

控制排队长度的高密度路网信号优化模型

胡晓健, 王 炜, 陆 建

(东南大学 交通规划与管理江苏省重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了提高高密度路网地区的交通管理水平, 针对高密度路网特点, 提出了一种分布式信号控制模型, 用于控制交叉口的排队管理. 该模型建立了多目标函数, 包括了平均出行延误最小和平均排队占比最小; 模型约束包括了排队长度估计、信号控制参数约束. 此外, 为了避免排队回流现象的产生, 还建立了具有高优先级的排队回流约束. 仿真结果表明, 该模型提高了高密度路网地区的交通通行效率, 并有效避免交叉口排队回流现象.

关键词: 高密度路网; 信号控制; 排队管理; 排队回流

中图分类号: U491 **文献标识码:** A

Traffic signal control model based on queue management in high-density network

HU Xiao-jian, WANG Wei, LU Jian

(Key Lab for Traffic Planning and Management, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: To improve the traffic management in a high-density network, we propose a distributed traffic signal control model to manage the queues in the intersections, based on the characteristics of high-density network. This model minimizes the average travel delay and the average queue ratio under the constraints on the queue dissipation and the signal control parameters. In addition, to avoid queue spillbacks, a high-priority queue spillback constraint is built. Simulation results illustrate the improvement of the traffic travel efficiency in high-density networks, and the effective avoidance of queue spillbacks.

Key words: high-density network; traffic signal control; queue management; queue spillbacks

1 引言(Introduction)

新城市主义运动的倡导下, 高密度路网建设已经成为现阶段城市路网的发展趋势之一. 高密度路网表现为均质的路网机理特征: 通过比较均质的交通流组织形式, 保障充分利用高密度路网良好的选择性, 而非通过传统的等级路网体系将交通流向交通干道汇集, 实现疏导交通^[1]. 国内外已建成了诸多高密度路网, 例如美国纽约曼哈顿地区、西班牙巴塞罗那城区、法国巴黎CBD地区、日本东京CBD地区, 以及国内的上海外滩地区、天津小白楼地区等. 这些地区均具备了道路细而稠密, 道路间距约在100~300 m之间, 主要由2车道至4车道的道路组成正交棋盘式网络交通, 路网密度分布均匀, 道路之间无明显的道路等级差异等高密度路网的基本特征. 高密度路网交叉口密集, 路段长度短, 道路间距小, 产

生的排队容易蔓延到上游交叉口, 产生交叉口“死锁”现象. 因此, 高密度路网地区有必要实施区域协调控制.

目前, 区域协调控制技术是交通信号控制理论研究重点之一: SADAYOSHI^[2,3]针对每一个路口交通流的变化, 通过强化学习方法调整信号周期的绿信比, 利用遗传算法产生的局部学习过程, 修正信号周期的大小, 但是由于该模型有较多的系统参数需要人工调整, 参数调整的好坏直接影响模型的应用效果的优劣. LI等^[4]采用三层金字塔式控制结构, 形成基于多智能体的道路交通协调控制体系, 该体系适用于较为理想的交通环境, 不能直接应用于城市路网. OU等^[5]采用由递归建模和改进贝叶斯学习相结合的多智能体系统实现交通网络控制, 通过实验证明了该方法的可行性. 承向军等^[6]提出一种引入

收稿日期: 2009-11-27; 收修改稿日期: 2010-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(50738001); 中国博士后科学基金资助项目(20100471359); 江苏省博士后科研计划资助项目(0902004B); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0115).

学习机制的基于多智能体技术的城市交通信号控制系统框架,该系统还处于开发阶段,尚未进行试验. LIU等^[7]提出一种交通网络信号区域协调控制策略,通过反复的迭代过程来寻求各智能体之间的协作,该模型在具有4交叉口的小路网中进行了仿真实验. CHEN^[8]提出了自适应协同信号控制模型(ACTAM),用来预测各路口的交通流量.为提高高密度路网交通通行效率,针对高密度路网结构特点,结合区域协调控制理论的研究成果,提出了高密度路网的分布式区域信号控制模型.上述研究成果均处于理论研究和仿真实验阶段,而且适用的路网具有较强的针对性,对于高密度路网中交叉口密集、交叉口间距小的情况缺乏考虑.

