

基于耗散性的过饱和十字路口信号灯控制

王秀蒙, 郭戈[†]

(大连海事大学自动化系, 辽宁大连 116026)

摘要: 针对十字路口的过饱和情况, 引入一种新颖的正定切换系统模型. 基于正定切换系统的耗散性能分析, 针对四相位十字路口, 提出交通信号灯实时状态反馈控制策略. 建立四相位离散时间切换系统模型, 设计状态反馈控制器, 并确定十字路口各个相位的绿灯时间, 通过与经典饱和路口信号设计模型(bang-bang控制)对比的仿真研究表明, 在缓解十字路口过饱和的问题上, 状态反馈控制方法更有效.

关键词: 过饱和十字路口; 离散时间; 正定切换系统; 耗散性

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Dissipativity-based signaling control of oversaturated intersections

WANG Xiu-meng, GUO Ge[†]

(Department of Automation, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The traffic-responsive signalization problem for an oversaturated intersection is addressed. A new model for intersection called positive switched system is presented. Then, based on the dissipativity analysis results for positive switched system, an online state-feedback strategy for traffic signal in four-phase intersection is proposed. By molding the intersection as a discrete-time switched system, a set of state-feedback controllers is proposed and the green time of each phase in signalization is determined. Finally, a simulation study in comparison with the classic models(bang-bang control) is presented. Simulation result shows the effectiveness of state-feedback control in relieving the oversaturated situation for an intersection.

Keywords: oversaturated intersection; discrete-time; positive switched system; dissipativity

0 引言

交通信号控制是城市交通网络中一个长期存在的问题. 有效的交通信号系统可以减少车辆延误、停车次数、燃料消耗、污染物排放和事故的发生^[1]. 此外, 由于交通拥堵情况越来越严重, 有效的交通信号灯控制对于缓解过饱和情况发挥着非常重要的作用^[2-8]. 大多数信号控制策略基于固定时间的信号控制^[1-4], 固定时间策略基于历史数据而非实时数据. 近年来, 一些文献研究了在线信号控制方法^[5-8], 这种方法更适应实时交通情况. 关于过饱和交通方面的相关研究已取得了显著成果, Michalopoulos等^[5]率先提出二阶配时方法, 该方法以过饱和状态下的交叉口延误时间为目标, 通过最优化求解以寻求最大绿灯时间和最小绿灯时间的转换点. 文献[6]引入离散时间模型(包含 bang-bang 控制)来优化文献[5]模型, bang-

bang 控制需要选择开关最大绿灯时间和最小绿灯时间的顺序. 文献[7]着重从排队长度和延时两个性能指标进行测评, 深入分析了 bang-bang 控制的特点和可用性, 但是 bang-bang 控制在各个方向饱和流率相差较大时有效性较差. 文献[8]针对一般情况提出一种最优交通灯切换方法, 将扩展线性互补问题转化成最小化问题来解决, 当切换周期较大时, 该任务难以实现. 最近, 相关研究取得重要进展, 文献[9-10]将耗散思想应用于交通信号设计问题中, 将车辆流入看作能量的存储, 车辆流出看作能量的消耗, 这种耗散方法为交通信号控制问题和十字路口系统优化提供了新的思路. 本文基于耗散思想对十字路口系统的正定性和切换性能进行研究, 引入现代控制理论中的状态反馈控制思想^[11-12], 考虑十字路口的所有变量建立一种切换系统模型, 然后基于切换系统理论^[13-15]

收稿日期: 2017-05-03; 修回日期: 2017-09-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573077).

责任编辑: 张海涛.

作者简介: 王秀蒙(1991-), 女, 博士生, 从事智能交通、车辆协同控制的研究; 郭戈(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能交通、车辆协同控制、网络控制等研究.

