

# 城市单路口交通信号两级模糊优化控制与仿真<sup>\*</sup>

杨文臣, 张 轮<sup>1</sup>, 何兆成<sup>2</sup>

( 1. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804;  
2. 中山大学工学院 // 广东省智能交通重点实验室, 广东 广州 510275 )

**摘 要:** 该文提出交通信号两级模糊控制的两种优化方法。首先, 针对两级模糊控制器在低流量下考虑多维交通状态变量致使路口交通状态弱化, 提出一种两级组合模糊控制器, 其采用 0-1 组合思想, 立足路口交通状态特征选取模糊控制器的交通状态变量的组合及结构。接着, 针对模糊控制器参数经验设置及不具备学习能力, 提出一种两级模糊在线优化控制器, 其引入滑动时间窗思想, 采用混合遗传算法在线同时优化模糊控制器隶属函数和控制规则的参数; 最后, 开发两级模糊在线优化控制的 Paramics 仿真平台, 对两种模型进行效用评价; 仿真结果表明所提出的方法分别从模糊控制器结构和参数优化的角度改进了两级模糊控制器的不足, 控制效果符合交通管理者的控制目标。

**关键词:** 交通工程; 交通信号; 模糊逻辑; 组合模糊; 遗传算法

**中图分类号:** U491.51, TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2012) 06-0041-07

## Optimal Two-stage Fuzzy Control for Urban Traffic Signals at Isolated Intersection and Its Simulation

YANG Wenchen<sup>1</sup>, ZHANG Lun<sup>1</sup>, HE Zhaocheng<sup>2</sup>

( 1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;  
2. School of Engineering // Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China )

**Abstract:** Two optimal approaches of two-stage fuzzy controller for traffic signals at isolated intersections are presented. Firstly, from the perspective of structural optimization, a two-stage combination fuzzy controller is designed, for the consideration of multi-dimensional traffic status variables leading to the inefficiency of traffic states at intersections under low traffic flow. The controller introduces 0-1 combination and determines the combination of traffic status variables of fuzzy controller's inputs. Secondly, aiming at the problems of fuzzy controller parameter empirical settings and functional disability of learning, a two-stage fuzzy logic traffic signal controller with online optimization is proposed, for the insufficiency of fuzzy controller parameter settings and functional disability of learning. This controller introduces the rolling horizon framework and optimizes the parameters of membership functions and fuzzy rules of fuzzy controllers by using hybrid genetic algorithm. Finally, the performance of the two proposed models is validated via online Paramics-based simulation platform, and extensive relative simulation tests have demonstrated the potential of the developed controllers for adaptive traffic signal control.

**Key words:** traffic engineering; traffic signal; fuzzy logic; combination fuzzy; genetic algorithm

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50408034); 上海市创新基金资助项目 (11ZZ27)

作者简介: 杨文臣 (1985 年生), 男, 博士生; E-mail: tongjiywc@163.com

城市交通信号多级模糊控制器综合考虑多维交通状态影响因素,如排队长度、饱和流量和相位持续时间等,可较准确地描述路口各相位交通通行需求的紧急程度,并通过分级分散处理状态变量可避免状态变量间相互干扰;同时,通过优化路口相位顺序,可提高控制器性能;仿真结果表明该方法能有效减少延误、提高路口通过量,优于定时控制等<sup>[1]</sup>。但其采用的标准四相位结构忽略了右转等非关键车流,在交通状况复杂的路口,对交通流的波动响应不足;在低饱和的交通状态下,因考虑多维交通状态影响因素,致使路口交通状态弱化,多级模糊控制器性能差;而且,多级模糊控制器的多参数采用经验知识确定,不具备学习功能<sup>[2]</sup>。