2 建立模型(Modeling)

分布式控制结构克服了系统在资源、时空分布、运算困难等局限性,具备并行、分布、开放和容错等优点,有利于提高系统寻优的时效性和系统运行的稳定性,适用于交叉口密集、路网结构复杂、交通流变化大的高密度路网地区.

因此,高密度路网的分布式区域信号控制模型采用分布式控制结构,将高密度路网中每一个信号交叉口作为控制对象,建立子控制系统,如图1所示.每个子控制系统均由1个被控交叉口(交叉口 N)和若干个直连交叉口(交叉口 $N+1, N+2, \dots$)组成.子控制系统根据子控制区域内的交通状况和短时交通流估计,优化、实施信号控制方案.根据重叠分解原理可知,当每个交叉口的信号优化都获得该子控制系统的最优解时,可以确保被控区域获得接近最优控制的次优控制,实现区域信号协调控制.

高密度路网的分布式区域信号控制模型需要根据子控制区域短时交通流预测,优化被控交叉口的信号控制参数.因此,采用元胞运输模型(CTM模型)为子控制系统建立交通流模型,用于交叉口处交通流的短时预测(图1).CTM模型简单、易用,在信号控制优化领域得到广泛应用^[9~12].

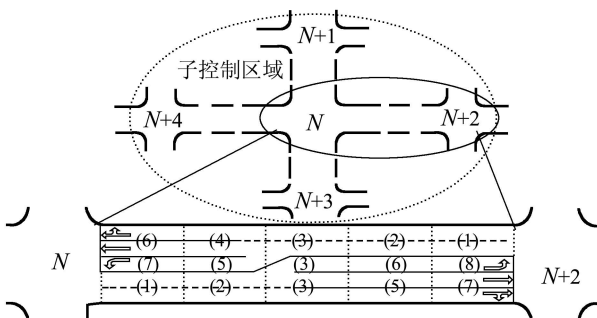


图1 子控制区域路网建模结构

Fig. 1 Controlling regional network structure mode

1) 模型优化目标.

高密度路网交叉口密集,相邻交叉口之间距离短,相互影响更为直接.因此,子控制系统优化被控交叉口信号时,还要尽量避免对直连交叉口的影响.根据GU对不同控制目标的控制效果分析^[13],提出将“行程时间延误最小”和“平均排队占比最小”作为区域交通信号控制系统的控制目标.

行程时间延误用于描述通行车辆因受交通流状况、道路条件、交通控制等因素影响,而产生的总延误.对于由CTM模型建立交通流模型的子控制系统而言,车辆总行程时间延误等于所有元胞的延误车辆数乘以延误时间.因此,车辆总行程时间延误最小的目标函数

$$O_{\text{delay}} = \min \sum_{m=1}^M \sum_{i \in A} \sum_{j=1}^{N_i} [k_{(i,j)}(t+m) \cdot v - q_{(i,j)}(t+m)] \cdot \Delta T^2. \quad (1)$$

式中: A 为子控制区域内从直连交叉口驶向被控交叉口方向的路段集合; M 为最大预测步长数; N_i 为路段 i 内的元胞数; $k_{(i,j)}(t)$ 为在第 t 个时间步长内,路段 i 的第 j 个元胞内的交通流密度; $k_{(i,j)}(t)$ 为在第 t 个时间步长内,路段 i 的第 j 个元胞的交通流驶出率; v 为交通畅行情况下,理想行驶车速; ΔT 为单位时间步长.

平均排队占比是指交叉口处,各路段排队长度占路段可容纳排队长度比的平均值.采用平均排队占比最小作为优化目标,既考虑了每个相位的排队长度,又考虑了各条路段对排队长度的容纳程度,适用于排队车辆容纳空间有限的高密度路网.通过平均排队占比优化,可以实现优化被控交叉口信号参数的同时,充分利用被控交叉口的排队空间,避免排队蔓延到周边交叉口,影响相连交叉口的车辆通行.平均排队占比最小的目标函数如式(2)所示:

$$O_{\text{length}} = \min \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{\text{len}_p(M)}{L_p}. \quad (2)$$

其中: P 为被控交叉口的相位总数; L_p 为第 p 个车辆运动方向的最大可容纳排队长度; $\text{len}_p(M)$ 为在第 M 个步长时, p 相位的车辆排队长度.