[†]通讯作者. E-mail: geguo@yeah.net

解决过饱和和十字路口信号灯的控制问题。

信号十字路口多模态系统的本质是由交通信号灯决定的多相位特点,可以描述为由多个相位的多个子系统组成的切换系统.由于过饱和路口中重要的是设置合理的绿灯时间以提高路口车辆通行能力,本文以绿灯时间作为系统的控制输入,将信号灯控制问题转化为一组状态反馈控制问题,从而确保闭环系统的状态能够收敛到较小的范围,以此解决道路过饱和问题.首先建立一个四相位系统的正定切换模型,通过求解一组线性规划(LP)问题(可以借助现有的软件工具箱求解)提出一种基于耗散控制策略;然后结合实际情况,给出相应的仿真,并与 bang-bang 控制方法进行比较.结果表明,所提出算法是有效可行的,而且在解决过饱和问题所需要的周期较短.

1 问题描述和系统建模

1.1 问题描述

城市交通系统是由多个十字路口组成的交通网络,一般情况下,十字路口的交通信号控制问题可以描述为一个四相位系统.图1是典型的四相位交通路口模型,每一相位的两个交通流具有相同的特征.

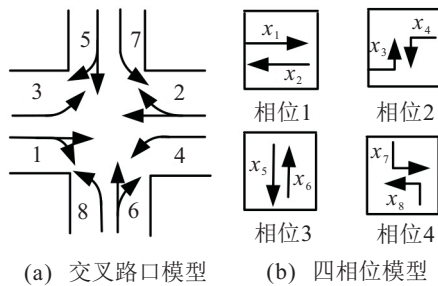


图1 四相位交叉口模型

首先给出有关参数的定义:

1) 信号绿灯时间: $g_p(k), p \in G = \{1, 2, 3, 4\}$.

2) 损失时间 l : 在信号控制领域,损失时间是指在车辆通过交通路口时没有被有效利用的时间.损失时间主要包括两部分,一是绿灯开启时,车辆从停止状态到行驶状态所需时间;另一部分是绿灯关闭,黄灯开启时,只有越过停止线的车辆才能继续通行,因此也有一部分损失时间,即没有被有效利用的黄灯时间.损失时间一般认为是一个常数.

3) 有效绿灯时间 $g_p^e(k)$: 车辆能够通过交通路口的时间,可以得到: $g_p^e(k) + l = g_p(k) + y$, 其中 y 为信号灯黄灯时间,是一个常数.令 $L = l - y$, 即

$$g_p^e(k) = g_p(k) - L.$$

4) 输入流量 q_i : 单位时间内,在某一方向上到达交通路口的车辆总数, $i \in F = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$.

5) 饱和流率 s_i : 有效绿灯时间内,在车流不间断

的情况下,单位时间内能通过交通路口的车辆的最大数量.

6) 到达的车辆总数 $A_{i,T}$: 时间 T 内,某一方向到达交通路口的车辆总数, $A_{i,T} = q_i T$.

7) 离开的车辆总数 $D_{i,T}$: 时间 T 内,某一方向离开交通路口的车辆总数, $D_{i,T} = s_i T$.

8) 排队长度 $x_i(k)$: 有效绿灯时间内不能顺利通过路口、需要排队等待绿灯通过的车辆数.

1.2 系统建模

基于上述定义,依据存储-转发模型^[16],建立过饱和和十字路口的动态模型.对应四相位十字路口有4个动态方程,下面逐个相位介绍:

1) 相位1. 排队长度可表示为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + A_{i,g_1} - D_{i,g_1}.$$

相位1中方向1和方向2具有相同的特征,则 $A_{i,g_1} = q_i g_1(k), i = 1, 2$, 且有

$$D_{i,g_1} = s_i g_1^e(k) = s_i (g_1(k) - L), i = 1, 2.$$

可以得到相位1中方向1,2的动态方程为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + (q_i - s_i)g_1(k) + s_i L, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

由于其他方向 ($i = 3, 4, 5, 6, 7, 8$) 在相位1不能通行,会发生排队现象,即这些相位此时具有如下特点:

$$A_{i,g_1} = q_i g_1(k), i = 3, 4, 5, 6, 7, 8;$$

$$D_{i,g_1} = 0, i = 3, 4, 5, 6, 7, 8.$$

所以,相位1中方向3,4,5,6,7,8的动态方程可写为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + q_i g_1(k), i = 3, 4, 5, 6, 7, 8. \quad (2)$$

方程(1)和(2)构成相位1的动态方程.

