

文章编号:1671-1637(2013)02-0106-08

基于 Petri 网的城市主干道交通信号协调优化

牟海波,俞建宁,刘林忠

(兰州交通大学 交通运输学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究城市主干道交通信号协调优化问题,建立了包括交叉口交通信号显示模块与信号相位转换模块的时延 Petri 网模型与基于变速度连续 Petri 网的交通流模型,设计了由监控、判别和通行相位选择 3 个子系统构成的交通信号控制系统,并给出了具体的控制步骤。根据连续 Petri 网中各参数间的关系,以车辆排队长度、上游路段车流速度和下游路段畅通度为输入变量,以相位优先指数为输出变量,确定下一通行相位,采用模糊 Petri 网确定当前相位的最佳绿灯时间,并进行了仿真计算。仿真结果表明:采用 Petri 网与模糊控制相结合的方法后,由西向东与由东向西方向车流的行程时间分别缩短了 7.1%、7.6%,交叉口排队长度的改进率分别为 11.9%、11.2%,4 个相位的交叉口平均延误分别由 9.7、10.3、11.8、13.2 s 下降到 8.2、9.1、11.4、11.4 s。可见,主干道信号协调优化方法可以较好地实现干线信号协调控制。

关键词:交通信号控制;协调优化;模糊控制;Petri 网;优先指数

中图分类号:U491.51 **文献标志码:**A

Traffic signal coordinated optimization of urban arterial road based on Petri net

MU Hai-bo, YU Jian-ning, LIU Lin-zhong

(School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To study the traffic signal coordinated optimization of urban arterial road, a timed Petri net model with a traffic signal display module and a signal phase transition module, and a traffic flow model based on continuous Petri net with variable speeds were established. A traffic signal control system composed of 3 subsystems for monitoring, discriminating and current phase selecting was designed, and concrete control steps were presented. Considering the relationship of parameters in continuous Petri net, next green phase was determined by taking vehicle queue length, traffic flow velocity at upstream section and open degree at downstream section as input variables, and phase priority indexes as output variables. The superior green time of current phase was determined by using fuzzy Petri net, and a simulation calculation was carried out. Simulation result indicates that by combining Petri net with fuzzy control, travel times respectively shorten by 7.1% and 7.6% for west-to-east and east-to-west traffic flow, and the improvement rates of queue length at intersection are 11.9% and 11.2% respectively. The average delays of four phases at intersection decrease from 9.7, 10.3, 11.8, 13.2 s to 8.2, 9.1, 11.4, 11.4 s respectively. So, traffic signal coordinated control on urban arterial road is better realized by using traffic signal coordinated optimization method. 4 tabs, 8 figs, 15 refs.

Key words: traffic signal control; coordinated optimization; fuzzy control; Petri net; priority index

收稿日期:2012-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(71161016);兰州交通大学青年基金项目(2011023)

作者简介:牟海波(1977-),女,辽宁朝阳人,兰州交通大学讲师,工学博士,从事交通信息工程与控制研究。

Author resume: MU Hai-bo(1977-), female, lecturer, PhD, +86-931-4938025, mhbmmm@mail.lzjtu.cn.

0 引言

城市交通系统的主干道承载着交通网络中的大部分车流,所以干道交叉口的信号协调控制策略对交通系统的运行效率起着决定性作用。目前,协调控制主要采用最大绿波带法、最小延误法等优化交叉口相位差。Tian 等为了解决包含多个交叉口的较大线控系统的相位差优化问题,根据最大绿波带法设计了以延误、停车次数和行车速度为目标的启发式算法^[1];Liu 等以最大化主干道效率为目标,考虑溢出交通流间的相互影响,提出了优化主干道信号配时的数学模型,并采用元胞自动机、遗传算法等方法求解^[2-3];王正武等考虑上、下行相位差之间的关系,以系统总延误最小为目标建立了同时优化共用周期、绿信比和双向相位差的模型,并采用改进粒子群优化算法求解^[4];Gartner 等提出了为主干道每个方向提供连续绿波带的数学规划方法^[5];万绪军等以沿干线双向行驶的车辆延误最小为目标,建立线控系统相位差调节的优化模型,为干线交通流畅通提供了一种优化控制方法^[6]。以上研究对保持车流畅通、缓解交通拥堵起到了一定的积极作用,然而,由于交通系统为复杂巨系统,很难用精确的数学模型来表示,因此,实际应用中,上述方法存在考虑因素简单、模型复杂等局限性。城市交通系统为事件驱动的异步系统,具有高度并发性、资源共享性、冲突性以及动态性。为得到有效的交通控制策略,选择恰当的模型来精确描述城市交通系统的特性及动态行为且便于进行仿真计算尤为重要。

Petri 网在描述并发性与异步性方面具有无可比拟的优势,因此,适用于城市交通系统建模与仿真。Febbraro 等用 Petri 网建立了由路段与信号控制交叉口构成的交通网络模型,提出了基于赋时 Petri 网的交通信号控制方法^[7];Tolba 等采用混合 Petri 网建立了城市交通网络模型,分析了交通流参数与混合 Petri 网参数的对应关系,从宏观与微观方面分析了模型的适应性^[8];Dotoli 等采用赋时着色 Petri 网建立了城市交通网络的框架模块,并通过仿真比较了固定信号与信号周期固定情况下,各相位绿灯时间动态调整时的有关指标^[9];List 等探讨了 Petri 网在交通信号控制中的应用,并通过 P 不变量对其进行结构分析^[10];Barzegar 等结合自适