2) 车辆排队长度估计.

被控交叉口处,各相位的车辆排队长度估计如式(3)所示:

$$\text{len}_p(t) = \max \{0, \text{len}_p(t-1) + (q_p^{\text{end}}(t) - q_p^{\text{out}}(t)) \cdot \Delta T\}, \quad (3)$$

式中: $q_p^{\text{end}}(t)$ 为在第 t 个步长时,车辆到达第 p 相位排队末端的驶入率; $q_p^{\text{out}}(t)$ 为在第 t 个步长时,车辆驶

离第 p 相位排队前端的驶出率。

$q_p^{\text{end}}(t)$ 可通过ROBERTSON模型^[14~16]计算。根据在第 $t-1$ 步长结束时刻的排队长度, $\text{len}_p(t-1)$ 确定排队尾部所在元胞 (i, j) ; 将元胞 (i, j) 视为ROBERTSON模型中所指的路段, 估计 P 相位排队末端的驶入率:

$$q_p^{\text{end}}(t) = F \cdot q_{(i,j)}^{\text{in}}(t-1) + (1-F) \cdot q_p^{\text{end}}(t-1), \quad (4)$$

式中: $q_{(i,j)}^{\text{in}}(t-1)$ 为在第 $t-1$ 个步长时, 元胞 (i, j) 处的驶入流量。

$q_p^{\text{out}}(t)$ 取决于 p 相位信号灯状态和该相位在停车线处元胞的交通流驶离率:

$$q_p^{\text{out}}(t) = u_p(t) \cdot \min \{vk_p^{\text{out}}(t), q_p^{\text{max}}(t)\}, \quad (5)$$

式中: $k_p^{\text{out}}(t)$ 为停车线处, p 相位排队前端第1个元胞在第 t 个步长时的车流密度; $q_p^{\text{max}}(t)$ 为停车线处, p 相位队列前端第1个元胞在第 t 个步长时的车流饱和流量; $u_p(t)$ 为第 t 个步长时, 信号灯第 p 相位的信号状态。 $u_p(t)$ 为布尔函数, $u_p(t) = 1$ 表示相位 p 在此步长内为绿灯, $u_p(t) = 0$ 表示相位 p 在此步长内为红灯。

3) 信号控制参数约束。

被控交叉口各个相位信号灯控制参数在红灯、绿灯和黄灯等3种状态之间的变化, 可采用布尔函数进行描述:

$$u_p(t) = u_p(t-1) + \xi_p(t-1) - 2u_p(t-1)\xi_p(t-1), \quad (6)$$

式中: $u_p(t)$ 为第 t 个时间步长时, 第 p 相位的决策情况。 $u_p(t)$ 为布尔函数: $u_p(t) = 1$ 表示相位 p 在第 t 个步长需要改变信号状态, $u_p(t) = 0$ 表示相位 p 在第 t 个步长维持交通信号原状态。

此外, 黄灯的状态仅在相位由绿灯变为红灯时出现。因此, 当 $u_p(t-1)\xi_p(t-1)$ 时, p 相位在第 t 个时间步长的前3秒将处于黄灯状态, 然后变成红灯状态。

根据信号灯状态 $u_p(t)$, 即可确定 p 相位的绿灯时长:

$$G_p(t) = (G_p(t-1) + \Delta T) \cdot u_p(t), \quad (7)$$

式中: $G_p(t)$ 为在第 t 个步长末, p 相位的绿灯时长。

每个相位的绿灯时长必须满足绿灯时长约束条件, 即大于等于该相位的最短绿灯时长 G_p^{min} 和小于等于最大绿灯时长 G_p^{max} :

$$G_p^{\text{min}} \leq G_p(t) \leq G_p^{\text{max}}, \quad (8)$$

为避免交叉口内不同相位的交通流产生冲突, 建立相位间的冲突约束条件。该约束采用布尔矩阵不等式进行描述:

$$U^T(t) \cdot U(t) \leq \Gamma, \quad (9)$$

式中: $U(t)$ 为交叉口相位状态集合, $U(t) = \{u_1(t), u_2(t), u_p(t)\}$; Γ 为相位关系布尔矩阵, 用于约束交叉口各相位状态之间的关系。对于不同类型的信号交叉口均可以建立相应的相位关系布尔矩阵 Γ 。以典型信号交叉口图2为例, 相位关系布尔矩阵:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