2) 相位2. 动态方程为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + (q_i - s_i)g_2(k) + s_i L, \quad i = 3, 4; \quad (3)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + q_i g_2(k), i = 1, 2, 5, 6, 7, 8. \quad (4)$$

3) 相位3. 动态方程为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + (q_i - s_i)g_3(k) + s_i L, \quad i = 5, 6; \quad (5)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + q_i g_3(k), i = 1, 2, 3, 4, 7, 8. \quad (6)$$

4) 相位4. 动态方程为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + (q_i - s_i)g_4(k) + s_i L, \quad i = 7, 8; \quad (7)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + q_i g_i(k),$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6. \tag{8}$$

在四相位的4个子系统中, 存在一个切换信号 $\delta(k)$, 该切换信号决定 k 时刻系统处于哪个子系统模式. 定义相位指示函数为

$$\eta_p(k) = \begin{cases} 1, & \delta(k) = p; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{9}$$

扩展到四相位的动态方程中, 上述方程可简写为如下状态空间方程:

$$X(k+1) = \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) [X(k) + B_p U_p(k) + C_p],$$

$$g_{p,\min} \leq U_p(k) \leq g_{p,\max}. \tag{10}$$

其中

$$U_p(k) = g_p(k), \quad p = 1, 2, 3, 4;$$

$$X(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_7(k) \ x_8(k)]^T;$$

$$B_1 = [q_1 - s_1 \ q_2 - s_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6 \ q_7 \ q_8]^T;$$

$$B_2 = [q_1 \ q_2 \ q_3 - s_3 \ q_4 - s_4 \ q_5 \ q_6 \ q_7 \ q_8]^T;$$

$$B_3 = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 - s_5 \ q_6 - s_6 \ q_7 \ q_8]^T;$$

$$B_4 = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6 \ q_7 - s_7 \ q_8 - s_8]^T;$$

$$C_1 = [s_1 L \ s_2 L \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T;$$

$$C_2 = [0 \ 0 \ s_3 L \ s_4 L \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T;$$

$$C_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ s_5 L \ s_6 L \ 0 \ 0]^T;$$

$$C_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ s_7 L \ s_8 L]^T.$$

系统(10)是典型的离散时间切换系统, 由于在十字路口系统模型中各个相位的工作顺序是相位1、相位2、相位3、相位4、相位1、 \dots , 并以这种顺序轮流进行, 转换信号可按照以下方式描述:

$$\delta(k) = p, \text{ if } \delta(k-1) = q,$$

$$p \neq q, \quad p, q \in G. \tag{11}$$

这意味着在每个时刻 k 处发生切换.

大多数现有的模型都是考虑一个固定的信号周期(十字路口各个相位组合基础系列的重复), 这样要求必须选择合适的周期. 如果周期选择不当, 将会导致整个信号灯控制系统性能下降. 本文的切换系统模型需要考虑的仅仅是绿灯时间的控制, 由绿灯时间决定整个周期时长.

1.3 控制目标

将车辆到达率超过道路通行能力的交通状态称为过饱和状态. 本文的控制目标是通过信号灯绿灯时间的控制, 提高路口的车辆通行能力, 将路口的排

队长度降至最小. 根据可控绿灯时间 $g_p(k)$, 采用如下形式的状态反馈控制器:

$$U_p(k) = \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) K_p X(k),$$

$$g_{p,\min} \leq U_p(k) \leq g_{p,\max}, \tag{12}$$

其中 K_p 为需要设计的反馈控制增益.

将状态反馈控制器(12)代入系统动态模型(10)中, 十字路口系统的闭环形式可表述为

$$X(k+1) = \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) [A_p X(k) + C_p],$$

$$g_{p,\min} \leq K_p X(k) \leq g_{p,\max}, \tag{13}$$

其中 $A_p = I + B_p K_p$. 在式(12)的控制下, 本文的控制目标是使闭环系统的流量供应率无积累.

首先, 队列长度的初始值应非负, 即 $x_i(0) \geq 0$. 为了保证设计的状态反馈控制器的可用性, 在研究周期内 $X(k)$ 必须保持正定, 即

$$X(k) \geq 0, \quad \forall k \in N. \tag{14}$$

为了使系统无积累, 引进特殊的存储函数 $S(k)$, 它表示各个方向储存在系统中的长度总和, 即

$$S(k) = e^T X(k), \tag{15}$$

其中 $e^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$.

