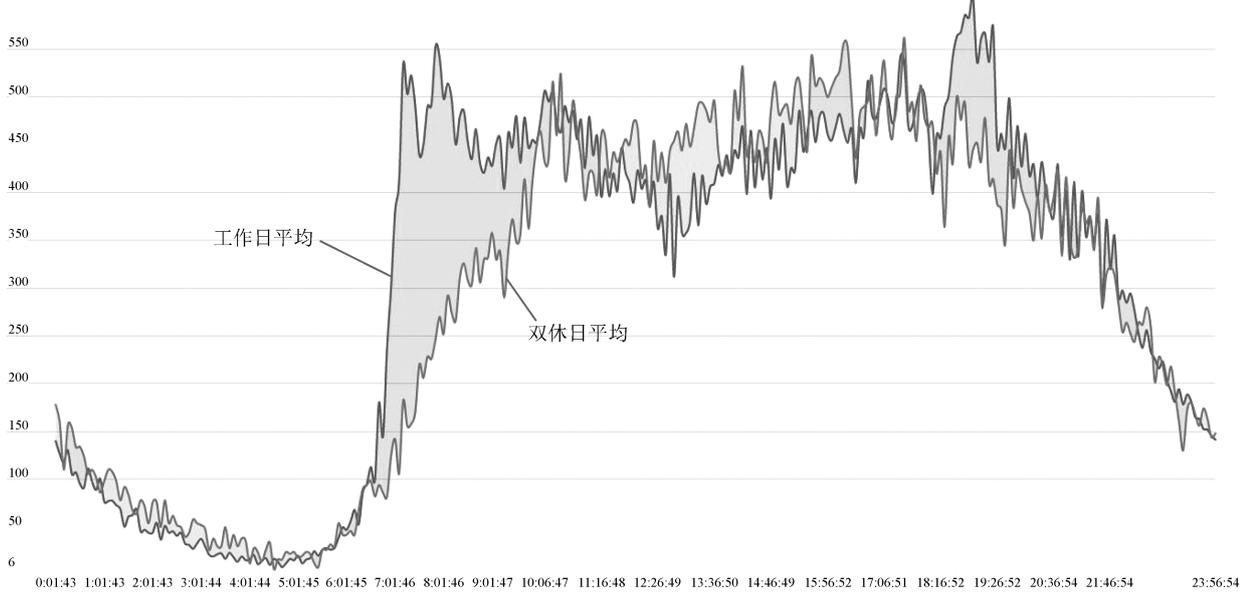


图 7 工作日与双休日车流量对比

Fig. 7 Comparison of traffic flow between workdays and weekends

大”, 16:31 ~ 19:30, 为“极大”, 17:31 ~ 22:00, 为“很大”, 22:01 ~ 23:00, 为“中”, 23:01 ~ 1:00, 为“小”, 1:01 ~ 1:30, 为“极小”. 根据车流量不同时刻的变化规律及控制策略, 设定凌晨 1:30 ~ 6:00 时间段的交通信号灯为黄灯闪烁的警示信号, 随后各时间段的周期设定为

$$\Omega_0, \Omega_3, \Omega_6, \Omega_5, \Omega_4, \Omega_5, \Omega_6 \quad (21)$$

这样就得到工作日路口相位周期的语言动力学轨迹.

同理, 双休日如图可得, 早高峰稍有延后, 且晚高峰稍有提前. 凌晨 1:30 ~ 6:00 同样设置为黄灯闪烁的警示信号, 其余时间段内可得新的语言动力学轨迹为

$$\Omega_0, \Omega_3, \Omega_3, \Omega_5, \Omega_5, \Omega_6, \Omega_5 \quad (22)$$

#### 4.2 各相位配时的语言动力学分析

设右转车辆以礼让行人为前提不受红绿灯限制. 相位设置如图 3 所示: 南北直行为相位一 ( $P^1$ ), 南向北左转为相位二 ( $P^2$ ), 西向东左转为相位三 ( $P^3$ ). 以各相位在指定周期内检测到的最大排队长度为输入  $L^i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), 经模糊化后输入模糊控制器, 根据前文所述模糊规则, 经过模糊推理计算各相位所占论域的百分比, 得到对应相位时长为

$$T^i = T(t) \times Q^i\% \quad (23)$$

输入、输出的隶属度函数分别设置如图 8 所示.