应模糊着色 Petri 网、模糊推理规则和自动学习机制,研究了交叉口交通信号控制问题^[11];Julvez 等以最小化车辆延误为目标,基于连续 Petri 网建立了城市交通网络模型并进行仿真^[12]。然而以上研究中,系统无法根据预测到的车流量优化信号设置,在考虑当前相位绿灯时间时,忽略了相邻交叉口车流情况,极有可能加重下游交叉口的负担,从而造成交通拥堵。

本文建立了城市交通网络的 Petri 网模型,建立由信号显示层、信号相位控制层和优化协调层构成的信号协调控制系统,充分考虑上下游路段车流的动态属性,采用模糊控制技术研究城市主干道交通信号协调控制问题,并进行了交通仿真与分析。

1 变速度连续 Petri 网基本理论

变速度连续 Petri 网是由 P 、 T 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{A} 、 \mathbf{M}_0 、 \mathbf{V} 构成的六元组^[13],其中

$$P = \{p_d \mid d = 1, 2, \dots, n\}$$

$$T = \{t_j \mid j = 1, 2, \dots, m\}$$

$$\mathbf{B} = [b(p_d, t_j)]_{n \times m}$$

$$\mathbf{A} = [a(p_d, t_j)]_{n \times m}$$

$$\mathbf{M}_0 = [m_0(p_d)]$$

$$\mathbf{V} = (v_j)$$

$$P \cap T = \emptyset$$

$$P \cup T \neq \emptyset$$

式中: P 、 T 分别为有限的库所集与变迁集; \mathbf{B} 、 \mathbf{A} 分别为前向与后向关联函数矩阵; \mathbf{M}_0 为库所的初始标识向量,其他状态的标识向量为 \mathbf{M} ; \mathbf{V} 为变迁的最大触发速度向量; p_d 为库所集 P 中的第 d 个库所; t_j 为变迁集 T 中的第 j 个变迁; $b(\cdot)$ 为 t_j 与其输入库所 p_d 之间弧上的权值; $a(\cdot)$ 为 t_j 与其输出库所 p_d 之间弧上的权值; $m_0(p_d)$ 为库所 p_d 的初始标识,标识用托肯表示,其他状态下 p_d 的标识记为 $m(p_d)$; v_j 为变迁 t_j 的最大触发频率。

将变迁 t_j 的输入库所集记为 t_{ij} ,在标识 \mathbf{M} 下,当 $p_d \in t_{ij}$,均有 $m(p_d)$ 大于 0,则 t_j 使能程度 $E(t_j, \mathbf{M})$ 为

$$E(t_j, \mathbf{M}) = \min_{p_d \in t_{ij}} \left[\frac{m(p_d)}{b(p_d, t_j)} \right] \quad (1)$$

若一般离散 Petri 网的每个变迁 t_j 都对应一个表示触发时间的非负实函数 u_j ,则称为时延 Petri 网;若

u_j 为 0, 则 t_j 为瞬时变迁; 若 u_j 大于 0, 则 t_j 为时延变迁。本文中实心矩形、短横线和空心矩形分别表示时延变迁、瞬时变迁和连续变迁, 圆与同心圆分别表示离散库所与连续库所, 黑点表示托肯。

2 基于 Petri 网的 城市交通网络模型

2.1 交通流模型

图 1(a) 为城市交通网络中的交叉口, 东、南、西、北 4 个方向的交通流均由左转、直行、右转车流构成, 通过埋设 在各车道相应位置的 2 个磁感应线圈获得进出交叉口的车流量信息, 二者之间的范围为检测区。1、2、5、6 为直行与右转车流, 3、4、7、8 为左转车流。本文采用图 1(b) 的 4 相位信号控制方案。

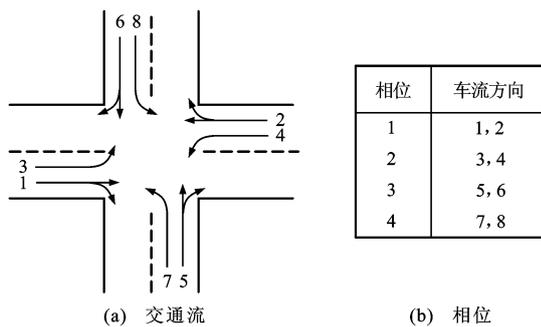


图 1 交叉口交通流与相位

Fig. 1 Traffic flow and phases at intersection

考虑东西方向为主要交通流方向的城市主干道, 以图 1(b) 信号控制方案为基础, 建立交叉口 l 的交通流连续 Petri 网模型见图 2, 其中库所 p_{ia} 、 p_{ib} 、 p_{ic} 分别为 i 方向等待进入交叉口的车流、检测区内的车流以及检测区剩余位置数, $i=1\sim 8$; ϵ_i 为库所 p_{ia} 的标识, 代表 i 方向同时通过交叉口的车辆上限, $i=1\sim 8$; 库所 p_{ih} 的标识表示离开交叉口后从 i 方向进入路段的车流, $i=1\sim 4$; 变迁 t_{ia} 、 t_{if} 、 t_{il} 一旦被触发, 代表 i 方向的车流到达、进入检测区以及离开交叉口, $i=1\sim 8$; 变迁 t_{we} 、 t_{ew} 被触发分别代表车流离开交叉口后进入由西向东、由东向西方向的路段; p_{we} 、 p_{ew} 的标识分别代表由西向东、由东向西方向路段上的车流; $\delta_{l,i,1}$ 、 $\delta_{l,i,2}$ 分别为交叉口 l 第 i 个方向车流的右转与直行比例, $i=1, 2, 5, 6$ 。

