

文章编号:1671-1637(2015)06-0101-09

过饱和交叉口交通信号控制动态规划优化模型

李瑞敏¹, 唐 瑾^{1,2}

(1. 清华大学 交通研究所, 北京 100084; 2. 中国城市和小城镇改革发展中心, 北京 100045)

摘要:为满足过饱和交叉口信号控制的需求,应用动态规划理论,建立了过饱和交叉口信号控制优化模型,界定了模型的阶段、状态变量和决策变量,推导了平均排队长度状态转移方程和控制器状态转移方程,确定了基于交叉口不同饱和状态的目标函数与约束条件,提出了模型优化框架。非饱和状态以最小化延误为控制目标,饱和状态和过饱和状态以最大化通行能力为控制目标。通过迭代运算判断保持或者切换当前相位,并将控制效果实时反馈以调节下一阶段信号配时方案。以秦皇岛市某交叉口为例,基于实际采集数据得到了非饱和、饱和与过饱和3种状态的交通流量,应用动态规划模型获得配时方案,并与TRANSYT方法给出的配时方案进行了对比分析。分析结果表明:在非饱和状态下,采用动态规划模型计算的平均延误、饱和度、平均排队长度分别为49.3 s、0.76、13.7 veh,采用TRANSYT方法计算的对应值分别为52.0 s、0.78、14.4 veh;在过饱和状态下,采用动态规划模型计算的饱和度与平均延误分别为0.85、78.5 s,采用TRANSYT方法计算的对应值分别为0.86、82.5 s,但对应的平均排队长度为27.3 veh,略优于动态规划模型的27.6 veh;饱和状态控制效果与过饱和状态控制效果类似。可见,采用动态规划模型可以有效降低交叉口饱和度和,减少各相位不同进口道车辆的平均延误。

关键词:智能交通系统;交通信号控制;动态规划;过饱和交叉口;信号配时优化;饱和度和

中图分类号:U491.51

文献标志码:A

Traffic signal control optimization model of over-saturated intersection based on dynamic programming

LI Rui-min¹, TANG Jin^{1,2}

(1. Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Center for Urban Development, Beijing 100045, China)

Abstract: In order to satisfy the signal control demand of over-saturated intersection, an optimization model was established by using dynamic programming theory. The stages, state variables, and decision variables were redefined. The state transition equations of average queue length and controller were built. The objective functions and constraints based on different intersection saturated states were determined. The optimization framework of the model was proposed. The control objective of unsaturated states was designed as the minimum delay, and the control objectives of saturated and over-saturated states were designed as the maximum capacity. Through iteration operations, retaining or changing the current phase was decided, and the signal timing program of next stage was adjusted by the real-time feedback of control effects. Taking an intersection of Qinhuangdao City as an example, the traffic flows of unsaturated,

收稿日期:2015-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(71361130015);“十一五”国家科技支撑计划项目(2014BAG03B03)

作者简介:李瑞敏(1979-),男,山东莱州人,清华大学副教授,工学博士,从事智能交通系统研究。

saturated and over-saturated states were obtained based on the actual collected data. The signal timing program was obtained by using the dynamic programming model, and compared with the signal timing program obtained by using TRANSYT method. Analysis result indicates that for the unsaturated state, the average delay, saturation, and average queue length obtained by the proposed model are 49.3 s, 0.76, 13.7 veh respectively, and the corresponding values obtained by TRANSYT method are 52.0 s, 0.78, 14.4 veh, respectively. For over-saturated state, the saturation and average delay obtained by the proposed model are 0.85 and 78.5 s respectively, and the corresponding values obtained by TRANSYT method are 0.86 and 82.5 s respectively, however, the corresponding average queue length is 27.3 veh that is slight better than the optimization value 27.6 veh. The control effect of saturated state is similar to over-saturated state. Obviously, the proposed model based on dynamic programming can effectively reduce the intersection saturation and the average delay of vehicle for each import of each phase. 1 tab, 16 figs, 21 refs.

Key words: intelligent transportation system; traffic signal control; dynamic programming; over-saturated intersection; signal timing optimization; saturation

Author resume: LI Rui-min(1979-), male, associate professor, PhD, +86-10-62770985, lrmin@tsinghua.edu.cn.

0 引 言

目前,中国城市道路交叉口早晚高峰期间交通流经常呈现饱和或过饱和状态,从而对路口的信号控制提出了更高的要求。现有的交通控制研究多是面向非饱和状况,对于饱和状态和过饱和状态的信号控制效果并不理想。过饱和交叉口的特征之一是某个或多个进口道方向上的排队较长,当过饱和状态的时间不断延长时,排队车辆有可能溢流到上游交叉口,造成上游交叉口锁死、通行能力下降等,因此,过饱和状态的需求、控制目标、约束条件等具有其特殊性^[1]。

过饱和交叉口的管理主要通过控制交通需求与增加交通供给以实现交叉口的供求平衡^[2]。在时间资源方面,控制交通需求可以通过协调上游交叉口的信号配时,以控制到达下游交叉口的流量。增加交通供给即通过合理的信号配时方案增加交叉口的通行能力,因此,在过饱和状况下,信号控制常以车辆排队长度最小或/和路网通行车流量最大为控制目标,其中对排队长度的管理是过饱和和交通信号控制的重要目标^[3-5]。

