

考虑信号交叉口等待时间的最短路径算法

杨帆, 杨晓光, 云美萍

(同济大学道路与交通工程国家重点实验室, 上海 201804)

摘要: 在甄别等待时间和延误的基础上, 首先提出了信号交叉口处等待时间函数, 并分析了信号交叉口处等待时间特性; 其次, 在假设路段行程时间固定的基础上重新定义路网的邻接矩阵, 提出信号交叉口属性表, 并结合重新定义的路网参数, 将信号交叉口等待时间引入算法之中, 提出了新的标号算法, 即考虑信号交叉口等待时间的最短路径算法 (CWTSI-SP algorithm), 用以求解本文网络最短路径问题. 数值试验的结果表明, CWTSI-SP 算法考虑了信号交叉口的等待时间, 并分析了最短路径和最短行程时间随开始时间的不同而变化的特性. 算法具有较好的效率, 并贴近交通现象本质, 对于动态交通流分析具有良好的实用性.

关键词: 最短路径算法; 信号交叉口等待时间; 标号算法
中图分类号: U495 **文献标志码:** A

Shortest Path Algorithm with a Consideration of Waiting Time at Signalized Intersections

YANG Fan, YANG Xiaoguang, YUN Meiping

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The paper presents a function of waiting time at signalized intersection and the waiting time characteristics are first analyzed. Then, the link matrix is re-defined and the attribute table of the signalized intersection is given. Based on the assumption that the section travel times are fixed, a new labeling algorithm, the CWTSI-SP algorithm, which is the shortest path algorithm by taking the waiting time at signalized intersections into consideration, is presented to solve shortest path (SP) problem. The numeral experiment results demonstrate that with the CWTSI-SP algorithm the features of the shortest path and travel time related to departure time at origin are analyzed. The CWTSI-SP algorithm is efficient in dynamic traffic loading analysis.

Key words: shortest path algorithm; waiting time at

signalized intersection; labeling algorithm

最优路径选择是出行者信息服务中的重要服务内容. 随着智能交通系统 (ITS) 技术的发展及多源 (元) 交通信息数据的获取, 最优路径选择服务已经由静态最优路径选择发展成为实时动态最优路径选择. 在实时的交通环境下, 寻找出用户需要的最优路径 (通常意义上为时间最短的路径), 对于为出行者提供高质量的出行信息服务具有重要意义. 在城市路网中信号交叉口处的等待时间是行程时间的主要组成部分, 然而根据经典图论理论得到的最短路径均不考虑在信号交叉口的等待时间, 因此所得到的最短路径与实际真正的最短路径之间有很明显的差异. 因此在城市网络中搜索最短路径, 必须将在信号交叉口处的等待时间考虑到行程时间之中.

此外, 考虑等待时间的最短路径搜索在交通理论上也具有重要意义. 随着动态交通流理论的发展, 人们对于交通问题的分析从静态宏观层次转移到动态微观层次. 以动态网络加载 (dynamic network loading, DNL) 问题为代表的动态交通流理论中, 传统的静态路径搜索算法已经不适用于实时动态的交通网络分析. 在微观动态交通流分析中交叉口处的等待是不可忽视的因素. 而现有的 DNL 模型多数是针对高速公路的连续流进行分析, 缺少对城市网络间断流的研究. 因此, 考虑等待时间的最短路径研究可以为动态网络交通流分析提供理论依据和支持.

信号交叉口处等待时间与信号交叉口延误是 2 个不同层面上的概念. 信号交叉口延误是指由于车辆排队或在交叉口上游减速而在交叉口处产生的低速行驶和停车. 其由 3 部分组成: UD (uniform delay), ID (incremental delay) 和 IQD (initial queue

收稿日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金 (60974093); 国家自然科学基金 (51178344)

第一作者: 杨帆 (1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为网络交通流. E-mail: yf0sky@yahoo.com.cn

通讯作者: 杨晓光 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统、交通设计与安全、智能公交.

