

局部拥挤条件下单点自组织信号控制方法

姜桂艳¹, 郭海锋^{1,2}

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022, jianggy@jlu.edu.cn; 2. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对已有交通信号控制方法难以有效疏导拥挤交通流的现状, 以感应线圈检测器采集到的实时数据为拥挤识别的基础, 以拥挤流向放行车辆数最大为目标, 提出了一种无信号周期、无固定相位相序限制的单个交叉口自组织信号控制的基本原理, 研究了候选信号相位集、各流向权重、等待时间上限的确定方法, 设计了局部拥挤条件下单个交叉口的自组织信号配时方法, 并以 VISSIM 为工具进行了模拟验证和对比分析。结果表明, 所提出的方法能够改善局部交通拥挤的疏导效果。

关键词: 局部拥挤; 单个交叉口; 自组织; 信号控制

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)10-1671-06

Traffic self-organizing signal control method for congested isolated intersection

JIANG Gui-yan¹, GUO Hai-feng^{1,2}

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China, jianggy@jlu.edu.cn; 2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aimed at the congestion evacuating, an available self-organizing signal control principle without signal cycle and fixed phase as well as phase order is proposed. The designed signal control method is based on inductive loop data to identify the congestion flow and will overcome the deficiency of the present signal control mode for controlling congested traffic flow. For maximizing the number of passing vehicles, the proposed signal control method includes some key components such as setting stand-by phases, weighting each stream, deciding the maximum waiting time and allocating signal timing. The method is tested and compared through simulation with VISSIM. The comparative analysis shows that the proposed method can evacuate the congested traffic flow of a congested intersection more effectively.

Key words: congested conditions; isolate intersection; self-organizing; signal control

城市道路交通拥挤通常源于某一局部,并向四周扩散,严重时可导致大面积道路堵塞甚至区域路网的交通崩溃。如果能够及时发现路网中存在的局部交通拥挤,并采用合适的信号控制方法对其进行有效的组织与协调,则有助于减少拥挤的持续时间,有效防止拥挤的进一步扩散。

Gazis^[1]首次在交通信号控制领域将城市道路交通状态分为非饱和状态(Under-saturated)与过饱和状态(Over-saturated),并沿用至今。其中的过饱和状态在我国通常称为饱和状态,可理

解为拥挤状态。Gazis将绿灯结束时有剩余排队车辆的交叉口定义为过饱和交叉口(Over-saturated Intersection),并参考固定式信号控制方法的基本原理,率先提出了一种按照最大绿灯时间轮流放行的固定式拥挤交通信号配时方法。在此基础上,陆续有学者从不同角度对单点拥挤交叉口的信号控制方法进行了探讨^[2-8]。

现有成果在交通拥挤的量测指标和控制方法方面进行了有益探讨,特别是提出了排队长度约束、通行权优先等新的控制理念,在一定程度上改善了信号控制手段疏导拥挤交通流的能力。但由于这些成果都是在经典信号控制基本原理下进行

的某种改良,仍然以周期、相位、绿信比、最大绿灯时间等概念为基础,有些成果甚至沿用了延误最小的控制目标.而经典信号控制的机制是针对波动性较强的非拥挤交通流设计的,因此这些改良方法疏导拥挤的效果还不能满足实际需要,在局部拥挤情况下需要依靠交警疏导交通的现象非常普遍.

目前,局部拥挤条件下交通信号控制方法研究中存在的问题主要包括:

1)划分交通状态的饱和度指标是基于固定配时控制方法提出的,交叉口各相位的通行能力是定值,饱和度仅与实际到达流量有关.但在信号配时可实时变化的控制方式下,各相位的通行能力是可变的,此时饱和度不仅与实际到达的流量有关,还与交叉口的信号配时有关,而且各交叉口的信号周期不同,以饱和度评价的交通状态结果难以保证时间可比性和客观性.

