

# 道路转向延迟的动态对偶图模型

郑年波 陆 锋 段滢滢

(中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

**摘 要** 传统的道路转向延迟对偶图表达法缺乏对交通网络时间依赖特性的考虑, 不适合动态路径规划问题的求解。本文将时间因素引入到对偶图中, 发展了一种动态对偶图模型, 将交通路网表达为动态对偶网络, 并为之定义了FIFO(先进先出)条件, 推导了满足FIFO条件的动态行程计算方法, 设计了时间依赖的标号设定最短路径算法。实验结果表明, 利用该对偶图模型和动态对偶网络, 能有效表达路网转向延迟, 在以出行时间为标准的动态路径规划中, 基于动态对偶网络的路径规划结果可节省约16%的出行时间。

**关键词** 转向延迟 动态对偶图 FIFO条件 路径规划 最短路径

中图法分类号: P208 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)06-915-06

## Dynamic Dual Graph Model for Turn Delays on Road Networks

ZHENG Nianbo, LU Feng, DUAN Yingying

(State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** Traditional dual graph modeling turn delays at road intersections are ill-suited to the time-dependent route planning in the travel information services, due to the ignorance of time-dependency of transportation networks. With introducing a time factor into a dual graph, a dynamic dual network model is presented, where the links in the original network are mapped into the nodes in the dual network, and the turns in the original network are mapped into the links in the dual network. Besides, the First-In-First-Out (FIFO) condition is defined for this dynamic dual network, and two relevant arrival-time computational formulas are then given out. The classical label-setting shortest path algorithm is temporally adapted to the dynamic dual network by the definition of origin-destination dual node sets and time-dependent dual node labels. An experiment on a real road network shows that the proposed model is suitable for dealing with the turn delays, and saved about 16 percent travel time in the real-time route planning.

**Keywords** turn delay, dynamic dual graph, FIFO condition, route planning, shortest path

## 0 引 言

随着车辆导航、地图网站等位置服务应用逐渐向提供实时信息服务方向发展, 如何表达城市交通网络的时间依赖特性, 为动态交通环境下的路径规划提供支持, 成为关键技术问题。对此, 一些学者提

出了为每个时段复制原始网络, 从而将时间离散动态网络静态化的时间扩展网络模型<sup>[1-4]</sup>。而另一些学者则趋向于将路段行程时间建模为时间依赖的变量, 并使其满足“先进先出”条件<sup>[5-7]</sup>。然而, 这些研究普遍缺乏对转向延迟的考虑。在现实交通系统中, 交叉口转向所引起的延误时间在全部行驶时间中占有相当大的比重。而且, 由于同一交叉口不同

**基金项目:**国家自然科学基金项目(40871184); 国家高技术研究发展计划(863)计划项目(2007AA12Z241); 中国博士后基金项目(20090450563)

**收稿日期:**2009-03-19; **改回日期:**2009-04-16

**第一作者简介:**郑年波(1979—), 男, 中国科学院地理科学与资源研究所博士后。主要从事交通GIS、智能交通系统、位置服务等方面的研究。E-mail: zhengnb@reis.ac.cn

转向对应不同延误时间的特性不符合标号设定 (LS) 最短路径算法单一标号的要求, 导致针对节点 (即交叉口) 进行标号的最短路径搜索策略不再有效<sup>[8]</sup>。

为了有效处理交叉口转向延迟带来的上述问题, Añez 等人提出了对偶图表达法<sup>[9]</sup>。其基本思想是将原图中的弧段映射为对偶图中的节点, 将原图中同一节点的多个转向映射为对偶图中不同的弧段。继而, Winter 详细讨论了该方法在路径规划中的应用<sup>[10-11]</sup>。而 Hu 等人则将其引入到交通仿真和分析的研究中<sup>[12]</sup>。另外, 基于弧段的网络表达模型<sup>[13]</sup>以及基于弧段标号的路径规划算法<sup>[14-16]</sup>本质上也是基于对偶图的思想。然而, 目前的这些转向延迟处理方法都基于静态网络, 没有考虑到交叉口转向延迟时间依赖于开始转向的时刻, 而且禁止转向也有可能是分时段的, 因此不适合时间依赖路径规划问题的求解。