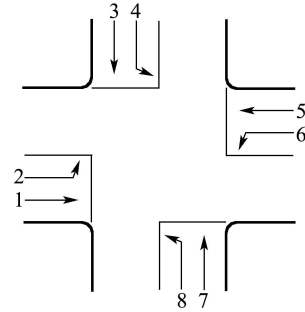


图2 典型交叉口相位示意图

Fig. 2 The typical intersection's signal phase diagram

4) 排队回流约束。

交叉口排队回流是指在信号交叉口处, 等待通行的车辆排队过长, 上溯到上游交叉口, 造成上游交叉口死锁。高密度路网交叉口之间的间距较短, 极易造成排队回流现象。为此, 建立交叉口之间的排队回流约束。排队回流约束为高优先权约束, 即启动该约束条件后, 被控交叉口信号仅受排队回流约束控制; 当终止排队回流约束后, 才根据式(1)~(9)重新优化被控交叉口信号控制参数。

从预留空间考虑, 路段至少应提供在 ΔT 时间内驶入最大车辆数所需的停车排队空间作为预防排队回流现象预留空间。因此, 将启动回流约束指标 L_i^{cr} (式(10))作为是否启动排队回流约束的标准:

$$L_i^{\text{cr}} = L_i^{\text{link}} - (q_{(i,1)}^{\text{max}} \cdot \Delta T \cdot l_{\text{veh}} / No_i), \quad (10)$$

式中: L_i^{link} 为排队长度的最大容纳空间长度, 即路段 i 长度; $q_{(i,1)}^{\text{max}}$ 为路段 i 的入口处元胞的最大驶入交通流量; l_{veh} 为平均

车辆长度; No_i 为路段 i 的车道数.

当排队长度触及回流队长指标时, 表明该路段可能出现排队回流现象. 该路段上下游相连的子控制系统将会启动排队回流约束. 路段下游子控制系统采取下游交叉口的服务约束; 路段上游子控制系统采取上游交叉口的禁行约束.

下游交叉口的服务约束: 当被控交叉口的路段 $j (j \in A)$ 触及排队回流约束启动条件时, 则该子控制系统的被控交叉口作为路段 j 的下游交叉口, 会为路段 j 车辆提供通行服务, 如式(11):

$$\begin{aligned} \text{if } \text{len}^j(t) \geq L_j^{\text{cr}}, j \in A, \text{ then} \\ u_p(t+1) = 1, \end{aligned} \quad (11)$$

式中: p 为路段 j 中引起最长排队长度的相位; $\text{len}^j(t)$ 为路段 j 的排队长度, 排队长度可由式(12)获得

$$\text{len}^j(t) = \max_{p \in O_j} \{\text{len}_p(t)\}, \quad (12)$$

式中 O_j 为被控交叉口信号相位中, 控制驶出路段 j 的相位集合.

与此同时, 该子控制系统将通知路段 j 上游紧邻的子控制系统, 采取上游交叉口的禁行约束: 上游子控制系统的被控交叉口将禁止向路段 j 放行车辆. 如下式(13)所示:

$$u_p(t+1) = 0, \forall p \in I_j. \quad (13)$$

式中: I_j 为被控交叉口交通信号控制相位中, 控制驶入路段 j 的相位集合. 当路段排队逐渐消散之后, 被控交叉口需终止排队回流约束, 重新优化被控交叉口信号控制参数. 为避免排队回流约束启动、终止状态的频繁切换, 将路段的中点作为终止回流约束指标, 即当排队长度小于 $0.5L_i^{\text{link}}$ 时, 终止排队回流约束.