为建立能反映交通流主要因素的模型, 采用空间离散化方法, 将 2 个交叉口之间的区域分为 3 部分, 即 2 个子区段与交叉口区 (检测区), 分别反映车流离开上游交叉口进入路段、车流在路段上的运行以及车流离开路段进入下游交叉口。将 2 个交叉口之间的区域总长度减去交叉口区长度后取平均即得

到每个子区段的长度。交叉口区的车流情况见图 2, 接下来描述路段上的交通流。以由西向东方向通过第 1 个交叉口后进入路段的交通流为例, 得到路段上的交通流模型, 见图 3。图 3 中: 库所 p_{s1} 、 p_{s2} 代表 2 个子区段, 其标识代表子区段上的车辆数; 变迁 t_{s0} 、 t_{s1} 、 t_{s2} 表示上游交叉口与下游子区段 1、子区段 1 与子区段 2、子区段 2 与交叉口区的分隔线; 库所 p'_1 、 p'_2 的标识代表 2 个子区段上剩余车辆位置数; 库所 p''_0 、 p''_1 、 p''_2 的标识 α_0 、 α_1 、 α_2 代表同时触发变迁 t_{s0} 、 t_{s1} 、 t_{s2} 的车辆数上限; 库所 p_L 的标识代表离开子区段 2 进入交叉口区的车流。令 $m_k(\tau)$ 为 τ 时刻库所 p_{sk} 的标识, $m'_k(\tau)$ 为库所 p'_k 的标识, N_k 、 q_k 、 L_k 、 V_k 、 ρ_k 分别为子区段 k 的容量、最大流率、长度、畅行速度、阻塞密度, v_k 为变迁的最大触发频率, 则有

$$\begin{cases} m_k(\tau) + m'_k(\tau) = N_k \\ \alpha_k = q_k L_k / V_k \\ v_k = V_k / L_k \\ N_k = \rho_k L_k \end{cases} \quad (2)$$

根据 Petri 网的模块化表示方法, 分别将图 2、3 作为交叉口区与路段的模块, 多个这样的模块综合在一起即可得到整个主干路的 Petri 网模型。

2.2 交叉口交通信号显示模块

车流的信号显示 Petri 网模型见图 4。图 4 中: 库所 p_g 、 p_y 、 p_r 一旦得到托肯, 表示当前车流信号显示绿灯、黄灯、红灯; p_z 代表控制系统中含有初始托肯的库所; $p_{\Delta 1}$ 、 $p_{\Delta 2}$ 代表根据红灯时间与排队车辆数决定是否结束当前车流绿灯时间的库所; 变迁 t_{g1} 、 t_{g2} 、 t_y 、 t_r 一旦被触发, 分别代表最短绿灯时间结束、实际绿灯时间结束、黄灯时间结束及红灯时间开始。对于任一车流, 当 p_g 得到一个托肯时, 该方向车流所在相位信号显示为绿灯, 瞬时变迁 t_0 立即被触发, p_1 、 p_2 、 p_3 各得到一个托肯, p_1 中的托肯允许车流通过交叉口。分别用 G_1 、 G_2 表示最短绿灯时间与最长绿灯时间, 经过 G_1 时间后, t_{g1} 被触发, p_2 失去托肯, p_4 得到托肯。 $p_{\Delta 1}$ 得到托肯的条件是某个相位的红灯时间已经达到规定的上限, $p_{\Delta 2}$ 得到托肯的条件是某个相位的排队车辆数达到阈值。当 $p_{\Delta 1}$ 得到托肯时, 变迁 t_1 被触发; 当 $p_{\Delta 2}$ 得到托肯时, 变迁 t_2 被触发; t_1 、 t_2 被触发都将使 p_4 失去托肯。若 $p_{\Delta 1}$ 、 $p_{\Delta 2}$ 均无法得到托肯, 则协调优化系统采用模糊 Petri 网方法确定当前相位的实际延长绿灯时间 G_3 , 当前相位的实际执行绿灯时间 G 为

