

## 监督交通量变化的多模型预测自适应交通信号灯控制

安爱民<sup>1</sup>, 郝晓弘<sup>1</sup>, 张爱华<sup>1</sup>, 赵超<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 福州大学 化学化工学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 因信号设定时间和车流量动态行为引起的交通量变化是现代交通控制系统存在高度不确定性的主要因素. 根据交通流量具有高峰期、正常期及突发超流量期的特点, 本文提出了一种监督多模型交通流量建模方法, 结合模型预测控制技术对交通信号灯进行优化式智能控制, 对不同交通模式下交通流量的实时变化作出反应, 在优化的模式下对关键主干道交叉路口的信号灯进行自适应调节, 达到实现通行次数合理, 车辆延误时间以及停车时间都减少的目的. 仿真示例说明了该方法的有效性.

**关键词:** 智能交通控制; 信号灯自适应调节; 监督多模型; 模型预测控制; 车流量

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Intelligent traffic volume variation control with supervised multi-model traffic signal adaptive predictive control

AN Ai-min<sup>1</sup>, HAO Xiao-hong<sup>1</sup>, ZHANG Ai-hua<sup>1</sup>, ZHAO Chao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information Engineering,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China)

**Abstract:** A major issue in traffic control systems is the high level of uncertainty due to traffic volume variation in the dynamics of vehicular queue and signal timings. An approach is proposed to deal with the problem based on the supervised multi-model signal adaptive predictive control (SMM-SAPC). According to the characteristics in traffic flow, such as nominal period, peak period and a super flow period, a supervised multi-model approach for modeling the dynamic traffic flow is proposed. By incorporating the traffic modeling method within MPC with control traffic signal systems, a novel intelligent traffic control is implemented. Corresponding response will be made for different traffic conditions; an adaptive signal control for intersection in a main road can be implemented. The presented simulations are indicative for the reasonable traffic time and reduction in delay time and stop time that can be achieved by the proposed method.

**Key words:** intelligent traffic control; adaptive signal timings manipulation; supervised multi-model; model predictive control; vehicular traffic volume

### 1 引言(Introduction)

现代社会城市化进程的快速发展, 交通拥塞问题变得日益严重. 如何对城市道路以高效、优化的方式进行控制和操作成为国内外交通控制技术研究领域的研究热点和难点<sup>[1]</sup>. 交通量持续增加, 而道路容量增加速度慢的现状也成为制约城市交通状况改善的一个瓶颈. 交通信号系统是综合化多模式交通系统的一部分, 根据交通快速发展的趋势, 信号系统的操作将进一步变得更为复杂<sup>[2]</sup>. 使用传统的交通控制技术已经不能完全有效控制与管理当今日趋复杂

的城市交通系统<sup>[3]</sup>.

智能交通控制与管理(intelligent traffic control and management, ITCM)是实现现代城市交通高效、优化运行的新方法, 该技术的研究成为近年来来的一个热点<sup>[4]</sup>. 其中基于交通信号灯的智能控制技术的发展最为迅速<sup>[5]</sup>. 相比于传统的交通控制系统(traditional traffic control, TTC), ITCM致力于对多个交通控制系统的自动化、分布式控制与管理. 具有优化交通流、降低维护成本、减少拥塞, 自动故障恢复等优点<sup>[4]</sup>.

ITCM策略中常用的方法有自适应交通信号灯控制(adaptive traffic signal control, ATSC)<sup>[2,5,6]</sup>, 以及采用多智能体控制与协调方式对无线车辆进行网络控制<sup>[7]</sup>. ATSC是现代城市交通普遍采用的交通控制方法, 根据路况中实时的交通流量对信号灯进行有效控制是实现智能交通控制与管理的关键技术.

采用先进控制技术对交通系统进行智能控制在近期的文献中有报道<sup>[8,9]</sup>, Baskar等对由智能车辆和路旁控制器组成的自动高速公路系统进行管理和控制. 采用MPC方法对高速公路上车辆队列中的车辆协调, 通过动态调节车辆的速度和车道的动态分配实现高速公路上的车辆所花费的时间最小. 刘志勇<sup>[6]</sup>、傅惠等<sup>[10]</sup>也将预测控制的思想应用到交通控制领域.

