

基于干道绿波效应协同策略的信号配时模糊控制

张 屹

(广州大学华软软件学院软件工程系 广州 510990)

摘 要 随着城市道路交通量的增长、路网密度的增大,相邻路口之间的相关性日益明显。一个路口交通信号的调整往往影响到相邻若干个路口交通流的运行状况,其拥堵可能会随着时间推移逐步波及周边数个路口乃至所在区域内所有路口。因此应利用各种先进的控制技术对相邻路口的控制参数进行调整,实现区域乃至整个城市范围内对交通进行动态协调控制,以满足日益增长的交通需求,使交通道路供给与交通需要间达到动态平衡。文中利用绿波效应协同策略对干道相邻路口绿灯延长时间进行模糊控制,以解决交叉口之间耦合性的问题,该算法能够比较灵活地进行信号配时。通过实验仿真,验证了本方法在干道城市交通系统中的可行性。

关键词 干道,绿波效应,协同策略,信号模糊控制

中图法分类号 TP309.2 文献标识码 A

Signal Timing Fuzzy Control Based on Road Green Wave Effect Collaborative Strategy

ZHANG Yi

(South China Institute of Software Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510990, China)

Abstract With growth of urban road traffic volume and the increase of road network density, correlation between adjacent road intersections is becoming more and more obvious. An intersection traffic signal adjustment tends to affect the health of a number of adjacent intersections road traffic flow. Its congestion may over time gradually spread to within a few blocks and regions all around the intersection. Therefore increasingly high demands of urban traffic signal control to reach a variety of advanced control technology integration, achieve the purpose to adjust a control parameter, in order to achieve dynamic coordination within the city-wide traffic control, to satisfy traffic demands, and then let the road traffic and the transport demand to reach a new balance. This article introduced the use of the green wave effect collaborative strategies adjacent green extension of fuzzy control in order to solve the problem of coupling between intersections road. This algorithm makes Signal Timing to be more flexible.

Keywords Intersection, Green-wave effect, Cooperative policies, Signals fuzzy control

1 引言

城市交通中,由于交通流量大,使得各相邻路口往往相互关联相互影响,只关注某个路口的交通控制不能解决大规模城市交通系统中交通信号的控制问题。在目前的交通信号“绿波”控制方案中,Warberg 等人^[1]提出根据数据的统计规律来进行控制,然而这类方法无法自适应交通动态变化的特性,从而无法处理突发交通状况;Markos 等人^[2]提出通过一个集中式的控制模型来管理交通信号,但随着城市交通规模的扩大,控制中心必然会产生计算瓶颈;Camponogara 等人^[3]通过假设所有交通灯都能获得全局状态,并通过分布式策略解决了计算瓶颈问题,但实际应用中的通信瓶颈问题却难以避免。另一方面,由于时延和瓶颈通过获取全局状态或采用集中式的控制方法,往往无法高效地应对灾难等突发交通情况;Mirchandani 等人^[4]对底层交通灯的自适应控制方案进行了研究,但对如何进行高层次的“绿波”效应规划的研究并没有提出相应的智能算法。

本文提出了一种基于干道绿波效应协同策略的信号配时模糊控制方法,以实现自适应的交通网络“绿波”效应。这区别于其它干道协调控制,如同步式干道协调控制、交互式干道协调控制及续进式干道协调控制等方式。在该模型中,每个路口的状态建模都包括了相邻路口的交通状况,从而可以通过这种局部观测估计当前路口下一时刻的交通情况。通过历史统计和强化学习的方法估算在某相位车辆选择车道概率等参数,从而实现路口最优策略的选择以降低该路口车辆等待时间,从而选择最优的控制策略实现“绿波”效应。

2 干道信号协调控制

本文研究相邻交叉口的信号控制,其几何模型如图 1 所示。我们可以将它建模成无向图 $G(V, E)$, 其中 V 是路口集合, E 是路口之间道路集合。在绿波现象中,多个交通灯协同合作,使得某个方向的车流连续通过多个路口,让通过路口的车辆最大化,在路口等待的车辆最小化。