Ballester、Henry、Bingham 等采用遗传算法<sup>[3]</sup>、神经网络<sup>[4]</sup>、增强学习等智能算法在交通信号与路口环境交互过程中<sup>[5]</sup>,学习控制器参数,仿真结果证明了模糊优化控制的有效性,但这类方法多是离线优化,且控制器性能取决于优化算法的效率、有校样本集或回馈函数的设计。遗传算法采用群体搜索策略,不依赖梯度信息和经验知识<sup>[6]</sup>,Lekova、Kim、Yang 等将其应用于模糊控制器参数优化,可分为已知模糊规则参数优化模糊隶属参数,已知隶属参数优化模糊规则参数<sup>[7-9]</sup>,同时优化隶属函数与模糊规则参数三类<sup>[10]</sup>。目前,模糊遗传优化控制研究多属前两类,同时优化规则和隶属参数的交通信号模糊控制器及其微观交通仿真评价的研究较少。同时,多数已有方法采用 Matlab 或计算机程序模拟路口交通流生成,缺乏反映现实路网车流运行的微观模拟方法和模糊控制方法布署实施的仿真评价技术的研究<sup>[11]</sup>。

本文以基于交通强度的交通信号两级模糊控制为基础,研究城市交通信号模糊智能优化控制及其在线仿真。针对两级模糊控制因考虑多维交通状态变量致使在低流量下交通状态弱化等不足,从两模糊控制器结构及交通状态参数选取优化的角度,提出城市交通信号组合模糊优化控制方法,该方法采用“0-1”组合的方式,在低流量下仅考虑队长,采用单级模糊控制器,而在中高流量下综合考虑交通状态因素,采用二级模糊控制器。针对模糊控制器参数人工设定且不具备学习功能,从模糊控制器参数优化的角度,提出基于混合遗传算法的交通信号模糊优化控制,其引入滑动时间窗,设计两级模糊控制器隶属函数和控制规则参数的优化框架,并采用改进的混合遗传算法在线学习两级模糊器参数。最后,利用 Paramics 提供的二次开发接口和 Matlab

与 VC++ 的混合编程技术构建交通信号两级模糊在线优化控制 Paramics 仿真平台,并以典型城市单交叉口进行实验,采用四种控制策略对案例进行大量仿真,对提出的两种模型进行效用评价。

## 1 两级组合模糊控制模型

### 1.1 建模理论分析

交通信号两级模糊控制器的性能受限于交通状态变量的选择和控制器参数的合理设置。路口车辆较多时,红灯相位均有一定排队车辆数,仅凭排队车辆数难以准确描述路口状态,基于交通强度的状态变量考虑相位时间及绿相车流到达情况,符合控制需求;但是,在车流量低的情况下,交通流为自由流,路口排队车辆数很少,由于考虑相位时间,路口状态被弱化<sup>[12]</sup>,使低流量下的两级模糊控制等同于最小周期控制,致使控制性能差,主要体现在两个方面:

- 1) 相位决策延长时间小,相位频繁切换致使路口新增车辆通常要排队才能通过。
- 2) 红灯相位时间短而目标绿灯相位排队车辆数少,致使新绿灯相位无车浪费绿灯时间现象严重。

因而,两级模糊控制器状态变量的选取应与路口交通状态直接关联,状态变量的选择取决于路口交通状态特征,面向不同的交通状态,模糊控制器的结构应是自适应的。

### 1.2 两级组合模糊概念模型

结合经典模糊控制器在低流量下具有好的控制性能,引入“0-1”组合控制思想<sup>[13]</sup>,提出城市交通信号组合模糊控制方法:其在低饱和交通状态下,选择相位排队车辆数作为交通状态变量,采用经典的单级模糊控制 (Single-level Fuzzy Traffic Signal Control, SFTSC)<sup>[12]</sup>;而在高饱和交通状态下,选择相位交通强度作为交通状态变量;采用基于交通强度的两级模糊控制 (Two-level Traffic Signal Control, TFTSC)<sup>[10]</sup>。组合模糊控制的概念模型用公式 (1) 描述:

$$\begin{cases} \text{SFTSC} & \text{if } Y \leq Y_0 \\ \text{TFTSC} & \text{if } Y > Y_0 \end{cases} \quad (1)$$

高饱和及低饱和交通状态的划分采用二维路口交通状态划分方法<sup>[14]</sup>,结合高饱和和低饱和状态下的交通流特性,以空闲状态的阈值作为高低饱和度状态划分的标准,即交叉口总流率  $Y_0 = 0.42$  (交叉口的占有率  $O_i$  小于 0.33)。两级组合模糊控制选取  $T_c$  为滚动优化周期,即每个  $T_c$  判定路口交