本研究中, 针对城市交通实时动态流量的高度不确定性, 根据一个工作日当中交通状况的不同模式(正常期、高峰期及突发事件)提出一种监督交通流量变化的多模型自适应交通信号灯预测控制方法. 以交叉路口车辆在不超过允许车流量的条件下, 通过最小化预测域内车流量预测误差(预测车流量与期望车流量之间的误差)加权平方和与信号调节时间加权平方和这一目标函数, 得到下一控制间隔内优化的信号灯时间, 应对城市主干道在高峰期及突发事件下交通高效、优化运行和管理.

## 2 模型预测控制(Model predictive control-MPC)

MPC是20世纪70年代出现于化工过程工业的一种先进控制技术, 已经在许多工业领域得到成功应用, 并取得显著的经济效益<sup>[11]</sup>. MPC是一种在线的优化控制技术, 明确使用过程模型(连续模型(continuous model, CM)或离散模型(discrete model, DM))对被控对象的未来动态行为进行预测. 在一个有限的时间域内求解约束优化问题, 用计算得到最优的控制行为将被控制量调节到期望的状态或者是一个限定的范围内.

图1示出了MPC的基本原理.  $T_s$ 为采样周期, 即为相邻两个控制信号调节发生变化的时间间隔. 在每一个时间步 $k$  (对应的时间间隔为 $t = kT_s$ ), 在间隔 $[k, k + N_p]$  ( $N_p$ 为预测域)内, MPC控制器使用对象模型预测系统的行为 $\hat{y}(k)$ , 同时确定出当前的状态 $x(k)$ . 接下来, 在预测周期 $[k, k + N_p]$ 内控制器最小化如下的含有约束的目标函数:

$$J_O = \sum_{j=1}^{N_p} \|\hat{y}(t + j|t) - w(t + j)\|_Q^2 + \sum_{j=1}^{N_C-1} \|\Delta u(t + j - 1)\|_R^2, \quad (1a)$$

其中服从下面的约束:

$$\begin{cases} u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}, \\ \Delta u_{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max}, \\ y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}, \end{cases} \quad (1b)$$

其中:  $w$ 是输出变量设定值,  $N_C$ 为控制域,  $Q$ 是正定的对角矩阵,  $R$ 是正半定的对角矩阵<sup>[11]</sup>. 解上述优化问题(1), 得到如下的最优控制序列:

$$U^* = [u(k) \cdots u(k + N_p - 1)]. \quad (2)$$

为了减少计算的复杂性, 通常采用下面的约束:

$$\begin{aligned} u(t + j) &= u(t + j - 1), \\ j &= N_C, \dots, N_p - 1, (N_C \leq N_p). \end{aligned} \quad (3)$$

在实际的控制中, 仅将最优的控制序列 $U^*$ 中的第1个控制量 $u(k)$ 应用于系统的控制中, 使系统的输出 $y(k)$ 达到期望的参考轨迹 $w(k)$ . 随后预测域 $N_p$ 前移一步, 预测和优化步骤在前移的预测域中利用新的系统测量值重复进行.

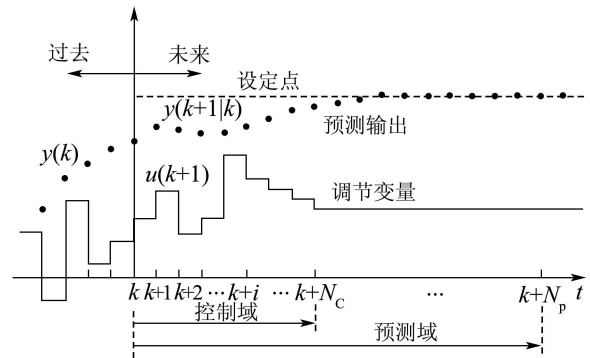


图1 MPC基本原理示意图

Fig. 1 Schematic of MPC Principle

## 3 城市交通网络模型建立(Urban traffic network modeling)

Diakaki提出了一种描述交通网络和交通流的模型<sup>[12]</sup>. 为了表述简单, 称之为TNTFM(traffic network and traffic flow modeling).

