

基于 TdPN 的中小流量交叉口信号控制研究

宋佳运

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对城市中小流量交叉口交通拥堵问题, 提出了一种基于时延 Petri 网 (TdPN) 的可变相序信号控制模型; 利用 TdPN 建立交叉口车流模型和信号控制模型, 结合马尔可夫链, 建立交通流的动态生成模型; 通过将通行权赋予当前等待车辆数最大的相位来实现相位的随机选择; 以平均延迟时间最小为优化目标, 通过遗传算法求解最优相位配时; 在信号周期固定的情况下, 分析基于 TdPN 的四相位可变相序控制模型在不平衡交通流下对交叉口平均排队长度的影响, 并将此模型与四相位固定相序控制模型进行对比; 研究表明, 该方案在单位时间内有效地减少了交叉口的平均排队长度。

关键词: 交通信号控制; 时延 Petri 网; 马尔可夫链

Signal Control of Small and Medium Flow Intersection Based on Timed Petri Net

Song Jiayun

(School of Optical-Electrical Information & Computer Engineering, Shanghai University of Science & Technology,
Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the traffic congestion problem of small and medium traffic intersections in cities, this paper proposed a variable phase sequence signal control model based on timed petri net (TdPN). This paper used TdPN to establish the intersection traffic model and signal control model and also used Markov chain to establish the dynamic generation model of traffic flow. This paper assign a grant to the phase which had the largest number of waiting vehicles to select phase randomly. With the minimum average delay time as the optimization goal, this paper used genetic algorithm to solve the optimal phase timing. In the case of fixed signal period, this paper analysis the influence of TdPN-based four-phase variable phase sequence control model on the average queue length of intersections under unbalanced traffic flow. The simulation compared this with the four-phase fixed phase sequence control model. The research results show the scheme reduced the average queue length of intersections per unit time.

Keywords: traffic signal control; timed Petri net (TdPN); markov chain

0 引言

随着机动车数量的急剧增长, 国内许多城市局部地段车辆严重阻塞。交通信号控制作为城市交叉路口的主要模式, 通常用于调节城市内的车流量, 通过改变相序、有效绿灯时间和周期时间等控制策略来影响通行效率。文献 [1] 针对非线性和非平衡的交叉口系统, 以延迟时间为性能指标, 提出了基于元胞自动机和多交叉口信号配时规划算法的新型多交叉口模型; 文献 [2] 针对单交叉口交通流量未饱和的情形, 提出了基于 K 近邻短时交通流预测的自适应控制策略; 文献 [3] 以交叉口车均延误最小为优化目标, 提出了车路协同环境下交叉口自适应实时控制优化模型。以上研究大多通过采集实时的交通信息或预测历史交通流数据, 在一定程度上缓解了交通拥堵, 提高了交叉口车辆的通行效率, 但是不能有效地对交叉口进行建模分析。

Petri 网是对离散并行系统的数学表示, 包括库所和变迁两类节点, 其中网的部分描述系统的结构, 而标识部分

模拟系统的运行状态。文献 [4] 第一次将 Petri 网应用于交通系统。时延 Petri 网 (Timed Petri net, 简记为 TdPN) 系统可以对异步并发系统的性能进行分析, 模拟交通流的变化以及对信号优化控制。文献 [5] 针对四相位固定相序交叉口系统的建模, 提出了一种自上而下的混合 Petri 网方法; 文献 [6] 利用 TdPN 建立无信号交叉口控制模型, 通过建立车辆最快消散目标函数来求解车辆最优通行序列; 文献 [7] 提出基于时延赋色 Petri 网的交通流优化控制模型, 通过建立以输入路段车辆数最小为目标的车流优化方程来提高车辆通行效率。文献 [8] 通过 Petri 网构建交通控制策略模型, 从而优化每个信号相位的持续时间来最小化队列长度。文献 [9] 以各相位车辆总停留时间最短为目标, 提出一种基于混合 Petri 网的优化感应控制模型。文献 [10] 基于离散时延 Petri 网, 通过禁止弧控制各相位绿灯延长时间。以上研究通过模拟现实交通网络中车辆的运行状态, 根据不同的优化控制方法提高交叉口通行能力。其中针对城市中小流量交叉口相位随机控制相关的研究则相对较少。