本文选取某个工作日中的三个时间点, 将检测的车流数据由模糊控制器, 通过模糊集合的词计算和匹配度法计算得到配时方案 (算法流程图如图 9).

经过实地考察, 检测到该路口凌晨 0:30 ( $t_1$ ) 分左右的各相位周期内车队长度均在 10 m 以下, 设下一相位周期为  $\Omega_0(1)$ , 各相位  $\omega_0^1(1) = \omega_0^2(1) = \omega_0^3(1) = S^*$ , 因此

$$T^1(1) = T^2(1) = T^3(1) = 10 \text{ s} \quad (24)$$

上午 7:50 ( $t_2$ ) 时测得相位各车道的平均排队长度 (即相序优先级) 为  $L^1(t_2) = 150 \text{ m}$ ,  $L^2(t_2) = 130 \text{ m}$ ,  $L^3(t_2) = 100 \text{ m}$ , 由对应配时模糊规则库, 激活 1 条模糊规则, 得:

$$\omega_6^1(2) = \omega_6^2(2) = M, \omega_6^3(2) = S \quad (25)$$

经过模糊推理与词计算, 可得决策论域为  $\Omega_6(2)$ , 对于各相位的决策时间所占论域百分比  $Q^i$ , 可得  $Q^1\%(2) = Q^2\%(2) = 50\%$ ,  $Q^3\%(2) = 25\%$ , 故下一周期的通行相序为  $P^1, P^2, P^3$ , 各相位的通行时间为

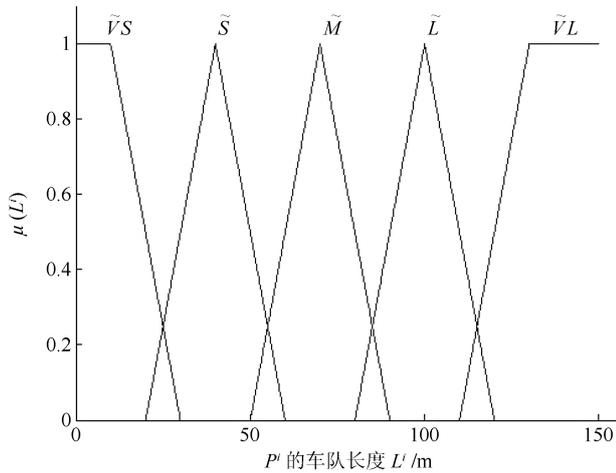
$$T^1(2) = T^2(2) = 75 \text{ s}, \quad T^3(2) = 38 \text{ s} \quad (26)$$

中午 1:30 ( $t_3$ ) 时, 测得  $L^1(t_3) = 70 \text{ m}$ ,  $L^2(t_3) = 80 \text{ m}$ ,  $L^3(t_3) = 40 \text{ m}$ , 经模糊化、模糊推理可得周期为  $\Omega_3(3)$ , 各相位配时分别为

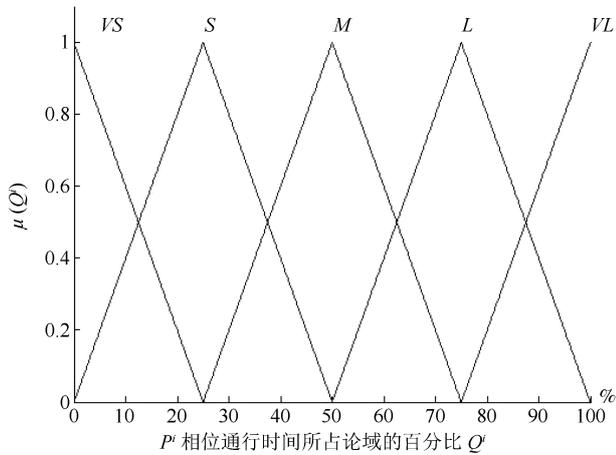
$$\omega_3^1(3) = \omega_3^2(3) = M, \omega_3^3(3) = S \quad (27)$$