系统车辆总流入是每个相位到达的车辆总和, 表示为

$$A_p(k) = g_p(k) \sum_{i=1}^8 q_i = K_p X(k) \sum_{i=1}^8 q_i. \tag{16}$$

系统车辆总流出是每个相位离开的车辆总和. 相位1车辆离开总数为

$$D_1 = (s_1 + s_2)(g_1 - L) =$$

$$(s_1 + s_2)g_1 - (s_1 + s_2)L;$$

相位2车辆离开总数为

$$D_2 = (s_3 + s_4)(g_2 - L) =$$

$$(s_3 + s_4)g_2 - (s_3 + s_4)L;$$

相位3车辆离开总数为

$$D_3 = (s_5 + s_6)(g_3 - L) =$$

$$(s_5 + s_6)g_3 - (s_5 + s_6)L;$$

相位4车辆离开总数为

$$D_4 = (s_7 + s_8)(g_4 - L) =$$

$$(s_7 + s_8)g_4 - (s_7 + s_8)L.$$

离开系统的车流量可以表示为

$$D_p(k) = d_p g_p - d_p L = d_p K_p X(k) - d_p L. \quad (17)$$

其中: $d_1 = s_1 + s_2, d_2 = s_3 + s_4, d_3 = s_5 + s_6, d_4 = s_7 + s_8$. 每个相位的流量供应率定义为

$$\begin{aligned} \theta(k) &= \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) \theta_p(k) = \\ &= \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) [A_p(k) - D_p(k)] = \\ &= \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) [\alpha_p X(k) + \beta_p], \\ \alpha_p &= K_p \left(\sum_{i=1}^8 q_i - d_p \right), \beta_p = d_p L. \end{aligned} \quad (18)$$

为了实现具有存储函数 $S(k)$ 和流量供应率 $\theta(k)$ 的系统无积累, 必须满足如下条件:

$$\Delta S(k) = S(k+1) - S(k) \leq \theta(k). \quad (19)$$

这意味着, 系统中车辆排队长度总量的变化量应该始终小于等于系统的总输入量减去总输出量. 在这种情况下, 具有状态反馈控制器(12)的系统相对于流量供应率 $\theta(k)$ 可以说是无积累的.

2 性能分析和控制器设计

2.1 性能分析

通过研究正定切换系统的耗散性能解决十字路口的控制问题. 考虑前面得到的四相位正定切换系统(13), 给出如下定义.

定义1 对于系统(13), 初始条件 $X(0) \geq 0$, 如果对于任意采样时刻都有相应方向的 $X(k) \geq 0$, 则系统是正定的.

引理1 对于任意相位 p , 当且仅当 $A_p \geq 0, C_p \geq 0$ 时, 系统正定.

证明 充分性显而易见, 下面给出必要性的证明. 定义

$$\begin{aligned} X(k) &= [x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_8(k)]^T, \\ A_p &= \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,8} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,8} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{8,1} & a_{8,2} & \cdots & a_{8,8} \end{bmatrix}, C_p = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_8 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

有

$$x_i(k+1) = a_{i,1}x_1(k) + \cdots + a_{i,8}x_8(k) + c_i.$$

因为系统(13)是正定的, 可以得到

$$a_{i,m} \geq 0, \forall m = 1, 2, \dots, 8, \forall i = 1, 2, \dots, 8;$$

$$c_i \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, 8.$$

因此矩阵 $A_p \geq 0, C_p \geq 0$. \square

定义2 对于供应率

$$\theta(k) = \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) [\alpha_p X(k) + \beta_p]$$

的系统, 如果存在非负函数 $S : S(0) = 0$ 使得 $\Delta S(k) \leq \theta(k) (\Delta S(k) < \theta(k))$ 成立, 则系统(13)是耗散的(严格耗散的).

