第 34 卷 第 5 期 计 算 机 工 程 2008 年 3 月
Vol.34 No.5 Computer Engineering March 2008
·博士论文· 文章编号：1000—3428(2008)05—0017—03 文献标识码：A 中图分类号：TP273

基于时间窗的随机时变交通网络信号相位协调

袁二明[1]，蔡小强[2]，涂奉生[3]
(1. 南开大学信息技术科学学院，天津 300071；2. 香港中文大学，香港；3. 南开大学信息学院，天津 300071)

摘 要：交通网络是随机时变网络，用周期性时间窗模拟各路口信号灯控制，建立交通网络中路口相位差协调控制模型。时间窗的设定使只有规定行驶方向的车辆可以通行路口，其他车辆不可通行。为得到车辆在路口前等待状况，定义时间窗函数，该函数采用协调交通网络路口信号相位差的方法求得随机时变网络的最短期望路径。结合改进的 SDOT 算法和穷举法及遗传算法设计一种混合算法。对一个四路口小型交通网络进行了仿真研究，结果验证了求解算法的有效性。

关键词：时间窗；随机时变网络；相位差；最短路径

Optimal Offsets Between Intersections in Stochastic Time-varying Traffic Network Based on Time-windows

YUAN Er-ming[1], CAI Xiao-qiang[2], TU Feng-sheng[3]
(1. College of Information Technology Science, Nankai University, Tianjin 300071; 2. Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China; 3. College of Information, Nankai University, Tianjin 300071)

【Abstract】Travel networks are stochastic, time-varying. A time constraint(repeated sequence of time-windows)network model is proposed to simulate the operations of traffic-light control. In each time-window, only the car in specified routes is allowed to pass (green light) and others and not allowed (red light). In order to get the condition of car in front of intersection, this paper gives a function of time-windows, and gets the shortest path of signal traffic network with time-windows and offsets between intersections. A mixed algorithm combining the SDOT algorithm and genetic algorithm is designed to solve the problem. The paper simulates a four-intersection traffic network, result shows the effectiveness of the algorithm.

【Key words】time-windows; stochastic time-varying networks; offset between intersections; shortest path

近年来，交通网络优化已成为交通问题研究的热点。在交通网中，需要求出出行时间最短或出行费用最少的路径。在文献[1-2]中提出了一种新的基于时间窗的信号灯控制下的交通网络最短路问题，用重复的一列时间窗作为交通信号灯限制，对每个时间窗，只有规定的特殊路径才允许直接通行，网络中的路权为确定性的。文献[3-7]中对随机时变网络最短路进行讨论，把路权看作一个与时间相关的随机变量，从而求得从起点到终点的最短期望时间路径。考虑到交通网络中最短路在信号灯控制下，车辆在路口处受到信号灯的影响而花费时间有所变化，因此，交通网络优化的同时，需要研究最短路径与相位差的优化。本文采用时间窗函数来限定交通网络中路口信号灯情况，绿灯时间段作为允许车辆通行的时间窗，同时定义一个时间窗函数来确定当车辆在红灯时需要等待的时间。然后，利用时间窗函数来求得随机时变的交通网络期望最短路，并利用穷举法和遗传算法得到路口相位差，使得车辆从起点到终点需要的期望时间最短。