E-mail: yangxg@tongji.edu.cn

delay)^[1]. 信号交叉口处等待时间是指由于信号交叉口信号灯禁行而使个体车辆在停车线处停车等待的时间. 交叉口处的等待时间与信号交叉口延误的差异主要体现在 2 个方面. ①信号交叉口延误是一个统计学的概念, 而等待时间是一个个性化的概念. 信号交叉口延误的输入为如通行能力、平均排队长度以及车辆到达率等参数. 这些参数均为实际观察后通过统计分析得到并用以描述群体特征. 等待时间则是根据每一个单体车辆个性化的参数来确定的. 信号交叉口处的等待时间, 准确而言, 只与车辆到达交叉口开始排队等待的时间以及选择的行驶方向(直行、右转或左转)有关系. ②信号交叉口延误由于是一个统计学的概念, 因此其值也是一个统计数值. 而信号交叉口等待时间根据行驶方向不同有不同取值. 如图 1 所示的十字型交叉口为例, 当车辆到达停车线时, 由于同一相位同一时刻只允许一个方向通行, 因此选择的后继路段不同(终点 1、终点 2 或终点 3), 其在交叉口处的等待时间也是不同的. 这个因素在传统的 shortest path 算法中并未考虑, 也是本文所研究的最短路径搜索算法与传统算法之间的主要差异之一.

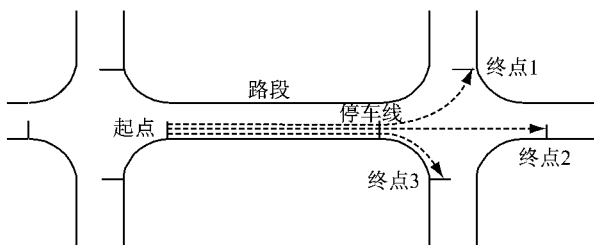


图1 信号交叉口等待时间示意
Fig.1 Diagram of waiting time at signalized intersections

最短路径问题(shortest path, SP)是图论中经典理论. 自 20 世纪 50 年代 Dijkstra 提出了经典的最短路径标号算法以来, 很多学者对 SP 算法进行了研究和改进. 但就经典图论网络 SP 问题求解来看, 仍是以 Dijkstra 算法和 Floyd 算法为主流算法. 然而传统经典 SP 算法应用于交通领域有 2 个缺陷: 一是路段费用是固定的, 二是没有考虑节点处的延误. 在传统经典 SP 算法中, 网络具有固定拓扑结构和固定路段费用, 而在交通领域中, 路段费用, 即出行时间是一个变量, 与实时的流量相关. 此外, 图论中的 SP 算法均只考虑路径上所有路段费用之和, 而没有考虑所经过的节点处的延误. 但在交通领域中, 特别是针对城市内部交通路网研究时, 交叉口处的等待时间是影响路径行程时间的主要因素. 鉴于上述 2

个缺陷, 传统经典 SP 算法应用到交通领域时具有一定的局限性.

目前在静态的交通分配中, 如 Frank-Wolfe 算法, 应用经典 SP 算法时, 在每一次迭代步骤中, 通过 BPR(美国联邦公路局)函数对路段行程时间进行更新, 并应用 Dijkstra 算法或 Floyd 算法搜索最优路径. 其基本的原理依旧是 Dijkstra 算法和 Floyd 算法的标号法. Cooke 等^[2]、Dreyfus^[3]以及 Halpern^[4]针对时变路段长度网络的最短路径问题提出求解算法, 随着动态交通流理论的发展, 传统静态交通网络演化为时变网络(time-dependent network), 但在每一个时间片的算法中依旧是一个静态路网 SP 搜索的问题. 因此, 从静态网络最短路径搜索演变为动态网络最短路径搜索问题时, 经典 Dijkstra 算法和 Floyd 算法依然适用.

然而, 传统 SP 算法并不能照搬应用于考虑交叉口延误的网络中. 在现有考虑交叉口延误的最短路径算法中, 不同的研究者从不同的角度提出了各自的算法模型. Kirby 等^[5]提出了一个算法, 有效计算考虑交叉口处延误的最短路径, 但并没有给出求解的计算方法和结果. Easa^[6]延续了前者的研究, 提出了一个改进的标号法来计算考虑禁行的网络最短路径算法, 但没有考虑交叉口的延误. 算法结果表明了其有效但在应用上具有局限性, 因为其没有考虑到交叉口转向时的惩罚函数. Ariel 等^[7]研究了考虑在路段延误随时间变化的网络中的最短路径问题, 研究了在不同等待约束条件下路网中最短路径和最小延误搜索算法及结果, 而节点处的时变延误则是连续可微的模拟函数, 与交通网络中交叉口处的等待时间函数不同, 因此其算法应用于交通领域具有局限性. Ziliaskopoulos 等^[8-9]提出利用扩展的 FSS(forward star structure)结构来表示包括交叉口转向和转向禁行的交通路网, 并用一个改进的标号算法对最短路径禁行求解. 但在其研究的路网中, 路段行程时间和交叉口的转向惩罚函数都是固定式的, 并非一个与时间相关的动态函数. Pallottino 等^[10]研究了动态最短路径问题, 引入了时间窗(time windows)、转向惩罚函数和禁行(turn penalties and prohibitions)等概念. 同样, 其考虑的转向惩罚函数仍然是固定式的.