通状态,并根据路口交通状态选择下一个控制间隔内的模糊控制器。 $T_o$ 由交通信号控制方案的实时性及平衡过渡的需求综合确定。

## 2 两级模糊遗传优化控制设计

### 2.1 两级模糊在线优化框架

单一优化模糊控制规则或隶属函数参数将人为割断二者内在联系,违背模糊控制内涵<sup>[7]</sup>。为此,研究同时优化隶属函数与模糊规则的参数。为使模糊交通控制器的参数设置与路口实时的交通状态需求相匹配,引入滑动时间窗的思想<sup>[15]</sup>。滑动时间窗口的原理如图1所示:在整个控制时间窗口 $H$ 内,实时采集每一个目标控制间隔 $T$ 内的交通流数据,在每一个控制器优化时间段的起点 $T_o$ ,优化并更新模糊控制器参数,到下一个目标控制间隔,重复上述过程,从而动态地适应路口交通流的波动特性。

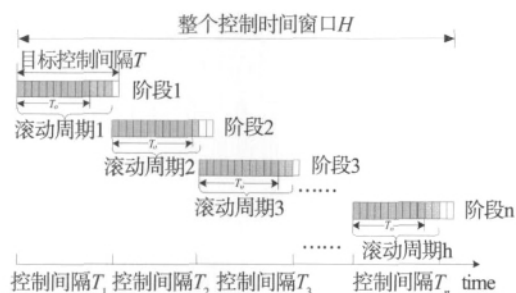


图1 滑动窗口的原理图

Fig. 1 The illustration of rolling horizon

遵循滑动时间窗滚动优化的原理,交通信号两级模糊优化控制结构如图2所示。

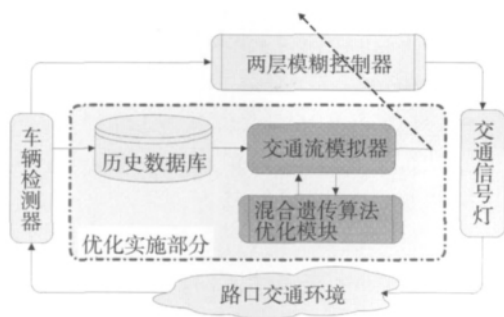


图2 交通信号两级模糊优化控制结构

Fig. 2 The structure of optimal fuzzy control system

控制实施模块在 $T$ 内实时采集各路口各车道内车辆的到达/离开交通流数据,并存储在历史数据库;在每个优化时间段的起点 $T_o$ ,交通流重现

模块根据历史数据库中的准实时交通数据,模拟上一个控制间隔内的路口车流运行过程;同时,遗传优化模块采用混合遗传算法,学习路口控制器参数,并在优化结束后更新模糊交通控制器参数。

### 2.2 基于状态划分延误建模

选取交叉口平均延误作为控制器参数每一代个体的性能评价指标。延误的计算方法可分为两类:

- ① 中观数值模拟<sup>[10]</sup>,延误由数值拟合公式计算得出,控制效果取决于中观模型与现实的相符程度。
- ② 微观仿真模拟<sup>[16]</sup>,由交通仿真软件模拟车流运行,提取延误的仿真结果,该方法耗时,实现复杂。

受限于Paramics等微观交通仿真软件二次开发的支持性,研究采用中观数值模拟方法。以往多数研究采用“到达即垂直排队”思想建立车辆在交叉口行驶的延误模型,但在低饱和和流量下,车辆在战略与战术线圈间存在离散行驶过程,该模型误差较大。为此,基于状态划分的延误建模分为高饱和与低饱和两种交通状态,模拟路口车辆的行驶。在低饱和情况下,新到达车辆以50%的概率加入排队;高饱和情况下到达车辆以100%概率加入排队。高饱和与低饱和度状态下延误的详细建模过程分别详见文献[10,17]。

