

# 基于路网饱和度平滑算法的交通信号群 配时系统设计

李昌华<sup>1,2</sup>, 张毅<sup>1,2</sup>, 王燕妮<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 针对棋盘状城市路网交通信号群, 提出一种基于饱和度阵列平滑的信号配时算法, 并且建立一个路网配时优化系统. 采用两种二维模板分别对整体路网信号周期和绿信比进行调控, 其中拥堵程度评估模板从小区域进行拥堵判定并对中心交叉口调整周期时长; 拥堵方向四邻模板从相邻交叉口空位分析中判断绿信调整方向. 从面到点进行宏观到微观的调控, 使路网信号群协同工作. 动态阈值使路网处于对车流速度能产生线性影响的正常饱和区域, 空域滤波使整个路网饱和度快速平滑和降低, 进而提高了整体车流的行驶效率, 间接降低了整体车辆延误. 仿真结果表明: 饱和度平滑优化方法效果显著优于传统静态方法, 适合于突发性或整体严重不均衡的交通状况, 也适合于高饱和度交通状况.

**关键词:** 交通信号群; 饱和度平滑; 空域滤波; 纵横向梯度差

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)03-0422-06

目前, 我国很多城市交通供需极不平衡, 车辆数剧增, 而城市道路拓宽难度很大, 使得车辆拥堵频繁发生. 在车辆出行时间的延误中, 交叉口延误所占的比例远大于路段延误, 因此对交叉口信号灯的配时的实时动态优化, 对于减少延误, 缓解交通拥堵具有很大意义.

我国大部分老城区采用棋盘状路网分布, 当路网中多个交叉口集中出现交通量过饱和时, 对各个交叉口单独进行配时优化很难有明显效果. 这时通过整体路网的信号协同控制更能有效提高整体路网的通行效率, 进而改善交通拥堵. 因此对整个路网交叉口的信号优化, 是对整体路网瓶颈的优化.

目前, 对于交通信号配时的研究, 分为两个基本方向: 一种是静态或者半静态的交通配时方法, 它们分别对应定时段定时控制和多时段定时控制; 另一种则是自适应动态优化的方法, 其中包括人工神经网络、模糊控制等方法, 它们采用的演化算法为遗传算法<sup>[1]</sup>、粒子群算法<sup>[2]</sup>、蚁群算法<sup>[3]</sup>和博弈论算法<sup>[4]</sup>等.

交通量是变化的, 从这个角度上说, 静态方法是一种机械的定时方法, 难以适应不断变化的交通状况; 相比静态方法, 半静态方法更接近于实际的交通量规律, 但是不适应于复杂变化的交通量, 并且难以处理突发性交通状况.

自适应动态规划 (Adaptive dynamic programming, ADP) 本质上基于强化学习原理, 模拟人通过环境反馈进行学习, 近年来被认为是一种非常接近人脑智能的方法<sup>[5]</sup>, 自适应动态规划是人工神经网络、最优控制和强化学习 (Reinforcement learning) 相融合产生的交叉领域, 也可以认为是离散领域的强化学习在连续领域的扩展<sup>[6]</sup>, 可以说, 自适应动态规划则是一种广义的强化学习方法, 在各种复杂控制领域得到了广泛应用. 然而, 对于一个具体路网, 其基本变化规律往往是可预测的, 从这个方面看, 自适应动态规划过多的对大体确定的交通量变化规律进行着重复学习. 另外, 神经网络、遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、模糊逻辑的算法在路网中起到了一些智能化的作用, 但是也有其不足<sup>[7]</sup>, 主要表现为: 计算较为繁琐, 需基于先验知识, 实时敏感度不强. 总之, 多种自适应动态规划方法, 都面临着对系统训练控制的收敛性、稳定性、协调性等诸多难题.