交叉路口(十字路)是由连接街道、大街的交叉路以及连接它们的其他基础设施组成的, 是城市交通网络中的一重要部分. 交叉路口一般是几条通行道共同穿越区的终止部分区域. 通行道是一组车辆可以同时行驶的车道, 通常都是双向的. 交通网络都被描述成拓扑形式的网络, 在这个网络中, 交通流量是按照信号灯不同时间阶段变化的. 一个时间阶段就是一种信号灯的操作时间间隔. 在给定的时间段内, 十字路口的交通信号灯保持不变. 也可以进一步将通行道分成多个车流. 当车流右转向时, 能穿过十字路口停车线的最大车流量就是饱和车流量, 以每小时的车辆数来表示. 黄灯时间是确保安全, 在连续阶

段中引入的黄灯时间就是损耗时间. 到下一个重复开始的一轮信号灯操作时间称作是一个交通信号灯周期, 包括红、黄、绿3种信号灯的操作阶段.

图2是一个由两条通行道路形成交叉路口的城市交通网络, 在每条可双向行车的道路上有4条车道, 两两同向行驶. 从西至东水平连接的方向为参考方向. 在同向行驶的两条车道上, 在进入路口处, 靠中心线车道上的车辆将作左转行走, 另一条车道上的车辆直接前行. 图中的箭头表示这个网络中的所有车流. 图中也示出在十字路口一个信号灯操作周期中的3个信号阶段以及车流信息情况.

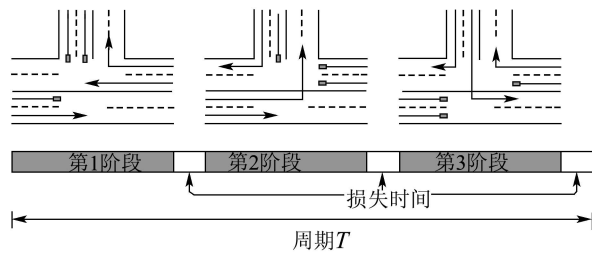


图 2 交通网络模型示意图

Fig. 2 Schematic of traffic network modeling

如图3所示, 在有向城市交通网络中, 道路连接点是交叉点(路口), 弧线对应于不同通行道或车道的连接情形. 转弯车流量率 $v_{n,n+1}$ 是表示从连接路段 $n \in I_{J_2}$ 到达节点 $J_2$ 的车辆以 $v_{n,n+1}$ 的转弯率进入到连接路段 $n+1 \in I_{J_2}$ . 为了达到分析与控制的目的, 设在交叉口的转弯车流量率 $v_{n,n+1}$ 、循环次数 $N_j$ , 损耗时间 $T_l$ ,  $n$ 上的饱和车流量 $S_n$ 都为常数.

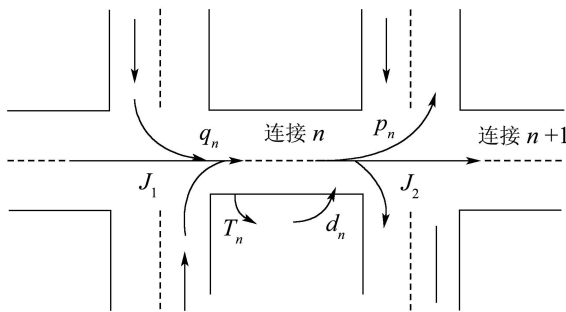


图 3 交通网络一个连接中的车流动态行为

Fig. 3 Dynamics of traffic flow in a traffic network link

$\Omega_n$ 为交叉口 $J_2$ 处一个交通信号灯周期中的信号灯时间阶段数 $m$ 集合,  $u_{n,m}$ 表示阶段 $m \in \Omega_n$ 交通灯中绿灯时间, 在图3中,  $m = 3$ (红灯、黄灯、绿灯操作阶段数). 对于TTC来说, 所有的交叉路口都是以同一个交通信号灯周期 $T$ 来操作. 这样对信号灯的操作就施加了如下的等式约束:

$$\sum_{m \in \Omega_n} u_{n,m} + T_{l,n} = T. \quad (4)$$

另外一个约束就是对绿灯时间的限制:

$$u_{n,m}^{\min} \leq u_{n,m} \leq u_{n,m}^{\max}, \quad (5)$$

其中 $u_{n,m}^{\min}$ 和 $u_{n,m}^{\max}$ 是所允许的绿灯时间最小值、最大值.

