

# 城市交通信号三级模糊滑动优化控制方法

杨文臣<sup>1</sup>, 张 轮<sup>1</sup>, 张 孟<sup>1</sup>, 何兆成<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中山大学 广东省智能交通重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘要:** 提出一种城市交通信号三级模糊滑动优化控制方法. 引入非冲突车流的搭接相位构建交通信号三级模糊控制器的模型, 并采用滑动时间窗设计滑动优化的框架. 根据实时采集的交通数据, 采用基于黄金分割的混合遗传算法, 在线学习模糊控制器的隶属函数及控制规则参数. 在常态及事故不同交通条件下, 以典型路口进行 Paramics 仿真试验. 结果表明提出方法的自适应能力好, 可快速响应路口交通流的不确定性事件, 且在高饱和的交通条件下性能稳定.

**关键词:** 智能交通; 交通信号; 模糊逻辑; 滑动时间窗; 黄金分割; 遗传算法

**中图分类号:** U491.51, TP391.9

**文献标志码:** A

## Rolling-horizon Optimization-based Three-stage Fuzzy Logic Controller for Urban Traffic Signals

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

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** A rolling-horizon optimization-based three-stage fuzzy controller for urban traffic signals is presented. This controller introduces overlap phases of conflict-free approach flows to develop the model of a three-stage fuzzy controller. Aiming at online learning of the parameters of fuzzy membership functions and fuzzy rules, a rolling-horizon framework is used to efficiently explore the effectiveness of fuzzy controllers under different traffic conditions. In this framework, according to the real-time observed traffic data, a genetic algorithm (GA)-based heuristic integrated with golden ratio (GRGA) has been employed to yield reliable solutions. Experiments are conducted on a typical blackspot isolated

intersection via Paramics-based online simulation under daily and abnormal traffic scenarios. Extensive simulation results demonstrate the potential of the developed controllers for adaptive traffic signal control with rapid response to the uncertainty of time-variant traffic flow at intersections.

**Key words:** intelligent transportation; traffic signal; fuzzy logic; rolling horizon; golden ratio; genetic algorithm

城市交通信号模糊控制是解决城市交通问题有效的内涵式智能解决方案之一. 两级模糊控制器综合考虑多类交通状态影响因素, 分级分散处理状态变量, 优化路口相位顺序, 提高了控制器性能<sup>[1-2]</sup>. 但多数研究遵循标准四相位结构, 采用“跳相”的策略优化路口相序, 容易引起驾驶员的不适应<sup>[3]</sup>; 而且, 控制器参数通常根据专家的经验知识确定, 相位结构和控制模型标定后便不再改变, 不能有效处理路口各进口道到达车流的时变性及不确定性<sup>[4]</sup>.

Dion 等<sup>[5]</sup>从相位结构优化的角度, 通过固定基准相位顺序, 并引入同向车流的两个搭接相位优化相位结构, 但优选准则简化了各流向通行需求的时变特性及相位切换对驾驶行为的影响, 模型结构实质上仍为两级模糊控制. 杨文臣等<sup>[6]</sup>综合考虑候选相位交通强度和相位切换对驾驶行为的影响, 通过非冲突车流的 8 个搭接相位实现各相位顺序及结构的优化, 提出了三级模糊控制器, 但控制器参数不具备在线学习功能. 遗传算法采用群体搜索策略, 不依赖梯度信息和经验知识, 众多学者将其应用于模糊控制器参数优化, 主要分为 3 类<sup>[7]</sup>: 已知模糊规则, 优化模糊隶属参数; 已知隶属参数, 优化模糊规则; 同时优化隶属函数与模糊规则. 目前, 同时优化隶属函数及规则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, 且控制器的性能取决于遗传算

收稿日期: 2014-01-16

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA112307)

第一作者: 杨文臣(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为人工智能, 智能交通控制系统. E-mail: tongjiyw@tongji.edu.cn

通讯作者: 张 轮(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通运输系统. E-mail: lun\_zhang@tongji.edu.cn

法的质量和效率. Yang 等<sup>[8-9]</sup>采用模拟退火及粒子群等仿生机理改进遗传算子的计算规则,以提高简单遗传算法的局部搜索能力.但是,改进的混合遗传算法结构复杂,计算量大,模糊自适应控制在线优化具有明显的滞后性.

本文从相位结构优化和控制器参数在线学习的角度,提出一种城市交通信号三级模糊滑动优化控制方法.采用非冲突车流的搭接相位优化路口控制方案的相位结构,提出交通信号的三级模糊控制模型;基于滑动时间窗的思想,设计交通信号三级模糊控制器的在线优化框架,并将黄金分割局部优化机制用于改进遗传算法的局部搜索,采用黄金分割遗传算法在线学习模糊控制器的隶属函数和控制规则.最后,开发交通信号三级模糊控制的 Paramics 在线仿真平台,并以典型城市黑点路口进行实验,在不同路口交通条件下,采用 4 种控制策略对案例进行大量仿真,对所提出模型及算法的效用进行评价.