本文受广州市科研项目“相邻路口交通红绿灯模糊控制及仿真系统(08C003)”资助。

张 屹(1972-),男,博士生,讲师,主要研究方向为人工智能与软件自动化测试技术, E-mail: tran-zh@163.com。

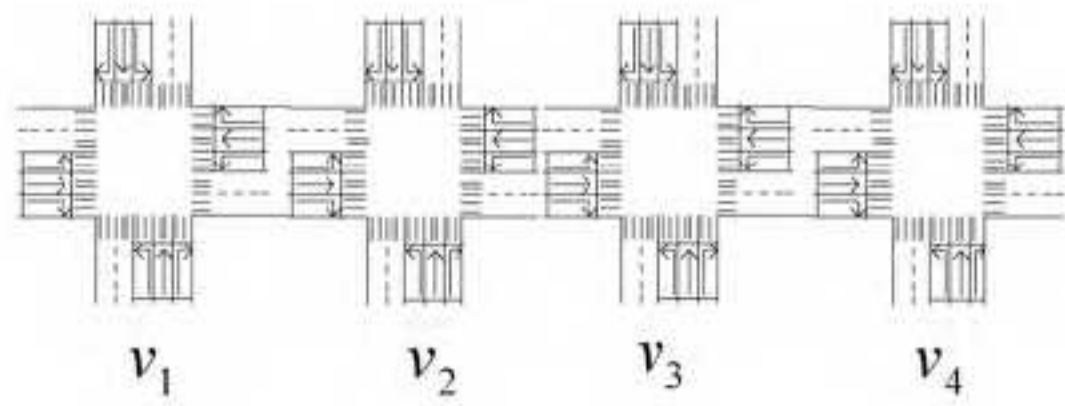


图1 相邻交叉口几何模型

根据绿波效应,交通灯协同要求最小化下一时刻等待的车辆,亦即在 t 时刻 λ 相位各路口协同工作产生的期望效用值最小^[5]:

$$\pi^*(\lambda, t) = \operatorname{argmin}_{Jt-act(G, \lambda, t)} EU(G, \lambda, t)$$

其中, λ 为信号相位,根据路口通行权在一个周期内的更迭来划分。

$EU(G, \lambda, t)$ 表示在 t 时刻从路口 V_j 经过路口 V_i 转向路口 V_k 协同工作产生的效用值,它是整个道路中 $t+1$ 时刻每个路口 V_i 在 λ 相位时等待车辆数目的总和。

$$EU(G, \lambda, t) = \sum_{v_i \in V} \sum_{v_j \in n(v_i)} Tf_i^j(k, \lambda, t+1)$$

其中, $Tf_i^j(k, \lambda, t+1)$ 表示 $t+1$ 时刻当前车道 λ 相位等待车辆数。 $Jt-act(G, \lambda, t)$ 表示在 t 时刻 λ 相位所有交通灯的动作集合,即

$$Jt-act(G, \lambda, t) = \bigcup_{v_i \in V} \mathcal{F}_i^j(k, \lambda, t)$$

其中, $\mathcal{F}_i^j(k, \lambda, t) \in \{\text{green}, \text{red}\}$ 表示动作变绿和变红。

根据徐杨等提出的预测模型,我们计算离开和到达路口的车辆数,下一时刻车道上 λ 相位等待车辆数目 $Tf_i^j(k, \lambda, t+1)$ 等于当前等待车辆数目减去离开的车辆数再加上到达的车辆数,即:

$$Tf_i^j(k, \lambda, t+1) = Tf_i^j(k, \lambda, t) + Tc_i^j(k, \lambda, t) - Td_i^j(k, \lambda, t)$$