过饱和和交通控制研究最早起源于 20 世纪 60 年代, Gazis 首先提出以延误最小为控制目标的单点过饱和和交叉口信号控制模型^[6],但没有考虑排队长度约束,无法适用于距离较近且其中一个为过饱和的相邻交叉口组; Michalopoulos 等运用最优控制理论设计了以排队长度为约束,以过饱和和交叉口系统最小

延误为控制目标的控制方法^[7-8],但方法约束较多,控制模型复杂; Abu-Lebdeh 等提出饱和和干道实时控制模型,并用遗传算法求解,考虑排队长度管理,以通行能力最大为控制目标^[9-10],但研究没有考虑路段长度和转向车流的影响; Ahn 等提出以最大通行能力和控制排队长度防止回溢为控制目标的干道网信号控制模型,考虑过街的最小绿灯时间为约束条件^[11],但研究仅考虑了单向优化控制; Lieberman 等提出基于混合整数线性规划 (Mixed-Integer Linear Program, MILP) 的过饱和实时控制模型,以交叉口通行能力最大、有效利用车道存储空间和服务水平均衡为控制目标,优化相位差,控制排队长度^[12-13]。

目前,在过饱和和交通控制方面已经有一些探索性研究,但因为过饱和和交通状态特征复杂于非饱和和交通状态,且缺少稳态交通流,因此,过饱和状态下交通信号的动态实时控制非常重要。

在动态规划理论应用于交通信号控制研究方面, Henry 等将滑动时间窗的方法应用于分布式网络控制,形成了动态规划 (PRODYN) 控制方法^[14]; Mirchandani 等在实时分层优化分布式系统 (Real-Time Hierarchical Optimized Distributed Effective System, RHODES) 中的单点信号控制器中使用了动态规划理论^[15]; Cai 提出了单个路口的近似动态规划 (Approximate Dynamic Programming, ADP) 方法,使用线性函数来近似价值函数,结果表明其效果与自适应控制方法相当^[16]; Cai 等将 ADP 控制方法应用于一般化的独立交叉口,使用人工神经网络

(Artificial Neural Network, ANN)作为价值函数的统一的近似器,并使用强化学习范式^[17],但缺少最大绿灯时间约束;Bie等以减少路网机动车尾气排放为控制目标,运用近似动态规划来解决相邻交叉口协调控制问题,采用时域差分算法对基函数中的权重向量进行动态更新^[18];贾琰将改进的ADHDP方法应用于快速路匝道控制和以排队长度均衡为控制目标的过饱和和单点信号控制^[19]。

目前,国外正在研究、开发且不断完善的应用动态规划理论的信号控制系统有 RHODES 系统^[15]、动态控制优化策略 (Optimization Policies for Adaptive Control, OPAC)^[20]与 PROLYN 系统^[14]。RHODES 系统由美国亚利桑那大学于1996年开发并陆续现场测试,对半拥挤的交通网络比较有效,路口控制参数优化模块根据到达车辆的预测值、最优化目标和参数,用动态规划理论找出单个路口的最优相序和相位长度,并采用滑动时间窗以减少计算量^[15]。国内外对于动态规划理论在交通控制领域中的应用研究仍处于初始阶段,未来结合城市集成化交通管理的需求,研究动态规划理论在城市集成化交通管理中的应用具有重要的意义。

本文建立了基于动态规划理论的过饱和和交叉口信号控制优化模型,综合考虑了交叉口交通流的非饱和状态、饱和状态与过饱和状态,以充分适应中国城市道路交通流特点。在控制目标方面,当交通流非饱和时以交叉口总延误最小为控制目标,当交叉口交通流为饱和状态和过饱和状态时则以交叉口最大通行能力为控制目标。

1 信号控制动态规划优化模型

城市道路交通系统是随机性非常强的系统,路网任何时段的交通状况不仅取决于当前时段的驶入与驶出交通量,而且取决于前几个周期的交通状况与控制策略,每个周期路网的情况都在发生变化,因此,在优化当前周期的信号控制策略时必须同时考虑前几个周期的交通状况和当前周期的交通状况,需要将信号控制系统离散为多步决策过程,以更好地适应交通运行状况与环境的变化。

动态规划是一种求解多级决策过程最优化的方法。多级决策主要是指将整个决策过程分为若干阶段,通过递推转移决策过程,将多步最优控制问题转化为多个一步最优控制问题,最终使整个过程取得最优效果。动态规划的核心思想是 Bellman 原

理^[21],通过对目标函数的不断迭代来寻求最优解,从初始值开始通过正序不断利用 Bellman 方程进行修正,通过对最优评价函数直接进行搜索,计算出最优状态值后得出最优策略。

将动态规划应用于信号控制的优点在于将信号控制优化过程转化为多个一步最优控制过程,通过不断迭代计算交叉口的性能评价指标,判断是否需要延长各相位的绿灯时间,并通过实时检测将控制效果及时进行调整以调整下一步的优化过程,具有自适应能力。

1.1 模型假设

(1)在信号优化配时过程的每次运算中增加一段相同时间(即步长)重复执行此项运算。步长开始时决定是否延长或切换当前相位,步长结束时计算排队长度(本文中排队长度均指排队车辆数)。

(2)基于上游检测数据可以预测未来一个周期内该路口的车辆到达情况。

(3)排队车辆在绿灯期间饱和流率消散,忽略启动损失时间。

(4)在处于过饱和状态的一段时间内,车流稳定到达,车流到达率为一定值。

(5)为简化模型,设计固定相序,即每次是否切换相位只要判断本相位或下一相位。各不同相位与下一可能相位之间的关系见图1。当前为相位1时,只要计算相位1的目标函数和下一相位2的目标函数,对比确定是保持当前相位还是切换到下一相位。而当前为相位4时,则要判断当前相位4的目标函数和下一相位1的目标函数,确定决策。