综上所述, 传统经典 SP 算法在求解静态宏观网络分配等问题上具有实用性. 然而, 在微观交通流分析中, 交叉口处的等待延误时间与交叉口处到达时间和转向选择相关, 即城市交通网络是一个具有时

变路阻函数和时变交叉口延误函数的时变网络. 现有的算法尚没有很好的方法完全解决此问题. 本文在前人对于交通网络最优路径搜索算法的研究成果基础上进一步提出考虑信号交叉口等待时间的最短路径搜索算法. 本文在固定拓扑结构和固定路段费用的零流网络上进行分析, 将重心放在考虑信号交叉口等待时间的最短路径搜索算法上. 研究的假设前提如下: 交叉口信号周期已知并且固定、已知初始相位时间、各信号相位独立、每一个相位只允许一个方向通行、路段行程时间固定.

1 交叉口等待时间函数

1.1 参数

所应用到的参数及含义如表 1 所示.

表 1 参数及其含义
Tab.1 Parameters

参数	含义
$\tau_{arr,i}$	到达第 i 个节点的时间
$\tau_{dep,i}$	离开第 i 个节点的时间
$\tau_{w,i}$	在第 i 个节点的等待时间
R_i	第 i 个节点的周期时长
$p_{k,i}$	第 i 个节点第 k 个相位的绿灯时长
$g_{k,i}$	第 i 个节点第 k 个相位的绿信比
τ_a	路段 a 的行程时间, 路段 a 为连接 i 节点到 j 节点的路段
τ_{ij}	从节点 i 到节点 j 的行程时间

1.2 信号交叉口等待时间函数

信号交叉口等待时间与到达交叉口的时间 $\tau_{arr,i}$ 相关. 在行程时间已知的条件下, $\tau_{arr,i}$ 可以由上游交叉口的离开时间 $\tau_{dep,i}$ 和路段行程时间 τ_a 求得. 交叉口处的各参数具有以下关系:

$$p_{k,i} = R_i g_{k,i} \tag{1}$$

$$\sum_k g_{k,i} = 1 \tag{2}$$

$$\sum_k p_{k,i} = R_i \tag{3}$$

$$\tau_{arr,j} = \tau_{dep,i} + \tau_a \tag{4}$$

$$\tau_{dep,i} = \tau_{arr,i} + \tau_{w,i} \tag{5}$$

为简化研究, 假设交叉口处共有 n 个相位, 在每一个相位中, 只允许一个方向通行. 令 $t_{r,i} = \tau_{arr,i} \text{ Mod } R$ ($t_{r,i}$ 为到达 i 节点处的周期剩余时长, 即到达时间除以周期时长并取余数, Mod 为取余计算), 并且在 $\tau_{arr,s}$ 时刻交叉口当前相位序号为 s , 而车辆通行所需相位序号为 m . 显然, 当 $s=m$ 时, $t_{r,i} = \tau_{arr,i} = 0$. 分 2 种情况分别讨论等待时间, 如图 2, 图中 s 为在 $\tau_{arr,s}$ 时刻交叉口当前相位序号, m 为车辆通行所需相位序号.