其中, $Td_i^j(k, \lambda, t)$ 表示当前车道 t 时刻 λ 相位离开的车辆数;我们假设在一个绿灯周期中每条车道通过的最大车辆数为 δ ,如果 $\mathcal{F}_i^j(k, \lambda, t) = \text{green}$,则 $Td_i^j(k, \lambda, t) = Tf_i^j(k, \lambda, t) \leq \delta$;如果 $\mathcal{F}_i^j(k, \lambda, t) = \text{red}$,则 $Td_i^j(k, \lambda, t) = 0$; $Tc_i^j(k, \lambda, t)$ 表示当前车道 t 时刻 λ 相位到达的车辆数是由上一个绿灯周期中选择进入该车道的车辆数,我们可以通过统计和历史数据观测得到在 λ 相位车辆选择车道的概率为 $\beta_{i,j,k}$:

$$Tc_i^j(k, \lambda, t) = \beta_{i,j,k} \times \sum_{v_l \in n(v_j) \wedge v_l \neq v_i} Td_l^j(i, \lambda, t)$$

通过研究表明^[6,7]信号周期一般不应超过200s,因为周期过长容易使司机心理上变得急躁,从而强行并线或闯红灯等。

3 计算相邻路口 V_i 信号配时模糊控制思想

(1) 设定每个相位的最小绿灯时间 $G_{\min} = 15\text{s}$;

(2) 控制开始时,当第 λ 相位的绿灯结束黄灯开始瞬间,根据 $\pi^*(\lambda, t)$ 策略,得到第 $\lambda+1$ 相位的等待车辆数目及第 $\lambda+2$ 相位的等待车辆数目;

(3) 计算第 $\lambda+2$ 相位等待车辆数目与第 $\lambda+1$ 相位等待车辆数目的差值,记为 X ,以及相邻路口驶入车辆数与本路口驶出车辆数之差,记为 $Y = Tc_i^j(k, \lambda, t) - Td_i^j(k, \lambda, t)$,得到模糊控制的两个输入量;

(4) 程序查表得到绿灯延时 GE ,从而得到相位绿灯时间

$$G_{\text{time}} = G_{\min} + GE;$$

(5) 第 λ 相位红灯亮,第 $\lambda+1$ 相位黄灯亮 3s 后绿灯亮,其绿灯时间根据上一步查表所得到的 G_{time} 进行控制;

(6) 第 $\lambda+1$ 相位绿灯时间结束,黄灯亮起时刻,开始接收下一相位数据。依次循环反复,从而实现了对信号的智能控制。

3.1 输入 X, Y 的模糊化^[8-10]

根据实际情况,确定 X 和 Y 的实际变化范围(基本论域)分别为 $[-30, -30]$ 和 $[-60, 60]$ 。将基本论域离散化按照一般规范形式: $\{-n, -(n-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, (n-1), n\}$ 。采用模糊控制时一般并不以高的控制精度为目标,因此论域中的离散点数不宜太大。根据要达到的控制精度要求,选取 n 为7,即量化论域都为: $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 。按照量化因子可以得到离散值与所输入精确值之间的关系:

$$X \text{ 离散值} = \text{INT}(KX \times \text{实际输入精确量} + 0.5)$$

$$KX = 7/30 \text{ (量化因子)} \quad Y \text{ 离散值} = \text{INT}(KY \times \text{实际输入精确量} + 0.5)$$

$$KY = 7/60 \text{ (量化因子)}$$

模糊控制的语言变量及变量的选取,其原则既要考虑控制规则的灵活性,又要兼顾简单易行,我们选取:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。语言变量论域上的模糊子集由隶属度函数来描述^[11,12],隶属度函数 u 可以通过总结专家经验或统计方法来确定。 X 的隶属函数表见表1, Y 的隶属函数表同 X 。

表1 X 的隶属函数表

量化域	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
U															
X															
NB	1	0.8	0.4	0.1											
NM		0.2	0.7	1	0.7	0.2									
NS				0.1	0.4	0.8	1	0.4							
ZO						0.5	1	0.5							
PS								0.4	1	0.8	0.4	0.1			
PM										0.2	0.7	1	0.7	0.2	
PB												0.1	0.4	0.8	1