$$G = G_1 + G_3 \quad (3)$$

该时间即为当前相位的最佳绿灯时间。经过

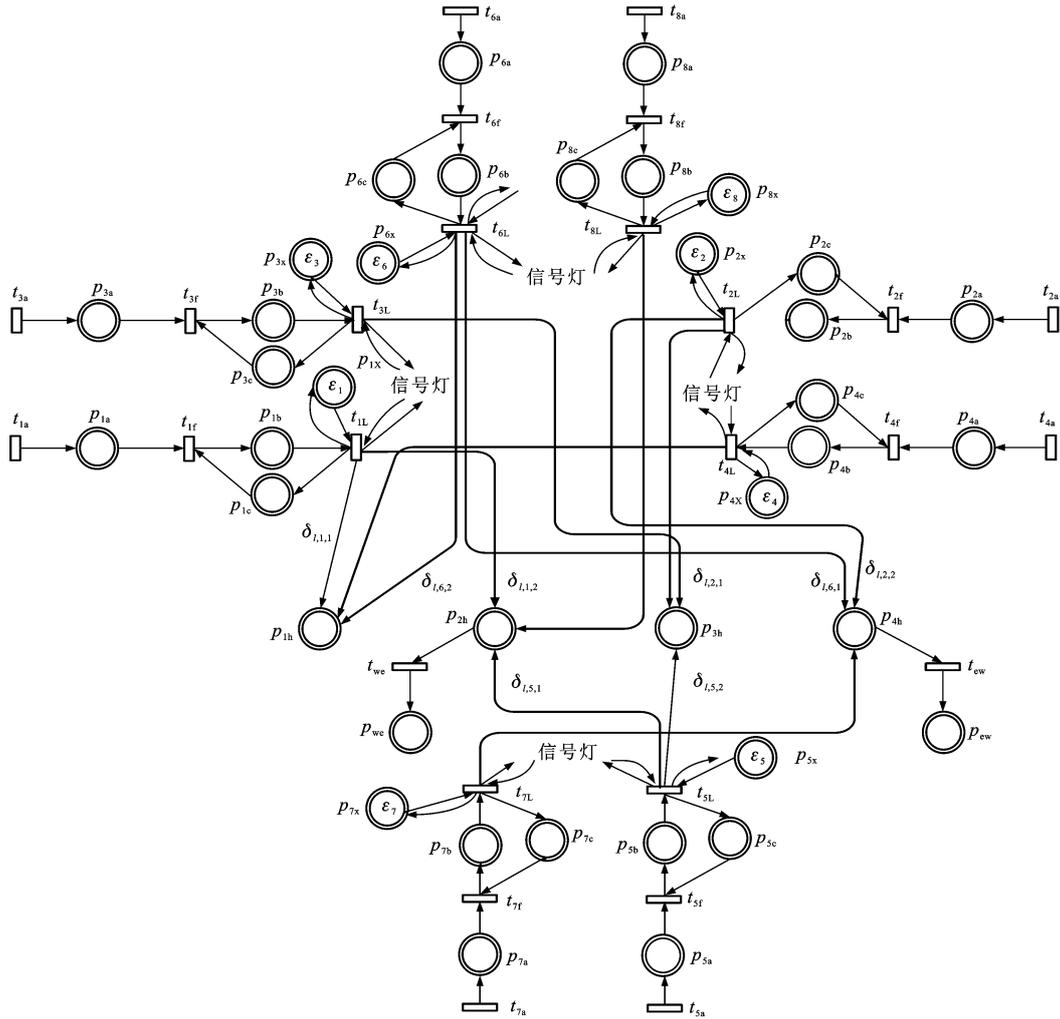


图 2 交叉口交通流连续 Petri 网模型

Fig. 2 Continuous Petri net model of traffic flow at intersection

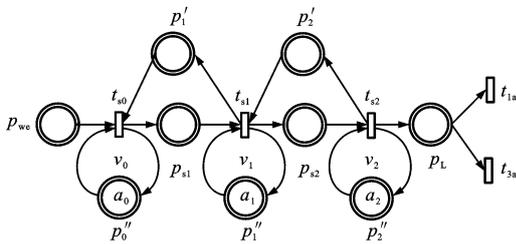


图 3 子区段交通流连续 Petri 网模型

Fig. 3 Continuous Petri net model of traffic flow at road section

G 时间后, t_{g2} 被触发, p_5 得到托肯, 继而 t_3 被触发, p_4 、 p_5 同时失去托肯。无论哪种情况使 p_4 失去托肯, p_y 将得到托肯使当前车流信号显示为黄灯。经过黄灯时间 Y 后 t_y 被触发, 黄灯时间结束, p_6 得到托肯继而触发 t_r , 使 p_r 得到托肯, 信号显示为红灯, 该车流被禁止通过交叉口。

2.3 信号相位转换模块

本文采用变相序信号控制方法, 为说明相位转换过程, 用库所 $p_{\gamma-\omega}$ 中的托肯表示由相位 γ 转换到

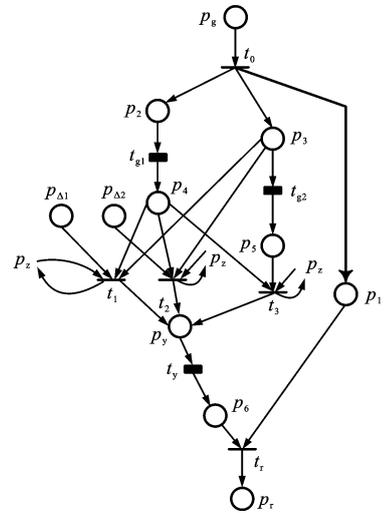


图 4 信号显示模块

Fig. 4 Signal display module

相位 ω , $\omega, \gamma = 1 \sim 4, \gamma \neq \omega$, 当满足相位转换条件时, p_z 中的托肯转移到特定的库所 $p_{\gamma-\omega}$ 中。在该模块

中用 p_{ig} 、 p_{iy} 、 p_{ir} 表示 i 方向的车流在信号显示模块中对应的库所 p_g 、 p_y 、 p_r ， $i=1\sim 8$ 。变迁 t_{z1} 、 t_{z2} 一旦被触发，代表相位转换开始与全红时间结束。假设某交叉口当前相位为第 1 相位，下一通行相位为第 2 相位，则相位转换 Petri 网模块见图 5。