$$\Delta x_n(k+1) = \Delta T[q_n(k) + d_n(k) - p_n(k) - Q_n(k)], \quad (6)$$

$q_n$ 是进入通行道 $n$ 中的车流量,  $p_n$ 是从 $n$ 中的出去的车流量.  $d_n$ 指不是从行车道中出去的车流量、 $Q_n$ 指进入 $n$ 中的车流量.

$$q_n(k) = \sum_{n \in I_{J_1}} v_{n,n+1} p_n(k), \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_n(k+1) = x_n(k) + \Delta T S(k), \\ S(k) = \sum_{n+1 \in I_{J_1}} v_{n+1,m} \frac{S_{n+1}}{T} \sum_{m \in \Omega_{n+1}} u_{J_1,m}(k) - \\ \frac{S_n}{T} \sum_{m \in \Omega_n} u_{J_2,m}(k) + e_n(k), \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\Delta T$ 是一个周期中两个时间段的间隔;  $S_n$ 是连接 $J_1, J_2$ 路段上的饱和(最大允许)车流量.

普遍化方程(8)以后, 将得到适用于任何路段的车流状态方程:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + e(k), \quad (9)$$

其中:  $x(k)$ 是车流状态矢量,  $u(k)$ 是一个信号周期中的绿灯时间,  $e(k)$ 是扰动矢量,  $A = I$ 表示状态矩阵,  $B$ 是控制输入矩阵.

#### 4 监督交通流量多模型信号灯自适应预测控制(Supervised traffic volume multimodel signal adaptive predictive control: SMM-SAPC)

本节将描述监督交通流的多模型切换控制的基本结构. 前面描述的TNTFM模型是在一个循环周期中的不同阶段的离散形式模型, 变量 $k = t$ 就是一个整数形式的离散时刻. 根据一个交叉路口在一个工作日的不同时间段中的车流状况不同, 确定几种不同的交通模式, 每一种模式对应一个信号灯时间与交通流量间关系的模型 $M_i$ . 上层的监督器根据不同时间段、交叉口 $J, J-1, J+1$ 的实时交通流情况 $x_J(k), x_{J-1}(k), x_{J+1}(k)$ , 在切换式MPC控制律下, 对信号灯的显示时间进行优化的自适应调节.

##### 4.1 控制结构(Control framework)

本文采用的基于监督器的切换式多模型MPC控制器控制结构如图4所示.  $y_M$ 表示交通流量的测量值,  $y_r$ 为不同交通状况下的参考值矢量,  $e_j(j = 1, 2, \dots, N)$ 为估计误差,  $P_s$ 为被控制的信号灯系统. 设计的预测控制器库 $\Omega_{MPC_i}(i = 1, 2, \dots, N)$ 中的

控制器是与第1节中描述的不同交通模式下的模型相对应. 假设这个模型集合对应了所用交通状况下可能的模型. 为了在每次选择的控制器与其模型匹配最好, 假设最佳的模型性能意味着应用了最佳的控制器性能. 估计模型性能的一种可能是比较模型输出与实际系统输出, 另一种可能就是构建基于每一个模型输出的估计器.