针对中小流量的城市交叉口, 本文在四相位固定相序信号控制模型的基础上, 提出了基于时延 Petri 网的四相位

收稿日期: 2019-08-08; 修回日期: 2019-08-28。

作者简介: 宋佳运 (1995-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事智能交通控制方向的研究。

可变相序信号控制模型。引入马尔可夫链，动态获取交叉口各进口道的车辆数。通过对变迁触发的控制实现相位随机选择与跳转。在 Webster 信号配时方案下，以交叉口车辆平均延误时间最小为优化目标，采用遗传算法求解最优配时。最后将平均排队长度作为参数进行评估试验，从而验证方法的有效性。

1 时延 Petri 网的基本理论

TdPN 系统是一个五元组， $N = (P, T; A, M, D)$ ，其中： P 和 T 分别表示库所、变迁的有限集合，并且 $P \cap T = \phi$ ， $P \cup T \neq \phi$ ； $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 表示库所指向变迁和变迁指向库所的有向弧集；映射 $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ 表示网 N 的一个标识， $M = [M(p_1), M(p_2), \dots, M(p_n)] \in N^n$ ， M_0 是初始标识； $D: T \rightarrow R^+$ 是定义在变迁集 T 上的时间函数。对于 $t \in T$ ， $D(t) = a$ 表示当一个标识满足 $M[t >]$ 时（ $M[t >]$ 表示变迁 t 在标识 M 有发生权），变迁 t 被使能，但要经过 a 个单位时间才会完成触发。变迁 $t_j \in T$ 在时延 Petri 网中有发生权的规则如式（1）所示， t_j 在 $M(p_i)$ 发生，得到一个新的标识 $M(p_i)$ ，如式（2）所示：

$$\forall p_i \in I(t_j), \quad M(p_i) \geq w(p_i, t_j) \quad (1)$$

$$M(p_i) = M(p_i) - w(p_i, t_j) + w(t_j, p_i) \quad (2)$$

其中， $1 \leq i \leq n$ ， $1 \leq j \leq n$ ； $w(p_i, t_j)$ 表示库所 p_i 指向变迁 t_j 的弧的权重； $w(t_j, p_i)$ 表示变迁 t_j 指向 p_i 的弧的权重； $I(t_j)$ 表示变迁 t_j 的所有输入库所的集合。

2 信号交叉口的 Petri 网模型

2.1 基于 TdPN 的交叉口车流模型

针对中小流量交叉口，本文研究对象为单个双向六车道十字交叉口模型，如图 1 所示。该交叉口总共有 24 车道 lane_x, ($x = 1, 2, \dots, 24$)，每个进口道分为左转、直行和右转车道，等待进入交叉口区域的车辆禁止随意变道。交叉口区域按逆时针方向分为 A、B、C、D 共 4 部分。各方向的交通流由左转车流（lane_1、lane_7、lane_13、lane_19）、直行车流（lane_2、lane_8、lane_14、lane_20）和右转车流（lane_3、lane_9、lane_15、lane_21）组成。

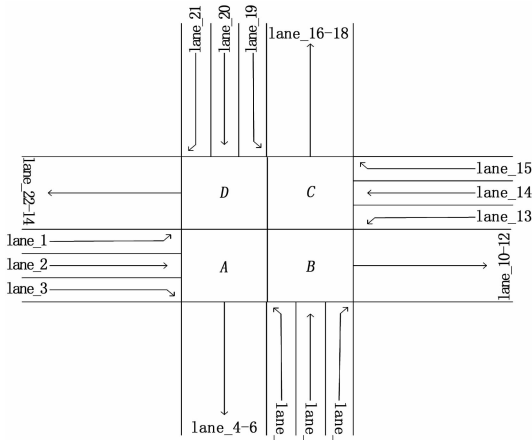


图 1 双向六车道交叉口模型

交叉口车流时延 Petri 网模型如图 2 所示。图中黑色条形表示即时变迁，白色条形表示延时变迁，圆圈表示库所。变迁模拟驶入和离开交叉口车流队列的事件，库所表示等待队列。相应变迁以及库所的含义如表 1 所示。