# 1 交通信号三级模糊控制模型

## 1.1 三级模糊控制器结构

路口各进口道的车流到达具有时变性,当路口车流到达分布不均衡或是发生交通事故等不确定性事件时,外界环境的改变将导致路口交通流特征发

生变化,必须实时对控制模型或方案进行优化,否则控制效果恶化.交通信号三级模糊控制器的结构如图 1 所示.第一级负责交通状态判定,包括红相紧迫度判定和绿相繁忙度判定,其根据路口采集的状态交通数据,采用交通强度分级分类处理各状态变量,评估各相位的通行需求,以减少控制规则的数量和状态变量间的干扰.第二级负责目标绿灯相位优选,其引入非冲突车流的搭接相位优化相位结构及顺序,提升模糊控制器对时变交通流不确定性的响应能力.第三级负责绿灯延长时间判定,其根据绿相繁忙度和目标绿灯相位的红相紧迫度,综合决定当前绿灯的延长时间.

## 1.2 相位优化模糊控制器

相位优化的 3 个基本原则如下:① 以交通安全为首要目标,以绿冲突矩阵为准则,设计合理的相位结构以保障路口的交通安全;② 为充分利用路口通行能力,相位结构及其切换顺序应根据路口时变的交通流特性进行优化调整;③ 为保证交叉口运行安全,相位运行必须遵循一定的基本顺序,以保证驾驶员适应度的平稳过渡.假定驾驶员对非冲突车流间的合流交织具有良好的适应性,如图 2 示,以最大化路口通行能力为设计目标,遵循标准四相位(A, B, C, D)的基本控制结构,采用非冲突车流的 8 个搭接相位(OP)优化路口各相位的结构及顺序.当运行到

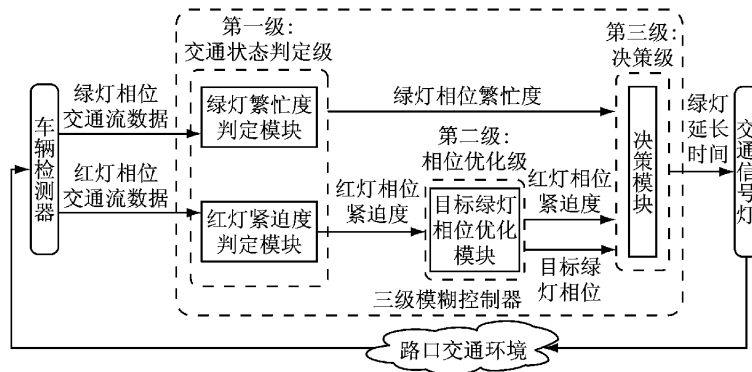


图 1 交通信号三级模糊控制器结构

Fig.1 Structure of three-stage fuzzy controller of the traffic signal

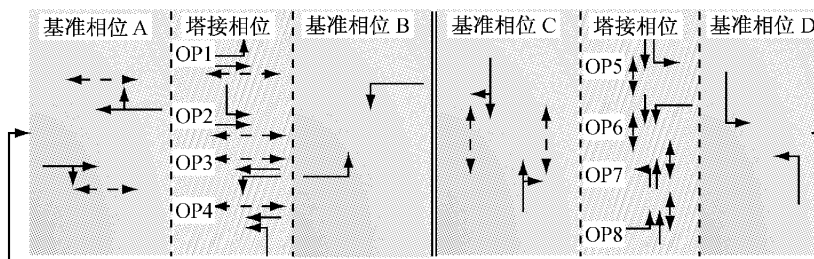


图 2 交通信号相位优化的逻辑示意

Fig.2 Logic of phase optimization for traffic signals

相位 A 或 C 的阶段,判断是否需要提前中断某直行车流并加插交通强度最高的非冲突车流,实现相位的搭接.同时,研究认为搭接相位是基准相位某车流的红灯早断优化,基准相位与搭接相位的累积绿灯时间小于基准相位的最大绿灯时间.

相位优化控制器的输入是候选红灯相位的红灯紧迫度,其由第一级交通状态判定级的输出结果决定,相位优化的输出是目标绿灯相位,其综合考虑候选相位交通强度和相位切换对驾驶行为的影响,采用推理规则综合判定.记  $R(i)$  为相位  $i$  的红灯紧迫度,  $N$  为具有最大红灯紧迫度的候选搭接相位,  $R$  的 5 个模糊子集的语言值为{很低,低,中,高,很高},且分别标记为{VL, L, A, H, VH}.以相位 A 为例, A 的下一相位可能是搭接相位 OP1, OP2, OP3, OP4 或相位 B,记  $R(N) = \max[R(OP1), R(OP2), R(OP3), R(OP4)]$ ,则目标绿灯相位的推理规则如表 1 所示.