### 2.3 求解算法

2.3.1 模糊控制器参数编码 研究所采用的模糊控制器具有两个输入变量和一个输出变量,均划分为5个模糊子集<sup>[10]</sup>。为提高算法精度和收敛速度,采用实数编码的遗传算法。如图3所示,交通信号模糊控制器采用三角形隶属函数,且为避免染色体过长,每一个三角隶属度函数的起点值和终点值分别取前后两个隶属度函数的顶点值。因此,仅凭隶属度函数的5个顶点值,便可准确地表示其形状和位置。

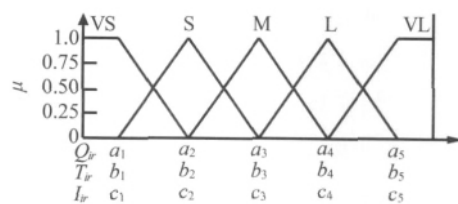


图3 隶属参数编码原理示意图

Fig. 3 Decoding for membership functions parameters

模糊控制器的控制规则采用整数矩阵 $R$ 表示: $R = [r_{ij}]_{5 \times 5}$ ,其中, $i, j, r_{ij}$ 为集合 $[1, 5]$ 内的整数,分别表示两个输入变量和一个输出变量模糊

子集的索引值。逐行将矩阵  $R$  中后一行的首个元素接到上一行的最末元素之后, 将矩阵  $R$  转换为行向量  $R'$ , 则模糊规则矩阵  $R$  的编码可用行向量  $R'$  表示。

两级模糊控制器的编码示意如图 4 所示, 为确保隶属参数的形状和模糊规则的客观性, 隶属函数中心点的参数编码按升序排序; 交通强度判定模块的模糊规则参数按行按列排升序, 而决策模块参数按行排降序。

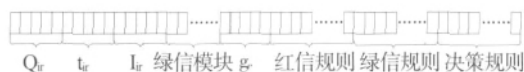


图 4 两极模糊控制器参数编码示意图

Fig. 4 Schema of decoding for two-stage fuzzy controller

2.3.2 改进的混合遗传算法 采用改进混合遗传算法优化模糊控制器参数<sup>[14]</sup>, 其引入模拟退火算子增强遗传算法局部搜索能力, 从而可搜索到更好的解集。流程如下:

1) 初始化: 初始遗传算法和模拟退火算法的控制参数。其中, 种群规模  $M$  取 100, 进化代数  $Gen$  取 100, 初始退火温度  $T_0$  取 30 000; 交叉和变异的概率随进化代数及个体的优劣程度自适应地动态调整。

2) 评价: 采用基于状态划分延误模型计算延误  $d$ , 再由公式 (2) 计算个体适应度

$$f(d) = \frac{1}{1+d} \quad (2)$$

3) 选择算子: 采用轮盘概率选择算子。

4) 交叉算子: 采用非均匀算术杂交算子。

5) 变异算子: 采用自适应的非一致变异算子, 其根据个体适应度值的优劣和进化代数动态地调整个体基因的变异量。

6) 精英保留策略: 将新生代种群中的最差个体替换为父代种群中的最好个体。

7) 模拟退火寻优策略: 选取新生代种群中的最好个体为初始向量, 调用模拟退火算法强化遗传算法局部寻优的搜索能力。①由退火状态函数产生新个体向量; ②Metropolis 准则概率选择新个体; ③判断退火抽样是否稳定, 若不稳定, 返回①; 若稳定, 执行降温操作并转到 8);

8) 判断算法终止条件: 若达到最大代数转到 2); 反之, 输出最优个体及其性能指标值。

### 3 案例分析

#### 3.1 两级模糊在线优化 Paramics 仿真平台

将 Paramics 作为各类信号控制策略的无偏评价工具, 搭建基于 Paramics 的模糊控制在线优化仿真平台<sup>[16]</sup>。该平台包括控制实施模块和优化实施模块, 只有控制器的当前优化请求结束后, 最新的优化指令才能开始执行。平台特性如下: ①为缩短开发周期和保障算法精度, 采用 Matlab 实现三类交通信号模糊控制器; ②为实现 Paramics 仿真平台与模糊控制器的交互, 采用 Matlab 混合编程方法<sup>[18]</sup>; 并采用数据库的命令队列技术, 建立“控制实施部分”和“优化实施部分”间的通信; ③在 Paramics 的 Modeler 模块中建立典型城市交叉口的仿真路网, 加载模糊控制插件并设计不同交通场景, 通过 Paramics 仿真验证交通信号两级模糊控制。