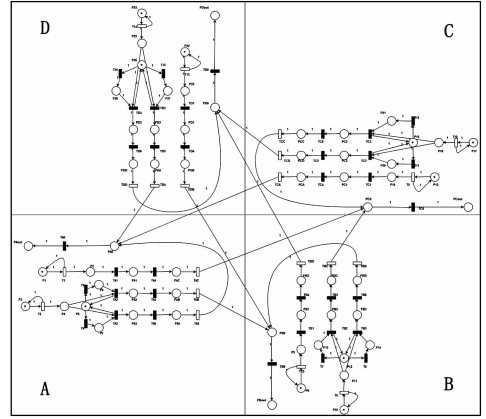


图 2 交叉口时延 Petri 网模型

表 1 相应变迁以及库所的含义

类型	名称	含义
库所	$Pm_1 (m_1 = 1, 3, 8, 10, 15, 17, 22, 24)$	存放下一次变迁触发生成的车辆
变迁	$Tn_1 (n_1 = 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14)$	生成进入交叉口的车辆
库所	$Pm_2 (m_2 = 2, 4, 9, 11, 16, 18, 23, 25)$	准备进入交叉口各进口道的车辆
变迁	$Tn_2 (n_2 = 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16)$	根据转向率分配直行和右转车流的过程
变迁	$TX1, TX2, TX3 (X \in \{A, B, C, D\})$	车辆进入 X 部分左转、直行/右转车道的过程
库所	$PX1, PX2, PX3 (X \in \{A, B, C, D\})$	在 X 部分左转、直行/右转车道等待的车辆
变迁	$TX4, TX5, TX6 (X \in \{A, B, C, D\})$	模拟车辆从 X 部分各车道进入交叉口的过程
库所	$PXX^x (X = A, X^x \in \{C, B, A\}; X = B, X^x \in \{D, C, B\}; X = C, X^x \in \{A, D, C\}; X = D, X^x \in \{B, A, D\})$	从 X 部分左转、直行/右转车道驶入 X 部分的车辆
变迁	$TXX (X, X^x \in \{A, B, C, D\})$	模拟车辆从 X 部分到 X' 部分通过交叉口
库所	$PX0 (X \in \{A, B, C, D\})$	从 X 部分驶离交叉口的车流队列
变迁	$TX0 (X \in \{A, B, C, D\})$	模拟车辆离开 X 部分
库所	$PXout (X \in \{A, B, C, D\})$	X 部分的出口车流队列

变迁 Tn_1 表示车流平均时间间隔满足参数为 λ 的指数分布，库所 $TX1$ 、 $TX2$ 、 $TX3$ 里存放的托肯数表示从车道 lane_x 等待进入交叉口的车流队列长度。本文通过控制变

迁 Tn_2 触发条件, 从而将库所 Pm_2 中的车流根据不同的转向率分配给直行和右转车道。假设库所 Pm_2 中的车辆数为 num , $T3$ 的激活概率为 α , $T4$ 的激活概率为 β , 其中 $\alpha + \beta = 1$, 则有 $\alpha \times num$ 辆车直行和 $\beta \times num$ 辆车右转。

2.2 基于 TdPN 的信号控制模型

本文根据图 3 四相位固定相序信号控制方案, 其中相应相位对应车流如表 2 所示, 并构建了图 4 的固定相序时延 Petri 网模型。固定时延变迁 $T1g'$ 、 $T2g'$ 、 $T3g'$ 、 $T4g'$ 表示每个相位的有效绿灯时间, 固定时延变迁 $T1_lost$ 、 $T2_lost$ 、 $T3_lost$ 、 $T4_lost$ 表示每个相位的损失时间, 其中包括黄灯时间和驾驶司机的反应时间。信号周期为各相位有效绿灯时间和损失时间之和。库所 PAL' 、 PCL' 、 $P4_lost$ 的初始标识为 1, $Txw4-1'$ 被使能, 经过延迟时间 $\delta_{Txw4-1'}$ 后, $Txw4-1'$ 触发, 库所 PBS' 、 PDS' 、 $P1ga'$ 托肯数由 0 变 1。当库所 PBS' 和 PDS' 中含有托肯时, 交叉口车流模型中的变迁 $PB5$ 和 $PD5$ 被使能, 经过有效绿灯时间 δ_{T1g} 后, 变迁 $T1g'$ 触发, 库所 $P1gb'$ 托肯数增 1; 变迁 $T1_lost$ 被使能, 经过损失时间 δ_{T1_lost} 后变迁 $T1_lost$ 触发。此时, 固定时延变迁 $Txw1-2'$ 被使能, 这也表示交叉口信号控制从相位 1 转为相位 2, 处于相位 1 的车辆不允许进入交叉口。