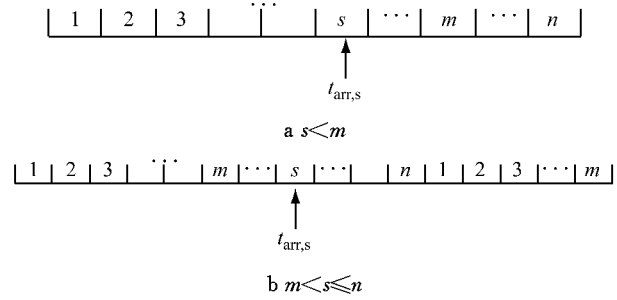


图 2 相位示意

Fig.2 Phase diagram

(1) $s < m$. 如图 2a 所示. 在该情况下等待时间可以由下式得到:

$$t_{w,i} = \sum_{k=1}^s p_{k,i} - t_{r,i} + \sum_{k=s+1}^{m-1} p_{k,i} = \sum_{k=1}^{m-1} p_{k,i} - t_{r,i} \tag{6}$$

(2) $m < s \leq n$. 如图 2b 所示. 在该情况下, 等待时间可以由下式得到:

$$t_{w,i} = \sum_{k=1}^s t_{k,i} + \sum_{k=s+1}^n t_{k,i} - t_{r,i} + \sum_{k=s+1}^{m-1} t_{k,i} = R_i + \sum_{k=1}^{m-1} t_{k,i} - t_{r,i} \tag{7}$$

假设某一个交叉口 I 相位由 3 个独立相位组成, 相位 1, 2 和 3 的绿灯时长分别为 p_1, p_2 和 p_3 , 交叉口信号灯周期时长为 R_I , 交叉口各相位等待时间函数如图 3 所示.

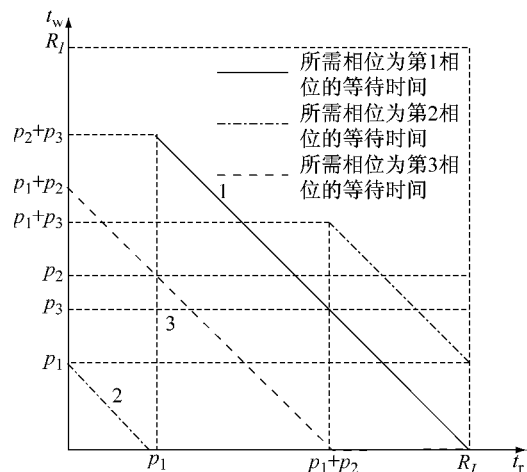


图 3 等待时间函数

Fig.3 Curves of waiting time function

由图 3 可以得出 2 个重要结论:

(1) 信号交叉口处的等待时间不仅仅与到达时间有关, 并且与后续选择路段有关. 而传统的最短路径搜索中未考虑交叉口转向带来的等待时间, 即使后续研究中增加了转向的惩罚因子, 也只是与

时间无关的定量. 然而, 在现实交通出行中, 出行者选择的路径决定了其在各交叉口处因选择不同相位而产生的等待时间的差异. 因此, 考虑等待时间的路段行程时间计算以及最短路径搜索算法均需要考虑后续路段选择的问题.

(2) 信号交叉口处任一相位的等待时间均为周期间断函数. 任一所需相位的等待时间均以信号交叉口的周期时长为周期, 呈现周期循环的特征. 在每一个周期内, 等待时间函数为连续不可微函数, 而在相邻周期交界点为等待时间函数的间断点, 即在每一个所需相位的绿灯尾时刻, 等待时间有一个突变, 导致等待时间增长, 这与现实交通现象是吻合的. 信号交叉口等待时间的上述特性使等待时间非连续不可微, 并且与后续路段相关, 这也导致在考虑信号交叉口等待时间的最短路径搜索算法与传统最短路径搜索算法思路上的差异.

2 考虑信号交叉口等待时间的最短路径算法

2.1 网络描述

2.1.1 邻接矩阵

传统算法中的邻接矩阵用“0”表示 2 点间无路段连接, 而用“1”表示 2 点间有路段相连接. 但在本文算法中, 因为要考虑到交叉口处不同后续路段选择的特殊性, 不能简单地以 0 和 1 来描述邻接矩阵. 借用地图中对于方向的定义来定义路段方向, 即上北下南、左西右东. 路段方向是指路段以起点为基准点从起点到终点的方向. 在邻接矩阵中, 每一个元素为矢量元素 (a_{ij}, d_{ij}) , $a_{ij}=1$ 表示 i 和 j 有路段相连, $a_{ij}=0$ 表示 i 和 j 不相连; d_{ij} 为方向参数, 用 1~8 分别表征北向、西北向、西向、西南向、南向、东南向、东向和东北向 (从北向开始逆时针方向定义), 0 表示 i 和 j 不相连. 以图 4 网络为例, 其邻接矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} (0,0) & (1,8) & (1,6) & (0,0) \\ (1,4) & (0,0) & (1,5) & (1,6) \\ (1,2) & (1,3) & (0,0) & (1,8) \\ (0,0) & (1,2) & (1,4) & (0,0) \end{bmatrix}.$$