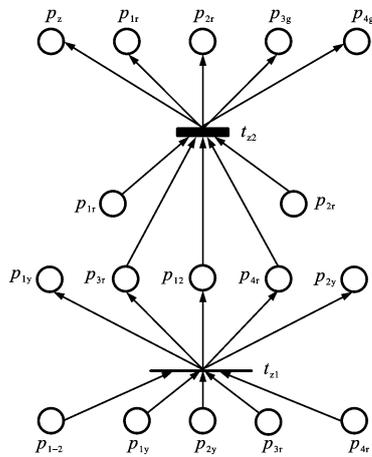


图 5 相位转换模块

Fig. 5 Phase transition module

当车流 1、2 信号显示黄灯，车流 3、4 信号显示红灯，且 p_{1-2} 得到托肯时，变迁 t_{z1} 被触发。库所 p_{12} 一旦得到托肯，代表正处于由相位 1 到 2 的转换过程中。 p_{1y} 、 p_{2y} 、 p_{3r} 、 p_{4r} 既是 t_{z1} 的输入库所，又是 t_{z1} 的输出库所，因此， t_{z1} 触发后， p_{1-2} 失去托肯，这 4 个库所的标识保持不变，同时 p_{12} 得到托肯显示当前正处于相位转换当中。当 p_{1r} 、 p_{2r} 得到托肯时，车流 1、2 信号都显示为红灯，时延变迁 t_{z2} 使能，经过时间 R 后（通常为 2 s）被触发，在这段时间内全部相位信号显示红灯。 t_{z2} 触发后托肯将被放到上面的 5 个库所中， p_{3g} 、 p_{4g} 中的托肯保证车流 3、4 信号显示绿灯，即允许第 2 相位车流通行， p_z 重新得到托肯，为下一次相位转换做好了准备。其他的相位转换逻辑与此相似。在一个相位转换过程中，由于 p_z 失去托肯，其他相位转换不能同时发生。相位转换结束后， p_z 重新得到托肯，其他相位转换可以发生，因此， p_z 中的托肯可以阻止 2 个相位转换同时发生。每个交叉口有 4 个相位，从当前相位出发可以转换到其他 3 个相位中的一个，因此，每个交叉口共有 12 个与图 5 相似的相位转换 Petri 网模块。

3 信号控制系统

信号控制系统由监控子系统、判别子系统和通行相位选择子系统构成。监控子系统检测每个车流在交叉口的排队长度，判别子系统判断某个相位当

前持续红灯时间 R_v 是否超过规定的上限，通行相位选择子系统决定下一个通行相位。控制系统的具体控制步骤如下。

Step 1: 当前相位的最短绿灯时间结束时，监控子系统检测 i 方向的车流在交叉口停留的车辆数，如大于阈值 F_i ，且 i 方向的车流属于 γ 相位，则将数值 γ 放入优先权集合 ψ 中，越先放入 ψ 的元素具有越大的优先权。

Step 2: 判别子系统判断若存在某个相位的 R_v 满足式(4)，则立刻执行该相位，否则转 Step 3

$$R_v \geq G_2 - G_1 - Y - R \quad (4)$$

Step 3: 判断集合 ψ 是否非空，若非空，则按照先进先出的原则，为 ψ 中排在第 1 位的相位提供绿灯，并将该元素从集合 ψ 中删除，否则转 Step 4。

Step 4: 继续执行当前相位，在当前相位绿灯时间结束时，通行相位选择子系统决定下一个通行相位，转 Step 1。

通行相位选择子系统有 3 个输入变量，为上游路段车流平均速度、红灯相位的交叉口排队长度以及下游路段畅通度，输出变量为相位的优先指数。

3.1 上游路段车流平均速度

为了有效控制一系列交叉口，应协同考虑相邻交叉口的情况，即本交叉口的交通信号应尽量与相邻路口保持一致以减少车辆停留时间，而且当下游路段较拥挤时，要控制本交叉口车辆的输出。用 $s_k(\tau)$ 表示 τ 时刻子区段 k 上车流的平均速度，则

$$s_k(\tau) = \frac{f_k(\tau)}{\rho_k(\tau)} = \frac{f_k(\tau)L_k}{m_k(\tau)} \quad (5)$$

式中： $f_k(\tau)$ 为平均流量； $\rho_k(\tau)$ 为车流密度。

为了表征离开上游交叉口车辆的动态特性，选取图 3 中第 1 个子区段上最近 3 s 车流的平均速度 $s_1(\tau)$ 作为输入变量。本交叉口某一红灯相位的排队长度 Q 仅反映本交叉口的情况，如果上游区段上的车流平均速度较大，则表明车辆从离开上游交叉口至到达本交叉口的剩余时间较短，为了尽可能为这些车辆提供绿波带，减少干道上的延误与停车率，需要给该相位较大的优先指数。通常每个相位车流的上游路段有 2 个，要选择 $s_1(\tau)$ 大的一个作为协调输入用的平均速度。为便于仿真，文献[12]在保证连续 Petri 网的性质不被破坏的前提下，提出离散化方法。 $m_d(\theta)$ 为 θ 阶段开始时库所 p_d 的标识， $f_j(\theta)$ 为通过变迁 t_j 的平均流量，则有

$$f_j(\theta) = v_j \min_{p_d \in t_{ij}} \left[\frac{m_d(\theta)}{b(p_d, t_j)} \right] \quad (6)$$

