

基于成本车流模型的城市交叉路口优化控制

宋春跃¹, 王 慧², 李 平¹

(1. 浙江大学 工业控制技术研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学 系统工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对存在随机故障的城市交叉路口信号优化问题, 从控制理论角度出发, 根据其自身特性, 借用最优生产控制思想, 首次提出了道路和车流运行成本模型, 且同时考虑路口的随机故障因素; 在此基础上根据系统中存在多级时标和不可靠性、以及呈现一种递阶结构和运行不均衡的特点, 将问题分解成不同层次的动态优化子问题, 采用递阶控制策略对其进行降阶分解, 从而得到交叉路口的优化控制策略。仿真结果表明, 该模型更宜于实施于实际交通最优控制中。

关键词: 成本车流模型; 递阶控制; 交通流; 随机故障

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A

Optimization control of urban intersection based on vehicle flow cost model

SONG Chun-yue¹, WANG Hui², LI Ping¹

(1. Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China;

2. Institute of Systems Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: From the point of view of control theory, the urban intersection signal optimization involving stochastic breakdown is dealt with. Based on the nature of urban intersection and borrowing the idea of optimal production control, a new vehicle flow cost model of road is initiated, with the consideration of the stochastic breakdown at the intersection. Since the system is characterized by multi-horizon and unreliability, which makes it a hierarchical framework, a hierarchical control policy is constructed based on the horizon. Consequently, the optimal control policy of urban intersection signal is gotten. The simulation shows that the model is practical, powerful and promising.

Key words: vehicle flow cost model; hierarchical control; traffic flow; stochastic breakdown

1 引言 (Introduction)

交通是一个城市经济活动的命脉, 对城市交通路口信号灯实施合理优化控制, 有利于缓解日趋紧张的交通拥挤问题。由于道路上车流状况实际上是随机变化的, 特别是在道路或交叉路口还时有随机事故发生, 故在交叉路口所实施的控制也应随交通流的不同和随机故障的发生而相应进行变化。城市交通路口的优化控制, 主要体现在对交叉路口各个相位的配时, 配时方案一旦改变, 就会影响到各个车道的车流状况。目前, 国内外的一些学者在对城市交通网络优化控制进行研究时, 很少提及对交叉路口多相位信号的优化控制, 并且在研究中都未涉及车道上的随机故障, 而事实上, 随机故障在日常交通中是常见的, 其发生将很大地影响交叉路口各个相位乃至整个路网的配时, 故在研究交叉路口最优控制时应该考虑随机发生的交通故障。

交通路口的相位优化控制问题在特性上类似制造工业的生产优化控制, 二者都包含连续变量动态系统及离散事件动态系统, 属于具有混杂特性的系统。每个交通路口就像是生产线中的一套设备, 和在任一已知时刻仅能生产一种产品一样, 它在任一已知时刻也只允许有一个相位的车道通车, 同样, 类似于生产系统内设备的随机故障发生必然会影响生产线的生产能力一样, 随机交通事故的发生也将影响到车道的流通能力。鉴于二者相同的特性, 本文从控制理论角度出发, 旨在考虑车道或交叉路口有随机故障发生时的城市交通路网优化控制, 不失一般性, 文中针对单交叉路口多相位信号优化控制进行了探讨。具体的做法是, 在有限时域内建立了单交叉路口的递阶车流成本控制模型, 并对其进行最优求解, 得到考虑随机故障发生时的最优配时方案。该命题等同于考虑一套生产设备的最优生产控制问题^[1,2],

该设备能生产 n 种产品 ($n \geq 2$) 但在任一时刻仅能生产一种产品, 且在生产过程中有随机故障发生、每当切换生产品种时含有切换成本 (setup cost). 与其它的信号配时优化方案——即不考虑道路随机故障, 把信号配时优化命题解释为求解整数规划问题从而求得多时段定时信号优化^[3]——相比较, 该模型属于感应控制范畴, 所建立模型更贴近实际, 有直观的物理意义, 也宜于实时实施.