图 4 中, 节点 1 处的相位周期信息为 (4 : 8), (5 : 13), (6 : 7), 其中相位顺序为 4(西南向)—5(南向)—6(东南向). (4 : 8) 表示西南方向 (4) 的绿灯时间为 8. 路段上的时间为该路段的零流行程时间.

2.1.2 信号交叉口属性

信号交叉口属性包括相位、相序、周期时长和绿

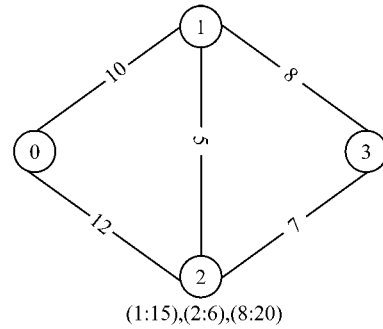


图 4 试验网络

Fig. 4 The experiment network

信比等. 结合邻接矩阵, 图 4 网络中的信号交叉口属性如表 2 所示. 其中, 起始节点属性为空, 以 null 表示. 每一个节点属性由各相位属性组成, 各相位属性由后续路段方向与该方向绿灯时间组成. 以节点 1 为例, 该信号交叉口属性由 3 个相位的属性构成. 第 1 个相位中, 后续路段方向为 4 (西南方向), 结合邻接矩阵表可得后续路段为 1—0, 该相位绿灯时长为 8; 第 2 个相位中, 后续路段方向为 5 (后续路段 1—2), 该相位绿灯时长为 13; 第 3 个相位中, 后续路段方向为 6 (后续路段 1—3), 该相位绿灯时长为 7.

表 2 试验网络信号交叉口属性

Tab.2 The signalized intersection attributes of the experiment network

节点标号	属性
0	null
1	(4 : 8), (5 : 13), (6 : 7)
2	(1 : 15), (2 : 6), (8 : 20)
3	null

2.2 CWTSI-SP 算法

结合邻接矩阵及信号交叉口属性提出考虑信号交叉口等待时间的最短路径 (CWTSI-SP) 算法. 与传统最短路径算法的差异在于, 传统的最短路径算法中节点处的到达时间等于离开时间, 在节点处没有额外的等待时间, 但在本算法中, 由于在交叉口处的等待时间与后续选择路段有关, 因此在 CWTSI-SP 算法中需要考虑后续路径选择和等待时间的计算. 具体的标号算法步骤如下:

(1) 主函数. ①初始化网络, 定义开始时间为 t_0 , 所有节点标号为 F , 所有节点的到达时间和离开时间均为 t_{INF} ; ②令起点标号为 T , 令起点的离开时间等于 t_0 , 并转入子函数中步骤 ①.

(2) 子函数. ①用标号子算法, 如果当前节点为终点, 则转入 ④. 如果当前节点不为终点, 则计算该节点的所有后续节点的到达时间, 如果到达时间小于节点处原先到达时间, 则修改后续节点的到达时

间。②用标号子算法,根据式(4)~(7)计算后续节点到其各自后续节点的离开时间,如果该离开时间小于先前离开时间,则修改后续节点的每一个后续节点的离开时间。③用标号子算法,对于每一个后续节点,改其标号为 T ,令其为当前节点,转入①。算法结束以后,改其标号为 F 。④用回溯法,寻找从终点开始的前续节点,直到起点,则该路径为最短路径,结束算法。

CWTSL-SP 算法基于标号算法的原理,以离开时间最短作为目标进行标号搜索。其与传统的 Dijkstra 算法的差别在于:由于传统的 Dijkstra 算法不考虑等待时间,每一个节点的到达时间等于离开时间,这就导致在选择后续路段的过程中没有离开时间上的差异性。但 CWTSL-SP 算法中考虑了等待时间,因此从某一节点出发去不同后续节点的时间均不相同。这是 2 种算法的最主要差异,也是 CWTSL-SP 算法能够考虑节点属性而 Dijkstra 算法没有考虑节点属性的根本原因所在。此外,CWTSL-SP 算法是一个实时动态算法,其更新过程和最终结果与开始时间 t_0 相关,而 Dijkstra 算法是在一个固定拓扑网络上的一个静态搜索算法,没有考虑交通网络的动态时变特性。