$\theta+1$ 阶段库所 p_d 的标识为

$$m_d(\theta+1) = m_d(\theta) + Hf_j(\theta)\sigma \quad (7)$$

式中: H 为托肯流, 等于前向与后相关联函数的差值; σ 为离散化后各个时间段的长度, 本文中为 3 s。

3.2 下游路段畅通度

选取下游路段畅通度作为输入变量, 是用来表征下游路段上的车辆状态, 当下游路段较拥堵时避免对其造成更严重的交通压力。路段上车辆数目多不一定阻塞程度高, 在交通需求量不超过通行能力的前提下, 如果平均流量比较大, 则向该路段输送车流不会造成交通拥堵。平均流量 $f_k(\tau)$ 与子区段长度、车辆数、下一个子区段可用车辆位置数等密切相关, 而区段车辆数及下一个子区段可用车辆位置数受到上下游交叉口交通信号的影响, 并且与路段上流入与流出的车辆数及速度有关。为此, 将 $f_k(\tau)$ 、 $m_k(\tau)$ 、 N_k 统一为一个畅通度参数 ξ 来衡量下游的拥挤程度。根据交通流基本图, 当 $f_k(\tau)$ 小于 q_k 时, 有拥堵与通畅 2 种情况, 为描述相同流量下对应的 2 种不同情况, 将下游路段上第 k 个子区段的畅通度 ξ_k 定义为

$$\xi_k = \max\left\{\frac{f_k(\tau)}{0.5 + m_k(\tau)/N_k}, \frac{1 - m_k(\tau)}{N_k}\right\} \quad (8)$$

取 q_k 为 $0.5 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$, 则 $\xi_k \in [0, 1]$, 下游路段的畅通度为

$$\xi = \min\{\xi_1, \xi_2\} \quad (9)$$

ξ 小于 0.5 对应拥堵状态, 此时应禁止上游路段向该路段输入车辆。通常每个相位车流的下游路段有 2 个, 要选择畅通度小的一个作为协调输入用的路段畅通度。

$s_1(\tau)$ 的模糊集为 {小, 中, 大}, 论域为 $[0, 40]$; Q 的模糊集为 {短, 中, 长}, 论域为 $[0, 20]$; ξ 为连续值, 其模糊集为 {低, 适中, 高, 很高}, 论域为 $[0, 1]$; 输出变量为各相位的优先指数 π , 模糊集为 {很小, 小, 适中, 大, 很大}, 论域为 $[0, 1]$ 。 $s_1(\tau)$ 、 Q 的隶属函数见图 6, 采用文献 [14] 的方法确定 ξ 、 π 的隶属函数。采用 Mamdani 方法与模糊中值法进行模糊推理与解模糊化, 选择优先指数 π 最大的相位作为下一个通行相位。

4 协调优化系统

在控制系统的通行相位选择子系统确定了下一个通行相位, 并执行了最短绿灯时间后, 若控制系统不给库所 $p_{\Delta 1}$ 、 $p_{\Delta 2}$ 托肯, 则协调优化系统采用模糊

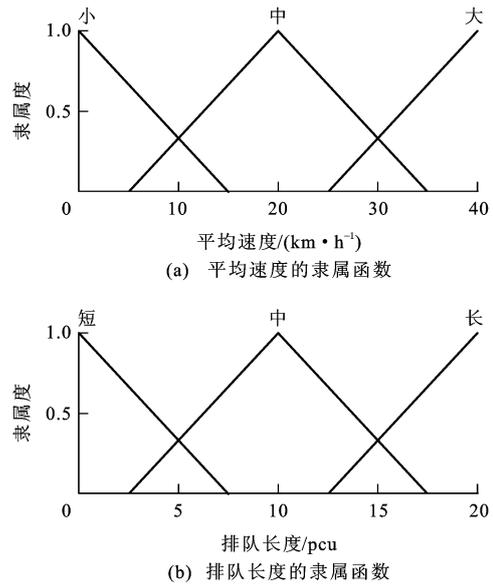


图 6 输入变量隶属函数

Fig. 6 Membership functions of input variables

Petri 网优化当前相位的绿灯延长时。模糊 Petri 网将 Petri 网的图形表现技术、模糊理论和模糊产生式规则有机结合 [15], 在推理分析过程中有着突出的优越性。若 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$ 为前提条件, η 为结果命题, 本文采用的推理规则为当所有前提条件对应的库所都含有托肯, 且这些库所均为代表推理的变迁的输入库所, 结果命题对应库所为该变迁的输出库所时, 结果命题以一定的真实度成立。

本文综合考虑当前相位的待通过车辆数 x_1 、本交叉口红灯相位持续红灯时间的最大值 x_2 、本交叉口绿灯相位下游路段密度的最大值来确定当前相位的绿灯延长时。 x_1 、 x_2 的隶属函数 $\mu(x_1)$ 、 $\mu(x_2)$ 分别为

$$\mu(x_1) = \begin{cases} x_1/20 & 0 \leq x_1 < 20 \\ 1 & x_1 \geq 20 \end{cases}$$

$$\mu(x_2) = \begin{cases} x_2/40 & 0 \leq x_2 < 40 \\ 1 & x_2 \geq 40 \end{cases}$$