1 问题描述

交通网络 $N=(V,A,\tau,s,d)$ ，V 为交通网络中的带信号灯的路口集合；A 为路口间路段集合；τ_{uv} 为在路段 uv ($uv\in A$)的行驶时间；s 为起始路口(驶入路口)；d 为目的地，对 $u\in V$ ，对应着一列时间窗 $W(u)=(w_u^1,w_u^2,\cdots,w_u^r)$ ， w_u^i 表示 u 路口的第 i 个时间窗，r 是 u 的时间窗数，本文中用到的时间窗由三维组和时间段构成，三维组 $\langle v^i,u,y^i\rangle$ 表示 u 路口第 i 个可以从 v^i 路口方向通过 u 路口向 y^i 路口方向行驶的路径，$last(u)$ 表示 u 的前结点路口集合，$v^i\in last(u)$ ，$next(u)$ 为 u 的后结点路口集合， $y^i\in next(u)$ ， $[kC+a_1^i,kC+a_2^i)$ 表示 u 路口第 i 个路径允许行驶的时间段，其中， C 是信号灯周期，$a_1^i<a_2^i<C$ ， $k=1,2,\cdots$ ，只有在时间段 $[kC+a_1^i,kC+a_2^i)$ ，车辆可由 v^i 路口经 u 路口向 w^i 路口方向行驶(绿灯)，如果在时间段外的时刻到达，车辆等待到下一个时间段开始时驶出(红灯)($i=1,2,\cdots,r$)。

交通网络 N 中的路口信号灯之间有相位差，当车辆在某一时刻 t_0 在 s 路口前驶入，经过几个路口到达目的地 d ，车辆必定选取最短时间的路径，所花费的时间包括在路上行驶时间和红灯等待时间，然后在这样的条件下进行相位差优化，使得在 t_0 时刻驶进的车辆能以最小时间到达目的地。

为得到车辆在路口处等待状况及等待时间，引入时间窗函数的定义。

定义 对任意时刻 $t\in Z$ ，若路径 $\langle v,u,y\rangle$ 对应的时间段为 $[kC+a_1,kC+a_2)$ ，则定义时间窗函数：

$$f_{\langle v,u,y\rangle}(t)=\begin{cases}kC+a_1 & (k-1)C+a_2\le t<kC+a_1\\ t & kC+a_1\le t<kC+a_2\end{cases} \tag{1}$$

其中，k 为整数；$a_1<a_2<C$ ；$v\in last(u)$ ；$y\in nest(u)$ 。若 s 为起点路口，定义 s 处的时间窗函数：假设其前有一虚拟点

基金项目：天津市自然科学基金资助项目(05YFJMJC01300)
作者简介：袁二明(1976－)，女，博士研究生，主研方向：智能交通控制；蔡小强、涂奉生，教授、博士生导师
收稿日期：2007-03-10 **E-mail：**emyuan@mail.nankai.edu.cn

s'，s 处的时间窗函数为

$f_{\langle s',s,j\rangle}$，$j \in next(s)$

为了分析时间窗函数的存在性，给出如下引理：

引理 对 $\forall t$，总可找到整数 k，使得 $(k-1)C+a_2 \le t < kC+a_2$ ($a_2 < C$)。

证明 对 $\forall (t-a_2)$，固定整数 C，总有

$$\left\lfloor \frac{t-a_2}{C} \right\rfloor \times C \le t-a_2 < (\left\lfloor \frac{t-a_2}{C} \right\rfloor + 1) \times C$$

成立，整理可得

$$\left\lfloor \frac{t-a_2}{C} \right\rfloor \times C + a_2 \le t < (\left\lfloor \frac{t-a_2}{C} \right\rfloor + 1) \times C + a_2$$

令 $k-1 = \left\lfloor \frac{t-a_2}{C} \right\rfloor$，则 $(k-1)C+a_2 \le t < kC+a_2$ 对 $\forall t$ 成立。

由引理知，对 $\forall t$，时间窗函数 $f_{\langle v,u,y\rangle}(t)$ 存在。

对于随时机时变网络 $N=(V,A,\tau(t),s,d)$，路口间行驶时间是一个离散的、非负的随机变量，其分布函数是时变的，在时刻 t，$\tau_{ij}^K(t)$ 为行驶路段 ij 所需要的时间，$K=1,\cdots,K_{ij}(t)$，$K_{ij}(t)$ 为时刻 t 在路段 ij 上行驶所需要时间的可能值数，行驶时间以概率 $p_{ij}^K(t)$ 为 $\tau_{ij}^K(t)$，且 $\sum_1^{K_{ij}(t)} p_{ij}^K(t)=1$。