针对上述问题, 本文提出了一种介于半静态配时方法与自适应动态规划之间的路网信号群实时动态优化方法. 在采集到路网交通总量的基础上, 设定主动动态阈值, 对小区域进行拥堵程度判定. 采用空域滤波的方式给予指导性的策略. 具体来讲就是用设计模板对路网信号群实施干扰, 使路网实现信号自动配时. 在这个过程中路网信号群仅仅是待处理的数据, 而不用从中获取后处理值以用于进一步的学习与控制, 因此避免了对交通量规律的重复学习, 进而减少了信号群控制模块的计算量. 相比静态与半静态配时方法而言, 每次对路网信号群的处理值是实时变化的, 更能适应路网交通流的实际情况.

收稿日期: 2014-01-10

修改稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61373112); 陕西省社会发展攻关项目 (2013K13-04-08)

作者简介: 李昌华 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事数字建筑及模式识别方面研究. E-mail: lch304502@126.com

## 1 饱和度平滑方法原理概述

研究发现<sup>[8]</sup>,车流在城市道路上的运行速度与交通负荷有着密切的关系.车速—交通负荷关系模型分三种情况:自由车流、正常车流、饱和车流.如图1所示,在交通负荷很小时,车流以城市道路允许的最大车速行驶,此时车速与负荷关系不大;交通负荷超过某个值后,车速基本上与交通负荷成线性相关关系,车速随着交通负荷增加而线性下降;当交通负荷接近饱和时,车速已降至很低,车速与交通负荷呈以横轴为渐近线的非线性关系.

由图1可知,对道路饱和度的控制,也间接的控制了车流行驶速度.而交叉口信号灯对道路空间配给起着至关重要的调控作用.也即,信号灯的时间分配直接影响相邻路段的空间分配.因此信号灯对饱和度有着直接影响,对车速可以产生间接影响,其影响程度在正常饱和度时会与车流速度有线性关系,而在其他情况时则呈非线性关系.本文所述方法的目的之一就是利用信号灯对车流速度进行线性调控.而从二维路网的角度处理信号群,则能更好的改善整体路网的行驶效率.

信号配时通常包括周期时长、绿信比、相位差等参数<sup>[9]</sup>.对于信号交叉口,其通行能力与信号灯周期时长相关,信号周期时长越长,通行能力就越大,但是这样引起的延误也会增加.因此信号周期时长有极限值,当信号灯周期时长超过极限值时,不仅提高通行能力的效率不高,同时车辆延误会迅速增加<sup>[8]</sup>.同理,有效绿信时长与通行能力成正比关系.

饱和度平滑方法原理框图如图2所示.决策模块根据路网交通量信息输出对路网周期时长与绿信的协调控制,对路网整体饱和度进行平滑,使大部分路段的车辆变为正常车流速度,从而提高路网整体通行能力.

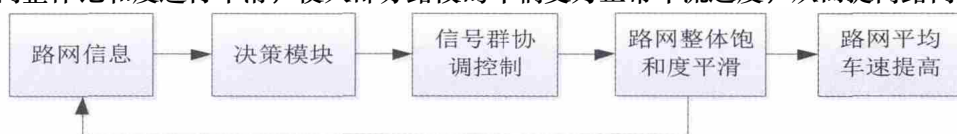


图2 饱和度平滑方法原理框图

Fig.2 Schematic diagram of saturation smoothing optimization method

## 2 信号配时系统设计

该系统从整个路网入手,以平滑路网整体饱和度为目标,对交叉口信号群配时进行动态整体优化的方法.当路网中出现局部较大程度拥堵时,定位拥堵区域,并对拥堵区域及其周边交叉口的信号配时进行整体调整.针对每个交叉口,在其拥堵级别的基础上进行相应疏导.本系统方案兼顾了宏观路网与微观交叉口的协调控制.

信号配时优化系统以棋盘状路网为研究对象,将整个路网看成一个二维平面,将路网的每个十字交叉口看作二维平面矩阵中的一个元素,该元素是拥有多个量值的一维向量.整个路网可以用一个二维数组  $f(x,y)$  来表示,这里  $x$  和  $y$  表示二维空间  $XY$  中的一个交叉口的的位置,而  $f$  则表示路网在点  $(x,y)$  的某种性质  $F$  的数值.