表 1 相位优化推理规则

Tab.1 Inference rules of phase optimization

R(B)	R(N)				
	VL	L	A	H	VH
VL	B	B	N	N	N
L	B	B	B	N	N
A	B	B	B	N	N
H	B	B	B	B	N
VH	B	B	B	B	B

## 2 交通信号三级模糊的在线优化

### 2.1 基于滑动时间窗口的滑动优化框架

模糊隶属函数和控制规则不相互独立,单一优化控制规则或隶属参数将人为割断二者的关联<sup>[7]</sup>.如图 3 所示,为使模糊交通控制器的参数与路口各流向时变的车流特征相匹配,采用基于滑动时间窗口的模糊控制器参数滑动优化框架<sup>[10]</sup>,在每一个控

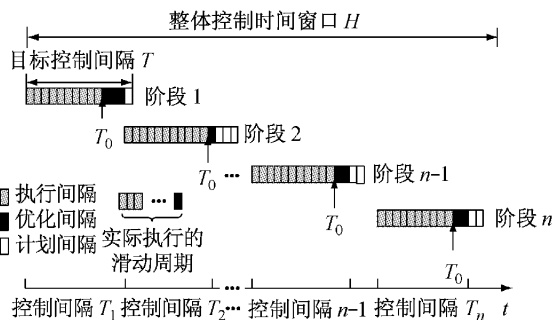


图 3 基于滑动时间窗口的滑动优化

Fig.3 Rolling-horizon optimization framework

制间隔内,同时在线学习模糊控制器的隶属函数及控制规则参数.在三级模糊自适应控制的整个时间窗口  $H$  内,定义模糊控制器参数的目标控制间隔为  $T$ ,实际控制间隔为  $T_i$ ,参数优化的时间起点为  $T_0$ .

(1)当路口交通信号模糊控制器的执行时间到达  $T_0$ ,参数优化模块采用遗传算法在线学习模糊控制器参数.其使用遗传算法产生模糊控制器的候选参数集的种群,并根据实时采集的路口交通数据,逐秒预测上一个控制间隔内路口车流的到达及演变过程.在重现上一个控制间隔内历史交通流的同时,采用每一个个体参数对应的模糊控制器对模拟的交通流进行控制,并计算该控制器作用下的控制效能.不断地重现历史交通流,直到遗传算法的优化过程结束,生成上一个控制间隔的交通条件下的最优模糊控制器参数.

(2)采用优化过的最优参数更新路口交通信号模糊控制器,其控制时域向前推移一个目标控制间隔  $T$ ,并以 1 s 为数据采集间隔,实时采集路口各车道的车辆到达及离开的交通数据,更新路网交通状态.当该模糊控制器的执行时间到达下一个参数优化的时间起点  $T_0$ ,重启参数优化模块.因而,自适应的三级模糊控制器可准实时地响应路口车流的时变性.

交通信号三级模糊滑动优化控制系统的结构如图 4 所示.路口的“三级模糊控制器”模块表征在实际路口已部署实施三级模糊控制方法的交通信号机;“历史交通流模拟器”模块用于逐秒预测上一个控制间隔内的车流到达;“基于遗传算法的参数优化”模块采用遗传算法在线学习控制器参数;除了存储路网的交通数据外,“历史数据库”仍可用于不同交通条件下控制器参数优化知识的存储与挖掘,当系统在线优化失效时,可采用离线知识进行降级优化控制.同时,鉴于优化模块的效率,只有上一个参数优化的命令结束后,系统最新的优化指令才能开

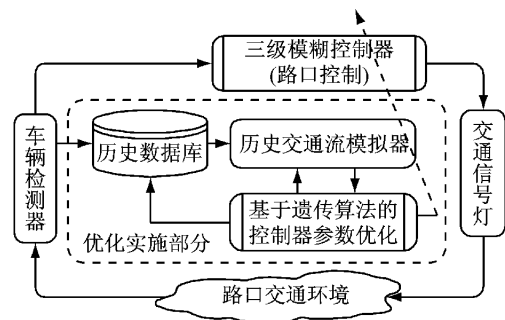


图 4 交通信号三级模糊滑动优化控制系统的结构

Fig.4 Structure of adaptive three-stage fuzzy controller

始执行.

### 2.2 三级模糊控制器参数的编码

研究采用的模糊控制器均具有 2 个输入变量和 1 个输出变量,且均划分为 5 个模糊子集 VS,S,M,L,VL.如图 5 所示,为保障控制器参数优化的收敛速度和精度,每个控制器都采用三角形隶属函数.为

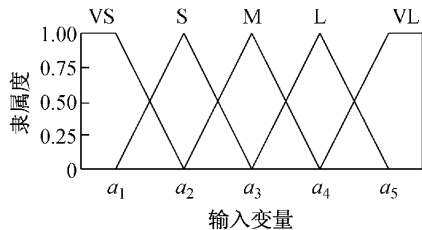


图 5 隶属参数编码原理示意

Fig.5 Decoding of membership functions

避免参数编码的染色体过长,每一个三角隶属度函数  $\mu$  的起点值和终点值分别取前后两个隶属度函数的顶点值,且采用实数编码的遗传算法.因此,仅凭隶属度函数的 5 个顶点值  $(a_1, \dots, a_5)$ ,便可较准确地表示其形状和位置.