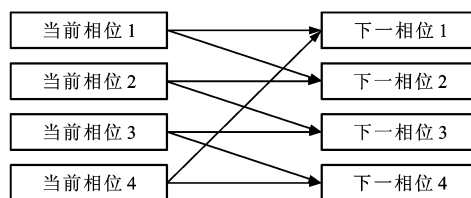


图1 固定相序

Fig. 1 Fixed phase sequence

1.2 模型基本要素

1.2.1 阶段

阶段是对整个信号控制过程的自然划分,通常根据时间顺序或空间顺序特征来划分阶段,以便按阶段的次序求解优化问题。本文以信号相位作为基本阶段。

1.2.2 步长

为提高交通控制的精度,定义步长即状态更新频率 Δt 为 2 s,即每 2 s 计算一次目标函数。信号控

制总时长为 T 。

1.2.3 状态变量

车道组是指为配合通行能力和服务水平分析,而在交叉口进口道设定的一组车道,本文中定义同一进口道具有相同转向功能的一条或几条车道为一个车道组。假设某交叉口车道组数量为 N ,第 n 个车道组有 $m(n)$ 条车道,则所有车道组的车道数向量 \mathbf{M} 为

$$\mathbf{M} = (m(1), \dots, m(n), \dots, m(N))^T \quad (1)$$

状态向量主要包括交通流状态向量和控制器状态向量。 t 时刻第 n 个车道组平均排队长度为 $l_t(n)$,则所有车道组的交通流状态向量 \mathbf{L}_t 为

$$\mathbf{L}_t = (l_t(1), \dots, l_t(n), \dots, l_t(N))^T \quad (2)$$

t 时刻第 n 个车道组信号灯的状态为 $s_t(n)$,绿灯为 1,红灯为 0,则所有车道组的控制器状态向量为

$$\mathbf{S}_t = (s_t(1), \dots, s_t(n), \dots, s_t(N))^T \quad (3)$$

式中: \mathbf{S}_t 为 t 时刻所有车道组信号状态向量。

1.2.4 决策变量

决策变量表示每个车道组信号是否变化,当信号发生变化时为 1,当信号保持当前状态为 0。 t 时刻第 n 个车道组的决策变量为 $u_t(n)$,所有车道组的决策变量 \mathbf{U}_t 为

$$\mathbf{U}_t = (u_t(1), \dots, u_t(n), \dots, u_t(N))^T \quad (4)$$

1.2.5 状态转移方程

t 时刻第 n 个车道组平均车辆到达率为 $\tau_t(n)$, Δt 时段内第 n 个车道组平均到达车辆数 $w_t(n)$ 为

$$w_t(n) = \tau_t(n) \Delta t \quad (5)$$

所有车道组的平均车辆到达率向量 $\boldsymbol{\tau}_t$ 为

$$\boldsymbol{\tau}_t = (\tau_t(1), \dots, \tau_t(n), \dots, \tau_t(N))^T \quad (6)$$

t 时刻第 n 个车道组的单车道车辆消散率为 $\theta_t(n)$,第 n 个车道组的车道平均消散流量 $y_t(n)$ 为

$$y_t(n) = \min \left\{ [l_t(n)m(n) + w_t(n)]s_t(n), \theta_t(n)m(n)s_t(n)\Delta t \right\} \quad (7)$$

所有车道组的单车道车辆消散率向量 $\boldsymbol{\theta}_t$ 为

$$\boldsymbol{\theta}_t = (\theta_t(1), \dots, \theta_t(n), \dots, \theta_t(N))^T \quad (8)$$

第 n 个车道组 $t + \Delta t$ 时刻的平均排队长度为

$$l_{t+\Delta t}(n) = l_t(n) - y_t(n)/m(n) + w_t(n)/m(n) \quad (9)$$

第 n 个车道组 $t + \Delta t$ 时刻的控制器状态为

$$s_{t+\Delta t}(n) = |s_t(n) - u_t(n)| \quad (10)$$

1.2.6 目标函数

在非饱和状态下选择交叉口延误最小为控制目

标,在饱和状态与过饱和状态下选择通行能力最大为控制目标。

(1) 非饱和状态下的目标函数

考虑车辆均匀到达和均匀离开, Δt 时段开始加入排队与结束加入排队车辆延误不同。交叉口所有车道组 Δt 时段的总延误增量 g_t 为

$$g_t = \sum_{n=1}^N [l_t(n)m(n) - y_t(n) + w_t(n)/2] \Delta t \quad (11)$$

交叉口所有车道组总延误最小的目标函数为

$$\min(J_t) = \min \left(\sum_{t=0}^T g_t \right) \quad (12)$$

式中: J_t 为 t 时刻交叉口所有车道组总延误。

(2) 饱和与过饱和状态下的目标函数

交叉口所有车道组 Δt 时段通行量增量 q_t 为

$$q_t = \sum_{n=1}^N y_t(n) \quad (13)$$

交叉口所有车道组总通行能力最大的目标函数为

$$\max(Y_t) = \max \left(\sum_{t=0}^T q_t \right) \quad (14)$$

式中: Y_t 为 t 时刻交叉口所有车道组总通行能力。

1.3 约束条件

1.3.1 最小绿灯时间约束

$s_t(n)$ 持续为 1 的次数大于 $\frac{x(n)}{\Delta t}$, $x(n)$ 为第 n 个车道组的最小绿灯时间。各车道组最小绿灯时间约束 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = (x(1), \dots, x(n), \dots, x(N))^T \quad (15)$$