配时系统结构图如图3所示.信息采集及预处理模块提取路网各交叉口信息,将各参数合并后输出路网各交叉口实时车流量等信息用于后续处理;区域协调控制算法通过信号周期调节和绿信比调节两级控制,实现对路网整体饱和度的平滑,其中区域饱和度评级模块输出各交叉口信号周期调整因子,对各交叉口信号周期进行调整,邻域梯度计算模块输出绿信比调整因子,对各交叉口绿信比进行调整.信号周期调整因子与绿信比调整因子的计算都考虑了区域协调控制.

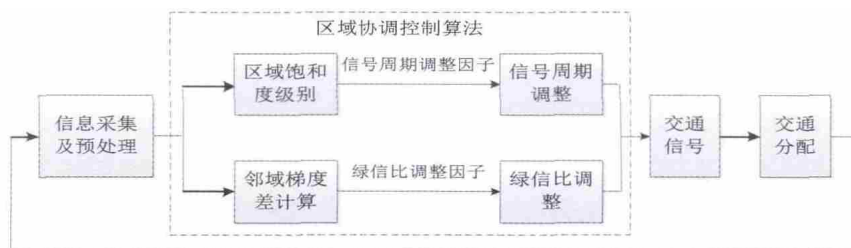


图3 配时系统结构图

Fig.3 The structure diagram of the timing system

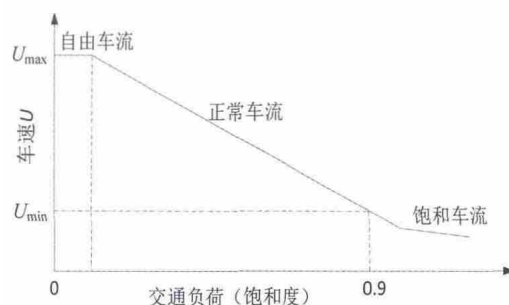


图1 车流速度-交通负荷关系模型

Fig.1 The relationship between vehicle speed and traffic load

## 2.1 信息采集及预处理模块

信息采集主要对信号交叉口的相关信息进行参数化和归类. 首先进行信息采集, 提取每个交叉口的路长、路宽、进口车流量、信号相位、信号周期、红黄绿信号时长、绿灯时间间隔等信息作为初始信息. 其次, 预处理模块对这些信息和参数进行归并和处理, 输出各交叉口的进口设计通行能力、进口实时分配交通量、信号周期初始值、信号相位初始值、绿信比值等信息用于后续模块的处理.

在信息采集中, 对于两个交叉点之间共有路段进行参数分割并分属一个交叉口. 将路段信息并入路口, 其中对于进入某交叉口相关信息归为该交叉口的参数. 如图 4 所示, 右上角路口相邻黑色部分的信息隶属于右上交叉口的参数, 对于棋盘状路网, 一个交叉口有四组这样的参数. 这样对交叉口阵列的处理包含了对路段因素的考虑和控制.

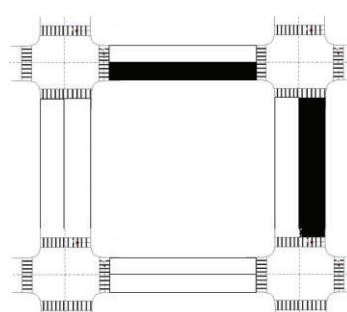


图 4 交通信息分割举例  
Fig.4 Example for traffic information segmentation

## 2.2 区域协调控制算法

区域协调控制算法分为三部分: 动态阈值、信号周期协调控制和绿信比协调控制.

### 2.2.1 动态阈值

动态阈值是整体路网的饱和度指标, 高于该指标, 对该交叉口进行信号周期调整, 否则保留原有信号周期. 动态阈值选择方法的基本思想为: 根据整体路网的交通总量及其交叉口总数按道路等级加权求商, 得到的数值即为阈值, 在协调控制算法每一轮的计算中, 整体路网的交通量为实时采集的, 因此阈值随实际情况动态变化. 第  $i$  次动态阈值  $T_i$  的计算公式见式(1).

$$T_i = \frac{k \sum_{j=1}^n S_j}{n} \quad (1)$$

其中,  $S_j$  为各个交叉口的饱和度,  $k$  为阈值调整系数,  $n$  为路网交叉口总数.