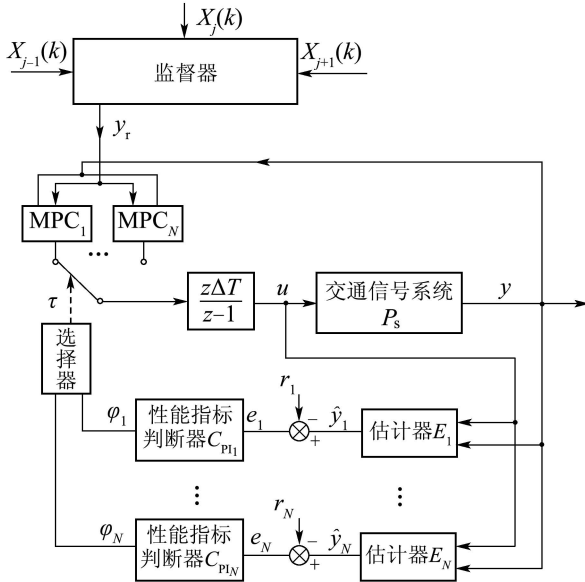


图4 监督多模型自适应控制策略

Fig. 4 Supervised multimodel signal adaptive predictive control

对于每一个估计通道 $E_j, j = 1, 2, \dots, N$ , 根据规定的性能指标 $\varphi_j(j = 1, 2, \dots, N)$ 得到估计误差 $e_j$ . 性能指标 $\varphi_j$ 是按照下式的低通滤波来计算得到的.

$$\varphi_j(k) = \lambda\varphi_j(k-1) + (1-\lambda)e_j(k), \quad (10)$$

其中 $\lambda \in (0, 1)$ 是一个加权参数.

选择器是用来给出应用到信号灯系统中的控制器的选择指标 $\tau$ , 即切换逻辑. 该选择是根据 $\varphi_j$ 的最小值所对应的 $j$ 值来选择的, 同时必须保证应用于交通信号控制的控制器能使得 $T_1$ 在某种程度上最小.

在控制结构中, 所用的控制器共用了一个积分器, 以保证控制器切换时无颠簸性(平稳性). 控制器一旦被选定, 它与积分器共同构成的控制器其离散式传递函数为

$$G_{c_j}(q) = G_{M_j}(q) \frac{q\Delta T}{q-1}, \quad (11)$$

其中:  $\Delta T$ 为采样时间间隔,  $q$ 为前移算符.

### 4.2 局部预测控制器的设计(Design of the local MPC controllers)

设计某一交通状况下的局部MPC控制器时, 对

应的目标函数为预测域内交通流量误差加权平方和控制域内绿灯时间加权平方和, 其形式如下:

$$J_0 = \sum_{i=1}^{N_p} (\hat{y}(k+i|k) - y_r)^T Q (\hat{y}(k+i|k) - y_r) + \sum_{j=1}^{N_C-1} \hat{u}(k+j|k)^T R \hat{u}(k+j|k), \quad (12a)$$

满足如下约束:

$$\text{s.t. : } \hat{y}(k|k) = y(k), k=0, 1, \dots, M-1, \quad (12b)$$

交通流与信号灯时间之间的离散状态空间描述关系为:

$$\hat{x}(k+i+1|k) = A\hat{x}(k+i|k) + B\hat{u}(k+i|k), \quad (12c)$$

$$C\hat{u}(k+j|k) \geq c, \quad (12d)$$

$$D\hat{u}(k+i|k) = d, \quad (12e)$$

式(12d)和(12e)表示一个交通信号周期内信号灯显示时间的不等式、等式约束.

### 4.3 估计器的设计(Design of the estimator)

为了提高对交通流控制的精确性, 引入一个多项式观测器 $E_j, E_j \in E$ . 集合 $E$ 的每一个观测器的设计是按照文献[13]的方法.  $E_j$ 对模型 $M_j$ 输出 $y_{m_j}$ (在图4中统一表示为 $y$ )进行估计, 估计值为 $\hat{y}_{M_j}(k)$ . 为了达到自适应的目的, 将每一个模型 $M_j$ 表示成ARX模型:

$$A_j(q^{-1})\hat{y}_{M_j}(k) = B_j(q^{-1})u(k) + \bar{e}_j(k); \quad (13a)$$

输出系数多项式为

$$A_j(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_{j,i}q^{-i}; \quad (13b)$$

输入系数多项式为

$$B_j(q^{-1}) = \sum_{i=1}^{n_b} b_{j,i}q^{-i}. \quad (13c)$$

其中:  $A_j$ 是不变度为 $n_a$ 的首一多项式,  $B_j$ 是不变度为 $n_b$ 的多项式.  $q^{-1}$ 是单位延迟算子. 设计输出的滤波估计, 让模型 $M_j$ 的输出保持在 $r_j$ 不变, 将式子(13a)的两边都加上 $A_0r_j(t) - A_jr_j(t)$ , 进行变形后得到下式:

$$y_j(k) = (A_0 - A_j) \frac{1}{A_0} y_j(k) + \frac{B_j}{A_0} u(k) + \frac{1}{A_0} \bar{e}_j(k), \quad (14)$$