计算当前相位绿灯延长时 G'_3 的自适应模糊 Petri 网见图 7, D_1 、 D_2 、 D_3 分别为当前相位待通过车辆数隶属度、红灯相位最大持续红灯时间隶属度以及下游路段密度, 由于最大持续红灯时间与下游路段密度对绿灯延长时起到负面影响, 因此, 令

$$\begin{cases} D'_2 = 1 - D_2 \\ D'_3 = 1 - D_3 \end{cases} \quad (10)$$

t_q 为代表模糊推理的变迁, p_q 为代表结果命题的库所, t_q 的输入权值 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为 0.5、0.3、0.2, $\lambda(t_q)$ 为变迁 t_q 的阈值, 取 0.4。将 D_1, D'_2, D'_3

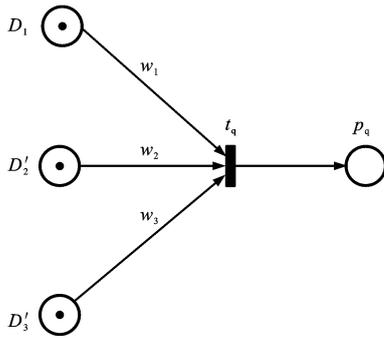


图 7 信号灯延时部分 Petri 网模型

Fig. 7 Petri net model of signal extension part

作为 3 个库所对应命题的真实度, D 为推理的结果, 若满足式(11), 则 t_q 被触发, p_q 得到托肯, 其真实度 $\chi(p_q)$ 取值为 D

$$D = D_1 w_1 + D_2 w_2 + D_3 w_3 \geq \lambda(t_q) \quad (11)$$

G'_3 由 p_q 中有无托肯及托肯的真实度确定, 为

$$G'_3 = \begin{cases} 0 & m(p_q)=0 \text{ 或 } \chi(p_q) < 0.3 \\ \text{int}[(G_2 - G_1)\chi(p_q)] & 0.3 \leq \chi(p_q) \leq 0.95 \\ G_2 - G_1 & \chi(p_q) > 0.95 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数。

若 R' 为最大允许红灯时间, 则实际绿灯延长时间 G_3 为

$$G_3 = \min\{G'_3, R' - \max(R_v) - 4\} \quad (13)$$

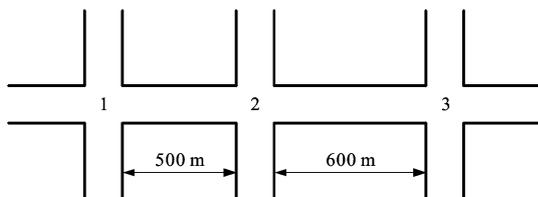


图 8 城市主干道

Fig. 8 Urban arterial road

5 仿真结果分析

本文以 MATLAB 与 C# 为仿真工具, 对图 8 中含有 3 个交叉口的主干道进行模拟仿真。交叉口间距离分别为 500、600 m, 令交叉口区长度为 100 m, 按照上文方法将交叉口间路段分为交叉口区、子区段 1、子区段 2。设交叉口 1、2 间与交叉口 2、3 间的路段自由流速度分别为 $15、20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 阻塞密度均为 $0.16 \text{ pcu} \cdot \text{m}^{-1}$, 最大流率均为 $0.5 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$, 按式(2)计算得到子区段参数结果见表 1。

设各交叉口的东西方向为双向六车道, 南北方向为双向四车道, 主线交叉口 3 个车道自内到外分别为左转车道、直行车道和直右混行车道。支线交

表 1 连续 Petri 网计算参数

Tab. 1 Calculated parameters of continuous Petri net

参数	交叉口 1、2		交叉口 2、3	
	子区段 1	子区段 2	子区段 1	子区段 2
α_k/pcu	6.67	6.67	6.25	6.25
N_k/pcu	32	32	40	40
V_k/s^{-1}	0.075	0.075	0.080	0.080

叉口内侧为左转车道, 外侧为直右混行车道。3 个交叉口车流的直行与右转比例见表 2。

表 2 车流的直行和右转比例

Tab. 2 Straight and right ratios of traffic flows %

交叉口	车流 1		车流 2		车流 5、6	
	右转	直行	右转	直行	右转	直行
1	10	85	10	85	20	70
2	12	80	12	80	20	70
3	8	87	8	87	20	70

设交叉口区容量为 16 pcu, $G_1、G_2、Y、R、R'$ 分别为 15、60、3、2、90 s, $F_i=12 \text{ pcu}, i=1、2、5、6, F_i=9 \text{ pcu}, i=3、4、7、8$ 。主线与支路方向车流到达为随机变量且服从均匀分布, 由东向西方向到达率为 $0.4 \sim 0.5 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$, 由西向东方向到达率为 $0.4 \sim 0.6 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$, 支路方向到达率为 $0.2 \sim 0.4 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ 。交叉口 1 初始标识 $m_0(p_{1b})$ 为 8, $m_0(p_{3b})$ 为 3; 交叉口 3 初始标识 $m_0(p_{2b})$ 为 6, $m_0(p_{4b})$ 为 4; 3 个交叉口 5、6、7、8 方向初始标识均为 5, 其余未给出的标识为 0。令 $\epsilon_i=0.3, i=1 \sim 8$, σ 为 3 s, 仿真时间为 150 s, 仿真 20 个周期。以车辆到达交叉口 1 与离开交叉口 3 在系统内的行程时间与排队长度为指标, 以交叉口 1 为关键交叉口, 信号周期为 80 s, 相对相位差为 30 s 时的一般线控系统得到的运行结果进行比较, 结果见表 3, 4 个相位车辆在交叉口的平均延误见表 4。