### 2.2.2 信号周期协调控制

信号周期协调控制的主要思路为: 通过拥堵程度评估模板评级, 对区域饱和度进行分级, 按不同饱和度级别输出对应信号周期调整因子, 对各交叉口信号周期进行调整. 该部分为对饱和度的宏观区域性调整. 其控制流程如图 5 所示.

在对区域饱和度的级别判定中, 设计了拥堵程度评估模板, 其为一个 8 邻域模板, 定义如下:

假定三个交叉口  $p, q, r$  坐标, 分别为  $(x, y), (s, t), (u, v)$ , 模板范围用距离量度函数表示为  $D(p, q)$ . 拥堵程度评估模板采用棋盘距离为量度, 即点  $p, q$  之间的 8 邻域距离函数为

$$D_8(p, q) = \max(|x-s|, |y-t|)$$

中心交叉口  $p$  的 8 邻域定义为:

$$N_8(p) = \{r \mid D_8(p, r) = 1\} \quad (3)$$

通过拥堵程度评估模板判定区域饱和度级别. 拥堵程度评估模板举例如图 6 所示, 阴影部分为高于动态阈值的交叉口, 根据阴影的个数将不同空间分布的饱和度分为 10 等级的拥堵程度. 拥堵程度评估模板将中心交叉口及其 8 邻域交叉口小区域的拥堵程度综合统计为中心交叉口的饱和度参数. 在处理过程中, 对路网中的每个交叉口实行拥堵程度评估模板的遍历, 对  $3 \times 3$  交叉口小区域内的交叉口进行协调安排, 实现了区域协调控制. 其中, 由于对中心路口最直接的影响是与其直接相连的交叉口, 而四角方向的路口的影响次之. 因此可对其进行不同权重的分配以适应实际路网状态.

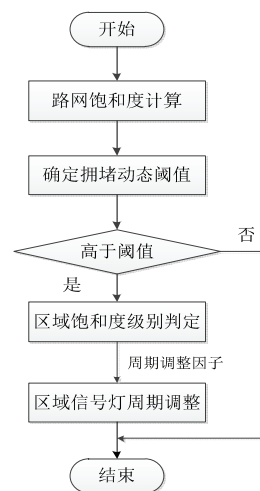


图 5 信号周期协调控制流程图

Fig.5 Flow diagram of signal coordination control

(2)

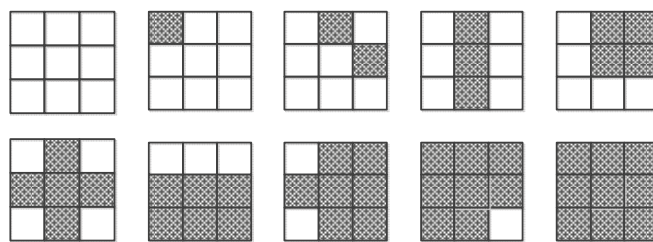


图6 拥堵程度评估模板举例

Fig.6 Example for congestion degree evaluation template

### 2.2.3 绿信比协调控制

绿信比协调控制的主要原理为:通过拥堵方向四邻模板,确定绿信调节的方向与程度.具体算法为,用空域滤波卷积模板计算各交叉口与纵横向相邻交叉口的交通量梯度差,输出带方向的调节因子,对各相位绿信比进行调节.该部分是对饱和度的局部微调.其控制流程如图7所示:

每个交叉口的拥堵都与其直接相邻的四个交叉口相关,因此设计了4邻域模板对中心交叉口拥堵方向和调节程度进行判定.拥堵方向四邻模板定义如下:

假定三个交叉口 $p, q, r$ 坐标,分别为 $(x, y), (s, t), (u, v)$ ,模板范围用距离量度函数表示为 $D(p, q)$ .拥堵方向四邻模板采用城区距离为量度,即点 $p, q$ 之间的4邻域距离函数为

$$D_4(p, q) = |x-s| + |y-t| \quad (4)$$

中心交叉口 $p$ 的4邻域定义为

$$N_4(p) = \{r \mid D_4(p, r) = 1\} \quad (5)$$

四邻模板形式如图8所示,每个点代表一个交叉口,关注的是中心点与上下左右四个相邻点的关系.图8是几种典型四邻模板的样例,阴影代表拥堵的交叉口.对于中心对称分布的四邻模板,因纵横向交通状况接近,故不进行绿信调整,其他情况通过邻路空位分析,按空位确定绿信调整方向.绿信调整基于原绿信时长上下浮动,浮动范围根据纵横向交通量梯度差来决定.

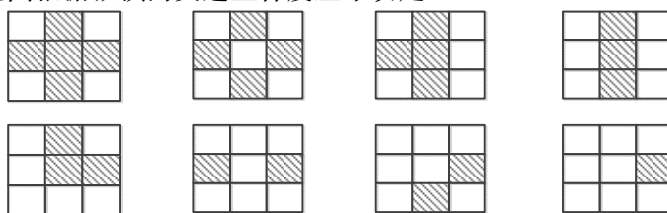


图8 拥堵方向四邻模板

Fig.8 The template of direct evaluation

在拥堵方向四邻模板具体算法的实现上,采用空域滤波法,计算路网各交叉口纵横向交通量梯度差,所得结果用于车流疏散方向及绿信调整.

空域滤波原理:对于两个不同量值的区域,两个区域值之间的一阶导数峰值一般对应于其边缘位置,其二阶导数则通常具有正负双峰值,双峰值之间的过零点对应与两个区域的边缘位置,正负号则分别对应较小值区域与较大值区域.这样二阶导数结果可用于确定路网拥堵边界与拥堵高低值方向.

采用四邻模板进行空域滤波的推理公式可用路网函数的一阶导数和二阶导数表示.梯度是路网对应二维函数的一阶导数,其公式见式(6).

$$G(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于路网函数 $f(x, y)$ 的二阶导数公式见式(7).

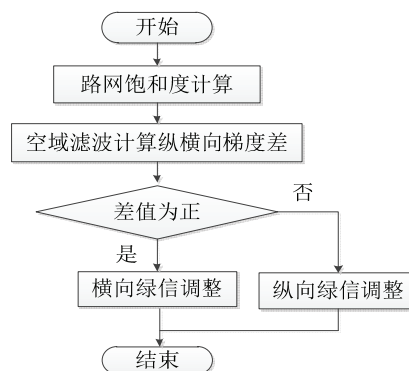


图7 绿信协调控制流程图

Fig.7 Flow chart of green signal coordination and control



$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

(7)

在本文所述的方案中,将路网看成由交叉口组成的点阵面,因此需要将上述数学方法变换为离散形式,并将上式结果表示为卷积模板,公式见式(8).

$$\nabla^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(8)

棋盘状路网每个交叉口具有纵横两个方向,因此本文提出将上式改为两个方向卷积模板之和的结果,其公式见式(9).

$$V + H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(9)

其中: V 为纵向卷积模板; H 为横向卷积模板.

纵横向卷积之差的正负号代表需要调整信号的方向,结果 R 为绿信比浮动程度的指标.

$$R = f(x, y) \otimes V(x, y) - f(x, y) \otimes H(x, y)$$

(10)

其中 $\otimes$ 表示卷积.

3 仿真

假设各相位黄灯时间和损失时间相等,则有效绿灯时间即为实际绿灯时间.为简化计算,统一将各交叉路口的信号灯设置为二相位.