注1 在严格递耗散的情况下, $\Delta S(k) < \theta(k)$ 可表述为 $\Delta S(k) \leq -\rho S(k) + \theta(k)$, 在选择本文所期望耗散度的数量时, $\rho > 0$ 提供了相应的自由度. 当 $\rho = 0$, 系统是耗散的, 而非严格耗散. 在接下来的论述中认为一般的耗散性能满足

$$\Delta S(k) \leq -\rho S(k) + \theta(k), \rho \geq 0.$$

对于正定切换系统, 正定切换函数

$$S(k) = X(k) \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) h_p^T, h_p \geq 0, \forall p \in G$$

可作为存储函数. 如下定理1可由具有特定供应率的耗散正定切换系统导出.

定理1 考虑正定切换系统(13), 给定一个标量 $\rho \geq 0$, 如果存在向量集 $h_p \geq 0$, 有

$$h_q^T A_p - (1 - \rho) h_p^T + \alpha_p \leq 0, \forall (p, q) \in G \times G,$$

$$h_q^T C_p - \beta_p \leq 0, \forall (p, q) \in G \times G \quad (20)$$

成立, 则系统关于供应率 $\theta(k)$ 是耗散的.

证明 给定向量集 $h_p \geq 0$ 构造存储函数

$$S(k) = X(k) \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) h_p^T. \quad (21)$$

通过耗散性和供给率 $\theta(k) = \sum_{p=1}^4 \eta_p(k) [\alpha_p X(k) + \beta_p]$

的定义, 可以得到

$$\begin{aligned} &\sum_{p=1}^4 \{ \eta_p(k+1) h_p^T X(k+1) - \eta_p(k) \times \\ & [(1 - \rho) h_p^T X(k) - \alpha_p X(k) + \beta_p] \} \leq 0. \end{aligned} \quad (22)$$

这保证了 $\Delta S(k) \geq -\rho S(k) + \theta(k)$. 另外, 还需满足切换信号, 所以接下来式(23)采用特殊的构造, 即

$$\begin{aligned} \eta_p(k) &= 1, \eta_{l \neq p}(k) = 0; \\ \eta_q(k+1) &= 1, \eta_{l \neq q}(k) = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

对于任意一个非零 $X(k)$, 式(23)意味着

$$\begin{aligned} h_q^T X(k+1) - (1 - \rho) h_p^T X(k) + \alpha_p X(k) - \beta_p &\leq 0, \\ \forall (p, q) &\in G \times G. \end{aligned} \quad (24)$$

使用系统模型 $X(k+1) = A_p X(k) + C_p$ 可以得到

$$\begin{aligned} [h_q^T A_p - (1 - \rho) h_p^T + \alpha_p] X(k) + h_q^T C_p - \beta_p &\leq 0, \\ \forall (p, q) &\in G \times G. \end{aligned} \quad (25)$$

由式(20)可知(25)是满足的. □

定理1提供了正定切换函数寻找向量集 h_p 的方法. 为了方便问题的研究,选择 $h = h_p$,可以得到如下推论.

推论1 考虑正定切换系统(13),给定一个标量 $\rho \geq 0$,如果存在向量 $h_p \geq 0$,有

$$\begin{aligned} h_q^T A_p - (1 - \rho)h_p^T + \alpha_p &\leq 0, \\ h^T C_p - \beta_p &\leq 0, \forall p \in G \end{aligned} \quad (26)$$

成立,则系统关于供应率

$$\theta(k) = \sum_{p=1}^4 \eta_p(k)[\alpha_p X(k) + \beta_p]$$

是耗散的.

2.2 控制问题求解

根据上述控制问题和分析结果,考虑四相位路口,设计控制器(12)中的状态反馈增益 K_p ,要求闭环控制系统实现无积累,本文的设计目标可总结为需要满足如下3点:

1) 正定性. 由引理1容易得到

$$I + B_p K_p \geq 0. \quad (27)$$

2) 耗散性能. 存储函数 $S(k) = e^T X(k)$,且供应

率 $\theta(k) = \sum_{p=1}^4 \eta_p(k)[\alpha_p X(k) + \beta_p]$,则有

$$\begin{aligned} e^T C_1 - \beta_1 &= \\ [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \times \\ [s_1 L \ s_2 L \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T - (s_1 L + s_2 L) &= 0. \end{aligned} \quad (28)$$

类似地, $e^T C_2 - \beta_2 = 0$,所以 $e^T C_p - \beta_p = 0$ 成立. 根据推论1,给定一个标量 $\rho \geq 0$,满足下述条件可保证耗散性:

$$e^T(I + B_p K_p) - (1 - \rho)e^T + \alpha_p \leq 0. \quad (29)$$

3) 控制变量约束条件. 绿灯时间满足

$$g_{p,\min} \leq K_p X(k) \leq g_{p,\max}. \quad (30)$$

总结以上步骤,四相位十字路口无积累反馈控制方法可表示为如下结论.