3.2 输出量(绿灯延时)GE的模糊化

① 其基本论域在 $[0, 50]$,考虑绿灯延时只有正值,量化论域为: $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ 。按照比例因子得到离散值与实际输出精确量的关系:

$$\text{实际输出精确量} = Ku \times \text{离散值}$$

$$Ku = 50/10 \text{ (比例因子)}$$

② 模糊控制的语言变量及变量的选取:零(G0)、很短(G1)、短(G2)、中等(G3)、较长(G4)、长(G5)。隶属度函数 u 见表2。

表2 隶属度函数 u

量化域	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X											
GE											
零	1.0	0.5									
很短		0.5	1.0	0.5							
短				0.5	1.0	0.5					
中等						0.5	1.0	0.5			
较长								0.5	1.0	0.5	
长										0.5	1.0

3.3 模糊控制规则表的建立

模糊控制规则的建立是非常重要的,规则是否能正确反映专家的经验,是否能有效控制对象,直接关系到整个控制器的性能。基于控制经验的总结得到表 3 所列的 49 条控制规则。

表 3 模糊控制规则

GE								
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Y	X							
	NB	零	零	零	零	零	零	零
	NM	零	零	零	零	零	零	很短
	NS	零	零	零	零	零	很短	短
	ZO	零	零	零	零	很短	短	中等
	PS	零	零	零	很短	短	中等	较长
	PM	零	零	很短	短	中等	较长	长
	PB	零	很短	短	中等	较长	长	长

3.4 模糊推理算法与解模糊

通常,从模糊规则得到的结果仍然是模糊量,还要经过模糊推理算法还原为精确量才能输出。根据模糊合成推理规则,将上述的每一条模糊控制规则分别合成输出一个模糊集合:

例如:if X_i and Y_j then $GE_m(i, j)$ 的范围:NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB; m 的范围:零、很短、短、中等、较长、长)其模糊关系为:

$$\tilde{R} = [X_i \times Y_j]^{T1} \times GE_m$$

其中, $T1$ 表示一种矩阵运算关系,目的是把一个 15×15 维的矩阵转置成一个 225×1 维的列向量,最后 \tilde{R} 得到的是 225×11 维的矩阵。每一个模糊关系矩阵都是 225×11 维,共有 49 个。

假设输入变量 X 为 3 时,隶属度函数最大值相对应的区间为 PM , 设 $a = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 7, 1, 0, 7, 0, 2, 0)$; 输入变量 Y 为 -2 时,隶属度函数最大值对应的区间为 NS 设 $b = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 4, 0, 8, 1, 0, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。根据模糊合成运算计算: $C = (a \times b)^{T2} \cdot \tilde{R}$, 其中 $T2$ 表示一种矩阵运算关系,目的是把一个 15×15 维的矩阵转置成一个 1×225 维的行向量, \tilde{R} 为上述模糊规则; if $X = PM$ and $Y = NS$ then $GE = G1$ 的模糊关系矩阵。

最终得到一个 1×11 维的向量。

解模糊常用加权平均法较多,有较好的稳定性,它的输出是连续的而不是跳跃的。假设输出的 c 为: $(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11})$, 其中每一个 c_i 的取值 $[0, 1]$, 它的加权平均值为绿灯延迟时间:

$$GE = \frac{\sum(i \times c_i)}{\sum c_i} (i \text{ 取 } 1-11)$$

最后该相位的有效绿灯时间: $G_{time} = G_{min} + GE$ 。转换后,绿灯处于另一方向,重复上述过程。

4 实验仿真

我们以深圳南山区学府路口和桃园路口两个相邻交叉路口的路段为例。采用 2013 年 12 月 29 日早上 8:00~10:00, 下午 16:00~18:00 的两个小时的各方向的平均交通车辆,数据如表 4 所列。

表 4 深圳南山区学府路口和桃园路口 12 月 29 日车流量数据

学府路口 (辆/小时)	东进口	南进口	西进口	北进口
左转	141	161	160	192
直行	558	433	594	651
右转	126	52	131	86
小型	618	484	664	697
中型	124	97	133	139
大型	83	64	88	93