2)绝大多数已有成果是以延误最小化为目标的静态信号配时方法,且假定拥挤期间交通状况从始至终不发生变化,信号配时一经确定便不再改变.这种控制方法显然较为简单,难以适应拥挤程度不断变化的交通状况.

3)少数成果虽然实现了动态控制,但优化目标仍然以延误为主.实际上,在拥挤情况下应该以交叉口的通行能力最大化为控制目标,采取有效策略使交叉口每次绿灯放行的车辆数最大.

4)现有成果均以经典的信号配时理念为基础,在固有的信号周期、相位以及绿灯延时的概念下进行拥挤交通流的疏导,影响了控制效果的进一步提高.

为解决已有研究成果中存在的第一个问题,文献[9]以地点交通参数数据为基础,将交通状态分为顺畅、阻滞和拥挤3种状态,其中阻滞与拥挤相当于饱和与过饱和状态.本文在后续论述中所提到的交通状态判别方法即以文献[9]为依据,而非已有交通控制方法中运用饱和度值界定的饱和或过饱和状态.

在实现交通拥挤状态在线识别的前提下,在已有成果的基础上,本文以局部交通拥挤的快速疏导为目标,重点研究了一种自组织信号控制的基本原理及单点自组织信号控制方法(Traffic Self-Organizing Signal Control for Congested Isolated Intersection, 简记 TSS-CII),并以 VISSIM 为工具进行了模拟验证和对比分析.

1 自组织信号控制的基本原理

所谓自组织信号控制,是指根据实时检测到

的交通数据,判别当前的交通状态,当发现交通拥挤时,交通信号控制系统以优先放行拥挤方向车流为目标,通过调整相位、相序以及相应信号配时参数,改变当前交通流的运行模式,对交叉口各方向的交通流进行自组织,以达到快速疏导交通拥挤的目的^[10].自组织信号控制方法的基本工作原理:

1)根据交叉口的几何形状,在不引起交通流冲突的情况下设计更多的候选相位,构成候选相位集;

2)在路段上布设检测器,以采集需要的动态交通数据;

3)以时间间隔 T 采集的动态交通数据为基础,根据交通状态判别算法对交通状态进行判别,如果判别结果为拥挤,则转4),否则不改变当前信号控制方式,转10);

4)信号控制机即将发放绿灯通行权时,根据检测器数据计算各车道排队车辆数;

5)计算各股交通流请求绿灯通行权的急迫程度;

6)计算使急迫程度最大的交通流全部放行所需的绿灯时间;

7)查看候选相位集,确定请求绿灯通行权迫切程度最大的那股交通流所属的相位;

8)以交叉口通行能力最大为目标,对7)中满足条件的相位进行择优筛选;

9)根据6)中计算的绿灯时间对选中的相位给予绿灯显示,其他方向显示为红灯,转4);

10) $T = T + 1$, 转3).

上述自组织信号控制方法适用于局部拥挤条件,突破了已有信号控制方法中信号周期、相位、相序和流向权重的限制,实现了由被动适应到主动组织的跃变.

2 TSS-CII 的计算基础

2.1 候选信号相位集设计

相位相序设计是交叉口信号控制的基础,合理的相位相序加以合理的配时才能使交叉口的空间资源得到充分的利用;相反,如果仅仅优化配时,而忽略相位的优化,则会限制控制效果的提高.因此,在新型信号机足以支持可变相位相序的前提下,应该考虑对信号的相位相序及配时同时进行实时优化,尽可能地提高交叉口的利用率.