本实验是在 LabVIEW 2010 环境下, 2.20 GHz 双核 CPU, 3GB 内存, Windows Vista 操作系统的计算机上进行的. 建立了一个 10×10 的棋盘状路网模型用于仿真实验. 使用本文提出的方法和静态方法两种方案分别进行仿真, 优化目标为路网平均饱和度以及路网车辆通行能力. 在路网初始车流量信息相同的情况下, 经过相同的仿真时间后, 对比两种方案的结果.

在理想状态下, 路网中无增减车辆时的两种方案的平均饱和度结果对比见图 9(a). 在路网中增加正常车辆干扰, 即不断有加入路网与退出路网车辆的情况下平均饱和度结果对比见图 9(b). 在路网中增加强干扰, 即不断有大量加入路网与退出路网车辆的情况下平均饱和度结果对比见图 9(c).

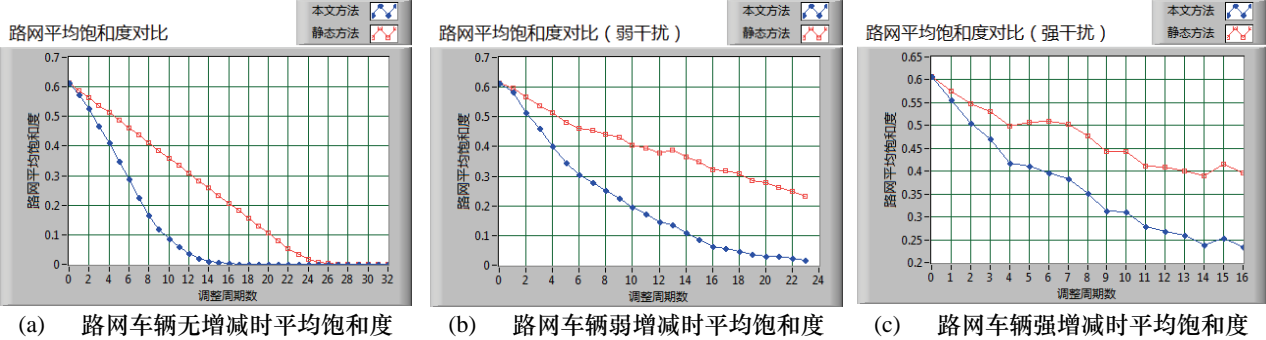


图 9 路网平均饱和度图

Fig.9 The average network saturation

由图 9 可见, 本文所述方法对路网平均饱和度的降低速度明显高于静态方法. 在不改变相位与交叉口几何条件的情况下, 根据交通量, 利用所建立的系统模型及优化算法确定各交叉路口的信号周期及各相位绿信比, 使得整体路网饱和度快速降低. 当路网中各交叉口交通量不同程度的不平衡时, 如各路口车辆增减数出现不同程度的随机扰动时, 饱和度平滑算法表现稳定.

表 1 饱和度平滑方法与静态方法在等时段内的通行车辆数

调整周期数	1	2	3	4	5	6	7	8
本方法路网通行车辆数	1 172	2 737	4 697	6 859	9 403	11 876	14 034	15 696
静态方法路网通行车辆数	800	1 600	2 400	3 208	4 034	4 856	5 660	6 466

在相同时间段内整个路网的通行车辆数见表1。该表为等间隔时长后,路网整体的车流通行量对比,从表中可以看出,经过一段时间后,本方案的路网通行车辆数显著高于静态方法的结果,随着时间的增加,优化的效果越来越好。显著提高了整体路网的交通效率。

## 4 结语

本文针对棋盘状城市路网组成的二维平面系统,以平滑路网整体饱和度为目的,对交叉口信号群配时进行动态整体优化。通过信号周期长度和各相位有效绿灯时长二级区域协调控制,完成信号配时。设计了拥堵评估二维模板,用于各交叉口及其邻域的小区域饱和度评级,动态确定各交叉口的信号周期长度;设计了空域滤波卷积模板,计算各交叉口与纵横向相邻交叉口的交通量梯度差,对绿信比浮动程度进行调节。仿真结果表明,该方法可快速降低拥堵交叉口群的饱和度,对路网的整体饱和度进行平滑,加快车辆行驶速度,提高整个路网的交通效率。适合于突发性或整体严重不均衡的交通状况,也适合于高饱和度交通状况。另外,该方法中所用算法适合于用擅长并行计算的FPGA等硬件来实现,可大大增加控制决策的快速性,具有较强的实际应用价值。