3 数值试验

以图 4 网络为例,分别用 Floyd 算法和 CWTSL-SP 算法对其最短路径进行计算。Floyd 算法得到的最短路径为 0-1-3,行程时间为 18。以 CWTSL-SP 算法计算不同出发时间下的起终点间最短路径及行程时间如表 3 所示,不同开始时间下的最短行程时间与 Floyd 算法得到的最短行程时间对比如图 5 所示。传统最短路径算法得到的行程时间不随出发时间变化而变化,而 CWTSL-SP 算法得到

表 3 不同出发时间下的最短路径及最短行程时间

Tab.3 The shortest path and travel time with different departure time

开始时间	最短路径	最短行程时间/s	开始时间	最短路径	最短行程时间/s
0	0-1-3	29	48	0-1-2-3	27
1	0-1-3	28	49	0-1-2-3	26
2	0-1-3	27	50	0-1-2-3	25
3	0-1-3	26	51	0-1-2-3	24
18	0-2-3	19	52	0-1-2-3	23
19	0-2-3	19	53	0-1-2-3	22
20	0-2-3	19	54	0-1-2-3	21
46	0-1-2-3	29	55	0-1-2-3	20
47	0-1-2-3	28			

的最短行程时间却是各异,并且如表 3 和图 5 所示,与 Floyd 算法得到的结果相差很大。如在 76 出发时,网络中的最短行程时间为 48,远远高于不考虑交叉口等待时间的最短行程时间值。由此也说明信号交叉口的等待时间对于最短行程时间的影响程度很大,在分析城市网络交通流时应充分考虑信号交叉口处的等待时间因素。

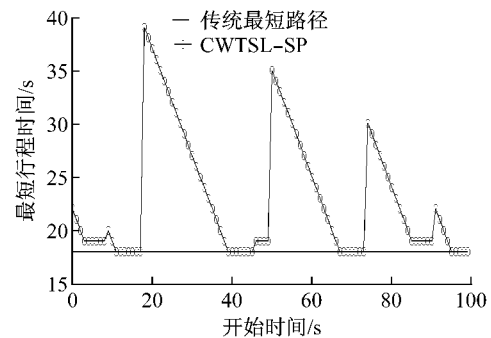


图 5 不同算法最短行程时间比较

Fig.5 Comparison of the shortest travel time with different algorithms

从结果中可以得到以下结论:①出发时间变化会导致最短路径选择的变化。如当出发时间为 0 时,最短路径为 0-1-3,而当出发时间为 50 时,最短路径为 0-1-2-3。这主要是由于不同的开始时间决定了到达交叉口的时间不同,从而使得在交叉口处的等待时间有明显的变化。②随着出发时间的不同,最短行程时间也不同,如图 5 所示,最短行程时间在一定时间段内呈现单调性,但从总体上看,是一个连续不可微曲线。这主要是因为交通网络是一个时变网络,道路上的交通参数随着时间变化而体现出不同的数值和特性,导致了行程时间和最短路径的跃变特性。出发时间的不同会使到达交叉口的时间发生变化,从而影响交叉口不同相位的等待时间,并最终导致最短路径的选择改变。综上所述,交通网络的最短路径问题是一个动态路径搜索问题,出发时间、交叉口属性以及动态路段行程时间都是影响最短路径搜索的因素。同时,将信号交叉口等待时间纳入行程时间中进行分析会使算法更能解决现实交通问题,为出行者提供更为准确的交通出行信息。

算法的效率性直接影响其在实际应用中的可行性。对试验路网(图 6)进行多次试验,测试算法的效率,选出试验中运算最短时间和最长时间,如图 7 和表 4 所示,其中拟合优度 R^2 均大于 0.95。通过对算法运行时间的拟合可知算法在求解小规模路网上具有较好的效率性,算法的时间效率随网络节点数和