本文通过将时间因素引入到对偶图中, 实现道路转向延迟的动态对偶图表达, 并定义动态对偶网络的 FIFO (先进先出) 条件, 设计适用于动态对偶网络的标号设定最短路径算法。

## 1 动态交通网络及其对偶图表达

### 1.1 动态交通网络

动态交通网络定义为  $G = (N, L, U)$ 。其中,  $N = \{0, 1, \dots, n-1\}$  表示描述交叉路口的节点集,  $L$  表示描述车行道段的有向弧段集,  $U$  表示转向集。弧段定义为节点间的二元关系, 其行程时间依赖于进入的时刻, 有

$L \subseteq \{(i, j, w_{ij}(t)) \mid (i, j) \in N \times N, (i, j) \neq (j, i), t \in T\}$  其中,  $w_{ij}(t)$  表示  $t$  时刻出发在弧段  $(i, j)$  上的行程时间,  $T$  表示时间集。

转向定义为两条连续弧段之间的二元关系 (或 3 个连续节点之间的三元关系), 其延误时间依赖于开始转向的时刻, 有

$U = \{(i, j, k, r_{ijk}(t)) \mid (i, j) \in L, (j, k) \in L, t \in T\}$  其中,  $r_{ijk}(t)$  表示  $t$  时刻由弧段  $(i, j)$  转向弧段  $(j, k)$  所花的时间。如果转向禁止, 则  $r_{ijk}(t) = \infty$ 。

### 1.2 对偶图表达

对偶图表达的基本思想是<sup>[9]</sup>: 将原图的弧段映射为对偶节点, 将原图的转向映射为对偶弧段。基于此, 上述动态交通网络  $G$  的对偶网络  $D$  定义为

$$D = d(G) = (N_D, L_D)$$

其中,  $d$  是一个双射函数, 有  $G = d^{-1}(D)$ ,  $N_D$  为对偶节点集,  $L_D \subseteq N_D \times N_D$  为对偶弧段集。

对于原网络中的任意一条弧段  $(i, j) \in L_G$ , 总存在对偶节点  $\alpha \in N_D$ , 使得:  $\alpha = d(i, j)$ ,  $(i, j) = d^{-1}(\alpha)$ , 有  $N_D = d(L_G)$ ,  $L_G = d^{-1}(N_D)$ 。对于原网络中的任意一个转向  $(i, j, k) \in U_G$ , 总存在对偶弧段  $(\alpha, \beta) \in L_D$ , 使得  $(\alpha, \beta) = d(i, j, k)$ ,  $(i, j, k) = d^{-1}(\alpha, \beta)$ , 其中,  $\alpha = d(i, j)$ ,  $\beta = d(j, k)$ ,  $(i, j) = d^{-1}(\alpha)$ ,  $(j, k) = d^{-1}(\beta)$ , 有  $L_D = d(U_G)$ ,  $U_G = d^{-1}(L_D)$ 。

设  $\psi_\alpha(t)$  为对偶节点到达时间函数, 表示  $t$  时刻进入后从对偶节点  $\alpha$  离开的时间, 有  $\psi_\alpha(t) = t + w_{ij}(t)$ , 其中,  $\alpha = d(i, j)$ 。设  $\zeta_{\alpha\beta}(t)$  为对偶弧段到达时间函数, 表示  $t$  时刻从对偶节点  $\alpha$  出发沿对偶弧段  $(\alpha, \beta)$  到达对偶节点  $\beta$  的时间, 有  $\zeta_{\alpha\beta}(t) = t + r_{ijk}(t)$ , 其中,  $(\alpha, \beta) = d(i, j, k)$ 。设  $\tau_{\alpha\beta}(t)$  为  $t$  时刻从对偶节点  $\alpha$  出发沿对偶弧段  $(\alpha, \beta)$  到达并离开对偶节点  $\beta$  的时间, 有

$$\tau_{\alpha\beta}(t) = \psi_\beta(\zeta_{\alpha\beta}(t)) = t + r_{ijk}(t) + w_{jk}(t + r_{ijk}(t)) \quad (1)$$