如图 1 所示为一个交通网络图一部分，若 $t_{n_j n_k}$ 为从n_j方向到达n_k路口前的时刻，$t_{n_j n_k n_l}$ 为从n_j路口方向穿过n_k路口向n_l路口方向行驶的时刻，显然有 $t_{n_j n_k n_l} = f_{\langle n_j,n_k,n_l\rangle}(t_{n_j n_k})$。

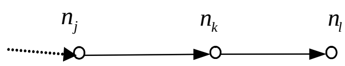

图 1 车辆从n_j路口经n_k路口向n_l路口行驶

本文中设 $\lambda_{n_k n_l}(t)$ 为在 t 时刻，从 n_k 路口沿路段 $n_k n_l$ 向下游路口 n_l 行驶而到达目的地所需最短期望时间，则

$$\lambda_{n_k n_l}(t) = \min_{n_m \in next(n_l)} \left\{ \sum_{i=1}^{K_{kl}} (f_{\langle n_k,n_l,n_m\rangle}(\tau_{n_k n_l}^i(t)) + \lambda_{n_l n_m}(f_{\langle n_k,n_l,n_m\rangle}(\tau_{n_k n_l}^i(t)))) p_{n_k n_l}^i(t) \right\}$$

边界条件为

$$\lambda_{n_j d}(t) = \sum_{i=1}^{K_{jd}} \tau_{n_j d}^i(t) p_{n_j d}^i(t), \quad n_j \in last(d) \tag{2}$$

其中，$\tau_{n_k n_l}^i(t)$ 是行驶路段 $n_k n_l$ 以概率为 $p_{n_k n_l}^i(t)$ 所需的时间；$f_{\langle n_k,n_l,n_m\rangle}(\tau_{n_k n_l}^i(t))$ 为车辆穿过路口 n_l 的时刻；$\lambda_{n_l n_m}(f_{\langle n_k,n_l,n_m\rangle}(\tau_{n_k n_l}^i(t)))$ 是在时刻 $f_{\langle n_k,n_l,n_m\rangle}(\tau_{n_k n_l}^i(t))$ 从 n_l 到目的地所需最短期望时间。

2 模型建立

模型最终目标是在最短期望时间路径上协调路口间的相位差，使起点到终点所需时间期望值最小，即是在时间窗限制下求网络的最短时间路径并对路口相位差进行优化。假设起始时刻为 t_0，路口相位差 $\boldsymbol{x}$ 用一组向量表示，$\boldsymbol{x}=(x_1,x_2\cdots,x_m)$，$m$ 为起点到终点间路口个数，x_i 为第 n_i 路口与初始路口所差的相位差 $i=1,2,\cdots,m$，由式(2)可以得到从起点 s 到终点 d 的最短路径 $\min_{j\in next(s)} \lambda_{sj}(f_{\langle s',s,j\rangle}(t_0))$，对应的时间窗是路口相位差 $\boldsymbol{x}$ 的函数，可记为 $f_{\langle s',s,j\rangle}^x(t_0)$，则目标函数可写为 $\min_x \min_{j\in next(s)} \lambda_{sj}(f_{\langle s',s,j\rangle}^x(t_0))$。

故模型表示为

$$\min_x \min_{j\in next(s)} \lambda_{sj}(f_{\langle s',s,j\rangle}^x(t_0))$$

$$\text{s.t. } 0 < x_i < C \quad i=1,2,\cdots,m \tag{3}$$

3 算法设计

给定路口间的一组相位差，得到一组各路口的时间窗函数，在时间窗函数限制下，求得从起点到终点所需时间期望值最小的路径。

(1)对在时间窗控制下的随机时变网络求最短期望路径

算法用到改进的 SDOT 算法，SDOT 算法见文献[7]，本文中加入时间窗函数，对目标函数进行了改进，基本步骤如下：

步骤 1 初始值设定，s 为起点，d 为终点，给定 t_0，设定空间 $\psi=\{t_0+n\delta\}$，δ 为最小时间间隔，且有 $t\in\psi$，$\lambda_{n_j,n_l}(t)=\infty$，$\lambda_{n_j,d}(t)=\sum_{i=1}^{K_{jd}} \tau_{jd}^i(t)p_{jd}^i(t)$，$n_j \in last(d)$，建立列表 SE，并把 d 加入；