## 参考文献 References

- [1] 田丰,边婷婷.基于自适应遗传算法的交通信号配时优化[J].计算机仿真,2010,27(6):305-308.  
TIAN Feng, BIAN Tingting. Traffic Signal Timing Optimization Based on Adaptive Genetic Algorithm[J]. Computer Simulation, 2010, 27(6): 305-308.
- [2] 张兰,雷秀娟,马千知.基于粒子群优化算法的多交叉口信号配时[J].计算机应用研究,2010,27(4):1252-1254,1294.  
ZHANG Lan, LEI Xiujuan, MA Qianzhi. Multi-cross signal timing based on particle swarm optimization algorithm[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(4): 1252-1254, 1294.
- [3] 李士勇.蚁群算法及其应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.  
LI Shiyong. Ant colony algorithm and its application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology press, 2004.
- [4] 朱铭琳,陈阳舟.基于博弈的交叉口交通信号配时系统设计[J].计算机仿真,2013,30(7):151-155.  
ZHU Minglin, CHEN Yangzhou. Design of Traffic Signal Assignment System Based on Game at Intersection[J]. Computer Simulation, 2013, 30(7): 151-155.
- [5] WERBOS P J. Using ADP to understand and replicate brainint elligence: the next level design[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Approximate Dynamic Programming and Reinforcement Learning. Honolulu, USA: IEEE, 2007: 209-216.
- [6] 赵冬斌,刘德荣,易建强.基于自适应动态规划的城市交通信号优化控制方法综述[J].自动化学报,2009,35(6):676-681.  
ZHAO Dongbin, LIU Derong, YI Jianqiang. An Overview on the Adaptive Dynamic Programming Based Urban City Traffic Signal Optimal Control[J]. Acta Automatica Sinica. 2009, 35(6): 676-681.
- [7] 李星毅,齐驰,赵明,等.基于序贯博弈的交通信号灯配时模型[J].交通工程,2008,12(3):225-236.  
LI Xingyi, QI Chi, ZHAO Ming, et al. A model based on sequential game for time-distributing of traffic signal lights[J]. Transportation Engineering. 2008, 12(3): 225-236.
- [8] 王伟,徐吉谦,杨涛,等.城市交通规划[M].南京:东南大学出版社,1999.  
WANG Wei, XU Ji-qian, YANG Tao, et al. Urban Transportation planning[M]. Nanjing: Southeast University Press. 1999.
- [9] 宗芳.道路交通管理[M].北京:机械工业出版社,2012.  
ZONG Fang. Road traffic management[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012.

## Design of traffic signal group timing system based on network saturation smoothing algorithm

LI Changhua<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi<sup>1,2</sup>, WANG Yanni<sup>1</sup>

(1. School of Information and Control Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** This paper proposed an algorithm based on saturation smoothing and built an optimization system of the network timing that two kinds of two-dimension template respectively control the network signal cycle and green ratio on the checkerboard road network. The template of degree evaluation determines the degree of congestion from a region and adjusts the cycle length of center intersection signals. The template of direct evaluation decides the direct of green signal. Macro to micro regulation makes the network signal group cooperative work. The road network works in a linear area of vehicle speed to saturation by a dynamic threshold. The spatial filtering smoothed and reduced the network saturation, so to improve the whole traffic flow efficiency and reduce vehicle delay indirectly. The simulation results show that the effect of saturation smoothing optimization method significantly outperforms the traditional static method. The method is suitable both for the bursty or whole seriously unbalanced traffic conditions, and for the high saturation traffic conditions.

**Key words:** traffic signal group; saturation smoothing; spatial filtering; difference between horizontal and vertical gradient

(本文编辑 桂智刚)