设  $p = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$  ( $k > 1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k \in N_D$ ) 为对偶网络中的一条路径, 则其到达时间定义为

$$A_p(t) = \tau_{\alpha_{k-1}\alpha_k}(\dots \tau_{\alpha_1\alpha_2}(\psi_{\alpha_1}(t))) \quad (2)$$

图 1 是一个十字路口对偶图表达的例子。原网络共有 5 个节点, 8 条弧段, 16 个可能的转向 (图中

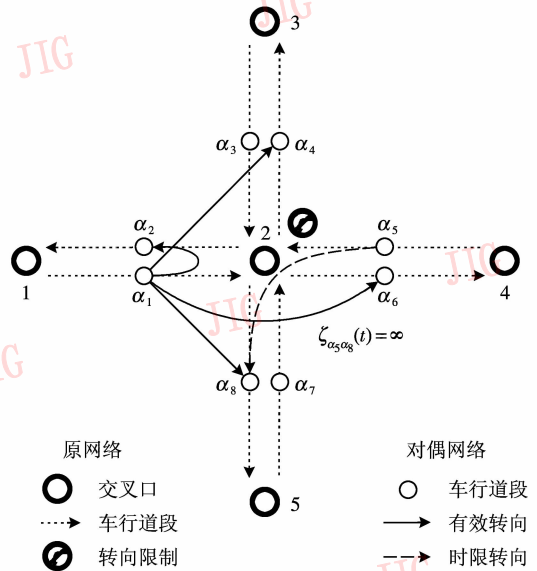


图 1 路网的对偶图表达

Fig. 1 Dual graph representation of road network

标注了由西向东行驶时的 4 种转向可能:直行、左转、右转和掉头)。而转换成对偶网络后,共有 8 个节点和 16 条可能的弧段。对于分时段转向限制,采取和转向延迟一样的处理方式,只不过在禁行期间,其延误时间需设为 $\infty$ (如图中由东向西禁止左转的情况)。对于永久禁行的转向,将不生成对偶弧段。

### 1.3 FIFO 条件定义

在动态对偶网络中,对于任意一条对偶弧段 $(\alpha, \beta) \in L_D$ ,如果 $\tau_{\alpha\beta}(t)$ 非减,即

$$\tau_{\alpha\beta}(s) \leq \tau_{\alpha\beta}(t) \quad \forall s, t \in T, s \leq t \quad (3)$$

则称此弧段满足 FIFO 条件。如果对偶网络中的所有弧段都满足 FIFO 条件,则称此对偶网络为 FIFO 网络。Kaufman & Smith 指出, FIFO 网络中的时间依赖最短路径问题可通过 Dijkstra, A\* 等标号算法来求解<sup>[17]</sup>。根据式(1),要使不等式(3)成立,则对偶节点到达时间 $\psi_\alpha(t)$ 和对偶弧段到达时间 $\zeta_{\alpha\beta}(t)$ 必须同时满足 FIFO 条件,即

$$\psi_\alpha(s) \leq \psi_\alpha(t) \wedge \zeta_{\alpha\beta}(s) \leq \zeta_{\alpha\beta}(t) \quad \forall s, t \in T, s \leq t \quad (4)$$