#### 3.2 Paramics 仿真

如图 5 所示, 以典型城市道路的正交十字路口作为研究对象, 采用标准四相位控制, 为避免因右转车辆交织造成直行车辆的干扰, 影响路口效率, 直行相位考虑右转车流。在每个进口的每条车道以 150 m 为间距, 各布设战略和战术两组检测线圈实时检测路口交通数据。

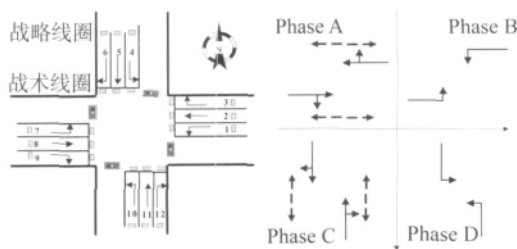


图 5 单交叉口模型示意图

Fig. 5 Experimental test isolated intersection

3.2.1 实验仿真流程 遵循交叉口信号控制最大及最小周期原则和最大及最小绿灯时间等基本原则, 遵循两级模糊控制的基本流程<sup>[10]</sup>, 在交通信号两级组合模糊控制中, 滚动优化周期  $T_c$  取 5 min, 即每过 5 min 两级组合模糊优化模块启动, 以合理选取模糊控制器的结构; 在两级模糊遗传优化控制中, 取目标控制间隔  $T$  为 10 min, 优化时间段起点  $T_s$  为 8 min, 即在每个目标控制间隔结束前 2 min, 启动优化实施模块学习三类模糊控制器参数, 并在优化实施模块优化结束后更新控制实施模块的控制器参数。

3.2.2 仿真场景 为验证本文提出的两种交通信

号模糊优化控制方法, 考查其不同流量下及交通流波动情况下的控制效果, 设计多种仿真场景, 包括交叉口各进口道车流均匀到达场景及各流向流量突然变化的场景。仿真实验场景设计如下:

1) 仿真时长为 13 h (00:00–12:00), 进口道流量在 400~1 600 pcu/h 变化, 每小时为一仿真时段 period, 且左-直-右车流转向比例为 0.25–0.60–0.15。

2) 为模拟路口短时交通流到达波动特性, 在 Paramics 的 Profile 文件中设置 1 h 内 10 min 间隔车辆的发车比例如为 15–11–17–22–16–19。

3) 根据国内城市道路直行设计通行能力为 1 650 pcu/h、左转/右转设计通行能力为 1 550 pcu/h 的规范, 车头时距 MHT、驾驶员反应时间 MDT 的仿真参数校准为 1.8 s、1.5 s。

4) 由于仿真效果受随机种子影响, 每种控制方案采用批量仿真 10 次。

3.2.3 实验设计 设计实验 I 验证提出的交通信号组合模糊控制方法 (CTFIFuzzy), 该实验对比定时、感应和两级分层模糊控制, 定时控制 (Fixed) 取路口进口道平均流量 900 pcu/h (05:00–06:00) 下的 Webster 控制方案<sup>[19]</sup>, 感应控制 (Actur-

ated) 的感应线圈距离停车线 30 m, 单位延长时间为 3 s<sup>[14]</sup>; 两级分层模糊控制方法 (TFIFuzzy) 采用基于交通强度的两级模糊控制<sup>[10]</sup>。设计实验 II 验证提出的交通信号两级模糊优化控制 (GAFuzzy), 该实验对比分析定时、感应和两级模糊控制方法。仿真实验的交通控制参数设置如下: 4 个相位的最小绿灯时间均为 12 s; 直行相位 1 和相位 3 的最大绿灯时间为 80 s, 而左转相位 2 和相位 4 的最大绿灯时间为 50 s; 最大周期 220 s。