表 3 仿真结果对比

Tab. 3 Comparison of simulation results

方向	比较参数	本文方法	相对相位差为 30 s 的方法
西→东	行程时间/s	95.3	102.6
	排队长度/pcu	9.6	10.9
东→西	行程时间/s	93.6	101.3
	排队长度/pcu	8.7	9.8

由仿真结果可以看出, 由于由西向东方向到达率大于由东向西方向到达率, 故由西向东方向车辆在系统内的行程时间与排队长度略大于由东向西方向。采用本文方法时, 二者行程时间分别为 95.3、93.6 s, 比相对相位差为 30 s 时一般线控系统的行程时间分别缩短了 7.1%、7.6%, 车辆排队长度分

表 4 交叉口平均延误

Tab. 4 Average delay at intersection

相位	本文方法/s	相对相位差为 30 s 的方法/s	改进率/%
1	8.2	9.7	15.5
2	9.1	10.3	11.7
3	11.4	11.8	3.4
4	11.4	13.2	2.8

别为 9.6、8.7 pcu,改进率为 11.9%、11.2%。第 1、2 相位是主线方向车流畅行相位,根据信号控制系统的控制规则,这 2 个相位的绿灯时间较长。采用本文方法时,第 1、2 相位车辆在交叉口的平均延误较小,分别为 8.2、9.1 s,低于第 3、4 相位的交叉口平均延误,但采用本文方法时,4 个相位的平均延误均低于控制方法为相对相位差等于 30 s 时的平均延误。可以看出,本文主干道信号协调优化方法达到了减少车辆延误的目的。

6 结 语

(1)基于 Petri 网给出了交叉口和路段的交通流模型,以及信号显示、信号相位转换和信号控制模型,设计了由信号显示层、信号相位控制层和优化协调层构成的信号协调控制系统。

(2)将连续 Petri 网中的数量指标作为模糊控制的输入变量,设计了通行相位选择方法,并进行了仿真计算,得到了车流行程时间、排队长度和交叉口平均延误 3 项数量指标。仿真结果表明,本文主干道信号协调优化方法可以较好地实现干线信号协调控制。

(3)由于各相位车流的到达率对控制策略的稳定性有一定影响,今后应确定各相位到达率的有效范围,以确保控制方法的有效性。

参 考 文 献 :

References :

[1] TIAN Z, URBANIK T. System partition technique to improve signal coordination and traffic progression[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(2): 119-128.

[2] LIU Y, CHANG G L. An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19(1): 130-144.

[3] LI Z C. Modeling arterial signal optimization with enhanced cell transmission formulations[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137 (7): 445-454.

[4] 王正武,罗大庸,黄中祥,等.线控系统协调优化模型及其改进粒子群算法研究[J].系统工程理论与实践,2007,27(10): 165-171.

WANG Zheng-wu, LUO Da-yong, HUANG Zhong-xiang, et al. Optimal coordination of artery system based on modified particle swarm algorithm[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2007, 27(10): 165-171. (in Chinese)

[5] GARTNER N H, STAMATIADIS C. Arterial-based control of traffic flow in urban grid networks[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 35(5/6): 657-671.

[6] 万绪军,陆化普.线控系统中相位差优化模型的研究[J].中国公路学报,2001,14(2):99-102.

WAN Xu-jun, LU Hua-pu. An optimal offset model for artery traffic signal control system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 99-102. (in Chinese)

[7] FEBBRARO A D, SACCO N. On modelling urban transportation networks via hybrid Petri nets[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(10): 1225-1239.

[8] TOLBA C, LEFEBVRE D, THOMAS P, et al. Continuous and timed Petri nets for the macroscopic and microscopic traffic flow modelling[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2005, 13(5): 407-436.

[9] DOTOLI M, FANTI M P. An urban traffic network model via coloured timed Petri nets[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(10): 1213-1229.

[10] LIST G F, CETIN M. Modeling traffic signal control using Petri nets[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(3): 177-187.

[11] BARZEGAR S, DAVOUDPOUR M, MEYBODI M R, et al. Formalized learning automata with adaptive fuzzy coloured Petri net: an application specific to managing traffic signals[J]. Scientia Iranica D, 2011, 18(3): 554-565.

[12] JULVEZ J, BOEL R K. A continuous Petri net approach for model predictive control of traffic systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Human, 2010, 40(4): 686-697.

[13] RECALDE L, HADDAD S, SILVA M. Continuous Petri nets: expressive power and decidability issues[J]. Automated Technology for Verification and Analysis, 2007(4762): 362-377.

[14] 梁超,范炳全,韩印.区域交通流协调控制方法[J].交通运输工程学报,2011,11(3):112-117.

LIANG Chao, FAN Bing-quan, HAN Yin. Coordination control method of regional traffic flow[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3): 112-117. (in Chinese)

[15] 杨劲松,凌培亮.一种模糊 Petri 网的逆向知识推理方法设计实现[J].计算机科学,2009,36(12):158-160.

YANG Jin-song, LING Pei-liang. Design and implement on a backward reasoning algorithm based on fuzzy Petri net[J]. Computer Science, 2009, 36(12): 158-160. (in Chinese)