经计算可得该时刻下一周期的通行相序为  $P^2, P^1, P^3$ , 各相位通行时长为

$$T^1(3) = 45\text{ s}, T^2(3) = 56\text{ s}, T^3(3) = 23\text{ s} \quad (28)$$



(a) 输入模糊集合  
(a) Fuzzy sets of input



(b) 输出模糊集合  
(b) Fuzzy sets of output

图 8 输入、输出模糊集合

Fig. 8 fuzzy sets of input and output

因此, 该路口在不同时刻各相位配时的语言动力学轨迹表示如下:

$$\begin{aligned} \omega_0^1(1) &= \omega_0^2(1) = \omega_0^3(1) = S^* \\ \omega_6^1(2) &= \omega_6^2(2) = M, \omega_6^3(2) = S \\ \omega_3^1(3) &= \omega_3^2(3) = M, \omega_3^3(3) = S \end{aligned} \quad (29)$$

### 5 结论与展望

本文针对交叉路口信号配时不合理的现象, 提出了一种基于 ACP 的平行控制方案, 以实时车流数据为输入, 以相位周期为波动型的连通时变论域, 通过设定变论域上的模糊集合及模糊规则, 给出红绿灯平行管理控制策略, 根据实时车流数据调整各

相位配时, 通过对三叉路口交通流数据实时计算出对应的配时周期及相位时长. 在同一天的不同时段内, 当车流量发生变化时, 配时周期及各相位时长也发生改变, 形成交叉路口各相位动态配时方案, 得到对应的语言动力学轨迹.