其中 $A_0(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_{0,i}q^{-i}$ 是与 $A_j$ 有相同度的稳定首一多项式, 在下面就将其称作是观测器多项式. 在假设模型 $M_j$ 保持在如下的值时, 为对象的输出确定一个估计器 $E_j$ .

$$\hat{y}_j(k) = (A_0 - A_j) \frac{1}{A_0} \hat{y}_j(k) + \frac{B_j}{A_0} u(k). \quad (15)$$

目的就在于, 若交通系统模型与  $M_j$  一致, 则  $y$  就是  $y_j$ , 此时就会有如下情形:

$$y(k) - \hat{y}_j(k) = y_j(k) - \hat{y}_j(k) = \frac{1}{A_0} \bar{e}_j(k). \quad (16)$$

估计值  $\hat{y}_j$  能精确地达到一点取决于扰动的功率大小. 若将  $A_0$  选择为 Hurwitz 多项式, 跟踪误差就变成是对扰动的低通过滤<sup>[13]</sup>. 如选择的是快速观测器(所有根位于原点), 将不具有滤波的作用. 通过选择  $A_0$  的根的实部位于 0, 1 之间, 当距离 0 远一些时, 就会选择一个动态行为慢、观测性能好的观测器<sup>[13]</sup>.

### 5 实例与仿真(Example and simulation)

在所居住的城市兰州市交通主干道西津东路七里河段选择一个连接 3 个交叉路口  $J_1, J_2, J_3$  的东西方向路段  $n$ , 交叉路由两条行车道组成, 每条行车道上有 4 条车道. 本研究实例中用到的数据是 2009 年 10 月份某一周 5 个工作日中的不同交通状况下取得的车辆流数据. 根据所采集的数据在 MATLAB 环境下辨识得到不同交通模式下的模型, 并设计出不同模式下的控制器  $MPC_i, i = 1, 2, \dots, 6$ , 对所提出的方法进行验证.

#### 5.1 信号灯周期固定的情形(Scenario of the constant signal cycle)

通常情况, 一个信号灯周期是 70 s, 交通灯系统通过交替变化红、黄、绿 3 种信号灯的时间来实现交通控制.

对  $J_2$  路口先采用 TTC 来控制交通信号灯. 以进入绿灯时间为一个周期  $T$  的开始, 到下一次绿灯时间开始结束. 第 1 阶段绿灯时间为  $B_t = 30$  s, 30 s 到进入黄灯时间  $Y_{t1} = 5$  s, 5 s 到进入红灯时间  $R_t = 30$  s 禁止东西方向车辆通行, 30 s 到进入黄灯时间  $Y_{t2} = 5$  s, 5 s 到一个信号周期结束. 在 TTC 方法中, 上述情况为一个工作日中的正常交通期  $N$  (非交通高峰期、非交通事故期)、早晨  $M_p$ 、中午  $N_p$ 、晚上  $A_p$  3 个交通高峰期, 周期为 70 s 的信号灯控制交通流方式, 容易造成拥塞现象.

表 1 和图 5 为不同交通状况下的平均车流量  $P_v$  (veh·min<sup>-1</sup>) 以及不同信号灯时间段内  $J_2$  路口通过的车流量  $n_v$  (veh·min<sup>-1</sup>).

表 1 固定时间控制下的信号灯显示时间与参数

Table 1 Parameters and signal timings under fixed time control

交通状况	$B_t$	$Y_{t1}$	$R_t$	$Y_{t2}$	$T$	$P_v$
$N$	30	5	30	5	70	196
$M_p$	30	5	30	5	70	582
$N_p$	30	5	30	5	70	523
$A_p$	30	5	30	5	70	560