### 1.4 弧段行程时间计算

在对弧段 $(i, j)$ 的交通状况进行建模时,通常将连续时间 $T$ 划分成若干时段 $[t_0, t_1), \dots, [t_{f-1}, t_f)$ ,并认为每个时段 $[t_k, t_{k+1})$ 内的交通流速度 $v_k$ 恒定。这样,弧段上的一个行程可能跨越速度值不同的多个时段,其行程时间(即对偶节点到达时间 $\psi_\alpha(t)$ )计算如下(其中 $l$ 表示弧段 $(i, j)$ 的长度):

1) 如果 $l_k - v_k \times (t_{k+1} - t) < 0$ , 有 $\psi_\alpha(t) = t + l_k/v_k$ , 否则:

2) 如果 $l_{k+1} - v_{k+1} \times (t_{k+2} - t_{k+1}) < 0$ , 有 $\psi_\alpha(t) = t_{k+1} + l_{k+1}/v_{k+1}$ , 否则:

3) 如果 $l_{k+m-1} - v_{k+m-1} \times (t_{k+m} - t_{k+m-1}) < 0$ , 有 $\psi_\alpha(t) = t_{k+m-1} + l_{k+m-1}/v_{k+m-1}$ , 否则:

...

其中,

$$l_k = l$$

$$l_{k+1} = l_k - v_k \times (t_{k+1} - t)$$

...

$$l_{k+m} = l_{k+m-1} - v_{k+m-1} \times (t_{k+m} - t_{k+m-1})$$

...

将交通流速度建模为时段依赖的变量,决定了不同时刻出发且路径相同的两辆车的时空轨迹必不相交,后出发的车辆无法超越先出发的车辆,即满足 FIFO 条件,如图 2 所示。

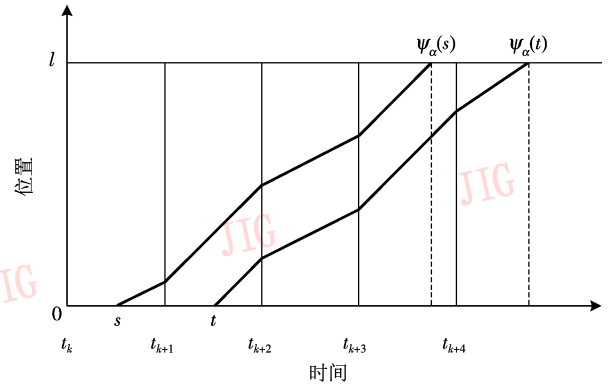


图 2 车辆的时空轨迹

Fig. 2 Spatial-temporal trajectories of vehicle

### 1.5 转向延迟时间计算

在处理每一个转向 $(i, j, k)$ 的延误时间时,也将连续时间 $T$ 离散化为多个时段 $[t_0, t_1), \dots, [t_{h-1}, t_h)$ ,并认为每个时段 $[t_k, t_{k+1})$ 内的平均延误时间恒定为 $c_k$ 。这样,车辆的转向延迟时间(即对偶弧段到达时间 $\zeta_{\alpha\beta}(t)$ )的计算过程如下:

$$\zeta_{\alpha\beta}(t) = \begin{cases} t + c_k & t \in [t_k, t_{k+1} - c_k) \\ t + c_{k+1} & t \in [t_{k+1} - c_k, t_{k+1}) \wedge \\ & c_{k+1} - (t_{k+1} - t) > 0 \\ t_{k+1} & t \in [t_{k+1} - c_k, t_{k+1}) \wedge \\ & c_{k+1} - (t_{k+1} - t) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