命题1 考虑离散系统(13),给定标量 $\rho \geq 0$,如果存在反馈增益 K_p ,使得

$$\begin{aligned} I + B_p K_p &\geq 0, \\ e^T(I + B_p K_p) - (1 - \rho)e^T + \alpha_p &\leq 0, \\ g_{p,\min} \leq K_p X(k) &\leq g_{p,\max}, \forall p \in G, \end{aligned} \quad (31)$$

则能保证闭环系统无积累.

根据上述结论,给出饱和和十字路口信号灯控制算法如下.

算法1 (信号灯控制算法).

Step 1: 检测8个方向的排队车辆初值,得到 $x_1(0), x_2(0), \dots, x_8(0)$.

Step 2: 估计8个方向的输入流量 q_i 和饱和流率 s_i .

Step 3: 给出存储函数 $S(k)$ (式(15)),并计算初值 $S(0)$.

Step 4: 计算系统总流入量 $A_p(k)$ (式(16))和总流出量 $D_p(k)$ (式(17)),并求出流量供应率 $\theta(k)$ (式(18)).

Step 5: 由式(31),解出状态方程(13)的状态反馈增益 K_p ,使得满足 $\Delta S(k) \leq \theta(k)$ (式(19)).

Step 6: 计算相应的有效绿灯时间,输出最佳周期时长.

3 仿真分析

为了验证本文算法的有效性和可行性,将本文的状态反馈控制方法与文献[7]中的bang-bang控制方法进行比较. 考虑四相位十字路口,设定交通路口处8个方向上的初始车辆排队长度分别为70、55、60、50、65、45、75、80,设定每个方向上的参数如表1所示.

表1 道路参数

方向	$q_i / (\text{veh/s})$	$s_i / (\text{veh/s})$	方向	$q_i / (\text{veh/s})$	$s_i / (\text{veh/s})$
x_1	0.32	1.6	x_5	0.37	1.6
x_2	0.30	1.3	x_6	0.33	1.3
x_3	0.34	1.5	x_7	0.36	1.4
x_4	0.36	1.4	x_8	0.34	1.5

应用Matlab线性规划工具箱,求出系统的反馈控制增益分别为

$$\begin{aligned} K_1 &= [0.320 \ 3 \ 0.108 \ 0], \quad K_2 = [0.060 \ 10 \ 0.074 \ 0], \\ K_3 &= [0.108 \ 0 \ 0.320 \ 3], \quad K_4 = [0.074 \ 0 \ 0.060 \ 10]. \end{aligned}$$

对反馈控制算法进行仿真,得到各个行驶方向车辆排队数量随信号周期的变化如图2所示. 由图2可见,本文采用的状态反馈方法在有效绿灯时间内能更有效地缓解过饱和的情况. 比较结果表明,采用状态反馈的方法,大约20个周期,十字路口的车辆排队数便可以消散,而bang-bang控制方法则需要32个周期. 所以采用本文状态反馈的方法可以大大提升系统性能.

图3为本文控制方法与bang-bang控制方法的比较仿真. 基于状态反馈控制方法在相位有效绿灯时间结束时路口排队车辆总数的变化如图3中 x_1 曲线所示;基于bang-bang控制方法,在相位绿灯时间结束时路口车辆排队总量随信号周期的变化如图3中 x_2 曲线所示.