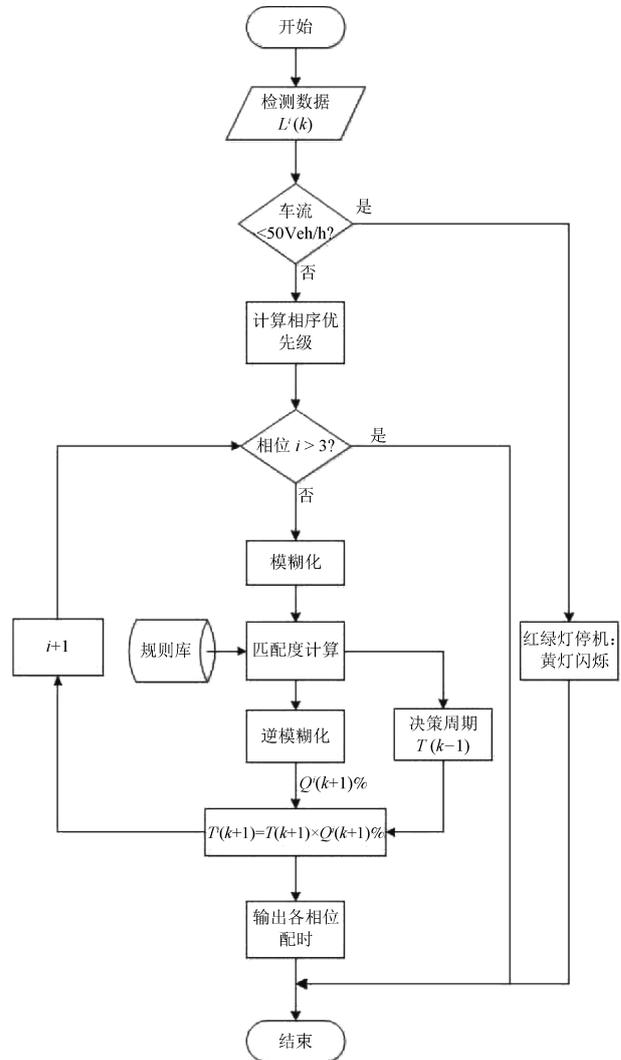


图 9 算法流程图

Fig. 9 Flow chart of the algorithm

本文主要针对 T 型路口的平行红绿灯配时展开探讨, 对于大型交叉路口行人流、非机动车流及机动车流的三元混合交通流中, 如何确定与交通流状况相一致的平行红绿灯配时周期及相位时长是未来的平行交通系统研究的一项重要工作.

### References

1 Zhou J, Chen C L Philip, Chen L, Zhao W. A user-customizable urban traffic information collection method based on wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(3): 1119–1128

- 2 Zhou J, Chen C L Philip, Chen L, Li H X. A collaborative fuzzy clustering algorithm in distributed network environments. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2014, **22**(6): 1443–1456
- 3 Zhang J P, Wang F Y, Wang K F, Lin W H, Xu X, Chen C. Data-driven intelligent transportation systems: a survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(4): 1624–1639
- 4 Zhai Gao-Shou, Cha Jian-Zhong, E Ming-Cheng. The architecture of integrated intelligent urban traffic control system. *System Engineering-Theory & Practice*, 2000, **20**(7): 80–84 (翟高寿, 查建中, 鄂明成. 集成智能城市交通控制系统体系结构的提出. 系统工程理论与实践, 2000, **20**(7): 80–84)
- 5 Li Sheng-Chun, Kong Ling-Jiang, Liu Mu-Ren, Zheng Rong-Sen. The effects of intelligent traffic light on the crossing traffic flow. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2266–2270 (李盛春, 孔令江, 刘慕仁, 郑容森. 智能交通灯对交叉路口交通流的影响. 物理学报, 2009, **58**(4): 2266–2270)
- 6 Pappis C P, Mamdani E H. A fuzzy logic controller for a traffic junction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1977, **7**(10): 707–717
- 7 Niittymaki J, Kosonen T, Nevala R. Fuzzy traffic signal control in major arterials. In: Proceedings of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Oakland, CA, USA: IEEE, 2001. 520–531
- 8 Bi Y R, Srinivasan D, Lu X B, Sun Z, Zeng W L. Type-2 fuzzy multi-intersection traffic signal control with differential evolution optimization. *Expert Systems with Applications*, 2014, **41**(16): 7338–7349
- 9 Balaji P G, Srinivasan D. Distributed multi-agent type-2 fuzzy architecture for urban traffic signal control. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Jeju Island, South Korea: IEEE, 2009. 1627–1632
- 10 Balaji P, Srinivasan D. Type-2 fuzzy logic based urban traffic management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2011, **24**(1): 12–22
- 11 Collotta M, Bello L L, Pau G. A novel approach for dynamic traffic lights management based on Wireless Sensor Networks and multiple fuzzy logic controllers. *Expert Systems with Applications*, 2015, **42**(13): 5403–5415
- 12 Abbas M K, Karsiti M N, Napiah M, Samir B B, Al-Jemeli M. High accuracy traffic light controller for increasing the given green time utilization. *Computers and Electrical Engineering*, 2015, **41**: 40–51
- 13 Chen Hong, Chen Sen-Fa. A method for real time traffic fuzzy control of a single intersection. *Information and Control*, 1997, **26**(3): 227–233 (陈洪, 陈森发. 单路口交通实时模糊控制的一种方法. 信息与控制, 1997, **26**(3): 227–233)
- 14 Li L, Lv Y S, Wang F Y. Traffic signal timing via deep reinforcement learning. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(3): 247–254
- 15 Li L, Wen D. Parallel Systems for traffic control: a re-thinking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(4): 1179–1182
- 16 Abdi J, Moshiri B, Abdulhai B, Sedigh A K. Forecasting of short-term traffic-flow based on improved neurofuzzy models via emotional temporal difference learning algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, **25**(5): 1022–1042
- 17 Abdi J, Moshiri B, Abdulhai B, Sedigh A K. Short-term traffic flow forecasting: parametric and nonparametric approaches via emotional temporal difference learning. *Neural Computing and Applications*, 2013, **23**(1): 141–159
- 18 Cong Dong-Dong, Wang Zhen-Jia. Intelligent traffic light control system of the urban transportation based on FNNC. *Control Engineering of China*, 2003, **10**(S): 14–17 (丛冬栋, 王振家. 基于 FNNC 的城市交通智能红绿灯控制系统. 控制工程, 2003, **10**(S): 14–17)
- 19 Bretherton D, Bodger M, Cowling J. SCOOT-managing congestion, control and communications. *Traffic Engineering & Control*, 2006, **47**(3): 88–92
- 20 Wiering M, van Veenen J, Vreeken J, Koopman A. Intelligent Traffic Light Control, UU-CS-2004–029, Institute of Information and Computing Sciences, Utrecht University, Utrecht, Netherlands, 2004.
- 21 Box S, Waterson B. An automated signalized junction controller that learns strategies from a human expert. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, **25**(1): 107–118
- 22 Box S, Waterson B. An automated signalized junction controller that learns strategies by temporal difference reinforcement learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, **26**(1): 652–659
- 23 Liu Qi-Zhong, Li Bing. The optimization control for regional traffic signal based on improved genetic algorithm. *Journal of Xihua University (Nature Science)*, 2014, **33**(6): 48–52 (刘脐钟, 李兵. 基于改进遗传算法的区域交通信号优化控制. 西华大学学报(自然科学版), 2014, **33**(6): 48–52)
- 24 Bingham E. Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control. *European Journal of Operational Research*, 2001, **131**(2): 232–241
- 25 Wang Fei-Yue. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293–302 (王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293–302)