1.3.2 最大绿灯时间约束

$s_t(n)$ 持续为 1 的次数小于 $\frac{h(n)}{\Delta t}$, $h(n)$ 为第 n 个车道组的最大绿灯时间。各车道组最大绿灯时间约束 \mathbf{H} 为

$$\mathbf{H} = (h(1), \dots, h(n), \dots, h(N))^T \quad (16)$$

1.3.3 最大排队长度约束

第 n 个车道组平均排队长度 $l(n)$ 小于该车道组平均排队长度约束 $f(n)$ 。各车道组平均最大排队长度约束 \mathbf{F} 为

$$\mathbf{F} = (f(1), \dots, f(n), \dots, f(N))^T \quad (17)$$

1.3.4 排队长度消散约束

为了避免左转车流在最小绿灯时间切换,设置排队长度消散约束,每次绿灯结束停止放行时,第 n 个车道组平均剩余排队长度的上限值约束为 $d(n)$,各车道组绿灯结束停止放行时,车道平均剩余排队长度上限值约束 \mathbf{D} 为

$$\mathbf{D} = (d(1), \dots, d(n), \dots, d(N))^T \quad (18)$$

式(15)~(18)中 $x(n)$ 、 $h(n)$ 、 $f(n)$ 、 $d(n)$ 的取值需要根据各交叉口的具体情况确定。

1.3.5 绿灯间隔时间约束

鉴于实际信号序列(通常为绿→黄→红)被转换为有效绿灯和有效红灯,必须确定失去通行权的信号组有效绿灯结束与获得通行权信号组有效绿灯开始之间的最小绿灯间隔时间,本文定义绿灯间隔时间为4 s。

1.4 模型优化流程

信号控制周期时长 T 内的模型优化流程见图2。

2 计算结果分析

2.1 实例验证

以秦皇岛市某交叉路口为案例,交叉口车道组见图3。交叉口车道组为8个,其中:车道组1为东进口直行;车道组2为东进口左转;车道组3为南进口直行;车道组4为南进口左转;车道组5为西进口直行;车道组6为西进口左转;车道组7为北进口直行;车道组8为北进口左转。因右转有专用进口车道且红灯期间可以右转,故不对右转进行信号控制。交叉口相位见图4,实线为红灯禁行车道,虚线为绿灯放行车道,相位1~4分别为东西直行、东西左转、南北直行、南北左转。通过车牌识别数据获得该路口的实际流量数据见表1,在1 h的仿真时段内:第1个时段时长为20 min,饱和度为0.89,交通流处于非饱和状态,根据车牌识别数据统计交叉口实际流量;第2个时段时长为20 min,流量饱和度为1.07,处于过饱和状态,为人工假设流量;第3个时段时长为20 min,流量饱和度为0.95,处于饱和状态,也为人工假设流量,考虑交通流的随机性,认为饱和度为0.95即达到饱和状态。通过流量的变化考察动态规划配时方案对各交通流状态的控制效果。

各车道组进口道数量为

$$\mathbf{M} = (3, 1, 3, 1, 3, 1, 3, 1)^T$$

初始排队长度为

$$\mathbf{L}_0 = (12, 10, 5, 12, 10, 10, 5, 9)^T$$

$$\tau_i = \begin{cases} (0.31, 0.04, 0.11, 0.06, 0.28, 0.04, 0.10, 0.03) & 0 < t \leq 1\,200 \text{ s} \\ (0.42, 0.04, 0.11, 0.06, 0.39, 0.04, 0.10, 0.03) & 1\,200 < t \leq 2\,400 \text{ s} \\ (0.36, 0.04, 0.11, 0.06, 0.34, 0.04, 0.10, 0.03) & 2\,400 < t \leq 3\,600 \text{ s} \end{cases}$$