3 模型求解(Model solution)

在排队回流约束未启动的情况下, 子控制系统通过式(1)~(9)优化信号控制参数. 由于目标函数和约束条件具有多目标、非线性的特点, 因此采用离散粒子群优化算法作为寻优算法. 该算法在对非线性、约束问题求解中表现出一定优越性^[17], 在大多数测试函数中离散粒子群优化算法比遗传算法优化速度快^[18]. 由于高密度路网地区分布式交通信号控制模型为多目标函数, 不能将其直接作为算法的适应度函数. 因此, 基于目标规划法原理^[19], 采用理想点, 建立适应度函数:

$$y = \min_{x \in \Omega} \|f(x) - C\|_{\infty}, \quad (14)$$

式中: Ω 为多目标优化问题的可行域; $f(x)$ 为多目标

函数组; C 为理想点.

理想点是在忽略其他目标的前提下, 由目标 i 所能达到的最优解 x_i^* 相对应的最优目标值 f_i^* 共同组成, 如式(15)(16)所示:

$$C = \{f_1^*, f_2^*, f_n^*\}^T, C \in \mathbb{R}^n, \quad (15)$$

$$f_i^* = f_i(x_i^*) = \min_{x \in \Omega} f_i(x). \quad (16)$$

式中 $\mathbb{R}^n$ 为解空间.

此外, 采用Deb比较策略比较粒子, 寻找迭代过程中最优粒子: 1) 如果两个粒子都是可行解, 则目标值小的粒子胜出; 2) 如果一个粒子在可行域, 另一个粒子不在可行域, 则前者胜出; 3) 如果两个粒子都不在可行域, 则约束违反程度小的粒子胜出. Deb比较策略简单, 避免通过罚函数法将模型约束条件引入适应度函数时, 造成惩罚系数调整困难的局面^[20].

算法寻优迭代流程如下:

Step 1 初始化粒子群规模、加速常数、初始惯性权值、进化末的惯性权值、最大进化代数等.

Step 2 随机生成粒子群, 包括每个粒子的初始位置和初始位移速度.

Step 3 根据粒子群的位置和多目标函数, 分别计算每个粒子的各个单目标函数值.

Step 4 将每个粒子的各个单目标函数值与历史迭代所得的各个单目标函数的最好极值进行比较, 寻找各个单目标函数的新极值.

Step 5 根据各个单目标函数的新极值修正本次迭代的理想点, 重新建立基于本次迭代的理想点的适应度函数.

Step 6 根据适应度函数, 计算每个粒子适应值.

Step 7 根据Deb比较策略, 判断粒子是否在可行域内: 如果在, 接受该粒子; 反之, 拒绝该粒子.

Step 8 在接受的粒子中, 比较粒子适应值, 确定粒子的个体极值和粒子群的全局极值.

Step 9 判断迭代次数是否达到最大进化代数: 是, 转入Step11; 否, 转入Step10.

Step 10 更新各粒子的位置和速度, 转入Step3.

Step 11 输出粒子群的全局极值及其相应粒子的位置, 结束算法.

4 模拟仿真(Simulation)

仿真目的在于检验高密度路网的分布式区域信号控制模型的应用效果. 通过Vissim建立交叉口间距在150~300 m之间, 双向四车道, 引道段拓展为三车道, 相交道路之间无明显的等级差异, 符合高密度路网特性的交通路网(图3). 路网共有20个信号交叉

口, 每个进口道均通过左转和直右两相位控制, 假设每个交叉口车辆左转向比为20%.

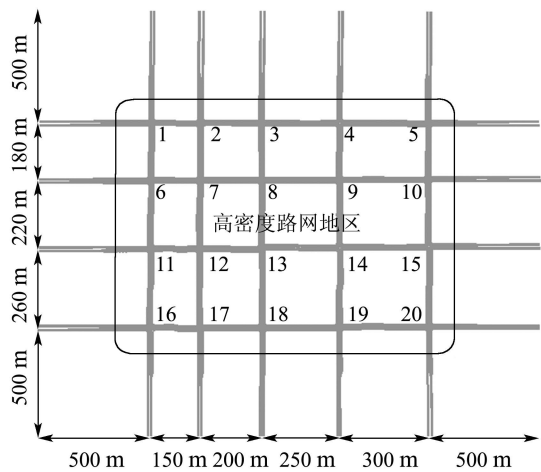


图 3 高密度路网的交通流模型

Fig. 3 High-density network's traffic model

首先, 通过Vissim建立了高密度路网, 并控制驶入高密度路网的18个入口的交通量, 模拟路网内不同的交通流饱和度; 其次, 在每个仿真步长内, 通过高密度路网的分布式区域信号控制模型, 优化信号交叉口的信号控制参数; 最后, 将仿真结果与常用的