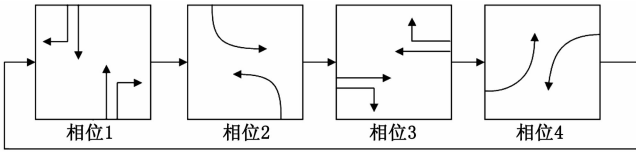


图 3 交叉口车流示意图

表 2 各相位对应车流

相位	车流
1	lane_20, lane_21, lane_8, lane_9
2	lane_19, lane_7
3	lane_2, lane_3, lane_14, lane_15
4	lane_1, lane_13

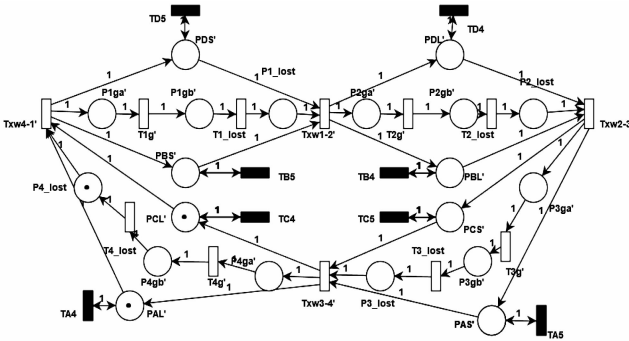


图 4 固定相序时延 Petri 网模型

考虑到城市交叉口进口道到达车辆的随机性, 本文在四相位固定相序信号控制模型的基础上进行改进, 从而形成图 5 所示的四相位可变相序信号控制模型。假设库所

PDS、PBS 所在区域为第 1 相位, 按其顺时针方向依次为第 2-4 相位。

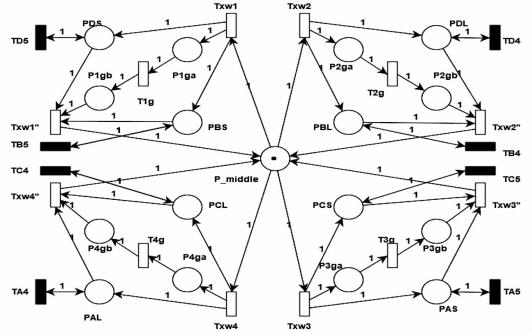


图 5 可变相序时延 Petri 网模型

固定时延变迁 $T1g$ 、 $T2g$ 、 $T3g$ 、 $T4g$ 表示每个相位的有效绿灯时间; $Txw1'$ 、 $Txw2'$ 、 $Txw3'$ 、 $Txw4'$ 表示每个相位的损失时间之和。信号周期为各相位有效绿灯时间和损失时间之和。库所 P_middle 的初始标识为 1。

3 四相位可变相序模型控制方法

3.1 引入马尔可夫链过程

假设各进口道变迁 Tn_1 的车辆到达过程是参数为 λ 的泊松过程, 车流到达时间序列 $T_k, k = 1, 2, \dots$ 满足相互独立同参数的指数分布。本文在泊松分布采集车辆数的基础上, 建立马尔可夫模型, 使车辆到达间隔时间在每隔一段时间进行更新迭代时, 以一定的概率选择不同状态, 模拟实际路口车辆到达的随机性。

马尔可夫链的特性为: 在给定现在状态时, 它与过去状态是条件独立的。本文马尔可夫跳转过程有 3 个状态, 即 $case_1$ 、 $case_2$ 、 $case_3$ 三种不同车辆到达分布, 假设系统的初始状态为 $case_1$, 以 200s 为周期更新状态; 系统的状态转移概率为 $pm_n (m = 1, 2, 3; n = 1, 2, 3)$, 则状态转移概率矩阵 P_case 为:

$$P_case = \begin{bmatrix} p_{1_1} & p_{1_2} & p_{1_3} \\ p_{2_1} & p_{2_2} & p_{2_3} \\ p_{3_1} & p_{3_2} & p_{3_3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

p 是 0~1 的随机数, 由 p 和 pm_n 之间的关系来决定满足泊松分布的车流到达时间间隔状态。假设系统的当前状态为 $case_3$ 且 $p_{3_3} > p_{3_1} > p_{3_2}$, 如果 $p \geq p_{3_3}$, 状态保持不变, 下一时刻的状态仍为 $case_3$; 如果 $0 < p < p_{3_2}$, 系统下一时刻的状态跳到 $case_2$; 否则系统下一时刻的状态则为 $case_1$ 。具体跳转流程如图 6 所示。