各车道组车辆的消散率为

$$\theta_i = (0.33, 0.30, 0.33, 0.30, 0.33, 0.30, 0.33, 0.30)^T$$

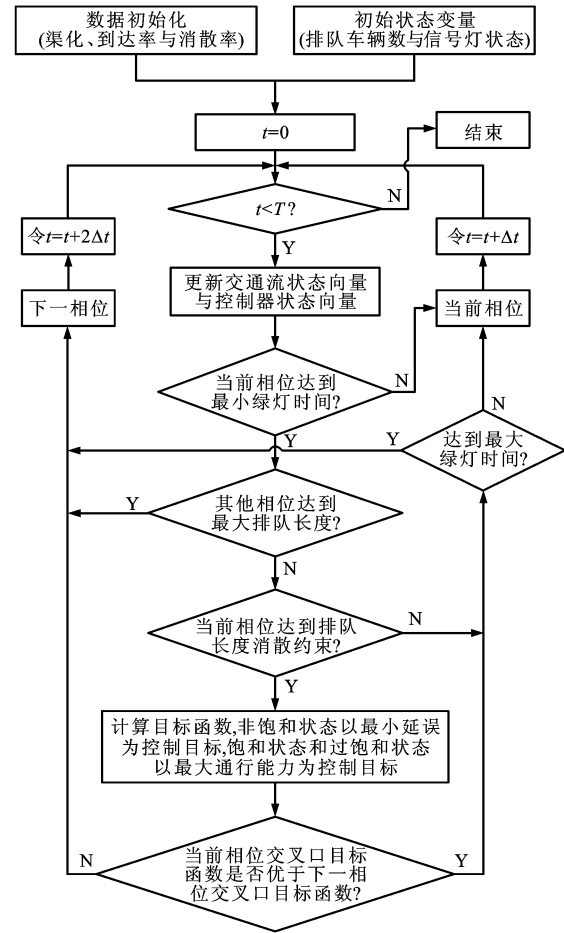


图2 优化流程

Fig. 2 Optimization flow

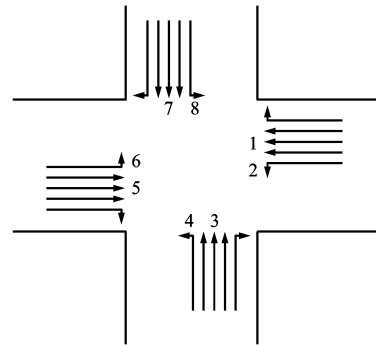


图3 交叉口车道组

Fig. 3 Lane groups of intersection

初始信号灯状态为东西直行绿灯,其他方向为红灯。相序依次为1(东西直行)、2(东西左转)、3(南北直行)、4(南北左转)。车辆到达率为

最小绿灯时间约束为

$$\mathbf{X} = (10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10)^T$$

最大绿灯时间约束为

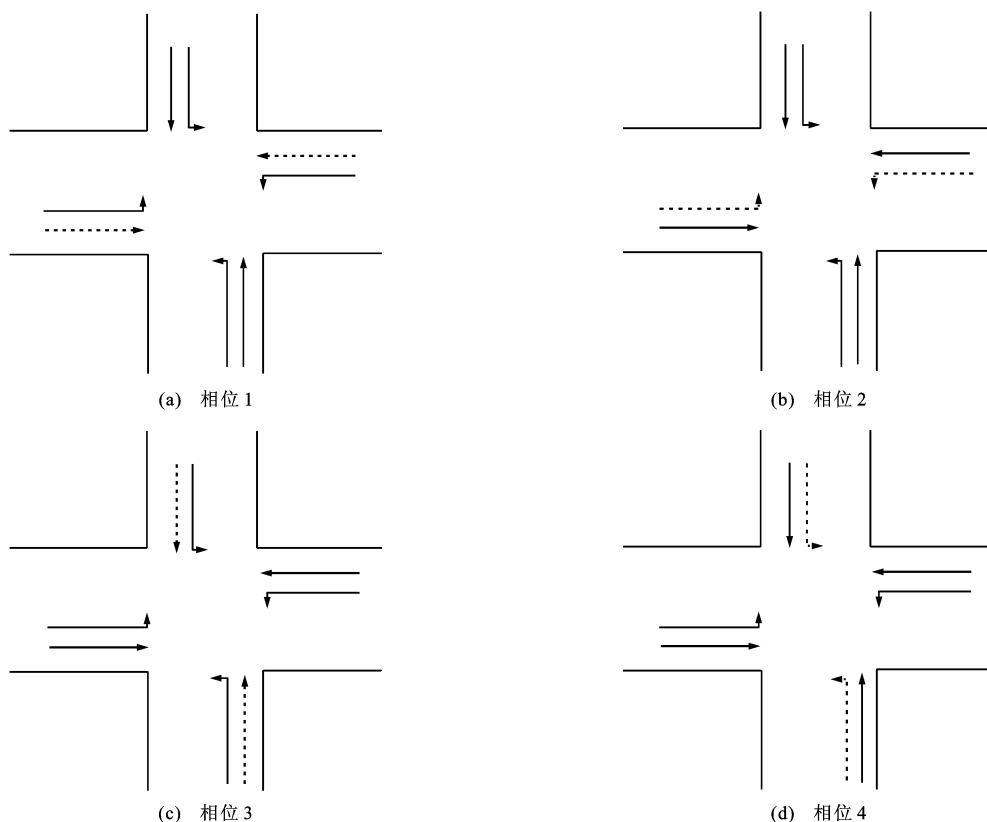


图 4 交叉口相位

Fig. 4 Intersection phases

表 1 交通流量与饱和度

Tab. 1 Traffic flows and saturations

交通状态	非饱和状态		过饱和状态		饱和状态	
	交通流量/ (veh · h ⁻¹)	饱和度	交通流量/ (veh · h ⁻¹)	饱和度	交通流量/ (veh · h ⁻¹)	饱和度
东口右转	150	0.10	150	0.10	150	0.10
东口直行	1 103	0.85	1 383	1.07	1 234	0.95
东口左转	173	0.51	181	0.54	199	0.59
南口右转	150	0.10	150	0.10	150	0.10
南口直行	514	0.51	555	0.55	523	0.52
南口左转	213	0.89	221	0.92	208	0.87
西口右转	150	0.10	150	0.10	150	0.10
西口直行	1 016	0.78	1 285	0.99	1 111	0.86
西口左转	187	0.56	213	0.63	225	0.67
北口右转	150	0.10	150	0.10	150	0.10
北口直行	550	0.54	595	0.59	573	0.57
北口左转	194	0.81	211	0.88	187	0.78
交叉口	4 550	0.89	5 244	1.07	4 860	0.95

$$H = (80, 60, 60, 60, 80, 60, 60, 60)^T$$

最大排队长度约束为

$$F = (70, 60, 50, 40, 70, 60, 50, 40)^T$$

排队长度消散约束为

$$D = (8, 5, 8, 5, 8, 5, 8, 5)^T$$

模型输出结果为第 n 个车道组 $s_i(n)$ 持续为 1 的次数,可换算为相位有效绿灯时间。

2.2 对比分析

应用提出的动态规划模型获得信号配时方案,并与 TRANSYT 方法配时方案和现状方案(该方案仅用于现状流量)进行比较,分析了不同交通状态下交叉口的饱和度、平均延误和平均排队长度。