步骤 2 如果 SE 为空，转步骤 4，否则，把第 1 个点 n_j 从 SE 中取出。

步骤 3 $n_l \in last(n_j)$，计算 η_{lj} 如下式：

$$\eta_{lj}(t) = \sum_{i=1}^{K_{lj}} (f_{\langle n_l,n_j,n_k\rangle}(\tau_{lj}^i(t)) + \lambda_{n_j n_k}(f_{\langle n_l,n_j,n_k\rangle}(\tau_{lj}^i(t)))) p_{lj}^i(t)$$

如果 $\eta_{lj}(t) < \lambda_{n_l n_j}(t)$，则 $\lambda_{n_l n_j}(t)=\eta_{lj}(t)$，$SE=SE\cup\{n_l\}$；如果所有的 $n_l \in last(n_j)$ 得到，转步骤 1。

步骤 4 停止。

(2)对路口间相位差进行优化

对给定的 $\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_m)$ 值，利用上述算法可以得到对应的函数值 $f=\min_{j\in next(s)} \lambda_{s,j}(f_{\langle s',s,j\rangle}^x(t_0))$，而式(3)的目标是找到合适的 x 值，即最优的路口的相位差，使得函数值最小。对于式(3)问题通过解析求解的可能性很小，可作数值求解，本文中数值求解采用的是改进的穷举法，采用改进穷举方法所需运算量(C^K)，C为路口周期长，K为路口个数。当路口很多，周期较长情况下，可采用启发式算法中的遗传算法[8]。

遗传算法基本步骤如下：

步骤 1 对 x 选择二进制形式的编码，即 0, 1 字符串。$\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_m)$，其中，每个向量 $\boldsymbol{x}_j$ 用一串 0, 1 字符串表示，x^i 表示第 i 个体。随机产生初始群体 POP，群体大小为 N；

步骤 2 满足停止规则，算法停止，否则，对群体中的每一个体计算适应度函数，本文是对函数求最小优化，这时可取 $F(i)=L_{\max}-f(i)$，$F(i)$ 为第 i 个体的适应度，$f(i)$ 为第 i 个个体的目标函数值，即 $f(i)=f(x^i)=f(x_1^i,x_2^i,\cdots,x_m^i)$，$L_{\max}$ 为 $f(i)$ 的最大值估计。

步骤 3 求得每个个体入选种群的概率，定义第 i 个个体入选种群的概率为：$p(i)=\frac{F(i)}{\sum_j F(j)}$，按轮盘赌方式进行选择而产生新种群 newPOP；对新种群以交配概率为 p_c 进行交配，即两个个体从各自字符串的某一位置(随机确定)开始互相交换；再以一个小的概率 p 使得一个个体的基因发生变异，形成新的群体 newPOP，用 newPOP 代替 POP，返回步骤 2。

4 算例

如图 2 所示交通网络，求 4 个路口的一个小交通网络中各路口间的相位差，以 s 路口西→东方向绿灯开始时刻为初始时刻，n_1 路口西→东方向绿灯与 s 路口西→东方向绿灯相位差 x_1，n_2 路口西→东方向绿灯与 s 路口西→东方向绿灯相位差 x_2，$n_1 n_2$ 为单行路段，假设初始时刻 $t_0=0$，$C=6$，在路段行驶时间如表 1 所示(本文采用 Elise Miller-Hooks 在文