3.2 可变相序模型相位随机选择及跳转过程

1) 根据图 5 四相位可变相序时延 Petri 网模型, $Txw1$ 、 $Txw2$ 、 $Txw3$ 、 $Txw4$ 分别表示系统处于第 1、2、3、4 相位。当 P_middle 中含有托肯时, 按照式 (4) 比较各相位进口道库所的队列长度总和 $length_x, (x = 1, 2, 3, 4)$, 将通行权赋予排队长度最大的相位。由于本文是按照

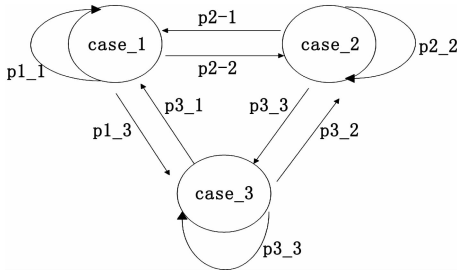


图 6 马尔可夫链模型

左转：右转/直行=2：8 的比例来分配车辆的，则在比较队列长度时，给左转库所分配权重 γ 。

$$length_x = \begin{cases} \text{if } x = 1, PD2. tokens + PB2. tokens \\ \text{if } x = 3, PA2. tokens + PC2. tokens \\ \text{if } x = 2, \gamma \times (PD1. tokens + PB1. tokens) \\ \text{if } x = 4, \gamma \times (PA1. tokens + PC1. tokens) \end{cases} \quad (4)$$

其中：PX1. tokens 和 PX2. tokens ($X \in A, B, C, D$) 表示进口道库所的队列长度。

2) 例如，当检测到库所 P_middle 中的托肯数为 1 时，如果第 2 相位的两个进口道库所 PD1 和 PB1 的队列长度 $length_2$ 最大，则变迁 T_{xw2} 被使能，经过相应延迟时间 $\delta_{T_{xw2}}$ 后， T_{xw2} 被触发。此时，变迁 $TD4$ 和 $TB4$ 被使能，即允许第 2 相位的车流进入交叉口；变迁 $T2g$ 被使能。考虑到相位绿灯时间并未结束，但进口道车辆排队数很少的情况，为了充分利用绿灯剩余时间， $T2g$ 被使能后会出现两种情况。

情况 1：变迁 $T2g$ 被使能，比较当前该相位进口道库所 PD1 和 PB1 的队列长度 $length_2$ 与固定值 k 的大小。当 $length_2 < k$ 时，立即结束有效绿灯时间， T_{xw2} 被使能，经过延迟时间 $\delta_{T_{xw2}}$ 后， T_{xw2} 被触发，库所 PBL 、 PDL 、 $P2gb$ 中的托肯转移到库所 P_middle 中，说明结束第 2 相位对整个交叉口信号系统的控制，B 区域的左转车道与 D 区域的左转车道上的车辆禁止进入交叉口。从而系统转至 a)。

情况 2：变迁 $T2g$ 被使能，当 $length_2 \geq k$ 时，经过延迟时间 δ_{T2g} 后， $T2g$ 被触发。托肯从库所 $P2ga$ 移入库所 $P2gb$ 中， T_{xw2} 被使能，经过对应延迟时间 $\delta_{T_{xw2}}$ 后， T_{xw2} 被触发，库所 PBL 、 PDL 、 $P2gb$ 中的托肯转移到库所 P_middle 中，系统转至 a)。

4 仿真与比较分析

本文以 Matlab R2016a 与 PIPEv4.3.0 为仿真工具，对交叉口时延 Petri 网模型进行仿真分析。在 PIPEv4.3.0 中搭建静态十字交叉口车流模型和信号控制 Petri 网模型，生成对应的 XML 文件。通过 Matlab 读取 XML 文件并进行动态地仿真分析。

为了试验本文方法的有效性，根据中小交通流量下的城市交叉口，本文选取 3 种车辆到达分布状态，即 $case_1$ 、 $case_2$ 、 $case_3$ 的车流负载分别为 2800 veh/h、