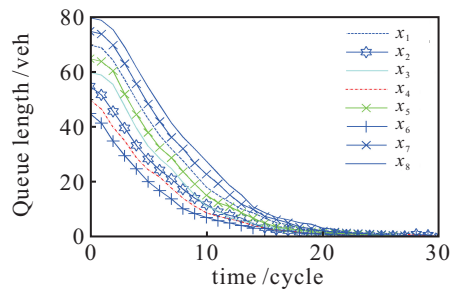


图2 8个方向的排队数量变化

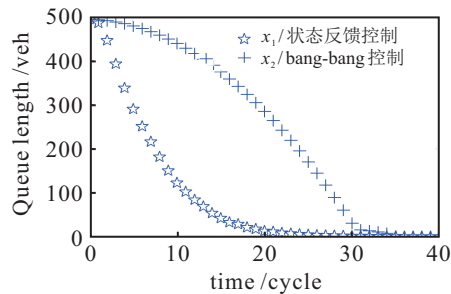


图3 本文方法与和bang-bang控制方法比较

4 结论

本文通过建立过饱和十字路口的正定切换系统模型,提出了基于耗散性能的控制策略,利用状态反馈控制策略对十字路口进行实时控制.最后对四相位十字路口进行仿真,结果表明状态反馈的实时控制策略远远优于bang-bang控制策略.但是本文仅研究了单个十字路口的情况,没有考虑多个路口间的相互作用,后续工作将考虑所提出方法在多个十字路口中的应用.

参考文献(References)

- [1] Papageorgiou M, Diakaki C, Dinopoulou V, et al. Review of road traffic control strategies[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(12): 2043-2067.
- [2] Diakaki C, Papageorgiou M, Aboudolas K. A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(2): 183-195.
- [3] Yu Q, Rong J. Fixed timing plan optimization for oversaturated intersection based on fuzzy logic[J]. J of Beijing University of Technology, 2007, 33(11): 1173-1176.
- [4] Hong K L, Asce M, Andy H F C. Control strategies for oversaturated traffic[J]. J of Transportation Engineering, 2004, 130 (4): 466-478.
- [5] Michalopoulos P, Stephanopolos G. Optimal control of oversaturated intersections: theoretical and practical considerations[J]. Traffic Engineering and Control, 1978, 19(5): 216-221.
- [6] Chang T, Lin J. Optimal signal timing for an oversaturated intersection[J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(6): 471-491.
- [7] 陈帅宇, 徐浩. 过饱和路口交通信号设计: 经典模型及最新方法的比较与总结[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(1): 97-110.
(Chen S Y, Xu H. Timing oversaturated signals: What can We learn from classic and state-of-the-art signal control models[J]. J of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(1): 97-110.)
- [8] Du L, Zhang Y. Positive switched system approach to traffic signal control for oversaturated intersection[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014, 8: 1-8.
- [9] Motawej F, Bouyekhf R, Moudni A E. A dissipativity based approach to traffic signal control for an over-saturated intersection[J]. J of the Franklin Institute, 2011, 348(4): 703-717.
- [10] Zhang H, Yan H, Chen Q. Stability and dissipative analysis for a class of stochastic system with time delay[J]. J of the Franklin Institute, 2010, 347(5): 882-893.
- [11] Sun W L, Wang Y P, Yu G Z, et al. Quasi-optimal feedback control for a system of oversaturated intersections[J]. Transportation Research Part C, 2015, 57(8): 224-240.
- [12] Xiang W M, Xiao J, Jiang Y S. Real-time signalization for an oversaturated intersection via static state feedback control: A switched system approach[J]. J of the Franklin Institute, 2015, 352(8): 3304-3324.
- [13] Xiang W M, Xiao J. Stability analysis and control synthesis of switched impulsive systems[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2012, 22(13): 1440-1459.
- [14] Zhao X D, Zhang L X, Shi P, et al. Stability of switched positive linear systems with average dwell time switching[J]. Automatica, 2012, 48(6): 1132-1137.
- [15] Kouvelas A, Aboudolas K, Papageorgiou M, et al. A hybrid strategy for real-time traffic signal control of urban road networks[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(3): 884-894.
- [16] Aboudolas K, Papageorgiou K, Kosmatopoulos E. Store-and-forward based methods for the signal control problem in large-scale congested urban road networks[J]. Transportation Research Part C, 2009, 17(2): 163-174.

(责任编辑: 郑晓蕾)