按照相位设计原则,可将交叉口各进口方向的多股车流,设计成多个相位构成候选相位集.在对交叉口进行自组织信号控制时,可根据不同流

向的交通状态在候选相位中进行选择,对交通拥挤程度高、最迫切需要放行的相位给予绿灯通行权,确保每次绿灯放行期间所选相位及其配时能够使交叉口的使用效率最大化,以此实现快速疏散排队车辆,缓解交通拥挤的目的。

2.2 各流向权重的确定

信号交叉口是由各路段相交而成,在通常情况下,各路段具有不同的等级.在非拥挤条件下,各路段交通流请求绿灯通行权的急迫程度差异不大,交叉口的空间资源和时间资源较充裕,在实施信号控制时可以忽略各路段等级的差异性,仅依据交通需求量进行配时计算即可.但在局部拥挤条件下,各路段交通流请求绿灯通行权的急迫程度差异较大,通常主干路承载的交通流量较大,拥挤期间主干路路段的空间资源和时间资源较为紧张,此时信号控制方案的制定需要考虑各路段等级的差异性,应对高等级路段的拥挤车流优先放行,以确保主路畅通.即,通过“掠夺”低等级路段交通流的时间资源,“补给”高等级路段交通流的通行机会。

为实现这个目标,需要事先对信号交叉口所辖路段进行分析,确定各路段的等级,并按照一定的原则对各路段所辖交通流流向赋予权重.在制定自组织信号控制方案时,可根据各流向的权重值及其交通拥挤等级确定其请求绿灯通行权的急迫程度。

2.3 等待时间上限及其确定方法

拥挤情况下,虽然应该优先考虑拥挤流向的交通流,并尽可能给予其特权,使其优先放行,但是也应该考虑其他流向等待的车流.从交通参与者的心理感受考虑,不能让其无限期地等待.有研究认为,人们可忍受的等待绿灯通行的时间为 2~3 min.实际上,这一值会因不同城市、不同道路而有所差别,如大城市车辆驾驶者在交叉口等待绿灯通行的心理承受能力要比小城市驾驶者在同样情况下的心理承受能力强.因此,等待时间上限 W_{\max} 很难用一绝对数值对其进行确定.可根据城市大小规模不同,交叉口的等级不同而相对地为其赋值。

3 TSS - CII 信号配时方法

当交叉口所辖某一路段或几个路段发生拥挤时,则实施 TSS - CII 信号控制.TSS - CII 在每一次绿灯结束时根据实时交通状态信息制定控制决策.其工作流程包括 6 个主要步骤。

1) 根据动态交通数据和交通状态判别算法,

判别交叉口及所辖各路段的交通状态,当发生拥挤时启动 TSS - CII;

2) 在当前相位绿灯结束时,根据固定型检测器的数据,计算各路段每一车道的排队车辆数 N_i ,具体方法详见 3.1;

3) 确定请求绿灯通行权迫切性最强的关键流向,将包括该流向的所有候选相位作为拟放行相位,具体方法详见 3.2;

4) 计算关键流向所需的绿灯时间 G_p ,具体方法详见 3.3;

5) 计算每一拟放行相位 P 获得通行权后交叉口的有效利用率 E_p ,并选择 E_p 最大的拟放行相位作为当前的放行相位,具体方法详见 3.4;