2000 veh/h、3200 veh/h，假设进口道车辆直行右转的比例为 6：4。变迁 Tn_1 的对应时间间隔为 δ_{Tn_1} 秒，如表 3 所示。

表 3 变迁 Tn_1 的对应时间间隔

状态	δ_{T1}	δ_{T2}	δ_{T5}	δ_{T6}	δ_{T9}	δ_{T10}	δ_{T13}	δ_{T14}
$case_1$	15	3.75	225	56.25	25.71	6.43	21.95	5.49
$case_2$	360	90	22.5	5.625	36	9	27.7	6.9
$case_3$	12.41	3.1	18.95	4.74	24	6	360	9

根据马尔可夫链模型，本实验设置的马尔可夫状态转移概率矩阵 P_case 如式 (5) 所示：

$$P_case = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.05 & 0.05 \\ 0.05 & 0.9 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{bmatrix} \quad (5)$$

本文以 Webster 延误模型^[11]和马尔可夫链平稳分布^[12]后的车辆到达状态为基础进行初始配时，将交叉口车辆平均延误时间作为目标函数，通过遗传算法对该单目标函数进行优化求解最优信号配时。单目标优化模型如下式 (6)：

$$F = \min D = \min \frac{\sum_i \sum_j D_{ij} q_{ij}}{\sum_i \sum_j q_{ij}} = \min \left(\frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-\lambda_i x_{ij})} + \frac{x_{ij}^2}{2q_{ij}(1-x_{ij})} \right) \quad (6)$$

约束条件为：

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (7)$$

$$G_{ei\min} \leq G_{ei} \leq C_{ei\max} \quad (8)$$

$$x \leq 0.9 \quad (9)$$

其中， D 表示交叉口车辆平均延误时间； D_{ij} 表示第 i 相位第 j 车道的每辆车平均延误时间； q_{ij} 表示第 i 相位第 j 车道的车流量； C 表示交叉口信号周期长度； λ_i 表示第 i 相位绿信比^[13]； x_{ij} 表示第 i 相位第 j 车道的饱和度； C_{\min} 表示交叉口信号最小周期长度； C_{\max} 表示交叉口信号最大周期长度； G_{ei} 为各相位有效绿灯时间； $G_{ei\min}$ 表示第 i 相位最小绿灯时间； $G_{ei\max}$ 表示第 i 相位最大绿灯时间； $i = 1, 2, \dots, n$ ， n 为相位数； $j = 1, 2, \dots, m$ ， m 为车道数。

仿真实验设置：1) 初始种群个数为 50；2) 交叉概率为 0.8；3) 变异概率为 0.05；4) 最大进化代数 500，仿真结果在 384 代开始趋于最优解，第 1、2、3、4 相位的有效绿灯时间分别为 15 s、8 s、24 s、11 s，每个相位的损失时间为 3 s。

本文采用对比实验，单次仿真总时间为 3 600 s，以车流队列的平均排队长度为定量指标，将上述最优配时用于基于 TdPN 的固定四相位和可变四相位模型，比较二者在整个仿真周期的平均排队长度。采用 Matlab 和 PIPE 工具，运行 20 次仿真后取平均值。交叉口进口道车辆排队情况的统计结果如图 7 所示。

由图 7 数据可以看出，在 20 次仿真实验下，四相位可变相序离散模型的平均排队长度比四相位固定相序模型的平均排队长度降低了约 8.9%；由图 8 数据可以看出，四相

位可变相序模型的左转队列平均等待车辆数比四相位固定相序的左转队列长度下降了约 2.9%，四相位可变相序的直行队列平均等待车辆数比四相位固定相序的直行队列车辆数下降了约 12.3%。根据仿真结果表示，随着交叉口进口道车流负载的随机变化，四相位可变相序控制模型减少了车辆的排队长度，缓解路口拥堵的情况，有效提高了路口通行效率。