桃园路口 (辆/小时)	东进口	南进口	西进口	北进口
左转	0	80	0	153
直行	113	476	123	599
右转	170	176	165	171
小型	212	549	216	693
中型	43	110	43	138
大型	28	73	29	92

利用 TSS 仿真平台 AIMSUN NG5.0 进行两个路口的数据仿真,见图 2。



图 2 TSS 仿真平台模拟

仿真时间大约 200 分钟,与定时控制方法进行比较,其结果如表 5 所列。

表 5 两种控制方式比较

控制方式	饱和度	平均延误 (秒/辆)	最大排队 长度(辆)	平均 停车率	油耗 (ml/辆)
定时控制	1.145	40.73	15	0.842	8.961
绿波效应 协同控制	0.913	34.48	15	0.794	7.585

从表 5 可以看出,本方法与定时控制相比,从饱和度、平均延误、平均停车率、油耗指标方面都得到优化和提升,同时也验证了本方法在干道城市交通系统中的可行性。

结束语 基于绿波效应,利用模糊控制的方法、人工神经网络等技术,提出对交通系统进行全局优化调度的红绿灯控制系统。局部模糊控制策略必须遵循全局最优的原则,我们可以利用马尔可夫决策过程选择最优控制行为。该模糊控制策略是一种复合策略,它能在管控中心的控制下进行调整。通过大量的模糊数据输入,对神经网络进行训练,以达到全局优化的调度[12]。虽然全局调控与局部模糊控制的配合使用仍有许多问题有待解决,但随着研究的继续进行,该方法将是

(下转第 97 页)

数 α_r, α_w 。从表 2 中的 $EXP(\beta)$ 值可以看出,在早高峰阶段有职业的出行者约占总出行者的一半,18 岁以下的出行者约占总出行者的一半。对于有职业的出行者,时间价值系数由隐性成本和显性成本两部分组成;对于学生,其时间价值系数可看成有职业者的 $1/3$ 。隐性成本按 15 元/(人 \times min) 计算,显性成本为 0.28 元/min(3000/(22 \times 8 \times 60)),设定乘客中含隐性成本的人数比例为 5%,则时间价值系数 α_r, α_w 为 0.593 元/(人 \times min)(0.5 \times 0.5 \times 1/3+0.5) \times (15 \times 5%+0.28 \times 95%)。公交企业运营费用为 3.8 元/min。

考虑最佳发车间隔的约束范围 [3,8]min,模型计算中以 0.5min 的速度逐渐增大,对应不同的权值系数产生不同的总时间费用成本。经模型计算,依据最小总费用成本确定对应权重因子,结果见表 3。根据实际公交线路的乘客时间费用和运营者费用的比例调查值,确定最佳权重取值为 0.4,从而得出最优发车间隔为 5.5min,此时总时间成本最小。

表 3 不同时间间隔和权重因子的调度模型结果

权重因子	最佳发车间隔	总费用	权重因子	最佳发车间隔	总费用
d	T	C	d	T	C
0.25	8.0	1992.3	0.3	7	2113
0.35	6.5	2203.7	0.4	5.5	2269.7
0.45	5.0	2309.6	0.5	4.5	2327.3
0.55	4.0	2323.8	0.6	4	2294.1
0.65	3.5	2239.6	0.7	3	2160.8

结束语 出发时间的选择是居民最基本的出行行为选择之一。本文利用生存分析理论确定了居民出行时间高峰时段,并对其影响出行时间的因素进行了分析,以最小发车间隔为决策变量建立优化模型,对乘客与公交公司的时间费用成本添加权重,并综合考虑各种约束。经过实际案例分析,该模型可以有效平衡乘客和企业双方的利益,减少总费用,提高服务水平,对于指导城市区域的公交调度、缓解交通压力有重要意义。