3.2.4 结果分析 选取信控路段的平均延误 (Delay)、平均队长 (Queue)、平均速度 (Speed) 和进口道平均通过量 (Count) 为控制器的性能评价指标。

1) 两级组合模糊控制。

两级组合模糊的仿真结果如图 6 所示, 在整个仿真过程中, 组合模糊控制稳定, 延误及队长等性能指标均优于定时、感应和两级模糊控制方法, 且随着流量增加, 控制效果优势明显。以延误为例, 相比其它控制方法, 组合模糊改进幅度约为 10%~47%。而且, 在低流量下, 组合模糊控制器选取排队长度作为状态变量后, 控制效果明显改善, 改进了两级模糊在低流量下控制效果差的不足。

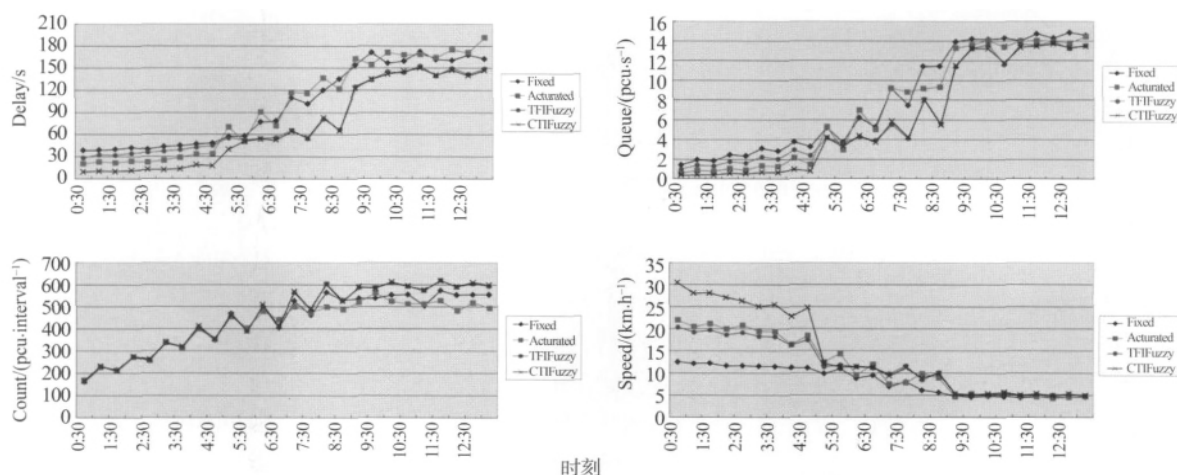


图6 交通信号组合模糊控制的各评价指标的仿真结果

Fig.6 Simulation results of two-stage combination fuzzy controller

2) 交通信号模糊遗传优化控制。

两级模糊遗传优化控制各性能指标的仿真结果如图 7 所示。在整个仿真过程中, 基于 GA 的模糊优化控制方法稳定, 在线准实时学习控制器参数后, 延误等各性能指标均优于两级模糊等控制方法。

以延误为例, 在整个仿真过程中, 基于 GA 的模糊优化控制比感应控制减少延误 27%, 比定时控制减小延误近 30%, 比两级模糊控制减少延误

约 13%, 且随着流量增加, 控制效果优势明显, 符合交通管理者控制目标。

就遗传算法效率而言, 在 90% 的控制间隔内, 模糊控制器参数可完成更新, 基本可满足准实时交通控制的要求。但是, 当路口处于饱和或过饱和的交通状态时, 各进口道均存在大量排队车辆, 采用来车即排队的延误模型计算延误消耗的时间大, 在指定的控制间隔内, 模糊控制器的参数更新失败。