定时控制方法获得的仿真效果进行比较. 因为, 高密度路网的分布式区域信号控制模型与定时控制方式相比, 共同点均是根据被控交叉口交通流变化优化信号参数, 不同点是前者为实时优化后者为定时控制.

在仿真过程中, 高密度路网入口处的交通量将统一设置为600 veh/h, 800 veh/h, 1000 veh/h, 1200 veh/h等4种情况, 模拟时长均为3600 s, 仿真步长为5 s. 其他参数主要由3部分组成: 一是交通流数据, 包括交叉口各进口道的流率和转向比, 这两项指标均可通过停车线处的感应线圈获得, 目前我国大中型城市交叉口的停车线普遍安装了电子警察、地感线圈, 可以满足交通流数据采集的要求. 二是模型中车速、激动波速、最短绿灯时长、最长绿灯时长等参数, 这些参数可通过实地调研获得. 三是算法中关于粒子群数、加速常数、初始惯性权值等参数, 这些参数可根据算法调试经验确定.

仿真初期, 路网内交通流较少且不稳定, 容易产生统计指标失真的现象. 因此, 各项指标数据的采集均从每次仿真的第600 s开始, 直至仿真结束. 仿真结果如表1所示.

表 1 高密度路网中两种控制应用评价

Table 1 The analysis of two control mode in high-density network applications

评价指标	控制方式	600	800	1000	1200
通行车辆总数/veh	定时控制	10027	13352	16681	19956
	分布式控制	10188	13532	16950	20247
平均出行时间/s	定时控制	226.65	235.23	244.52	255.58
	分布式控制	191.49	196.61	207.58	221.49
平均出行速度/(km·h ⁻¹)	定时控制	27.13	26.1	25.13	24.03
	分布式控制	32.14	31.28	29.63	27.74
平均延误时间/s	定时控制	109.87	118.38	127.49	138.52
	分布式控制	74.51	79.56	90.39	104.37

评价指标主要包括被控区域内通行车辆总数、出行时间、平均出行速度、延误时间. 由表1可知, 高密度路网的分布式区域信号控制模型的控制效果显著优于定时控制方式. 该模型的控制效果使被控区域内通行车辆总数有所增加的前提下, 车辆平均出行时间下降了15.01%, 车辆平均出行速度提高了17.97%, 车辆平均出行延误下降了29.42%. 造成上述现象的主要原因是: 高密度路网的分布式区域信号控制模型可以合理优化、分配交通时空资源, 提高各个交叉口的通行效率. 高密度路网的分布式区域信号控制模型能够更好的

发挥其优越性, 控制效果明显优于定时控制.

此外, 在路网入口处驶入交通量为1200 veh/h的情况下, 定时控制的路网中出现了交叉口排队长度过长造成上游交叉口拥堵的现象; 而在高密度路网的分布式区域信号控制模型控制的路网中, 由于模型建立了平均排队占比最小的控制目标, 以及具有高优先权的交叉口之间的排队回流约束, 因此避免了上述现象的产生.

5 结论(Conclusion)

由于高密度路网具有交叉口密集、交叉口间距

短的特点, 交叉口处的排队极易影响到相连交叉口车辆通行. 为此, 提出了高密度路网的分布式区域信号控制模型. 该模型从行程时间延误最小和平均排队占比最小两方面考虑, 建立了多目标优化函数以及信号控制参数的约束条件. 其中, 平均排队占比最小作为优化目标可充分利用交叉口之间的空间资源, 有效控制各个相位的排队长度. 此外, 针对高密度路网容易造成排队回流, 引发上游交叉口拥堵的现象, 提出具有高优先权的交叉口之间的排队回流约束.