考虑交叉口车流量先增加再减少的趋势,确定非饱和状态(饱和度为 0.89)、过饱和状态(饱和度为 1.07)和饱和状态(饱和度为 0.95)3 种情况,运用动态规划模型,通过迭代计算,获得 3 种交通状态下信号配时方案情况,分别见图 5~7。由图 5~7 可以看到:随着流量变化,各相位有效绿灯时间实时变化,各周期长度也实时变化;当流量稳定时,配时方案也逐渐趋于稳定。要注意的是,因为动态规划模型选择 2 s 为步长,各相位的绿灯时间增减是以 2 s 为单位,故各周期内的各相位绿灯时间并不完全一致,因此,选择各交通流状态下最终趋于稳定的信号配时方案输入 TRANSYT 中获得固定配时方案时相关评价指标计算结果。与 TRANSYT 自带的优化配时方案进行对比,选择饱和度、平均延误、平

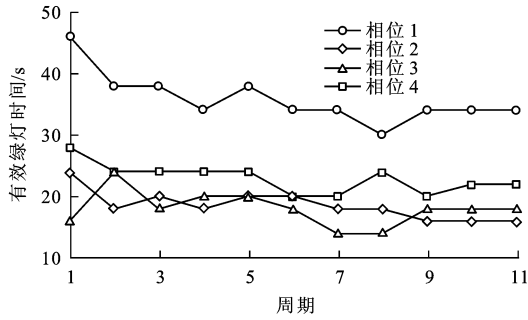


图 5 非饱和状态的有效绿灯时间

Fig. 5 Effective green times of unsaturated state

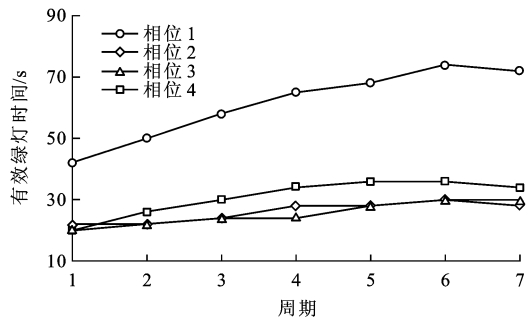


图 6 过饱和状态的有效绿灯时间

Fig. 6 Effective green times of over-saturated state

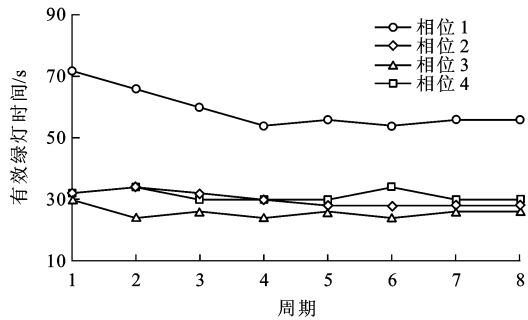


图 7 饱和状态的有效绿灯时间

Fig. 7 Effective green times of saturated state

均最大排队长度作为评价指标。

图 8~10 分别为非饱和、过饱和、饱和 3 种交通状态下不同优化配时方案的对比结果,路口现状非饱和状态下实施定时控制。图 11~13 分别为不同交通流状态下动态规划模型、TRANSYT 方法和现状配时 3 种方案的饱和度、平均延误与平均排队长度对比结果。图 14 为不同交通流状态下 3 种方案各相位平均饱和度的对比结果。图 15、16 分别为不同交通流状态下 3 种方案延误方差与排队长度方差的对比结果。由图 11~16 可以得出以下结论。

(1) 对实际的非饱和状态,动态规划模型和 TRANSYT 方法的优化效果均优于现状配时方案。从饱和度看,动态规划模型与 TRANSYT 方法的优化使得路口饱和度从现状的 0.89 分别降低为