模糊控制器的控制规则采用整数矩阵  $R$  表示:  $R=[r_{ij}]_{5 \times 5}, i \in [1, 5], j \in [1, 5]$ ,元素  $r_{ij}$  取值为集合  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$  的整数,表示输出变量模糊子集的索引值.将矩阵  $R$  转换为行向量  $R'$ ,则模糊规则的染色体编码可用  $R'$  表示.为保证驾驶员对路口相位方案的优化具有较好的适应性,避免潜在安全隐患,路口相位决策控制器的相位切换的推理规则应该保持稳定.为此,相位优化模块不在线学习其推理规则.三级模糊控制器参数的完整编码如图 6 示.

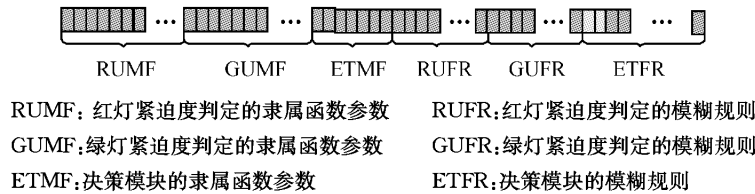


图 6 模糊控制器参数编码示意图

Fig.6 Decoding of three-stage fuzzy controller

### 2.3 基于黄金分割点的混合遗传算法

#### 2.3.1 黄金分割局部优化

当遗传算法进化到一定阶段,两个局部最优个体将趋同于解空间的同一个“凹处”.可以假设,在两个局部的最优个体的基因之间,存在潜在的更优的基因位置.为此,引入黄金分割比例 (golden ratio, GR) 确定局部最优点的搜索位置<sup>[11]</sup>.如图 7 示,A 和 B 为两个相邻优秀个体,C 为通过黄金比例得到的潜在最优点的位置,  $\overline{AC}$  和  $\overline{AB}$  的关系满足黄金分割点定义.同时,为拓展遗传算法解集的局部搜索空间,运用反向原理(将 C 的位置旋转 180°)生成反向黄金分割的局部最优个体  $C'$ ,其中  $\overline{C'C}$  和  $\overline{C'B}$  的关系满足黄金分割定义.

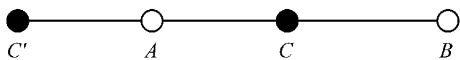


图 7 基于反向原理计算的黄金分割局部最优点示意

Fig.7 The reverse golden ratio-based local minima calculation

#### 2.3.2 基于黄金分割点的混合遗传算法 (GRGA)

GRGA 以简单遗传算法<sup>[9]</sup>的每一代最优的  $m$  个体作为初始向量,引入黄金分割点产生新个体向量集,从而拓展遗传算法搜索的解空间范围.

Step 1(初始化) 根据 2.2 的编码规则,采用实

数编码生成初始种群,该种群需满足控制器参数的约束条件和个体间互不相同准则;初始化遗传算法和黄金分割算法的控制参数.种群规模  $M$  取 100,进化代数  $G$ .取 50,黄金分割寻优规模  $m$  取 10,优秀个体子种群规模  $M_s$  为  $3m$ ;交叉和变异概率随进化代数及个体的优劣程度自适应地动态调整.

Step 2 (评价) 对每一个个体参数  $X$  对应的模糊控制器,根据实时采集的交通数据,研究采用 store-and-forward 理论逐秒预测上一个控制间隔内路口各车道车流的演化过程<sup>[3]</sup>,同时,计算该控制器作用下的路口平均延误  $d_x$ ,再由式(1)计算个体的适应度值  $f(X)$ .

$$f(X) = \frac{1}{1 + d_x} \quad (1)$$

Step 3 (选择算子) 采用轮盘概率选择算子.

Step 4 (交叉算子) 采用非均匀算术杂交算子.

Step 5 (变异算子) 采用非一致变异算子.

Step 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.

Step 7 (黄金分割寻优策略) 为保持种群的多样性,在简单遗传算法的每一新生代种群中,挑选最好的  $M_s$  个个体构成算法的子种群,并从子种群中随

机选取  $2m$  个优秀个体作为初始向量,调用黄金分割算子强化遗传算法的局部寻优搜索.

(1)由图 7 黄金分割函数产生  $2m$  个新个体向量,并采用式(1)逐个评估其个体适应度.

(2)采用 Metropolis 准则概率选择新个体,个体接收概率  $P(X)$ 按式(2)计算.为加速算法收敛和加大进化后期对局部寻优的依赖, $P(X)$ 随当前进化代数及适应度值自适应地调整.

$$P(X) = e^{-\alpha(1-\frac{Gf(X)}{G_e})} \quad (2)$$

式中: $G$ 为当前进化代数; $\alpha$ 为控制算法对进化代数依赖度的比例系数,研究取  $\alpha=0.6$ .

(3)用接收的优秀个体依次替换新生代中最差的个体.

Step 8 (判断终止条件) 如果  $G < G_e$ ,转到 Step 2;反之,输出最优个体.

### 3 案例分析

#### 3.1 案例描述

以深圳市某关键交叉路口作为模型和算法的验证对象.该路口车流量大,且各流向流量的分布差异明显,既有多时段定时控制在高峰期间的控制效果差.路口几何布局及相位结构如图 8 所示,以 150 m 为间距,在每条车道各布设战略和战术线圈检测车流到达及离开的数据.