2 对象描述 (System description)

在公路交通系统中, 虽然每辆单个车辆都是离散的个体, 但从宏观的角度看, 当道路车流密度较高时, 就可以把车流视为连续变动的不可压缩流体. 优化交叉路口的控制目标是使车道的流通能力达到最大. 为简单起见, 在下面考虑单交叉路口的最优控制中, 假设道路上的随机故障是影响其流通能力大小的唯一原因, 则车道可流通量表示为一段函数.

2.1 系统动态方程 (Dynamic equations of the system)

假设交叉路口有 n 个相位, 定义 $\theta_{ij} \geq 0$ 为绿灯向红灯切换时所必需的时间, 即黄灯配时时间, 易知在黄灯配时时间内路口任何相位都不允许通车, θ_{ij} 中的下标 $i = 1, 2, \dots, n, j = \text{MOD}(i/n) + 1, i, j$ 为单交叉路口的相位. 由于可能存在的车辆抛锚等原因, 车道会被部分或全部地堵塞而不能以最大流通量提供给车流, 引入 $u_i \in \mathbb{R}^+$ 为相位 i 车道上单位时间的车流可流通量. 考虑随机故障的存在, 假设单交叉路口有以下三种状态: i) 2——表示车道处于畅通状态, 能以最大流通量提供给车流行驶; ii) 1——表示车道仍能提供车流流通, 但由于有其他车辆抛锚等原因, 不能畅通; iii) 0——表示车道完全处于故障状态, 不能提供任何车辆行驶. 定义 $\zeta(t)$ 为单交叉路口的状态, $E = \{0, 1, 2\}$ 为过程 $\zeta(t)$ 的状态空间, $\zeta(t) \in E$. 则在单交叉路口状态为 $\zeta(t)$ 时相位 i 车道上的单位时间车流可流通量为 $u_i^{\zeta(t)} = \frac{1}{2} \zeta(t) r_i$, 其中 r_i 为该相位车道上单位时间允许的最大流通量.

定义 $x_i(t)$ 为时间 t 时单交叉路口相位 i 车道上车流的累积量, 即 $x_i(t) =$ 时间 t 时相位 i 车道上的可流通量 - 时间 t 时相位 i 车道上的车流量, $z_i \in \mathbb{R}^+$ 为相位 i 上的车流量. 令 $X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T \in \mathbb{R}^n, U(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t))^T \in \mathbb{R}^n, Z(t) = (z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t))^T \in \mathbb{R}^n$, 则系统的动态微分方程如下:

$$\dot{X}(t) = B^{\zeta(t)}(t) - Z(t), (X(0), \zeta(0)) = (X_0, \alpha). \quad (1)$$

其中 $B^{\zeta(t)}(t) = [b_1(t), b_2(t), \dots, b_n(t)]^T = [\delta_1(t)u_1(t), \delta_2(t)u_2(t), \dots, \delta_n(t)u_n(t)]^T, \delta_i(t)$ 定义为取值为 0 或 1 的连续函数, 其实质含义是交叉路口相位 i 车道上绿灯通行配时的描述函数, 而 $b_i(t)$ 则是 i 车道上的车流可流通量描述函数. 在式 (1) 中, X 为状态向量, B 为控制向量. 设 $B(\alpha)$ 为控制约束集, 它是 $\mathbb{R}^{+n}$ 上的闭子集. 对于 $\forall \alpha \in E$, 取值在 $B(\alpha)$ 上的可测函数 $b_i(t)$ 被称之为容许控制. 容许控制函数 $b_i(t)$ 的集合 $\Theta = \{b_i(t): t \geq 0\}$ 称为容许策略. 假定容许控制函数 $b_i(t)$ 对 t 是分段连续和连续可微的, 且对 x_i 存在有界的偏导. 又定义 $\lambda_{\alpha\beta}$ 为单交叉路口从状态 α 到状态 β 的转换率 (rate of transition), $\alpha, \beta \in E$. $\lambda_{\alpha\beta}$ 由以下方程描述:

$$\begin{aligned} P[\zeta(t+dt) = \beta | \zeta(t) = \alpha] &= \lambda_{\alpha\beta} dt + o(dt), \\ P[\zeta(t+dt) = \alpha | \zeta(t) = \alpha] &= 1 + \lambda_{\alpha\alpha} dt + o(dt), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\lim_{dt \rightarrow 0} o(dt)/dt = 0, \lambda_{\alpha\alpha} = -\sum_{\beta \neq \alpha} \lambda_{\alpha\beta}$.

定义 $Q = (\lambda_{\alpha\beta})$ 为生成矩阵 (generator matrix). 由于系统在任一时刻只能在某一相位的车道上通车, 对于 $t \geq 0, \forall \alpha \in E$, 还需要有以下约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq u_i^{\alpha}(t) \leq \frac{\alpha}{2} r_i, & i = 1, 2, \dots, n, \\ \delta_j(t) = 0, & j \neq i. \end{cases} \quad (4)$$

由于随机故障的存在及实际车道流通量的约束, 系统还必须满足以下稳定条件:

$$\begin{aligned} \frac{r_i - z_i(t)}{\lambda_{20}} + \frac{r_i - 2z_i(t)}{2\lambda_{10}} + \frac{r_i - 2z_i(t)}{\lambda_{21}} &\geq \\ \frac{z_i(t)}{\lambda_{01}} + \frac{z_i(t)}{\lambda_{02}} + \frac{z_i(t)}{\lambda_{12}}. \end{aligned} \quad (5)$$

评述 1 由于相位 i 车道上红灯期间的车辆抛锚故障等不影响相位 j 车道上的通车, 故这里所提及的车道状态是指绿灯时车道的状态, 并抽象为是交叉路口的状态. 交通工程技术人员经过较长时间的摸索, 可总结出适合该路口的故障率.

评述 2 由于修建车道和车流运输均需要成本代价, 而车辆占用车道、车道空道和车流等待都是消耗成本的, 因此本文试图从车道运行成本的角度来给出交叉路口的最优控制策略. 假设单位时间单位车流负累积量所带来车流成本及占用相位 i 车道的成本系数为 c_i^- , 而正累积量所带来的车流成本及占用相位 i 车道的成本系数为 c_i^+ , 有 $c_i^-, c_i^+ > 0$. 这里的负累积量表示由于道路故障、流通能力或配时所引起的车辆滞留; 正累积量表示车流稀少时空道情况.

评述 3 稳定条件 (5) 显而易见, 它是系统内在的要求. 其中 $(\lambda_{\alpha\beta})^{-1}$ 表示系统从状态 α 到状态 β 之间的平均逗留

时间.它意味着车道在畅通或半畅通时要能消除掉其半故障或完全故障状态下的车流累积.

2.2 目标函数(Objective function)

由于路口各个方向的车流及交叉路口状态具有随机性,交叉路口传统的定时控制方案显然难以得到理想的交通状况.因此,依据各个车道的实际车流信息及路口状态,以车流和车道成本最小为优化目标函数,对交叉路口交通信号进行综合优化很有必要.这样可以做到实时修正各个相位的配时,及时地疏散车流,减轻交通拥挤程度.为使路口流通能力最大,要求路口滞留车辆最小,即使得前面所述的车流和车道成本最小,故本文采用车流和车道的经济成本目标泛函,且考虑的是在路口相位信号控制周期不固定的情况下对如下目标泛函寻优,以得到最佳配时:

$$J(i, X, s, \Xi, \alpha, B(\cdot)) = \int_0^s e^{-\rho t} G(X(t), 0) dt + E \left(\int_s^\infty e^{-\rho t} G(X(t), B(t)) dt \mid X(0) = X_0, \zeta(0) = \alpha \right). \quad (6)$$