6) 为选定的放行相位显示绿灯,放行相应流向的车队。

上述控制过程的流程如图 1 所示。

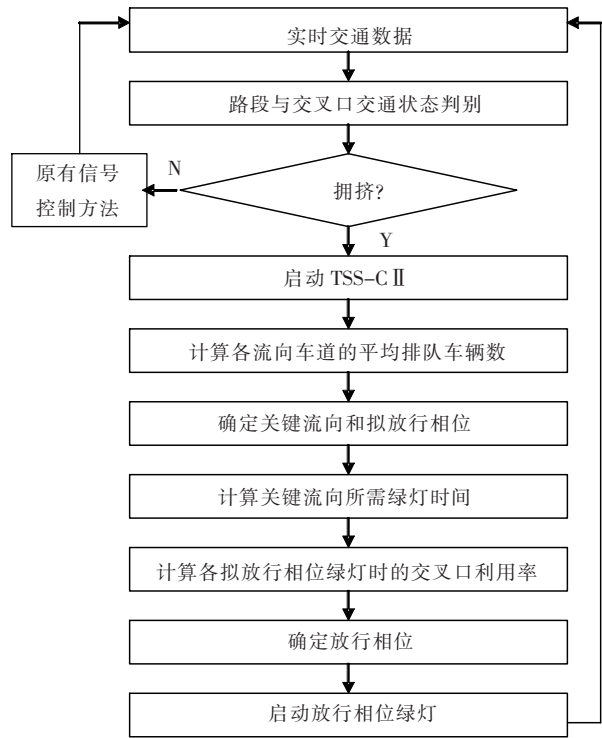


图 1 TSS - CII 工作流程

3.1 各车道排队车辆数的计算方法

在局部拥挤条件下,各相位绿灯结束时,红灯期间等待放行的车辆通常不能全部通过交叉口,滞留车辆将与新到达的车辆一起等待下一次绿灯放行.因此,在下次绿灯放行初始准确地计算出各车道等待放行的车辆数,并根据排队车辆数给予其相应的绿灯时间是非常必要的。

以图 2 为例,说明各车道排队长度的计算方法.在图 2 中,车道 3 为左转专用车道,车道 2 为直行车道,车道 1 为直行右转车道,各车道上下游分别安装有固定型检测器.车道 3 两个检测器之

间的距离为 L_{LT} , 车道2和车道1两个检测器之间的距离为 L_{RT} .

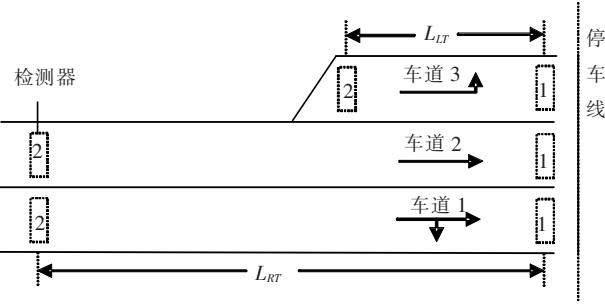


图2 车道示意图

3.1.1 左转车道的排队车辆数

假设当前第 t 次绿灯结束时车道3的两个检测器间有 s_t^3 辆车排队, 检测器2对新到车辆继续计数, 则该车道车流获得 $t + 1$ 次绿灯通行权时, 两检测器之间的排队车辆数为原有排队车辆数 s_t^3 与新到达车辆数 sn_t^3 之和, 即

$$N_t^3 = s_t^3 + sn_t^3. \quad (1)$$

当该车道再次获得绿灯通行权时, 检测器1开始对离开的车辆计数, 检测器2继续统计新到达的车辆. 当第 $t + 1$ 次绿灯结束时, 检测器2统计绿灯期间到达的车辆数为 SN_{t+1}^3 , 检测器1统计绿灯期间离开的车辆数为 sd_{t+1}^3 , 此时两个检测器之间的剩余车辆数为

$$s_{t+1}^3 = s_t^3 + sn_t^3 + SN_{t+1}^3 - sd_{t+1}^3. \quad (2)$$

由上述迭代公式, 便可计算出该车道再次获得绿灯时需要放行的车辆数.

3.1.2 直右流向各车道的平均排队车辆数

交叉口渠化的左转专用车道进口道通常较短, 即 $L_{LT} < L_{RT}$, 计算车道2上的排队车辆较为复杂, 因为车道2上游的检测器2不仅仅统计直行的车辆, 同时还有左转的车辆. 因此, 在计算车道2的排队车辆数时应去除左转的车辆, 而左转车辆的比例可以通过车道3上检测器实时检测的数据计算得到. 车道1的排队车辆数的计算形式与车道3相同, 见式(6). 假设当前车道2第 t 次绿灯结束, 则车道2上滞留的车辆数为

$$N_t^2 = s_t^2 + sn_t^2(1 - P_t^{LT}). \quad (3)$$

式中: P_t^{LT} 为第 t 次绿灯结束至 $t + 1$ 次绿灯开始时累计到达车辆数中所占的左转车辆百分比.

$$P_t^{LT} = sn_t^3 / sn_t^2. \quad (4)$$

当第 $t + 1$ 次绿灯结束时, 车道2上两个检测器之间的排队车辆为

$$s_{t+1}^2 = s_t^2 + (sn_t^2 + SN_{t+1}^2)(1 - P_t^{LT}) - sd_{t+1}^2, \quad (5)$$

$$N_t^1 = s_t^1 + sn_t^1. \quad (6)$$

3.2 关键流向的确定方法

关键流向是指同一交叉口各路段上请求绿灯通行权最迫切的流向排队.