与对偶节点到达时间的计算类似,这里考虑了跨越两个时段的情况,能保证先排队的车辆先转入下一条弧段,即满足 FIFO 条件。

## 2 基于动态对偶网络的标号设定算法

在对偶网络中进行路径规划,首先要根据起止点的位置确定起止对偶节点。当起止点位于网络节点处时,由于不能事先确定起点相连的哪一条是起始弧段,终点相连的哪一条是终止弧段,考虑建立起止对偶节点集。设 $s \in N_c$ 为起始节点, $L_s = \{(s, j) \mid j \in N_c, (s, j) \in L_c\}$ 为离开 $s$ 的所有弧段,则起始对偶节点集定义为 $H_s = d(L_s)$ 。设 $e \in N_c$ 为终止节点, $L_e = \{(i, e) \mid i \in N_c, (i, e) \in L_c\}$ 为到达 $e$ 的所有弧段,则终止对偶节点集定义为 $H_e = d(L_e)$ 。以图 1 为例,如以节点 2 为起点,则起始对偶节点集为 $\{\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_8\}$ 。

另外,当起点 $s$ 位于弧段 $(i_1, i_2) \in L_c$ 上时,令 $H_s = \{d(i_1, i_2)\}$ ,并以 $s$ 到 $i_2$ 的长度取代 $(i_1, i_2)$ 的长度

来计算到达时间  $\psi_{d(i,j_2)}(t)$ 。同样,当终点  $e$  位于弧段  $(j_1, j_2) \in L_c$  上时,令  $H_e = \{d(j_1, j_2)\}$ ,并以  $j_1$  到  $e$  的长度取代  $(j_1, j_2)$  的长度来计算到达时间  $\psi_{d(j_1, j_2)}(t)$ 。

传统 LS 算法以从起点出发的路径长度作为节点标号,并在节点扩展过程中不断对之进行更新<sup>[18]</sup>。而在动态对偶网络中,则需以路径到达时间作为对偶节点标号。设  $t$  为出发时间,  $A_\alpha$  为沿路径到达对偶节点  $\alpha$  的时间,  $P_\alpha$  为对偶节点  $\alpha$  在路径上的直接前驱对偶节点,  $Q$  为候选对偶节点集,  $R$  为永久标号对偶节点集(到此集合中的对偶节点的最短路径已经找到),则基于动态对偶网络的 LS 算法的流程如下:

- 1) 初始化 对每一个对偶节点  $\alpha \in H_s$ , 令  $A_\alpha = \psi_\alpha(t)$ ,  $A_\beta = \infty \forall \beta \neq \alpha$ ,  $P_\alpha = -1$ ,  $Q = Q \cup \{\alpha\}$ ;
- 2) 对偶节点选择 从候选对偶节点集  $Q$  中选出标号最小的对偶节点  $\alpha$ , 并将之永久标号, 即  $\alpha = \arg \min_{\beta \in Q} \{A_\beta\}$ ,  $Q = Q \setminus \{\alpha\}$ ,  $R = R \cup \{\alpha\}$   
 如果  $\alpha \in H_e$ , 则目的地已找到, 循环终止; 否则继续下一步;
- 3) 对偶节点扩展 对于对偶节点  $\alpha$  的每一个后继节点  $\beta \in N_D$ ,  $(\alpha, \beta) \in L_D$ , 如果还未永久标记,

即  $\beta \notin R$ , 且  $\tau_{\alpha\beta}(A_\alpha) < A_\beta$ , 则更新其标号值

$$A_\beta = \tau_{\alpha\beta}(A_\alpha), P_\beta = \alpha, Q = Q \cup \{\beta\};$$

4) 搜索终止 如果所有对偶节点都已扩展, 即  $Q = \emptyset$ , 则终止循环; 否则转向步骤 2)。

### 3 实验与讨论

实验路网采用北京市四环以内基于车行道的导航路网。该路网经过交叉口概化后, 共有弧段 26 628 条, 转向 72 279 个。交通数据采用北京市 2007 年 7—9 月 3 个月以 5 min 为周期的浮动车车速数据。该数据经过统计分析, 形成从星期一到星期日的 7 个类别。交叉路口转向延迟与信号周期、绿信比、交通流、心理因素等有关, 其计算是相当复杂的交通工程问题<sup>[19]</sup>。从信号周期的角度考虑, 以时段和转向类型为依据, 建立了一个简单的转向延迟模型:  $r_{ijk}(t) = 0.5 \times g(t, type_{ijk})$ 。其中, 0.5 表示在交叉口等待的概率,  $type_{ijk}$  表示由弧段  $(i, j)$  到弧段  $(j, k)$  的转向类型, 共有直行、右转、左转、掉头和进出匝道 5 种。根据出行经验, 设置  $g(t, type_{ijk})$  值如表 1 所示。