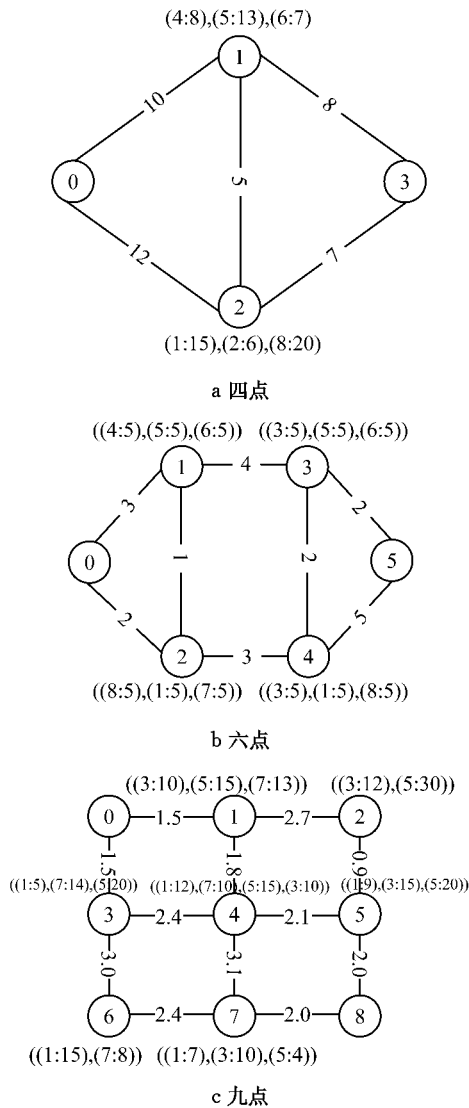


图 6 不同节点数和路段数的试验路网
Fig.6 Experiment networks with different nodes and link numbers

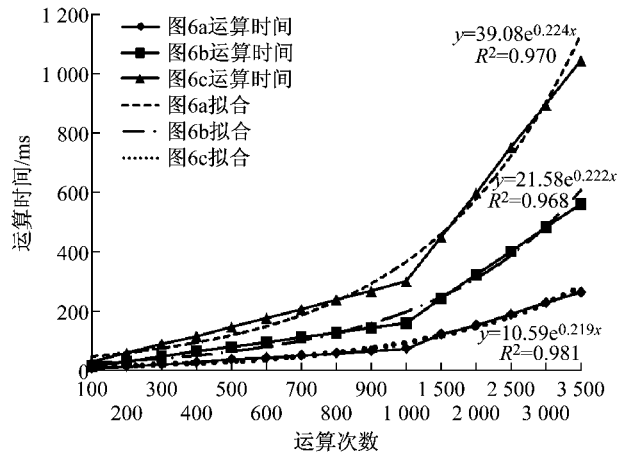


图 7 各试验路网的运算效率
Fig.7 Computing efficiency curves of experiment networks

路段数的增加呈指数上升趋势. 如果应用于大型交通网络, 则可以通过并行计算的方式计算可行路径以及每条路径的实际行程时间, 从而进一步提高运行效率, 满足实际应用中的时间需求.

4 结语

提出了考虑信号交叉口的最短路径搜索 (CWTSI-SP) 算法, 在传统标号算法的基础上重新定义了网络的邻接矩阵, 并加入交叉口属性表, 以节点的出发时间作为标号算法的依据, 搜索从起点到终点的最短路径. 数值试验表明算法对于求解交通网络中考虑信号交叉口等待时间的最短路径问题具有良好的效率性. 该算法可应用于动态交通网络加载问题中, 以提高动态网络分析的准确性和合理性.

表 4 不同路网算法时间

Tab.4 Different network time

ms

运算次数	图 6a		图 6b		图 6c	
	最长时间	最短时间	最长时间	最短时间	最长时间	最短时间
100	10.00	5.42	16.67	11.25	30.42	22.08
200	15.00	7.50	32.42	22.50	59.83	45.42
300	22.92	9.17	49.17	32.92	90.25	67.50
400	29.17	12.50	66.50	45.42	115.84	89.58
500	39.00	16.92	80.00	56.25	146.67	113.34
600	44.58	18.33	96.25	65.83	177.92	136.25
700	52.92	21.67	113.75	80.00	205.84	160.42
800	60.00	25.67	128.75	89.50	239.75	186.92
900	67.50	28.75	144.84	99.58	267.75	206.50
1 000	75.42	31.67	161.5	111.67	300.25	276.50
1 500	124.92	47.08	243.92	165.00	450.59	339.59
2 000	154.42	62.08	323.17	223.59	597.34	456.09
2 500	190.67	77.92	402.26	275.25	751.43	565.84
3 000	230.00	92.92	483.34	327.51	893.51	683.18
3 500	265.25	110.25	560.18	382.67	1043.18	792.35