在本文的研究中, 根据各流向的等待时间是否超过等待时间上限, 采用不同的方法确定关键流向. 当某些流向的等待时间超过等待时间上限时, 选择其中等待时间最大的流向作为关键流向. 否则, 按照下面的方法确定关键流向.

在局部拥挤条件下, 需要优先放行高等级路段的拥挤车流, 因此不能仅仅根据各车流方向的平均排队车辆数确定放行顺序, 而应该附加考虑交叉口所辖路段各流向的权重值, 式(7)为请求绿灯通行权迫切程度最高的关键流向筛选方法.

$$N'_p = \max \{ \max (N_i \times \tilde{\omega}_i)_M \}. \quad (7)$$

式中: N'_p 为请求绿灯通行权最迫切的关键车流方向, 即关键流向, $(N_i \times \tilde{\omega}_i)_M$ 为第 M 股车流第 i 车道的排队车辆数和第 i 车道的权重值乘积, M 为特定候选相位 P 中的流向.

确定关键流向后, 可计算出关键流向向各车道的平均排队车辆数 N_p , 用于后续的配时计算.

运用式(7)可以筛选出关键流向, 关键流向的车流即是需要优先放行的车流, 在当前时刻应给予关键流向所在的相位绿灯通行权.

需要注意的是, 关键流向的车流可能同属于几个候选相位, 究竟应该选择哪个候选相位并给予绿灯放行, 需要进行优化计算. 本文提出了一种以候选相位通行能力最大为目标的关键流向候选相位优选方法, 具体计算方法详见3.4.

3.3 拟放行相位绿灯时长的确定方法

TSS - CII 确定绿灯时间的原则是能够最大限度地放行关键流向的排队车辆以及绿灯启动后加入到关键流向的车辆. 因此, 对于关键流向所在的拟放行相位 P , 所需的绿灯时间为

$$G_p = L_p + (N_p + SN_p)h. \quad (8)$$

式中: G_p 为相位 P 的绿灯时间, L_p 为启动损失时间, h 为饱和车头时距, SN_p 为排队车辆放行期间到达并加入关键流向的车辆数, R 为关键流向的红灯时间长度. 这里假设绿灯放行期间车辆的到达率与红灯期间车辆的到达率相同, 即

$$SN_p = \left(\frac{L_p + N_p h}{R} \right) \times N_p. \quad (9)$$

3.4 放行相位的确定方法

对于关键流向所在的拟放行相位 P , 在确定了绿灯时间 G_p 后, 绿灯期间可放行的最大车辆数 V_p^{\max} 为

$$V_p^{\max} = \sum_M \sum_i ((N_i)_M + (SN_i)_M). \quad (10)$$

式中: $(N_i)_M$ 表示 M 流向 i 车道排队车辆数, 如果 $(N_i)_M$ 为拟放行相位的关键流向, 则 $(SN_i)_M = SN_p$; 如果 $(N_i)_M$ 不是拟放行相位的关键流向, 则 $(SN_i)_M$ 可由式(11)计算得到.

$$(SN_i)_M = \frac{G_p \times (N_i)_M}{(r_i)_M}. \quad (11)$$

式中 $(r_i)_M$ 为第 M 流向第 i 车道的红灯时间.

对于拥挤交叉口, 其时空效率是极其宝贵的资源, 分秒必争、寸土必争是拥挤期间实施有效控制必要手段.