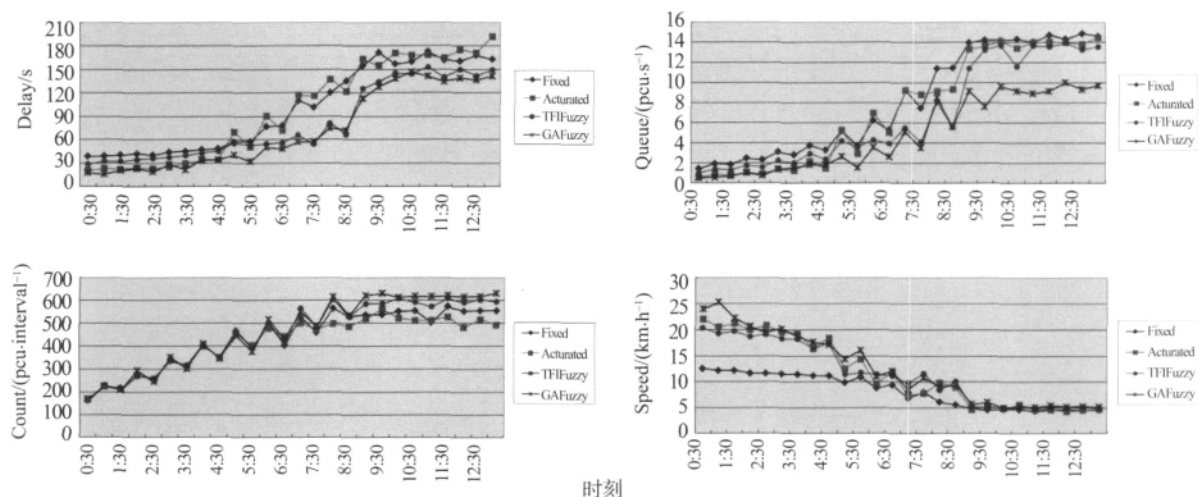


图 7 基于混合遗传算法的交通信号两级模糊优化控制的各评价指标的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of two-stage fuzzy controller based HGA

以红灯紧迫度判定模块的模糊控制器为例,说明交通信号两级模糊控制器的参数在优化前后的差别。图 8 (b) 是红灯紧迫度判定模块优化后的隶属度函数,人工设置的隶属度函数见图 8 (a)。从图 9 的模糊控制规则输出曲面对比可以初步看出:优化后的模糊规则弱化了较低交通强度状态下的决策输出,而强化了较高强度状态下的决策输出。

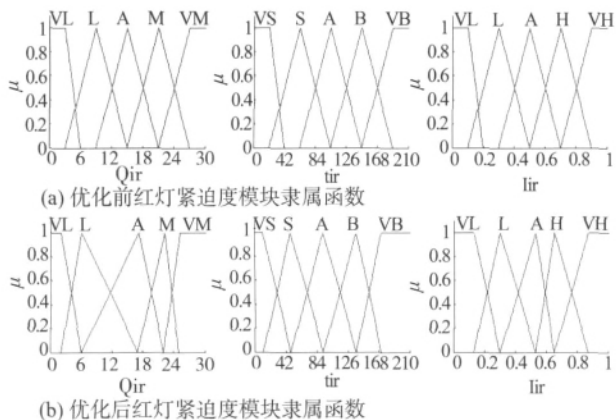


图 8 红灯紧迫度判定模块的隶属函数

Fig. 8 Membership functions of Red urgency judgment module

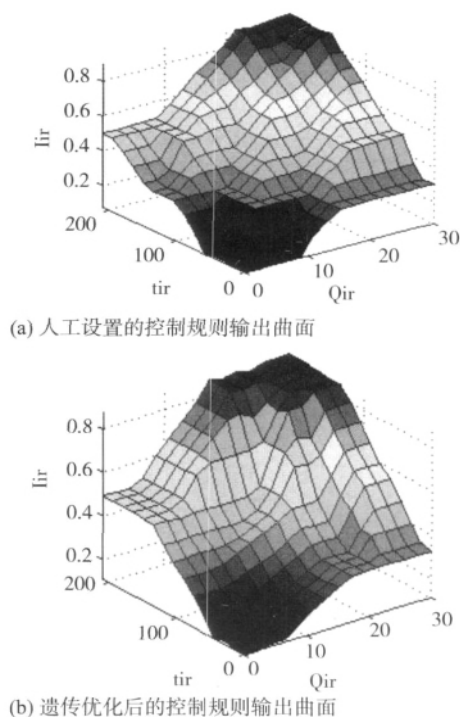


图 9 红灯紧迫度判定模块的控制规则输出曲面

Fig. 9 Output surface viewer of Red urgency judgment module

## 4 结 语

本文研究了基于交通强度的城市交通信号两级模糊控制的两种优化方法。交通信号两级组合模糊控制从模糊控制器结构优化角度引入“0-1”组合思想,在低流量下采用单级控制器,在中高流量下采用基于交通强度的两级模糊控制器;交通信号两级模糊遗传优化控制从模糊控制器参数优化角度