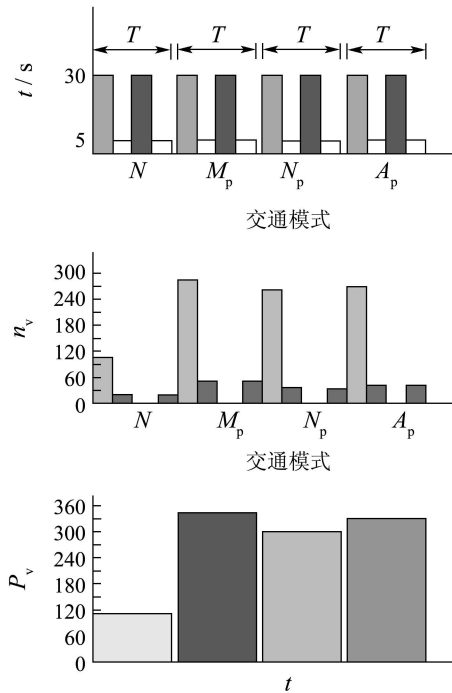


图 5 信号灯显示时间固定控制方式下的交通流  
Fig. 5 The traffic flow under fixed signal time control

#### 5.2 监督车流量预测自适应信号灯控制的情形(Scenario of the supervised traffic volume predictive adaptive signal control)

按照本研究提出的方法, 交通信号周期为不固定情形, 黄灯时间 5 s 不变, 绿灯时间和红灯时间是由 SMM-SAPC 根据上一个路口  $J_1$  和下一个路口  $J_3$  的交通状况, 以及不同交通模式下本路口的模型预测到的流量, 通过优化方程(12)这个目标函数, 计算出最优的绿灯时间, 来实时地变化交通信号, 控制本交叉路口的交通流量达到指定的期望车流量. 首先在一个工作日内(早晨 6 点至晚上 6 点), 将该路口的交通状况分为 6 种交通模式, 在该 6 种模式下的交通流数据见表 2.

表 2 一个工作日内的 6 种交通模式

Table 2 Six traffic modes in a working day

交通模式	时间段	车流/(veh·min <sup>-1</sup> )	周期/s	交通状况
$M_1$	AM 6~7	120	40	正常期
$M_2$	AM 7~9	582	80	高峰期
$M_3$	AM 9~12	265	56	正常期
$M_4$	PM 12~2	523	70	高峰期
$M_5$	PM 2~5	230	52	正常期
$M_6$	PM 5~6	560	72	高峰期

在表 2 中, 时间段中的 AM 6~7 其含义是表示早晨 6 点至 7 点, PM 2~5 表示下午 2 点至 5 点.

图 6 为采用本方法得到的仿真结果. 与图 5 所示结果的对比, 从图 6 的可以看出, 本文提出的方法可以

实现交通信号的自适应控制,与传统的方法相比,该控制方法能以优化的方式调节信号灯显示的时间,在不超过最大允许交通流量的前提下,尽可能最大化交通流量(达到设定的交通流量),尤其是在一个工作日的3个不同的交通高峰期,效果明显提高,实现交通控制智能化。

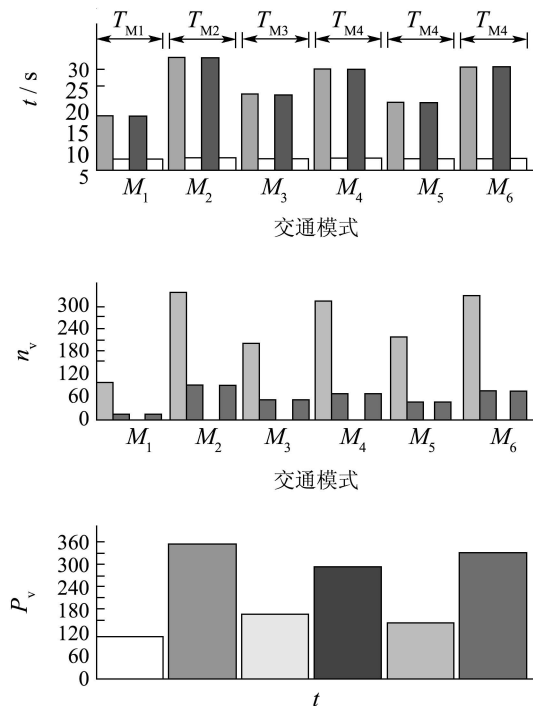


图6 SMM-SAPC控制方式下的交通流

Fig. 6 The traffic flow under SMM-SAPC

## 6 结论(Conclusion)

ITCM是实现现代城市交通高效、优化运行的新方法,针对现代城市交通出现的新特点,本文做了如下的研究工作:

1) 按照城市交通流量具有高峰期、正常期及突发超流量期的特点,提出了一种监督交通流量的多模型建模方法;

2) 结合模型预测控制技术对交通信号灯进行优化式智能控制.通过优化指定的目标函数对关键主干道交叉路口的信号灯显示时间进行自适应调节,而不是常规的信号灯显示时间固定化交通控制模式,以达到实现通行次数合理,车辆延误时间以及停止次数最小的目的,实现交通的智能化;

3) 引入交通流估计器对不同交通状况的不同模式下交通流量的实时变化作出估计以提高控制的性能;

4) 仿真实例说明了该方法的有效性。

## 参考文献(References):

- [1] HOOGENDOORN S P, BOVY P H L. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling[J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2001, 215(4): 283 – 303.
- [2] GRADINESCU V, GORGORIN C, DIACONESCU R, et al. Adaptive traffic lights using car-to-car communication[C] // *Proceedings of 65th the IEEE Vehicular Technology Conference*. Dublin: IEEE, 2007, 4: 21 – 25.
- [3] SUSSMANF J M. Intelligent vehicle highway systems: challenge for the future[J]. *IEEE Micro Magazine*, 1993, 1(14/18): 101 – 104.
- [4] BISHOP R. *Intelligent Vehicles Technology and Trends*[M]. Artech House, 2005.
- [5] CAI C, WONG C K, HEYDECKER B G. Adaptive traffic signal control using approximate dynamic programming[J]. *Transportation Research Part C*, 2009, 17(5): 456 – 474.
- [6] 刘智勇, 李水友. 城市交通信号的ANN自校正预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(6): 627 – 632.  
(LIU Zhiyong, LI Shuiyou. Learning algorithm for tracking control of nonlinear distributed parameter systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(6): 627 – 632.)
- [7] KOTASIALOS A, PAPAGEORGIOU M, MANGEAS M, et al. Coordinated and integrated control of motorway networks via nonlinear optimal control[J]. *Transportation Research C*, 2002, 10(1): 65 – 84.
- [8] BELLEMANS T, SCHUTTER B D, MOOR B D. Model predictive control for ramp metering of motorway traffic: A case study[J]. *Control Engineering Practice*, 2006, 14(7): 757 – 767.
- [9] BASKAR L D, SCHUTTER B D, HELLENDORN H. Model-based predictive traffic control for intelligent vehicles: Dynamic speed limits and dynamic lane allocation[C] // *Proceedings of 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Eindhoven: IEEE, 2008, 7: 174 – 179.
- [10] 傅惠, 胡刚, 徐建闽, 等. 基于神经网络的城市关联交叉口交通流预测控制方法[J]. *中国公路学报*, 2008, 21(5): 224 – 229.  
(FU Hui, HU Gang, XU Jianmin, et al. Traffic flow predictive control method of urban correlation intersection based on neural network[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(5): 4 – 8.)
- [11] CAMACHO E F, BORDONS C. *Model Predictive Control*[M]. London: Springer-Verlag, 1999.
- [12] DIAKAKI C, PAPAGEORGIOU M, ABOUDOLAS K. A multi-variable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(2): 183 – 195.
- [13] MORSE S. Supervisory control of families of linear set-point controllers—Part 1: Exact matching[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(10): 1413 – 1431.

## 作者简介:

安爱民 (1972—), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为先进控制技术、过程优化、智能交通控制, E-mail: anaiminll@163.com;

郝晓弘 (1960—), 男, 教授, 目前研究方向为迭代学习控制、网络控制, E-mail: haoxh@lut.cn;

张爱华 (1964—), 女, 教授, 目前研究方向为生物医学信号检测与控制, E-mail: ahzhang@lut.cn;

赵超 (1976—), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为工业过程控制性能监控与评估技术等, E-mail: seasky76@163.com.