因此, 本文在确定放行相位时, 所遵循的原则是使交叉口的利用率最大化, 拟放行相位 P 获得通行权期间交叉口的有效利用率 U_p 为

$$U_p = V_p^{\max} / G_p. \quad (12)$$

对关键流向所在的所有拟放行相位计算 U_p , 并选择 U_p 值最大的相位作为当前的放行相位, 给予其绿灯通行权.

4 模拟分析

4.1 模拟方案设计

本实验以图 3 所示的信号交叉口为例, 采用模拟手段, 通过 VB 调用 VISSIM 的 COM 端口实现对模拟期间交通流运行状态的实时判别, 并通过 VAP 编程模块对 TSS - CII 中的控制算法进行实现. 图中的数字为车道编号, 车道 1、车道 2、车道 4 和车道 5 所在的路段直行车流量较大, 车道 6 和车道 7 所在的路段左转车流量较大, 车道 3 所在的路段是支路. 该信号交叉口体现了不同转向交通流量大小有所差异的情况, 而非如同一般的信号交叉口那样直行方向流量较大, 其他转向流量较小. 因此, 选定该信号交叉口可以验证本文提出算法的通用性. 根据车流的不同流向, 可构成 12 个候选相位, 构成的候选相位集如表 1 所示. 在 TSS - CII 执行期间, 每次发放绿灯通行权时将从这 12 个候选相位中优选出一个, 并给予其绿灯显示.

本文在实验设计时拟采用 4 种信号控制方案, 即固定配时与分时段自适应配时、Gazis 的过饱和信号配时方法^[1]和本文提出的自组织信号配时方法, 并在相同的交通背景下进行模拟实验, 模拟时间为 3 600 s. 在使用 Gazis 提出的过饱和控制方法时, 本文对其进行了简单改进, 使其能够动态控制双向交通流, 而非只能静态控制单向交通流. 体现交通拥挤生成过程的背景交通流量见

表 2 所示, 交通流构成包括大车和小车两类, 其中小车比例 92%, 大车比例 8%.

表 3 为 VISSIM 中固定配时信号灯组示意图, 图 4 为固定配时方案.

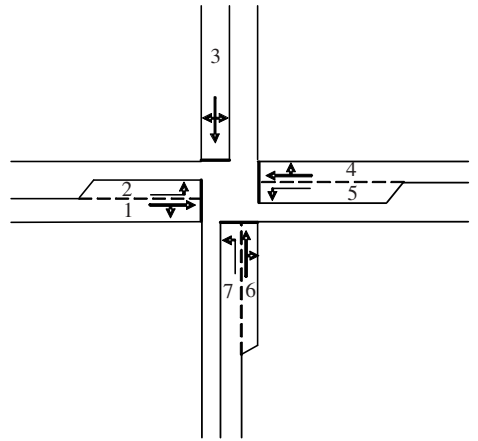


图 3 单点交叉口模拟示意图

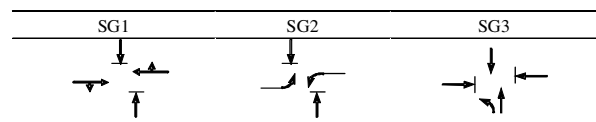
表 1 候选相位集

相位 1	相位 2	相位 3	相位 4
相位 5	相位 6	相位 7	相位 8
相位 9	相位 10	相位 11	相位 12

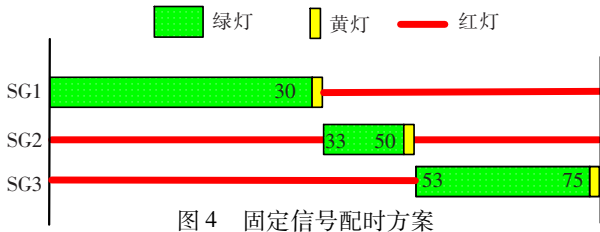
表 2 模拟交叉口交通流量输入方案 veh · h⁻¹

时间段/s	东进口	北进口	南进口	西进口
0 ~ 300	300	410	144	300
301 ~ 600	350	470	200	300
601 ~ 900	500	500	244	500
901 ~ 1800	800	600	500	800
1801 ~ 2700	900	700	500	1000
2701 ~ 3600	700	650	450	850

表 3 交叉口固定配时信号灯组



受 VISSIM 模拟软件的功能所限, 无法实现真正意义的自适应信号配时模拟, 因此本文在进行自适应模拟试验时, 采取分时段“准自适应控制”, 各时段配时方案见表 4 所示.