仿真结果表明, 在高密度路网内交通总量略有提高的同时, 出行时间、平均出行速度、延误时间等指标均显著优于定时控制方式. 结果表明该模型通过分布式控制, 以行程时间延误最小和平均排队占比最小作为控制目标, 实时优化各个交叉口的时空资源, 避免了排队回流现象, 提高了整个高密度路网地区的通行效率.

参考文献(References):

- [1] LANGDON P. *A Better Place to Live: Reshaping the American Suburb*[M]. Massachusetts: University of Massachusetts Press, 1997.
- [2] SADAYOSBI M, YUKINORI K. Self-organized control of traffic signals through genetic reinforcement learning[C] // *Intelligent Vehicles '93 Symposium*. Piscataway: IEEE, 1993: 113 – 118.
- [3] SADAYOSBI M, YUKINORI K. Genetic reinforcement learning for cooperative traffic signal control[C] // *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*. Piscataway: IEEE, 1994, 1: 223 – 228.
- [4] LI M S, HAFAM J, PRYOR L, et al. A cooperative intelligent system for urban traffic problems[C] // *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. New York: IEEE, 1996: 162 – 167.
- [5] OU H T, ZHANG W D, ZHANG W J, et al. Urban traffic multi-agent system based on rmm and bayesian learning[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Danvers: American Autom Control Council, 2000: 2782 – 2783.
- [6] 承向军, 杨肇夏. 基于多智能体技术的城市交通控制系统的探讨[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(5): 47 – 50.
(CHENG Xiangjun, YANG Zhaoxia. An approach to urban traffic control system based on multi-agent technology[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2002, 26(5): 47 – 50.)
- [7] LIU X M, WANG F Y. Study of city area traffic coordination control on the basis of agent[C] // *IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Singapore: IEEE, 2000: 758 – 761.
- [8] CHEN R S, CHEN D K, LIN S Y. ACTAM: cooperative multi-agent system architecture for urban traffic signal control[C] // *IEJCE Transactions on Information and System*. Japan: Inst Electron Inf & Commun Eng, 2005, E88-D(1): 119 – 126.
- [9] HONG K L. A novel traffic signal control formulation[J]. *Transportation Research, Part A*, 1999, 33A(6): 433 – 448.
- [10] HONG K L, CHANG E, CHAN Y CH. Dynamic network traffic control[J]. *Transportation Research Part A*, 2001, 35A(8): 721 – 744.
- [11] LAURA M M. *Macroscopic modeling and identification of freeway traffic flow*[D]. Berkeley: University of California, 2004.
- [12] 曾建勤, 王家捷, 唐良, 等. 基于CTM-RH的城市交通信号线控制[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(11): 1232 – 1236.
(ZENG Jianqin, WANG Jiajie, TANG Liang, et al. CTM-RH based line control for urban traffic lights[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, 36(11): 1232 – 1236.)
- [13] GU X J. *Multi-criteria signal timing control strategies for critical intersections*[D]. Miami: University of Miami, 2005.
- [14] ROBERTSON D I. Research on the transyt and scoot methods of signal coordination[J]. *ITE Journal*, 1986, 56(1): 36 – 40.
- [15] CASTLE D E, BONNIVILLE J W. Platoon dispersion over long road links[J]. *Transportation Research Record*, 1985, 1021: 36 – 44.
- [16] AXHAUSEN K W, KORLING H G. Some measurements of robertson's platoon dispersion factor[J]. *Transportation Research Record*, 1987, 1112: 71 – 77.
- [17] GODFREY C O, BABU V B. *New Optimization Techniques in Engineering*[M]. Germany: Springer, 2004: 219 – 239.
- [18] 雷开友. 粒子群算法及其应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
(LEI Kaiyou. *Research on particle swarm optimization and its application*[D]. Chongqing: Southwest University, 2006.)
- [19] CHARNES A, COOPER W W, FERGUSON R. Optimal estimation of executive compensation by linear programming[J]. *Management Science*, 1955, 1(1): 138 – 151.
- [20] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 186(2/4): 311 – 338.

作者简介:

胡晓健 (1981—), 男, 博士, 研究方向为城市交通信号控制、交通安全, E-mail: huxiaojian@seu.edu.cn;

王 炜 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为交通运输规划与管理;

陆 建 (1972—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为交通安全与交通管理.