其中, s 为初始时刻剩余的黄灯配时时间, $0 \leq s \leq \theta_{ij}$, $0 < \rho < 1$ 为折扣因子. $G(X(t), B(t))$ 是车道占用及空道的成本函数,假设 $G(X(t), B(t))$ 是局部李普西斯(locally Lipschitz)函数,故其是绝对连续的.为简化起见,一般定义

$$G(X(t), B(t)) = \sum_{i=1}^n c_i^+ x_i^+(t) + c_i^- x_i^-(t),$$

其中

$$x_i^+ := \max(x_i, 0), x_i^- := \max(-x_i, 0).$$

定义 $\Xi = \{(\tau_0, i_0 i_1), (\tau_1, i_1 i_2), \dots\}$ 为红绿灯配时序列,对应每一次配时, (τ, ij) 的含义为: τ 为本次绿灯配时的开始时间; ij 表示单交叉路口绿灯完成对相位 i 车流配时后转向相位 j .定义系统在时间 t 时的状态为 $(X(t), \alpha, ij)$, 则系统的状态空间为 $\mathbb{R}^n \times E \times \{ij \mid i = 1, 2, 3, 4, j = \text{MOD}(i/n) + 1\}$. 因此,单交叉路口的最优控制问题归结为寻求容许的控制策略 $(\Xi, B(\cdot)) \in \Omega = (\Xi, \Theta)$, 在满足式(1)和(4)给出的系统动态方程和约束基础上,使目标函数 $J(i, X, s, \Xi, \alpha, B(\cdot))$ 最小.

3 问题求解(Solution of the problem)

对于这类考虑存在随机故障的最优控制问题,可以采用递阶策略进行研究.若假设不同的事件具有不同的发生频率,则按照事件发生的频率可将问

题分解成不同层次的动态优化子问题分步解决^[4,5].本系统中事件可分为不可控事件和可控事件,所谓不可控事件是指诸如车道上的车辆抛锚等人们无法控制其发生的事件,而可控事件是指诸如红绿灯的配时等可以控制其发生的事件,显然它们的发生频率是大不相同的.在递阶结构框架中的每一层对应于唯一的事件发生频率段、该段可控事件的配时以及下一层的目标期望值.将发生频率低的事件放在递阶结构的高层,事件发生越频繁,在递阶结构中的层次越低.由于单交叉路口的红绿灯之间的切换频率比路口发生故障的频率要高得多,故本文所构造的递阶框架把车道故障率的发生放在上层,而红绿灯之间的切换放在下层.在上层不需要考虑红绿灯之间的切换,仅考虑故障率存在情况下寻求最优车道流量,并作为下一层的目标期望值;下层则考虑存在红绿灯切换的情况下,如何实时控制红绿灯配时时间使得目标泛函逼近上层的最优车道流量.整个递阶框架不是采用不变的全局优化目标,而是采用滚动优化策略,即每次最优配时控制仅对某一相位的车道实施.

虽然随时段的不同,车道上车流变化相当大,但在一天中的某个时段,车流仍可以近似认为不变.故本文考虑在有限时域内寻求单交叉路口的最优控制问题.不失一般性,假定 $s = 0$,初始时系统已经切换到相位 1 车道,则在有限时域 $[0, T_f]$ 的目标函数为^[2]:

$$J(1, X, 0, \Xi, \alpha, B(\cdot)) = E \left(\int_0^{T_f} e^{-\rho t} G(X(t), B(t)) dt \mid X(0) = X_0, \zeta(0) = \alpha \right) = E \left(\int_0^{T_1} e^{-\rho t} G(X(t), B(t)) dt + \int_{T_1}^{T_1 + \theta_{12}} e^{-\rho t} G(X(t), 0) dt + \dots + E \left(\int_{\sum_{i=1}^{k-1} \theta_{ij} + \sum_{i=1}^{k-1} T_i}^{\sum_{i=1}^k \theta_{ij} + \sum_{i=1}^k T_i} e^{-\rho t} G(X(t), B(t)) dt + \int_{\sum_{i=1}^{k-1} \theta_{ij} + \sum_{i=1}^{k-1} T_i}^{\sum_{i=1}^k \theta_{ij} + \sum_{i=1}^k T_i} e^{-\rho t} G(X(t), 0) dt \right) \right). \quad (7)$$