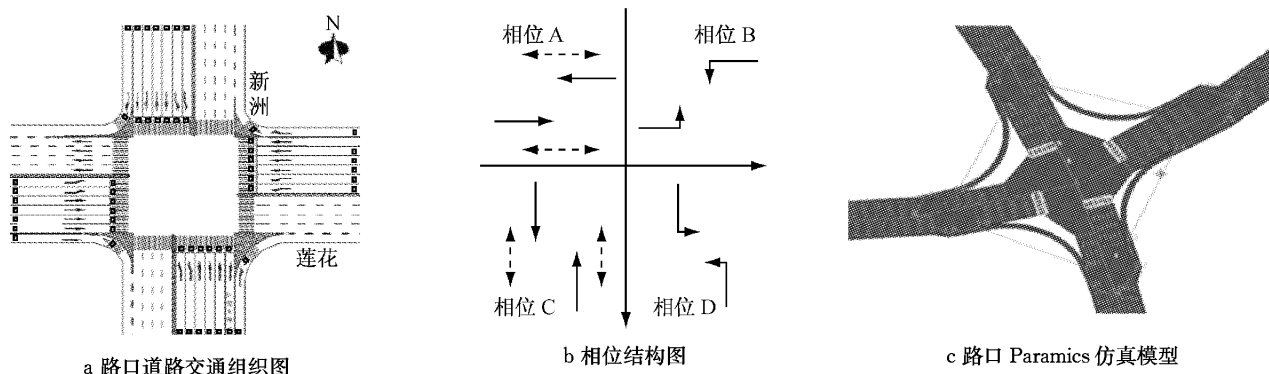


图 8 深圳市某正交十字路口道路组织与相位结构

Fig. 8 The test intersection in Shenzhen City of China and its signal phase model

#### 3.2 Paramics 仿真

##### 3.2.1 仿真场景

将 Paramics 作为各类信号控制策略的无偏评价工具,验证交通信号三级模糊自适应控制模型,考察其在不同流量和交通流波动情况下的控制效果.

常态交通场景 I:①采用一个月内(2008-03-01至 2008-03-31)路口感应线圈在空闲、顺畅、繁忙和拥堵 4 种状态下的实测车流量的均值作为状态的驶入流量,仿真时长为 24 h (00:00—24:00).各时段

下路口流量统计如表 2 所示.②为模拟路口短时交通流到达波动特性,根据线圈统计结果,在 Paramics 的 Profile 文件中设置 1 h 内 10 min 间隔车辆的发车比例.③根据国内城市道路直行设计通行能力为  $1\ 650\text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 、左转/右转设计通行能力为  $1\ 550\text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$  的规范,车头时距和驾驶员反应时间的仿真参数校准为 1.8 s 和 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 Paramics 的 Processor 模块批量仿真 20 次.

表 2 各状态下路口统计的小时平均流量

Tab.2 Statistical average traffic volume for four traffic statuses in a month

时间段	交通状态	交通量/(pcu · h <sup>-1</sup> )				
		东直,西直	东左,西左	北直,南直	北左,南左	东右,西右,北右,南右
22:00—7:00	空闲	126, 76	52, 64	271, 325	28, 120	33, 40, 24, 62
7:00—11:00	繁忙	822, 642	513, 384	1 619, 1 764	252, 529	332, 242, 198, 321
16:00—19:00	拥堵	945, 738	589, 441	1 861, 2 028	290, 608	361, 329, 226, 408
其他	顺畅	604, 494	404, 317	1 107, 1 389	236, 530	259, 213, 185, 297

注:东直、东左、东右分别表示东向直行、东向左转和东向右转,其余类似.

事故交通场景 II:在 24 h 的仿真时间段里,各流向的交通流输入和仿真参数与场景 I 的相同,在

09:00—11:00 的繁忙时间段时,假设交通强度最大的南进口的直行方向出现交通事故,内侧直行车道

关闭,该直行方向的通行能力下降 1/3.

### 3.2.2 实验设计

模拟退火是改进简单遗传算法常用的局部搜索算法,众多退火遗传算法(SAGA)成功应用于交通信号多目标优化<sup>[9]</sup>.为此,实验对比分析基于交通强度的交通信号两级模糊控制器(TFITSF)<sup>[3]</sup>、三级模糊控制器(MultiSF)<sup>[6]</sup>,以及基于 SAGA 的交通信号三级模糊控制器(SAMSF),以验证基于 GRGA 的交通信号三级模糊滑动优化控制(GRMSF)的控制效能和算法性能.遵循交通信号模糊控制的基本流程<sup>[6]</sup>,仿真参数设置如下:在线滑动优化的目标控制间隔  $T$  取 10 min,参数优化的时间起点  $T_0$  取 8 min;4 个相位及搭接相位的最小绿灯时间均为 10 s;对最大绿灯时间,直行相位 A 和相位 C 为 80 s;左转相位 B 和相位 D 为 50 s,而搭接相位 OP 为 30 s.以 30 min 为控制性能统计间隔,选取信控路口的平均延误  $d(s)$ 、平均队长  $Q(\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1})$  为控制效果的评价指标.

### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 在线优化的计算时间

在每个控制间隔内,统计 GRMSF 和 SAMSF 模糊控制器在线优化所消耗的计算时间,在常态场景和事故场景下的分析结果如图 9 所示.可以看出,GRMSF 和 SAMSF 在线优化的计算时间均随路口交通强度的增加而增加,与 SAMSF 相比,GRMSF

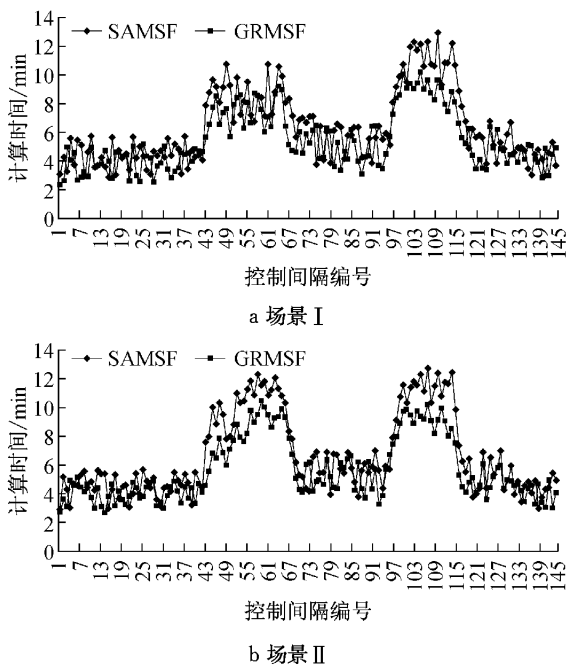


图 9 GRMSF 和 SAMSF 控制器在线优化的计算时间  
Fig.9 Time-varying computation time of the GRMSF and the SAMSF

在线优化消耗的时间少,且在 98% 的控制间隔内,GRMSF 控制器均能及时更新控制器参数.但是对 SAGA 算法,在繁忙和拥堵状态下,SAMSF 控制器在线优化消耗时间多数超过指定的控制间隔.这是因为与黄金分割局部搜索相比,退火算法计算量大且收敛条件苛刻.尤其是在交通事件的高强度交通条件下(图 9b),各进口道存在大量排队车辆,路口二次排队的车辆数增多,基于 store-and-forward 理论的来车即排队的延误模型计算消耗时间大,在指定控制间隔内,控制器参数优化失效.

#### 3.3.2 常态交通场景

GRMSF 控制器在日常交通场景下的仿真结果如图 10 所示.整个仿真过程中,GRMSF 控制器的延误和队长的波动幅度小,性能较稳定;在交通状态变化的 5 个过渡时间段,其对交通需求变化的响应速度快,进入稳态时间短.而且,通过在线学习控制器的相位方案和参数,GRMSF 和 SAMSF 控制器均能减小延误时间和队长.与 SAMSF, MultiSF 和 TFITSF 相比,GRMSF 减小信控路段排队长度分别达 0.39,0.76 和 1.92  $\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ ,减小信控路段平均延误分别达 3.60,7.58 和 20.17 s,这可能是因为与 SAMSF 控制器相比,GRMSF 控制器采用的黄金分割局部寻优能逼近更好解集.尤其在繁忙和拥堵交通状态下,GRMSF 在线优化时间效率高,控制器的

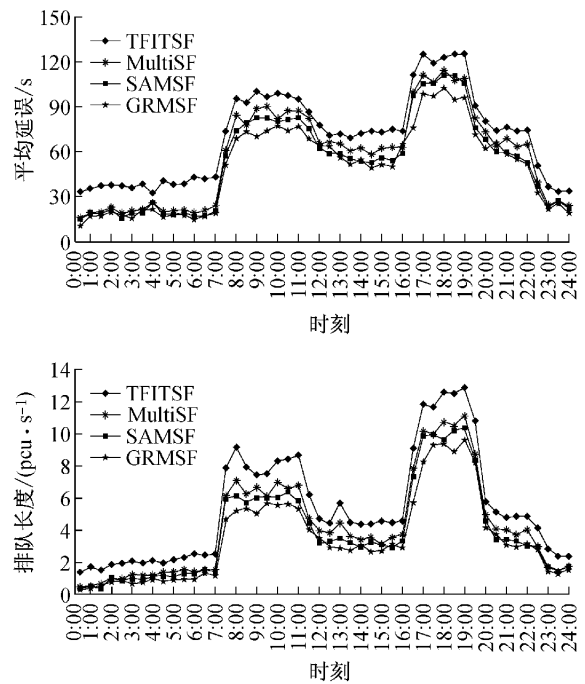


图 10 GRMSF 控制器在常态交通场景 I 下的仿真结果  
Fig.10 Time-varying control performance comparison of the GRMSF in Scenario I

性能优势显著,而在闲散和顺畅状态, SAMSF 和 GRMSF 均能及时更新模糊控制器参数,两者间的性能差异小.