参 考 文 献

[1] Carlsson G. Travelling by urban public transport: Exploration of usability problems in a travel chain perspective[J]. Scandinavian Journal of Occupational Therapy, 2004, 11(2): 78-89

(上接第 82 页)

解决中国中小城市交通控制问题的一个好办法。

把各种先进的控制技术相互集成,达到对路口控制参数进行调整的目的,从而实现在整个城市范围内对交通进行动态协调控制,满足交通需求的需要,使交通道路与交通需要达到新的动态平衡,为城市交通提出科学的、系统的控制体系。

参 考 文 献

[1] Warberg A, Larsen J, Jørgensen RM. Green wave traffic optimization—A survey [R]. IMM-Technical Report-2008-01. Danmarks Tekniske Universitet, 2008

[2] Markos P. Traffic control[J]. Handbook of Transportation Science, 2003, 56(3): 243-277

[3] Camponogara E, Kraus W Jr. Distributed learning agents in urban traffic control[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2902: 324-335

[4] Mirchandani P, Head L. A real-time traffic signal control sys-

[2] Pendyala R M, Bhat C R. An exploration of the relationship between timing and duration of maintenance activities[J]. Transportation, 2004, 31(4): 429-456

[3] 李志纯, 黄海军. 弹性需求下的组合出行模型与求解算法[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 94-98

[4] 王怡璇. 假日小汽车出行行为分析与建模[J]. 公路与汽运, 2012, 5: 0-16

[5] Furth P G, Wilson N M. Setting frequencies on bus routes: Theory and practice [J]. Transportation Research Record, 1981, 818: 1-7

[6] Margulis L. Hurricane Evacuation Decision-Support Model for Bus Dispatch[C] // Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET' 2006). Mayaguez, Puerto Rico, 2006: 1-9

[7] 曹丽雅. 公交调度优化模型及其解法研究[J]. 实验科学与技术, 2011, 9(4): 27-30

[8] 欧舟. 城市居民出行行为及特征研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012

[9] 陈团生. 通勤者出行行为特征与分析方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007

[10] Yu Q Q. A note on the proportional hazards model with discontinuous data [J]. Statistics & Probability Letters, 2007, 77(7): 735-739

[11] Small K A. The scheduling of consumer activity work trips [J]. The American Economic Review, 1982, 72: 467-479

[12] 胡晓健, 王炜, 陈淑燕. 一路一线直行式公交系统的信号配时与车辆调度优化方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(4): 866-870

[13] 张倩, 王振晔, 董亚非. 分子算法在公交网络问题中的应用[J]. 计算机科学, 2012, 39(2): 258-267

[14] Gentile, Guido, Sang N, et al. Route choice on transit networks with online information at stops [J]. Transportation Sci. 2005, 39(3): 289-297

[15] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009

[16] 李发智, 肖蕾, 杨东援. 公交发车间隔模型研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013(1): 92-96

tem; Architecture, algorithms, and analysis[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2001, 9(6): 415-432

[5] 徐杨, 张玉林, 孙婷婷, 等. 基于多智能体交通绿波效应分布式协同控制算法[J]. 软件学报, 2012, 29(11)

[6] 李灵犀, 等. 两相邻路口交通信号的协调控制[J]. 自动化学报, 2003, 29(6)

[7] 高俊侠, 等. 城域单交叉路口的模糊控制及仿真探讨[J]. 交通与计算机, 2004, 2(22)

[8] 李静. 单交叉口交通灯信号模糊控制及其仿真[J]. 微计算机信息, 2006, 3-1: 33-35

[9] 成卫, 等. 基于模糊理论的信号交叉口控制研究[J]. 昆明理工大学学报, 2004, 29(3)

[10] 沈国, 等. 基于相序优化的多相位模糊交通控制[J]. 控制与决策, 2002, 17

[11] 邓宜阳. 用 PLC 实现道路十字路口交通灯的模糊控制[J]. 成都大学学报, 2001, 29(6)

[12] 蒋珉, 等. 城市干线交通信号模糊控制及仿真[J]. 东南大学学报, 2004(2)