表 1 时间依赖的转向延迟

Tab. 1 Defaults for time-dependent turn delays

	直行	右转	左转	掉头	进出匝道
高峰期 (7:00 ~ 9:00; 17:00 ~ 19:00)	1	0.5	1	0.8	0.3
夜间 (21:00 ~ 24:00; 0:00 ~ 6:00)	0.5	0	1	0.5	0.5
一般时段 (6:00 ~ 7:00; 9:00 ~ 17:00; 19:00 ~ 21:00)	0.5	0.1	1	0.5	1

为测试转向延迟对出行时间的影响, 验证所提出模型的有效性, 在网络中随机选取 10 000 (100 × 100) 对  $O-D$  弧段 (即  $O-D$  对偶节点), 设置出发时间为周二上午 7:30, 然后利用 LS 算法计算每对  $O-D$  间带转向延迟的时间最短路径, 并在计算过程中累计转向延迟的总耗时。设  $T_1$  为路径行程时间,  $D$  为转向延迟耗时,  $r = 100\% \times D / T_1$  表示转向延迟时间占路径全部行驶时间的比重, 即误时率, 则针对 10 000 个样本, 误时率直方图如图 3 所示 (其中右纵坐标表示小于等于当前误时率的样本所占的百分比)。可以看出, 绝大多数情况 ( $\geq 90\%$ ), 交叉口转向延迟引起的时间耗费占全部行驶时间 25% 以上。对 10 000 个样本的误时率取平均可知, 一次出行中转向延迟时间占全部行驶时间约 38%。

同样针对上述 10 000 个样本  $O-D$  对, 计算每对  $O-D$  间不考虑转向延迟的时间最短路径。设  $T_2$  为

所得路径在考虑转向延迟情况下重新计算而得的实际行程时间,  $\Delta t = 100\% \times (T_2 - T_1) / T_2$  为考虑转向延迟路径相比于不考虑转向延迟路径的省时率, 则省时率直方图如图 4 所示 (其中右纵坐标表示小于等于当前省时率的样本所占的百分比)。可以看