### 3.3.3 交通事故场景

GRMSF 控制器在交通事故场景下的仿真结果如图 11 示. 在事件发生后, GRMSF 对交通事故等外界环境改变的响应速度较快, 且在整个事故阶段(09:00—11:00), 延误和队长的波动小, 控制器性能稳定. 相比 MultiSF 和 SAMSF 控制器, 在高强度交通条件下, 由于 GRMSF 控制器的在线优化具有更好的时间性能, 其仍能有效降低延误时间和队长, 而受 SAGA 算法的时间性能限制, SAMSF 控制器的性能略微改进. 以事故时间段内的排队长度及延误为例, 与 SAMSF, MultiSF 和 TFITSF 相比, GRMSF 减小了信控路段排队长度分别达 1.69, 2.87 和 4.46 pcu · s<sup>-1</sup>, 而平均延误则分别减少了 10.35, 18.97 和 29.62 s.

### 3.3.4 响应时间及周期时长变化

相位绿灯时间的长度变化频率可直接反应交通信号控制器的响应时间. GRMSF 控制器的每一个周期的每一个相位的绿灯时间长度变化如图 12 所示. 周期时长随着交通流的实时变化而动态调整, 当路口处于空闲或顺畅交通状态, 周期时长较小; 当路口处于高峰期间的繁忙或拥堵交通状态, 周期时长增大, 且在路口交通状态改变的过渡期间, 控制器能

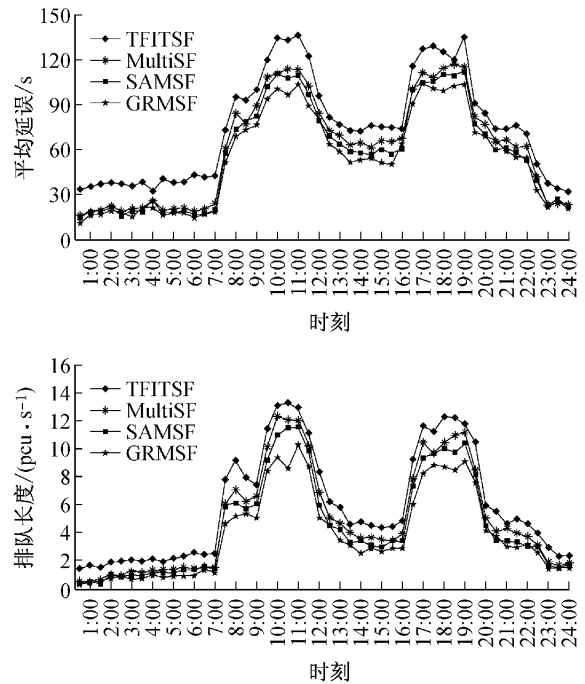


图 11 GRMSF 控制器在事故交通场景 II 下的仿真结果  
Fig. 11 Time-varying control performance comparison of the GRMSF in Scenario II

快速响应路口交通需求的变化, 及时调整各相位绿灯时长. 其中, 相位 C 的相位时间明显大于其他相位, 这与所研究案例在相位 C 获得通行权的南北直行车流的交通需求最大相符; 但是受“切换”配时方案调整策略的影响, 相位时长存在一定的波动.

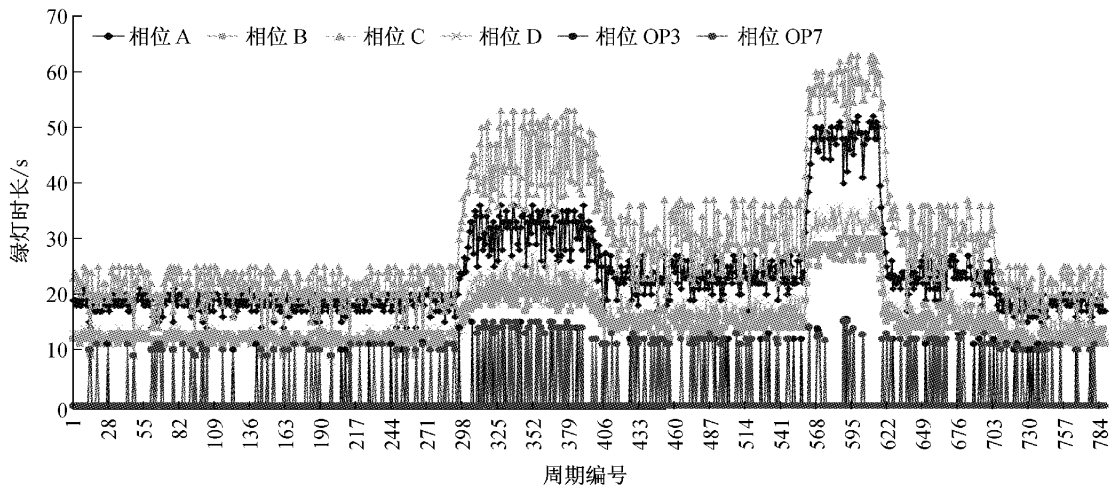


图 12 GRMSF 控制器的时变相位绿灯时间  
Fig. 12 Time-varying phase length of each cycle in GRMSF signal control

### 3.3.5 相序切换及收敛条件

相位切换顺序可直接反应驾驶员对路口实变信号方案的适应程度. MultiSF 和 TFITSF 控制器在 7:00—7:30 的相序切换如图 13 所示. TFITSF 采用跳相的相位优化策略, 各基准相位之间切换无序, 跳

相幅度大, 且跳相的频率高, 路口通行权顺序的频繁改变将给通过路口的驾驶员带来极大的不适应性, 是严重的路口交通安全隐患. MultiSF 采用搭接的相位优化策略, 各基准相位之间切换有序, 没有跳相, 且在 8 个候选搭接相位中, 控制器只采用了搭接

相位 OP3 和 OP7,这与研究案例在高峰期间西进口和南进口的直行和左转交通需求非常相符.