此外,该算法也可以应用于出行者最短路径推荐中,考虑交叉口处的等待时间使推荐路径更为合理与最优。

当然,本文的最短路径搜索算法中将路段行程时间假设为定值,重点放在了考虑交叉口等待时间的路径搜索上。在交通网络中路段行程时间也是一个时变函数,与实时交通状态相关,在后续的研究中,考虑引入路段行程时间函数并丰富和完善动态网络加载中的最短路径搜索算法;同时,在考虑零流网络的基础上引入实时交通流对于行程时间的影响分析,使算法能更准确地描述真实交通状况。

参考文献:

- [1] Transportation Research Board. Highway capacity manual [M]. Washington D C: National Research Council, 2000.
- [2] Cooke K L, Halsey E. The shortest route through a network with time dependent intermodal transit time [J]. Journal of Mathematic Annual Application, 1966, 14(3):493.
- [3] Dreyfus S E. An appraisal of some shortest path algorithms [J]. Operation Research, 1969, 17(3): 395.
- [4] Halpern J. The shortest route with time dependent length of edges and limited delay possibilities in nodes [J]. Operation Research, 1977, 21(3):117.
- [5] Kirby R F, Potts R B. The minimum route problem for networks with turn penalties and prohibitions [J]. Transportation Research, 1969, 3: 397.
- [6] Easa S M. Shortest route algorithm with movement prohibitions [J]. Transportation Research Part B, 1985, 19(3): 197.
- [7] Ariel Orda, Raphael Rom. Shortest path and minimum delay algorithms in networks with time dependent edge length [J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1990, 37(3): 607.
- [8] Ziliaskopoulos A K, Mahmassani H S. Time dependent shortest path algorithm for real time intelligent vehicle highway system applications [J]. Journal of the Transportation Resewch Board, 1993: 94.
- [9] Ziliaskopoulos A K, Mahmassani H S. A note on least time path computation considering delays and prohibitions for intersection movements [J]. Transportation Research Part B, 1996, 30(5): 359.
- [10] Stefano Pallottino, Maria Grazia Scutella. Shortest path algorithms in transportation models; classical and innovative aspects [D]. Perugia: University of Perugia, 1997.

(上接第 679 页)

决策时间进行了调整,允许在顾客群形成时间与开始决策时间内出现的新顾客进入决策,使进入计划的顾客更多,从而使路径平均距离更短。仿真分析结果也证明了新策略能够使路径距离变短,从而使平均系统时间减少。

参考文献:

- [1] Psaraftis H N. Dynamic vehicle routing: status and prospects [J]. Annals of Operations Research, 1995,61(1):143.
- [2] Psaraftis H N. Dynamic vehicle routing problems[M]. North-Holland: Elsevier Science Publishers B V, 1988.
- [3] Bertsimas D J, Van Ryzin G. Stochastic and dynamic vehicle routing with general demand and interarrival time distributions [J]. Advances in Applied Probability, 1993,25(4):947.
- [4] Bertsimas D J, Van Ryzin G. Stochastic and dynamic vehicle routing in the Euclidean plane with multiple capacitated vehicles[J]. Operations Research, 1993,41(1):60.
- [5] Bertsimas D J, Van Ryzin G. A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the Euclidean plane [J]. Operations Research, 1991,39(4):601.
- [6] Pillac V, Gendreau M, Guéret C, et al. A review of dynamic vehicle routing problems[J]. European Journal of Operational Research, 2013,225(1):1.
- [7] Yang J, Jaillet P, Mahmassani H. Real-time multivehicle truckload pickup and delivery problems [J]. Transportation Science, 2004,38(2):135.
- [8] Chen Z L, Xu H. Dynamic column generation for dynamic vehicle routing with time windows [J]. Transportation Science, 2006,40(1):74.
- [9] Bent R W, Van Hentenryck P. Scenario-based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers[J]. Operations Research, 2004:977.
- [10] Montemanni R, Gambardella L M, Rizzoli A E, et al. Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2005,10(4):327.