献[3]中用到的算例)。

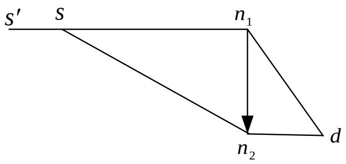

图 2　一个四路口交通网络

表 1　网络中各路段行驶时间

τ_{sn_1}	τ_{sn_2}	$\tau_{n_1n_2}$		τ_{n_1d}		τ_{n_2d}			
$t\geq 0$	$t\geq 0$	$t\leq 2$	$t\geq 3$	$t\leq 2$	$t\geq 3$	$t\leq 4$	$4<t\leq 5$	$5<t\leq 6$	$t>6$
2(0.5)	5(0.4)	4(0.8)	1(0.3)	3(0.8)	6(0.4)	4(0.2)	5(0.3)	1(0.9)	3(0.3)
3(0.5)	6(0.6)	5(0.2)	3(0.7)	7(0.2)	7(0.6)	6(0.8)	8(0.7)	2(0.1)	4(0.7)

各路口结点的时间窗如表 2 所示。

表 2　交通网中的时间窗

路口	路径	对应的时间段
s	$\langle s',s,n_1\rangle$	$[kC,kC+2)$
	$\langle s',s,n_2\rangle$	$(0,+\infty)$
n_1	$\langle s,n_1,n_2\rangle$	$(0,+\infty)$
	$\langle s,n_1,d\rangle$	$[kC+x_1,kC+2+x_1)$
n_2	$\langle s,n_2,d\rangle$	$[kC+x_2,kC+2+x_2)$
	$\langle n_1,n_2,d\rangle$	$[kC+x_2+5,(k+1)C+x_2)$

对相位差采用穷举法，在 Matlab7.0 环境下编程得到结果：

$$\lambda_{s's}(0)=\begin{array}{ccccccc} & x_2=1 & x_2=2 & x_2=3 & x_2=4 & x_2=5 & x_2=6 \\ x_1=1 & 9.7000 & 9.7000 & 9.7000 & 9.7000 & 9.7000 & 9.2600 \\ x_1=2 & 7.7000 & 7.7000 & 7.7000 & 7.7000 & 7.7000 & 7.7000 \\ x_1=3 & 9.6000 & 9.6000 & 9.6000 & 9.6000 & 9.6000 & 9.2600 \\ x_1=4 & 10.4600 & 10.6000 & 10.6000 & 10.6000 & 10.6000 & 9.2600 \\ x_1=5 & 10.4600 & 11.6000 & 11.6000 & 11.6000 & 11.6000 & 9.2600 \\ x_1=6 & 10.4600 & 11.7000 & 12.6000 & 12.6000 & 12.6000 & 9.2600 \end{array}$$

由上组数据可以看到，当 x_1=2 时，不管 x_2 为任何值，网络中最短期望值为 7.7，对应最短期望路径为：$s\rightarrow n_1\rightarrow d$。最优相位差 $x=(x_1,x_2)=(2\quad a)$，a 为 [1,6] 间的任意整数。

Elise Miller-Hooks 文中算例，不考虑红绿灯对网络的影响，即车辆到达路口时不作停留，得到最短期望值为：6.83，对应最短期望路径为：$s\rightarrow n_1\rightarrow d$。

当路口很多，且周期比较长时，采用遗传算法可以更快获得最短期望路径。对本算例采用遗传算法，选择编码为 10 位数的二进制码，即个体长度为 10；设置初始参数，随机产生群体大小为 5；设置交叉概率 $p_c=0.6$，变异概率 $p_m=0.1$，迭代次数 $n=50$。得到的结果如下：

从入口到各出口所需最短时间为 9.26 s；对应的路口相位差最优值为 $x=(x_1,x_2)=(1\quad 6)$。

本文采用的路口周期短、路口少，遗传算法的优越性没有体现出来，而且得到的值非最优而为次最优值，但对于周期长、路口多的交通网络，采用穷举法运算量过大，这时可采用遗传算法得到比较优的结果。