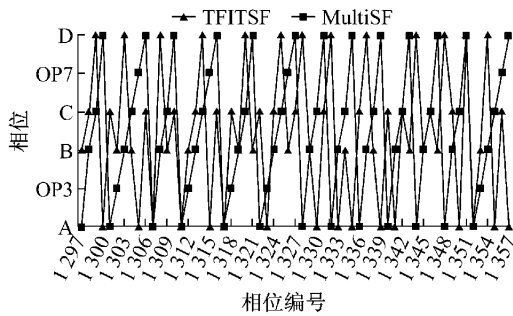


图 13 TFITSF 和 MultiSF 控制器的相位切换顺序  
Fig.13 Phase-switch sequence comparison of TFITSF and MultiSF

### 3.3.6 算法收敛条件

优化算法的收敛条件显著影响三级模糊自适应控制器的性能.采用具有不同总迭代次数的三级模糊控制器进行多次仿真,信控路段车辆平均延误以及在线优化的平均计算时间如图 14 示.由于遗传算法采用迭代寻优的机制,在线优化时间随迭代代数的增加呈指数级增长.当总迭代代数达到 50,相对于初始状态,路段延误的减少可达 50%,这是因为 GRGA 算法仍未收敛,随着进化代数的增加,GRGA 算法能逼近更好的参数解集,在保障一定优化效率的同时,提升控制器性能.当迭代次数大于 50,控制器性能呈稳定状态,这是因为 GRGA 算法在进入进化后期每代优选的最优解参数之间差异不显著,且增加代数中种群的迭代计算致使计算时间显著增长,优化模块的滞后性也大幅弱化了优化参数的效能.

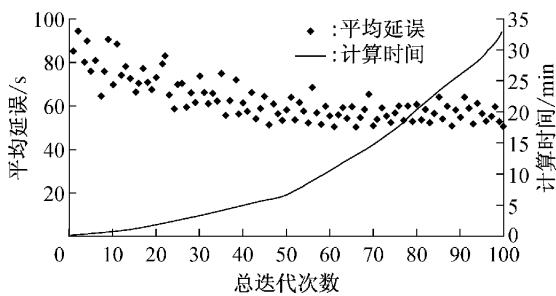


图 14 GRMSF 控制器在不同总迭代次数下的性能变化  
Fig.14 Improvement with changing generation number of GRMSF

## 4 结论

(1)相位优化策略应根据路口各流向车流实时

交通特征、驾驶员的适应性、路口交通安全隐患及控制器性能综合决定.跳相可优化相位切换顺序,但相位之间频繁无序切换,且波动幅度大,将给驾驶员带来极大的不适应,产生严重的安全隐患,应避免采用跳相策略.

(2)路口信号相位的优化显著影响交通信号三级模糊控制器的性能.搭接相位使基准相位的直行车流提前早断,放行非冲突左转车流,在保证路口通行权变更顺序一致性的同时,能有效识别路口交通模式的实时变化,充分利用路口资源.因而,根据路口交通流的实时变化优化信号相位方案是提升自适应交通信号控制性能的有效手段.

(3)交通信号三级模糊自适应控制器在线学习控制器参数,能有效响应交通模式变化,提升控制器的性能,但受遗传算法性能的显著影响.在高强度交通条件下,SAMSF 控制器的多数在线优化失效,而 GRMSF 能及时更新控制器参数,这与改进算法的收敛条件、局部搜索的计算量及质量有关.为高效更新模糊控制器参数,根据试点路网的规模及提出模型的特性,交通决策者需要仔细均衡优化算法的效率和求解参数的质量.

(4)依托高效的优化算法,提出的模型和算法具有好的自适应能力,能快速响应路口交通模式的实时变化,在高强度的交通状态或事故条件下,仍能有效利用路口通行能力,降低延误和队长,但受配时方案“切换”调整策略的影响,相位时长存在一定的波动.

### 参考文献:

[1] Trabia M B, Kaseko M S, Ande M. A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1999, 7(6): 353.

[2] 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.

[3] Yang Z Y, Huang X Y, Xiang C. Multi-phase traffic signal control for isolated intersections based on genetic fuzzy logic [C/CD]//The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian: IEEE; 2006.

[4] Nair B M, Cai J. A fuzzy logic controller for isolated signalized intersection with traffic abnormality considered [C/CD]// Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul: IEEE; 2007.

[5] Dion F, Hellings B. A rule-based real-time traffic responsive signal control system with transit priority: application to an isolated intersection [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(4): 325.

(下转第 1867 页)