式中第 T_i 表示交叉路口相位 i 绿灯的配时时间, θ_{ij} 为相位 i 绿灯配时完成后向相位 j 切换时的黄灯配时时间,有 $\sum_{i=0}^k \theta_i + \sum_{i=1}^k T_i = T_f$, 显然 $T_f \rightarrow \infty$, 则该问题就是原始问题.考虑路口行人过马路的安全需要,每相位最短绿灯时间不得小于某值 e (一般取 $e \geq 6s$), 故每一相位的配时 T_i 须满足以下条件:

$$T_i \geq 6s, i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

事实上,一个策略是否最优,关键在于初始时刻的决策规划.故下面解决在有限时域 $[0, T_f]$ 内采用递阶框架下寻求满意控制策略问题.即如何寻求最优的控制策略 $(\Xi, B(\cdot))$, 在满足式(1)和(4)给出的系统动态方程和约束条件基础上,使目标函数(7)达到最小,为此构造以下递阶控制模型.

评述 4 交叉路口的最优控制特点是其车流为不可控事件,为此在上节方程(1)中构造了可控事件绿灯通行配时的描述函数 $\delta_i(t)$, 这样就可以与生产系统中的流率概念相对应.

3.1 路口故障层(Failure level of the intersection)

在这一层不考虑红绿灯间的转换配时时间(既黄灯时间)对(7)进行寻优,以寻求最优车流流量,则(7)重新写为

$$\begin{aligned} J(1, X, 0, \Xi, \alpha, B(\cdot)) = \\ E\left(\int_0^{T_f} e^{-\alpha} G(X(t), B(t)) dt \mid X(0) = X_0, \zeta(0) = \alpha\right) = \\ E\left(\int_0^{T_1} e^{-\alpha} G(X(t), B(t)) dt + \dots + \right. \\ \left. \int_{\sum_{i=1}^k T_i}^{T_f} e^{-\alpha} G(X(t), B(t)) dt\right). \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\sum_{i=0}^k T_i = T_f$. 对于该问题,由文献[2]知其精确的最优控制率要求解

$$\min_{X(t)} \frac{\partial J(B^*(t), \zeta(t))}{\partial X(t)} B(t). \quad (10)$$

求解式(10),所得 $X^*(T_f)$ 和 $\min J(\cdot, \cdot)$ 即为时域 $[0, T_f]$ 内该系统的最优流量和泛函目标极值,并作为期望值输入到下层.

3.2 红绿灯转换层(Switch level of the signal)

上层已经确定了最优流量,本层的任务是考虑红绿灯之间有黄灯切换时间,使得本层的目标泛函达到最小值,为此有以下定义:

定义 x_i^k 表示 i 相位车道上车流在第 k 层的累积量, b_i^k 表示 i 相位车道上在第 k 层的车流流量. 考虑红绿灯间的黄灯配时因素,引入 X^2 , 表示本层车道上车流的累积量,即在系统动态特性的基础上,由 B^2 跟踪 B^1 , X^2 满足下式:

$$X^2(t) = \int_0^t B^2(s) ds - \int_0^t B^1(s) ds$$

或

$$\frac{dX^2}{dt} = F(X^2(\cdot), B^2(\cdot)) = B^2(t) - B^1(t). \quad (11)$$

由上层求解的期望绿灯最优配时和期望车流累积量,本层的问题便是在考虑存在黄灯配时情况下寻求交叉路口最优的绿灯配时函数 $\delta_i^2(t)$, 使以下目标泛函达到最小:

$$JS(X^2, B^2(\cdot)) = \int_0^{t_f} g(X^2(t)) dt \mid X^2(0) = X_0. \quad (12)$$