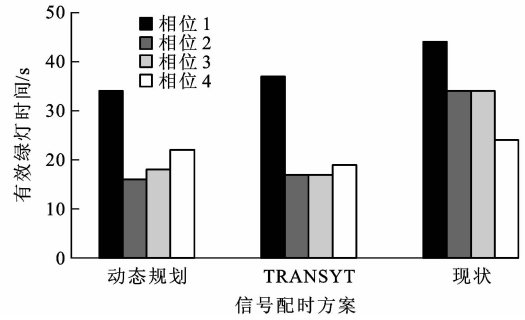


图 8 非饱和状态的信号配时方案比较

Fig. 8 Comparison of signal timing plans of

unsaturated state

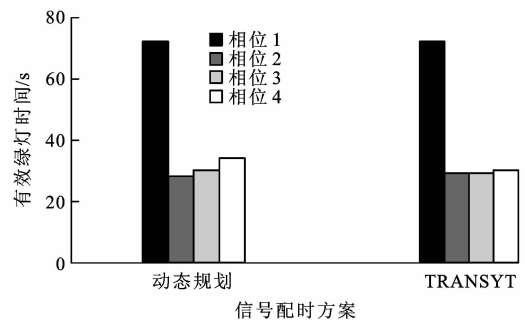


图 9 过饱和状态的信号配时方案比较

Fig. 9 Comparison of signal timing plans of

over-saturated state

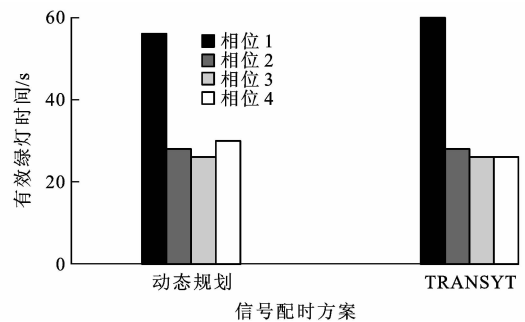


图 10 饱和状态的信号配时方案比较

Fig. 10 Comparison of signal timing plans of

saturated state

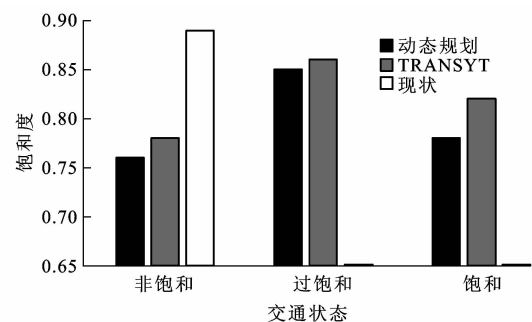


图 11 饱和度对比

Fig. 11 Comparison of saturations

0.76、0.78。需要注意的是,因为信号控制交叉口的饱和度是各车道组饱和度中的最大值,故从表 1 可

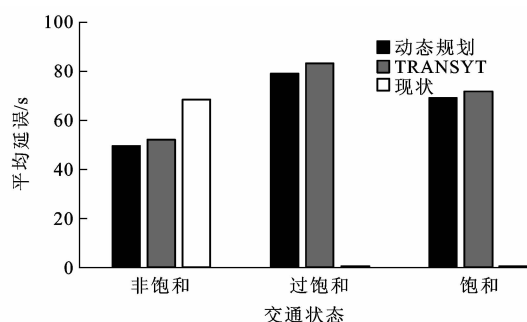


图 12 平均延误对比

Fig. 12 Comparison of average delays

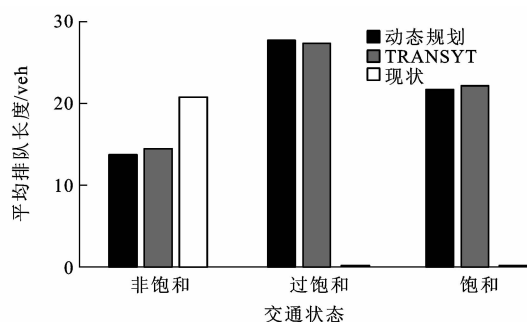


图 13 平均排队长度对比

Fig. 13 Comparison of average queue lengths

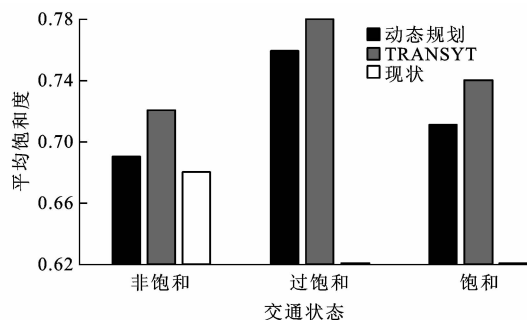


图 14 各相位平均饱和度对比

Fig. 14 Comparison of average saturations of different phases

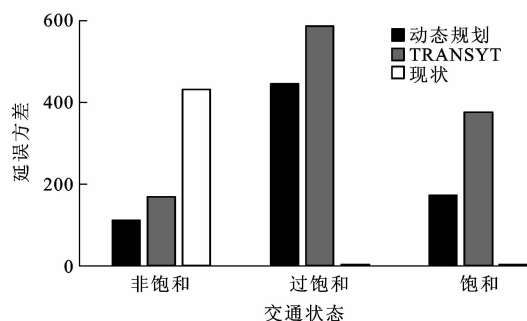


图 15 延误方差对比

Fig. 15 Comparison of delay variances

以看到,现状控制方案下的各车道组平均饱和度反而低,这主要是由于现状的定时配时方案周期较长,同时未能很好地适应交通流的分布,使得部分车道组的饱和度较高(导致路口的饱和度较高),而部分

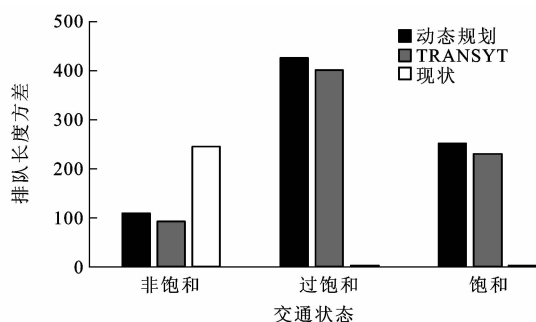


图 16 平均排队长度方差对比

Fig. 16 Comparison of variances of average queue lengths

车道的饱和度较低(导致各车道组的平均饱和度反而低),因此,虽然平均饱和度低,却并不是信号控制所追求的目标。对于非饱和状态,动态规划模型的平均延误略小于 TRANSYT 方法,平均排队长度小于 TRANSYT 方法,动态规划模型的控制效果最好。