- 26 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485–489, 514  
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485–489, 514)
- 27 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630–638
- 28 Mo Hong. Linguistic dynamic orbits in the time varying universe of discourse. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(10): 1585–1594  
(莫红. 时变论域下的语言动力学轨迹. 自动化学报, 2012, **38**(10): 1585–1594)
- 29 Wang Fei-Yue. Fundamental issues in research of computing with words and linguistic dynamic system. *Acta Automatica Sinica*, 2005, **31**(6): 844–852  
(王飞跃. 词计算和语言动力学系统的基本问题和研究. 自动化学报, 2005, **31**(6): 844–852)
- 30 Zadeh L A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, **8**(3): 338–353
- 31 Ning Bin, Wang Fei-Yue, Dong Hai-Rong, Li Run-Mei, Wen Ding, Li Li. Parallel systems for urban rail transportation based on ACP approach. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, **10**(6): 22–28

(宁滨, 王飞跃, 董海荣, 李润梅, 文丁, 李莉. 基于 ACP 方法的城市轨道交通平行系统体系研究. 交通运输系统工程与信息, 2010, **10**(6): 22–28)



**莫红** 长沙理工大学电气与信息工程学院教授. 2004 年获得中国科学院研究生院工学博士学位. 主要研究方向为语言动力系统与智能计算. 本文通信作者.  
E-mail: mohong198@163.com

(**MO Hong** Professor at the School of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology. She received her Ph.D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2004. Her research interest covers linguistic dynamic systems and intelligent computing. Corresponding author of this paper.)



**郝学新** 长沙理工大学电气与信息工程学院研究生. 主要研究方向为语言动力系统与智能交通系统.  
E-mail: mohong198@163.com

(**HAO Xue-Xin** Master student at the School of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology. His research interest covers linguistic dynamic systems and intelligent transportation systems.)