Gazis 的配时方案与图 4 中固定配时方案相似,但是当检测到拥挤时 SG1 和 SG3 的配时轮流切换,即当前周期 SG1 的绿灯时长为下一周期 SG3 的绿灯时长,下一周期 SG1 的绿灯时长为当前周期 SG3 的绿灯时长,SG2 的绿灯时长不变. 以此实现拥挤条件下,各拥挤方向按最大绿灯时间轮流放行的目的.

表 4 分时段自适应控制各模拟时段信号配时方案

配时参数	时段					
	0 ~ 624	625 ~ 1 206	1 207 ~ 1 823	1 824 ~ 2 382	2 383 ~ 2 983	2 984 ~ 3 600
SG1	30	33	37	40	42	42
SG2	17	17	16	16	16	16
SG3	22	24	26	29	33	31
黄灯	3	3	3	3	3	3
周期	78	83	88	94	100	98

4.2 试验结果

表 5 为 4 种不同信号控制方法的模拟实验对比结果,采用的性能指标分别为平均速度、平均延

误和停车次数.在局部拥挤条件下,本文所提出的自组织信号控制方法明显优于其他 3 种信号控制方法.

表 5 各种信号控制方式综合指标对比结果

控制方式	性能指标		
	平均速度/(m · s ⁻¹)	平均延误/s	停车次数/次
固定配时	18.075	51.675	3.879
分时段自适应控制	20.156	49.375	3.761
Gazis 饱和控制	21.537	44.358	3.295
本文提出的自组织控制	22.351	40.325	2.176

5 结 语

以拥挤流向放行车辆数最大为目标,以地点交通参数数据为基础,提出了一种无信号周期、无固定相位相序限制的自组织信号控制方法,并以 VISSIM 为工具对上述方法进行了模拟验证.结果表明,本文提出的 TSS - CII 方法可以提高局部交通拥挤的疏导效果.

参考文献:

[1] GAZIS D C. Optimum control of a system of oversaturated intersections[J]. Operations Research, 1964, 12(6):815 - 831.

[2] MICHALOPOULOS P G, STEPHANOPOLOS G. Oversaturated signal system with queue length constraints [J]. Transportation Research, 1977, 11(2):423 - 428.

[3] MICHALOPOULOS P G, STEPHANOPOLOS G. Optimal control of oversaturated intersections theoretical and practical considerations [J]. Traffic Engineering & Control, 1978, 19(5): 216 - 222.

[4] SHEPHERD S. Traffic control in over-saturated condi-

tions[J]. Transport Reviews, 1994,14(1):13 - 43.

[5] CHANG Tang-hsien, LIN Jen-ting. Optimal signal timing for an oversaturated intersection[J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(6):471 - 491.

[6] 裴玉龙,蒋贤才. 饱和交通状态下的绿信比优化及其应用研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(11): 1499 - 1502.

[7] ZHANG Lin, LI Honglong, PREVEDOUROS P D. Signal control for oversaturated intersections using fuzzy logic[C]//84th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, D. C. :TRB of the National Academies, 2005:1 - 24.

[8] GHASSAN Abu-lebdeh, RAHIM F B. Development of traffic control and queue management procedures for oversaturated arterials [J]. Transportation Research Record, 1997, 1603(3):119 - 127.

[9] 姜桂艳,郭海锋,吴超腾. 基于感应线圈数据的城市道路交通状态判别方法研究[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,增刊(1):37 - 42.

[10] 郭海锋. 局部拥挤条件下城市道路交通信号控制方法研究[D]. 长春:吉林大学,2008.

(编辑 赵丽莹)