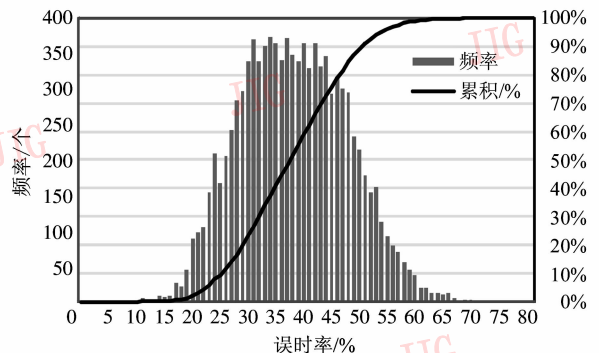


图 3 误时率直方图

Fig. 3 Time-delay ratio histogram

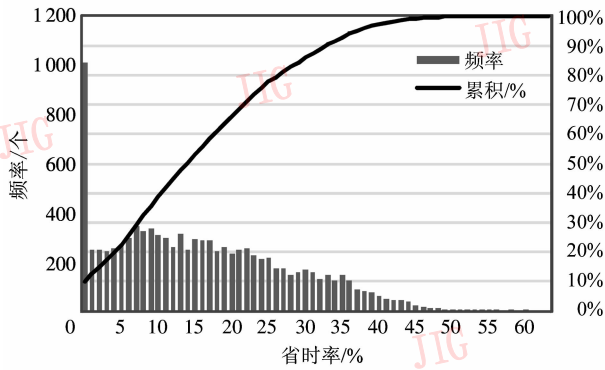
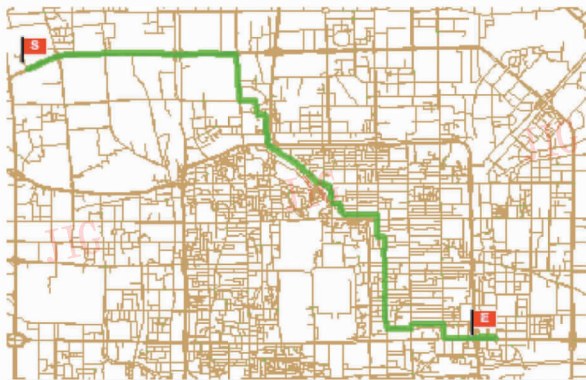


图 4 省时率直方图

Fig. 4 Time-saving ratio histogram

出,绝大多数情况下( $\geq 85\%$ ),考虑转向延迟规划路径比不考虑转向延迟规划路径更省时,省时率最多将近 60%。对 10 000 个样本的省时率取平均值可知,在路径规划中考虑转向延迟,相比于不考虑转向延迟,将节省约 16% 的出行时间。

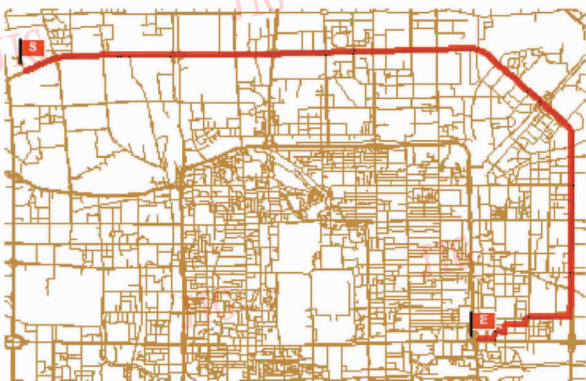
图 5 和图 6 是不考虑与考虑转向延迟规划路径



长度 17.0 km,行程时间 75 min

图 5 不考虑转向延迟的规划路径

Fig.5 Route planning without turn delays



长度 20.4 km,行程时间 45 min

图 6 考虑转向延迟的规划路径

Fig.6 Route planning with turn delays

的实例比较(二者都考虑了实时交通信息)。其中,路径的出发地为北四环西路(四通桥),目的地为建国门外大街,出发时间为周二上午 7:30。可以看出,在不考虑转向延迟的情况下,规划路径将经过城区,遇到大量的交叉口等待,从而导致实际行驶时间更长。而考虑转向延迟的情况下,规划路径则经过四环,虽然这意味着更多的行车距离(多走 3.4 km),但由于避免了城区道路引起的过多转向,行驶时间大幅度减少(节省了 30 min)。