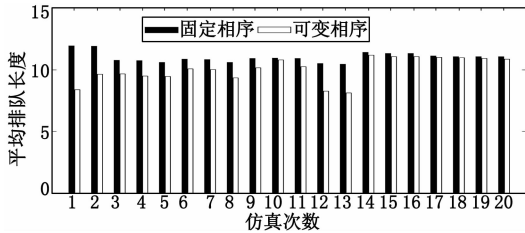


图 7 平均排队长度

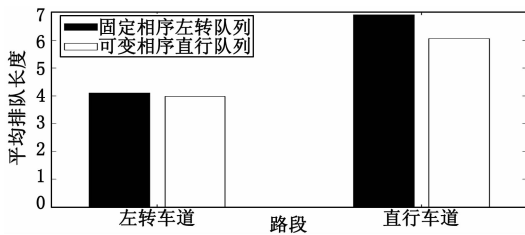


图 8 左转/直行平均排队长度

6 结束语

本文采用基于 TdPN 的中小流量交叉口可变相序控制模型，通过引入马尔可夫链模型，实现交叉口车辆生成的随机性。四相位可变相序信号控制模型根据进口道实时排队长度进行相位随机选择以及跳转，较好地实现对车流负载不均匀交叉口的控制。根据遗传算法得到系统的最优配时，并进行了仿真实验，在固定周期的信号控制下，随着系统负载的周期性变化，四相位可变相序控制模型的平均排队长度优于四相位固定相序控制模型，有利于城市交叉口的交通资源能得到最大限度的利用。

(上接第 96 页)

又能达到较高的配料精度。从系统的运行情况看，自适应模糊控制方法较之一般的模糊控制，更加适应不同配方参数对控制系统的要求，使产品合格率得到了保证。

参考文献:

[1] 高锋阳, 等. 混凝土搅拌站动态配料系统控制算法及误差控制研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2008 (12): 137-140.
 [2] 曾光奇, 等. 模糊控制理论与工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006
 [3] 朱全印. 基于 LK 的混凝土搅拌站控制系统 [J]. 四川水泥, 2017 (12): 340, 110.
 [4] 刘 强. 计量秤 PID 技术在充填混凝土搅拌站自动配料控制中

参考文献:

[1] Hu W B, Wang H, Du B, et al. A multi-intersection model and signal timing plan algorithm for urban traffic signal control [J]. Transport, 2017, 32 (4).
 [2] 徐建闽, 李岩林, 翟春杰, 等. 基于短时交通流预测的单交叉口自适应控制 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2018, 37 (9): 73-78.
 [3] 姚志洪, 蒋阳升, 王 逸. 车路协同环境下自适应信号配时优化模型 [J]. 工业工程, 2018, 21 (4): 8-14, 33.
 [4] Dicesare F, Kulp P T, Gile M, et al. The application of Petri nets to the modeling, analysis and control of intelligent urban traffic networks [M]. Application and Theory of Petri Nets, 1994.
 [5] 王列伟, 吴 朔, 胡俊华. 基于 Petri 网的道路交叉口建模方法及比较研究 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (14): 211-216, 248.
 [6] 上官伟, 崔晓丹, 郑子茹, 等. 基于 TdPN 的无信号交叉口优化控制方法 [J]. 中国公路学报, 2016, 29 (3): 124-133.
 [7] 安毅生, 雷 甜, 袁绍欣, 等. 基于 TCPN 的交叉口信号控制模型与优化 [J]. 计算机应用研究, 2016, 33 (1): 194-198, 244.
 [8] Febraro A D, Giglio D, Sacco N. A deterministic and stochastic Petri net model for traffic-responsive signaling control in urban areas [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17 (2): 510-524.
 [9] 牟海波, 俞建宁, 刘林忠. 基于混合 Petri 网的单点信号优化感应控制 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46 (7): 2727-2734.
 [10] 牟海波, 俞建宁, 刘林忠. 基于混合 Petri 网的交叉口交通信号控制研究 [J]. 控制工程, 2012, 19 (5): 771-774.
 [11] Webster F V. Traffic signal setting [J]. Road Research Technical Paper, 1958, 39.
 [12] 刘 克. 实用马尔可夫决策过程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
 [13] 李振宸. 城市交通干道信号协调控制研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.

的应用 [J]. 电工技术, 2014 (6): 31-32.
 [5] 王泰华, 等. 基于 Backstepping 的自适应模糊控制算法研究 [J]. 自动化仪表, 2017, 38 (9): 36-39.
 [6] 何小宁, 等. 多变量模糊控制系统的结构分解及其应用 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (5): 452-454, 467.
 [7] 诸 静, 等. 模糊控制原理与应用 [M]. 北京. 机械工业出版社, 2001.
 [8] 张明君, 等. 一种控制增益函数未知的自适应模糊控制 [J]. 大连理工大学学报, 2014, 54 (2): 257-261.
 [9] 栾洪海. 混凝土搅拌站模拟器研制与开发 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
 [10] 《混凝土强度检验评定标准》(GB/T50107-2010) [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.