(2)对于过饱和状态,动态规划模型控制下的路口饱和度(0.85)小于 TRANSYT 配时方案下的路口饱和度(0.86),路口平均延误(78.5 s)也小于 TRANSYT 配时方案下的平均延误(82.5 s),而路口平均排队长度(27.6 veh)略大于 TRANSYT 配时方案的平均排队长度(27.3 veh)。动态规划模型控制下的路口各车道组的平均饱和度(0.76)小于 TRANSYT 方案(0.78)。

(3)对于饱和状态,动态规划模型控制下的路口饱和度与平均延误均略优于 TRANSYT 配时方案,而平均饱和度和延误方差也较小,与过饱和状态的分析结果类似,动态规划模型控制效果最好。

3 结 语

(1)交通信号控制参数需要适应动态实时的交通流变化状态,本文利用动态规划理论将多步决策整合为一步决策的特性,充分考虑中国当前交通流状态涵盖非饱和状态、饱和状态和过饱和状态的特点,提出了应用动态规划理论进行信号控制优化的模型。信号控制动态规划优化模型基于初始确定的信号周期,实时采集排队长度、延误等数据,作为系统的输入状态变量,通过对目标函数的不断迭代寻求最优解,实现实时反馈调节。在控制目标上,在非饱和状态时以交叉口总延误最小为控制目标,在过饱和状态和饱和状态时以交叉口通行能力最大为控制目标。计算结果显示,动态规划模型在降低交叉口饱和度和平均延误方面均优于 TRANSYT 方法。

(2)基于上游检测数据可以对下游路口未来

一个周期的车辆到达信息进行预测估计,未来将进一步研究如何将动态规划交通控制应用于多路口协调控制,并对相序进行优化。

参考文献:

References:

- [1] CHEN Shuai-yu, XU Hao, LIU Hong-chao. Timing oversaturated signals: what can we learn from classic and state-of-the-art signal control models[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(1): 97-110.
- [2] 郑淑鉴. 过饱和下的干道协调控制方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
ZHENG Shu-jian. Research on the method of coordinate control for oversaturated arterials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] SONG Xian-min, TAO Peng-fei, CHEN Li-gang, et al. Offset optimization based on queue length constraint for saturated arterial intersections[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 2012(23): 327-337.
- [4] 臧利林, 朱文兴. 基于子区域交通流优化的交叉口信号控制研究[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(6): 136-139.
ZANG Li-lin, ZHU Wen-xing. Study on control algorithm of traffic signals at intersections based on optimizing sub-area traffic flows[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(6): 136-139. (in Chinese)
- [5] TALMOR I, MAHALEL D. Signal design for an isolated intersection during congestion[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2007, 58(4): 454-466.
- [6] GAZIS D C. Optimum control of a system of oversaturated intersections[J]. *Operations Research*, 1964, 12(6): 815-831.
- [7] MICHALOPOULOS P G, STEPHANOPOULOS G. Oversaturated signal systems with queue length constraints—I: single intersection[J]. *Transportation Research*, 1977, 11(6): 413-421.
- [8] MICHALOPOULOS P G, STEPHANOPOULOS G. Oversaturated signal systems with queue length constraints—II: systems of intersections[J]. *Transportation Research*, 1977, 11(6): 423-428.
- [9] ABU-LEBDEH G. Development of dynamic traffic signal control procedures for oversaturated arterials and genetic algorithms solutions[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [10] ABU-LEBDEH G, BENEKOHAL R F. Design and evaluation of dynamic traffic management strategies for congested conditions[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2003, 37(2): 109-127.
- [11] AHN G H, MACHEMEHL R B. Methodology for traffic signal timing in oversaturated arterial networks[R]. Austin: University of Texas at Austin, 1997.
- [12] LIEBERMAN E B, CHANG J, PRASSAS E S. Formulation of real-time control policy for oversaturated arterials[J]. *Transportation Research Record*, 2000(1727): 77-88.
- [13] CHANG J. Real-time traffic control policy for oversaturated arterials[D]. New York: Polytechnic University, 2000.
- [14] HENRY J J, FARGES J L, TUFFAL J. The PRODYN real time traffic algorithm[C]// Elsevier. The 4th IFAC/IFIP/IFORS Conference on Control in Transportation Systems. Amsterdam: Elsevier, 1984: 305-310.
- [15] MIRCHANDANI P, HEAD L. A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2001, 9(6): 415-432.
- [16] CAI Chen. An approximate dynamic programming strategy for responsive traffic signal control[C]// IEEE. Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Approximate Dynamic Programming and Reinforcement Learning. New York: IEEE, 2007: 303-310.
- [17] CAI Chen, WONG C K, Heydecker B G. Adaptive traffic signal control using approximate dynamic programming[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2009, 17(5): 456-474.
- [18] BIE Yi-ming, WANG Lin-hong, WANG Dian-hai, et al. A signal coordination algorithm for two adjacent intersections based on approximate dynamic programming[J]. *Journal of Southeast University: English Edition*, 2012, 28(1): 112-118.
- [19] 贾 琰. 基于近似动态规划的交通控制算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
JIA Yan. Traffic control algorithm based on approximate dynamic programming[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [20] GARTNER N H. OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal control[J]. *Transportation Research Record*, 1983(906): 75-81.
- [21] BELLMAN R. Dynamic programming and Lagrange multipliers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1956, 42(10): 767-769.