## 4 结 论

本文面向城市交通网络中存在的转向延迟问题,利用对偶图思想,发展了一种动态对偶网络模型,并为之定义了 FIFO 条件,推导了满足 FIFO 条件的弧段行程和交叉口延迟时间计算方法,发展了基于动态对偶网络的标号设定最短路径算法。实验结果表明,本文的动态对偶网络模型能有效处理转向延迟,节省出行时间。下一步的研究工作包括:建立准确可用的交叉口转向延迟模型和弧段行程时间预测模型,以提高动态路径规划的精度;发展复杂交叉路口(如互通式立交)的自动识别与概化方法,以降低转向关系描述的复杂度。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Chabini I, Lan S. Adaptations of the A\* algorithm for the computation of fastest paths in deterministic discrete-time dynamic networks [ J ]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(1): 60-74.
- [ 2 ] Köhler E, Langkau K, Skutella M. Time-expanded graphs for flow-dependent transit times [ C ]//Möhring R, Raman R. Algorithms—ESA 2002. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 49-56.
- [ 3 ] Pallottino S, Scutella M G. Shortest Path Algorithms in Transportation Models; Classical and Innovative Aspects [ M ]// Marcotte P, Nguyen S. Equilibrium and Advanced Transportation Modelling. Netherlands: Kluwer, 1998.
- [ 4 ] Pyrga E, Schulz F, Wagner D, et al. Efficient models for timetable information in public transportation systems [ J ]. ACM Journal of Experimental Algorithmics, 2008, 12(2.4): 1-39.
- [ 5 ] Sung K, Bell M G H, Seong M, et al. Shortest paths in a network with time-dependent flow speeds [ J ]. European Journal of Operational Research, 2000, 121(1): 32-39.
- [ 6 ] Horn M E T. Efficient modeling of travel in networks with time-varying link speeds [ J ]. Networks, 2000, 36(2): 80-90.
- [ 7 ] George B, Shekhar S. Time-aggregated graphs for modeling

- spatio-temporal networks[C]//Spaccapietra S, Pan J Z, Thiran P, et al. Journal on Data Semantics XI. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 191-212.
- [ 8 ] Ren Gang, Wang Wei, Deng Wei. Shortest path problem with turn penalties and prohibitions and its solutions[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2004, 34(1): 104-108. [任刚, 王炜, 邓卫. 带转向延误和限制的最短路径问题及其求解方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34(1): 104-108.]
- [ 9 ] Añez J, De La Barra T, Pérez B. Dual graph representation of transport networks [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1996, 30(3): 209-216.
- [10] Winter S. Modeling costs of turns in route planning [J]. GeoInformatica, 2002, 6(4): 345-361.
- [11] Winter S. Route specifications with a linear dual graph [C]//Richardson D, van Oosterom P. Advances in Spatial Data Handling. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 329-338.
- [12] Hu M, Jiang R, Wang R, et al. Urban traffic simulated from the dual representation: flow, crisis and congestion [J]. Physics Letters A, 2009, 373(23/24): 2007-2011.
- [13] Zhang Xiaoguo, Wang Qing, Wang Ning, et al. A study on road network model in digital maps and the automatic generation algorithm of its database [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(5): 75-79. [张小国, 王庆, 王宁, 等. 电子地图道路路网模型及其自动生成算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(5): 75-79.]
- [14] Gutiérrez E, Medaglia A L. Labeling algorithm for the shortest path problem with turn prohibitions with application to large-scale road networks [J]. Annals of Operations Research, 2007, 157(1): 169-182.
- [15] Gao Song, Lu Feng. An arc-labeling shortest time path algorithm [J]. Geo-Information Science, 2008, 10(5): 604-610. [高松, 陆锋. 基于弧段标记的交通网络时间最短路径算法[J]. 地球信息科学, 2008, 10(5): 604-610.]
- [16] Han Gang, Jiang Jie, Chen Jun, et al. An arc based Dijkstra algorithm for road turning penalty in vehicle navigation system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(4): 366-368. [韩刚, 蒋捷, 陈军, 等. 车载导航系统中顾及道路转向限制的弧段 Dijkstra 算法[J]. 测绘学报, 2002, 31(4): 366-368.]
- [17] Kaufman D E, Smith R L. Fastest paths in time-dependent networks for intelligent vehicle-highway systems application [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 1993, 1(1): 1-11.
- [18] Fu L, Sun D, Rilett L R. Heuristic shortest path algorithms for transportation applications: state of the art [J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(11): 3324-3343.
- [19] Chen Chuanbin. Fusion Methodology Research on Urban Road Network Information Represented in Chinese Natural Language [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2008. [陈传斌. 自然语言表达城市路网信息融合方法研究[D]. 福州: 福州大学, 2008.]