初始条件为 $t = 0$ 时, $X^2(0)$ 已知,由于本层考虑了切换时间,故终端时间自由,为区别上节,这里记为 t_f . 其中函数 g 是严格凸函数,且有以下特性:

$$g(0) = 0, g(X) \geq 0 \quad \forall X, \lim_{\|X\| \rightarrow \infty} g(X) = \infty,$$

$$\text{这里令 } g(X^2(t)) = \sum_{i=1}^n c_i^+ x_i^{2+}(t) + c_i^- x_i^{2-}(t).$$

因这是一个始端时间和状态固定,且终端状态已知而终端时间自由的子问题,根据 ПОНТРЯГИН 的最大值原理(maximum principle)有以下定理存在:

定理 受控系统的状态方程为(11),容许控制 $b_i(t)$ 在有界闭集 Θ 中取值,即 $b_i(t) \in \Theta$, 初始条件为:始端时间 $t = 0$ 及始端状态 $X^2(0)$ 固定,终端状态的约束条件为: $X^2(t_f) = X^2^*(T_f)$. 目标泛函为方程(12).定义哈密尔顿(Hamilton)函数为 $H[X^2(t), B^2(t), \lambda(t)] = g(X^2) + \lambda^T(t) F(X^2(t), B^2(t))$. 欲使性能指标 $JS(\cdot, \cdot)$ 达最小值,以实现最优控制的必要条件为

1) 正则方程组:

状态方程

$$\begin{aligned} \dot{X}^2(t) &= \frac{\partial H}{\partial \lambda} [X^2^*(t), B^2^*(t), \lambda(t)] = \\ &F(X^2^*(\cdot), B^2^*(\cdot)), \end{aligned} \quad (13)$$

协态方程

$$\dot{\lambda}(t) = - \frac{\partial H}{\partial X^2} [X^2^*(t), B^2^*(t), \lambda(t)]; \quad (14)$$

2) 极值条件:

$$\begin{aligned} H[X^2^*(t), B^2^*(t), \lambda(t)] = \\ \min_{B^2(t) \in \Theta} H[X^2^*(t), B^2(t), \lambda(t)]; \end{aligned} \quad (15)$$

3) 端点约束:

$$X^2^*(0) = X(0); X^2^*(t_f) = X^2(T_f); \quad (16)$$

4) 横截条件:

$$\begin{cases} \lambda(t_f) = 0, \\ H[X^2^*(t), B^2^*(t), \lambda(t)] = \\ H[X^2^*(t_f), B^2^*(t_f), \lambda(t_f)] = 0. \end{cases} \quad (17)$$

对于以上方程,可用数值求解来寻求其最优控

制.由于采用滚动优化,每次仅实施相位 i 车道上一个时段的绿灯配时.这意味着优化过程不是离线一次进行,而是在线反复进行优化计算、滚动实施,并且,由在线检测出的车流量来调整目标泛函的初始值,然后再基于当前的车道流通情况进行滚动优化,从而使模型失配、时变、干扰等引起的不确定性能及时得到弥补,提高了系统的控制效果.实时优化配时控制还可以利用本周期及前一个周期各个方向各个车道车流的信息,对下一周期各个方向各个车道的车流进行预估,同时在优化时考虑本周期路口滞留车辆数.

4 仿真算例(Simulation examples)

考虑仅有两个相位的单交叉路口例子:相位 $n = 2, \rho = 0.9$,并假设路口仅有两个状态,即 $\alpha \in E = \{0, 1\}$,系统参数: $\theta_{12} = \theta_{21} = 0.15, \lambda_{10} = 0.1, \lambda_{01} = 0.2$.假设在某段时间内各个相位车道的车流是常量,即 $z_1 = 0.63, z_2 = 0.47$.对不同的初始状态 $X(0)$,把该问题按路口故障层及红绿灯转换层进行递阶优化,表1给出了该模型控制策略下相位1的红绿灯的最优配时仿真结果,由于是不同的初始状态,故仅列出相位1的仿真结果.可见,当两个相位车道的车流都较大时,分配给每个相位的绿灯配时比较短(例1),以保证每个车道的畅通;当一个相位车道的车流量比较大而另一相位的车流量较小时(例2,3),车流量大的车道绿灯的配时就相应加长;当两个相位的车流量都比较小时(例4,5),每个相位的绿灯配时也等同于例1,保证车辆的滞留时间短.以上仿真结果与客观事实相符.该模型和控制策略不仅保证了车流和车道在最低运行成本下运行,而且使路口配时较好的满足需求,并保持较低车辆滞留量.