对于行驶车辆来说，如果知道要行经网络的全部信息，包括道路行驶时间及各路口相位差，那么用本文方法很容易得到一条最优路径，使得花费时间最少。

5　结束语

本文在对路口采用周期性时间窗限制下，建立了时变随机交通网络中路口相位差协调控制模型，用来模拟各路口信号灯控制。在模型求解中，采用混合算法求得车辆从起点到终点在时间窗限制下的最短期望路径，及网络中路口间的最优相位差。算例仿真的结果表明本文算法的有效性。

参考文献

[1] Chen Y L, Tang K. Minimal Time Paths in a Network with Mixed Time Constraints[J]. Computers & Operations Research, 1998, 25(10): 793-805.

[2] Chen Yeliang, Yang Hsu-Hao. Shortest Paths in Traffic-light Networks[J]. Transportation Research, 2000, 34(1): 241-253.

[3] Miller-Hooks E. Adaptive Least-expected Time Paths in Stochastic, Time-varying Transportation and Data Networks[J]. Networks, 2001, 37(1): 35-52.

[4] Miller-Hooks E, Mahmassani H. Path Comparisons for a Priori and Time-adaptive Decisions in Stochastic, Time-varying Networks[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 146(1): 67-82.

[5] Miller-Hooks E, Mahmassani H. Least Expected Time Paths in Stochastic, Time-varying Transportation Networks[J]. Transportation Science, 2000, 34(2): 198-215.

[6] Yang Baiyu, Miller-Hooks E. Adaptive Routing Considering Delays Due to Signal Operations[J]. Transportation Research, 2004, 38(5): 385-413.

[7] Chabini I. Discrete Dynamic Shortest Path Problems in Transportation Applications: Complexity and Algorithms with Optimal Run Time[J]. Transportation Research Records, 1998, (1645): 170-175.

[8] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

（上接第 16 页）

的充分条件，指出了死锁的出现是由于在仿真时间推进中出现了互斥条件，请求保持条件不可剥夺以及环路等待。本文提出一个动态滑模法以较好地消除死锁，最后对 GALT 算法中 Lookahead 值的设定加以讨论。

参考文献

[1] IEEE Std 1516.1-2000 IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture(HLA) Object Model Template (OMT) Specification[S]. 2000.

[2] 童　军, 李伯虎, 惠天舒, 等. 高级体系结构(HLA)和新一代的分布交互仿真[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(2): 1-6.

[3] 童　军, 惠天舒, 李伯虎, 等. 高级体系结构(HLA)中面向对象方法学的研究[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(4): 42-47.

[4] 李露南, 熊华钢, 史永辉, 等. 基于 HLA 的半实物仿真时间管理策略的研究和实现[J]. 遥测遥控, 2006, 27(2): 59-61.

[5] 何　晶, 娄寿春, 王　刚. 防空作战一体化仿真环境研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2442-2445.

[6] 卿杜政, 李伯虎. HLA 运行支撑框架(SSS-RTI)的研究与开发[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 491-492.

[7] 张　龙, 尹文君, 柴旭东. RTI 系统时间管理算法[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 494-498.

[8] 陈凌云, 姜振东. HLA/RTI 中时间管理服务的研究[J]. 指挥技术学院学报, 2001, 12(6): 63-67.

[9] 刘步权, 王怀民, 姚益平. 一种无死锁的时间管理算法[J]. 软件学报, 2003, 14(9): 1515-1522.

[10] 王召福, 金士尧. HLA 仿真系统中 Lookahead 的分析与动态调整策略[J]. 计算机仿真, 2003, 20(4): 78-80.

[11] 吉桂琴, 王　司, 乔佩利. HLA 时间管理中 Lookahead 的设置与调整[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(1): 109-111.