引入“滑动时间窗”的思想,其根据路网准实时交通状态,采用混合遗传算法在线学习两级模糊控制器隶属函数和控制规则参数;同时,开发了城市交通信号两级模糊在线优化控制 Paramics 仿真平台,对两级模糊优化控制布署实施的仿真评价技术展开研究。

大量 Paramics 仿真结果表明:组合模糊控制方法根据路口交通状态选取模糊控制器状态变量组合

及其结构是合理的,其改进了两级模糊在低流量下控制效果差的不足;而两级模糊遗传优化控制准实时地学习控制器参数,性能稳定。相比定时控制等方法,两种优化后的控制器具有更好性能,且随着流量增加,控制效果优势明显,控制效果符合交通管理者控制目标。

#### 参考文献:

- [1] 李瑞敏,陆化普,史其信. 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.
- [2] NAIR B M, CAI J. A fuzzy logic controller for isolated signalized intersection with traffic abnormality considered [C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2007: 1229-1233.
- [3] BALLESTER P J, CARTER J N. A parallel real-coded genetic algorithm for history matching and its application to a real petroleum reservoir [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 59(3): 157-168.
- [4] HENRY J J, FARGES J L, GALLEGU J L. Neuro-fuzzy techniques for traffic control [J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(6): 755-761.
- [5] BINGHAM E. Reinforcement learning in neuro-fuzzy traffic signal control [J]. European Journal of Operation Search, 2001, 131(2): 232-241.
- [6] 燕乐伟,陈洋洋,周云. 一种改进的微种群遗传算法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(1): 50-54.
- [7] RAHMAN S M, RATROUT N T. Review of the fuzzy logic based approach in traffic signal control: Prospects in Saudi Arabia [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(5): 58-70.
- [8] LEKOVA A, MIKHAILOV L, BOYADJIE D. Redundant fuzzy rules exclusion by genetic algorithms [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 100(1): 235-243.
- [9] KIM J W, KIM B M, KIM J Y. Genetic algorithm simulation approach to determine membership functions of fuzzy traffic controller [J]. Electronics Letters, 1998, 34(20): 1982-1983.
- [10] 杨祖元,黄席樾,刘鸿飞,等. 基于改进遗传算法的交叉口模糊控制研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(9): 3330-3333.
- [11] KELSEY R L, BISSER K R. A simulation environment for fuzzy control of traffic systems [C]//The 12th IFAC-World Congress, 1993, 5: 553-556.
- [12] HOYER R, JUMAR U. An advanced fuzzy controller for traffic lights [J]. Annual Review in Automatic Programming, 1994, 19: 67-72.
- [13] CHROBOK R, KAUMANN O, WAHLE J, et al. Different methods of traffic forecast based on real data [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 155(3): 558-568.
- [14] 何兆成,杨文臣,梁诗. 城市单交叉路口交通信号实时优化控制与仿真[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(33): 239-243.
- [15] PAZ A, PEETA S. Behavior-consistent real-time traffic routing under information provision [J]. Transportation Research Part C, 2009, 17(6): 642-661.
- [16] QUADSTONE. Paramics 6. 6. 1 user manual [M]. Edinburgh, Scotland: Quadstone Ltd, 2008.
- [17] GAO J X, LI J G, ZHAO X H. Two-stage fuzzy control of urban isolated intersection signal for complex traffic conditions [C]//Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004: 5287-5291.
- [18] 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.
- [19] WEBSTER F V. Traffic signal settings [R]. Road Research Laboratory, London, U K, Road Res Tech, 1958: 39.