表1 仿真结果

Table 1 Results of simulation

例子	$x_1(0)$	$x_2(0)$	C_1^+	C_1^-	C_2^+	C_2^-	T_1
1	-2.0	-1.5	0.5	3.0	0.6	3.0	0.80
2	-1.5	0.0	0.5	3.0	1.0	3.0	1.40
3	-1.5	0.5	0.5	3.0	1.0	3.0	1.85
4	0.0	0.0	1.0	3.0	1.0	3.0	0.55
5	0.5	0.2	1.0	3.0	1.0	3.0	0.45

5 结论(Conclusion)

作者从道路和车辆运输成本的角度来考虑单交

叉路口的红绿灯最优控制问题,并把车道的随机故障纳入考虑范畴,通过递阶控制策略来优化控制方案,在实施中对路口各个车道车流量进行实时检测,从而为优化决策提供必要的的数据,使得路口交通模型更接近于实际.仿真结果表明,该模型更宜于获得最优控制解,能更方便地实施.以道路和车辆运输成本为红绿灯最优控制的目标泛函来优化其配时方案,在国内外文献中还不曾看到,本文仅在这方面做了粗浅的讨论,以期起到抛砖引玉的作用.

参考文献(References):

- [1] 宋春跃,高春华,王慧,等.制造系统的递阶滚动优化调度模型[J].控制理论与应用,2002,19(3):317-323.
(SONG Chunyue, GAO Chunhua, WANG Hui, et al. A hierarchical scheduling model of manufacturing systems on receding horizon [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(3): 317-323.)
- [2] SONG C Y, GAO C H, WANG H, et al. A finite horizon scheduling mode based on optimal inventory [C] // *Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hefei, China: [s. n.], 2000: 1878-1882.
- [3] 黄辉先,史忠科.城市单交叉路口交通流实时遗传算法优化控制[J].系统工程理论与实践,2001,21(3):102-106.
(HUANG Huixian, SHI Zhongke. Real-time control of traffic signal with genetic algorithms optimizing in urban intersection [J]. *Systems Engineering: Theory and Practice*, 2001, 21(3): 102-106.)
- [4] KIMEMIA J, GERSHWIN S B. An algorithm for the computer control of a flexible manufacturing system [J]. *IIE Transactions*, 1983, 15(4): 353-362.
- [5] GERSHWIN S B. Hierarchical flow control: A framework for scheduling and planning discrete events in manufacturing systems [J]. *Proc of the IEEE*, 1989, 77(1): 195-209.
- [6] SETHI S P, ZHANG Q. Hierarchical production and setup scheduling in stochastic manufacturing systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1995, 40(5): 924-930.

作者简介:

宋春跃 (1972—),男,2003年3月获控制科学与工程专业博士学位,现在浙江大学信息学院做博士后研究,研究领域为流程工业生产系统的最优生产控制、混杂系统的建模及优化、预测控制等, E-mail: cysong@iipc.zju.edu.cn;

王慧 (1959—),女,教授,研究领域为智能交通系统,复杂过程建模、控制与优化、计算机控制, E-mail: hwang@iipc.zju.edu.cn;

李平 (1954—),男,教授、博士生导师,主要研究方向为企业综合自动化、流程工业 CIPS、工业过程中的先进控制理论及应用等, E-mail: pli@iipc.zju.edu.cn.