

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.09.011

# 基于动态行程时间可靠性的 单车路径选择算法研究

智路平<sup>1,2</sup>, 周溪召<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306; 2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了提高出行者的路径选择效率, 从微观层面对随机动态路网条件下的单车路径选择问题进行深入研究。随机动态路网条件下, 作为车辆路径构成单元的路段, 不同时刻车辆在其上的行程时间具有明显的动态变化特征, 若使用传统的最短路算法进行车辆路径选择, 将某一时刻的路段行程时间作为路段权值不能反映路段行程时间动态变化产生的影响, 车辆路径选择结果容易造成误判。为解决此问题, 按照集散波理论对于路段车辆运行状态的划分方式, 首先以路段下游信号转换时刻目标车辆与排队车流队尾的相对位置关系为切入点, 对路段行程时间进行分状态分类随机动态预测, 然后建立对应可接受水平下的路段行程时间可靠性计算模型, 最终分别针对简单网络和复杂网络的单车路径选择问题提出使用行程时间可靠性作为关键控制变量的三阶段车辆路径选择模型和权值异化的Dijkstra车辆路径选择算法。通过案例及对比分析表明, 在出行者面临的简单网络中使用行程时间可靠性进行车辆路径选择可纠正仅仅按照单一行程时间进行车辆路径选择造成的选择误判, 在复杂网络中使用行程时间可靠性作为路段权值异化的Dijkstra算法可迅速求出最可靠路径, 有效解决了随机动态路网环境下的单车路径选择问题, 是对路径选择问题研究的深入拓展。

**关键词:** 交通工程; 行程时间可靠性; 行程时间分状态预测; 路径选择算法; 随机动态路网

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2018) 09-0071-07

## Study on Single Vehicle Routing Algorithm Based on Dynamic Travel Time Reliability

ZHI Lu-ping<sup>1,2</sup>, ZHOU Xi-zhao<sup>2</sup>

(1. School of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;  
2. School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to improve the routing efficiency of traveler, the routing problem of single vehicle under the condition of random dynamic road network is studied from micro level. Road section is a vehicle routing unit, the travel time on it has obvious dynamic change characteristics under random dynamic road network condition. If using the traditional shortest path algorithm to solve routing problem and using the instantaneous section travel time as the section weight value cannot reflect the influence of dynamic change of section travel time, the result of vehicle routing may be misjudged easily. In order to solve this problem, a new method is created. According to the division mode of vehicle running status in the theory of gather-disperse wave, first, the relative position relationship between the target vehicle and the tail of the queue in the signal conversion time on downstream section is analyzed, and the road travel time is predicted by states randomly and dynamically. Then, a calculation model about section travel time reliability under acceptable level is established. Finally, 2 algorithms for single vehicle routing problem using the travel time reliability as the key

收稿日期: 2017-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61273042); 上海理工大学管理学院博士启动项目 (YJRC201601)

作者简介: 智路平 (1982-), 男, 山西太原人, 博士. (zhi19821027@163.com)

control variable are set; one is a 3-stage routing model, the other is a weight dissimilated Dijkstra routing algorithm for single and complex road networks respectively. Through case analysis and comparison, it is found that (1) when the traveler is facing a simple network, the vehicle routing using travel time reliability can correct the misjudgment that is only according to the single travel time; (2) the dissimilated Dijkstra algorithm, which uses travel time reliability as the section weight value in the complex network, can quickly find the most reliable path. The two algorithms can effectively solve the single vehicle routing problem in random dynamic network environment. The research is the further development of routing problem.

**Key words:** traffic engineering; travel time reliability; travel time prediction by state; routing algorithm; stochastic dynamic road network

## 0 引言

随着交通拥堵程度的日益增加, 车辆行程时间的不可控程度日趋严重。在此背景下, 车辆最优路径选择问题的重要性受到出行者及管理者的极大关注。

车辆路径选择问题<sup>[1]</sup>, 自提出以后得到快速发展, 演变出众多子问题<sup>[2-4]</sup>, 而对其分析一般归结于求解最短路径。在有时间窗限制及随机动态路网条件下进行最短路径选择, 为受限的动态最短路径问题, 难点在于此时车辆的路段行程时间具有明显的波动性, 不再适于作为最短路径问题的求解指标。

关于动态最短路径问题, Hall<sup>[5]</sup>研究了交通网络中随时间变化的动态最短路径问题; Michael等<sup>[6]</sup>对单个车辆动态路径选择问题的模型进行了研究和分析; Chabini等<sup>[7]</sup>发现设定车辆在路径上的驾驶行为满足先进先出准则时, 可以使用 Dijkstra 算法对动态路径规划问题进行求解, 且不会增加问题求解的复杂程度; Fu等<sup>[8]</sup>研究了动态随机网络中的最短路径问题; Chai等<sup>[9]</sup>对自适应信号控制网络中的动态交通路径问题进行了研究; Tilk等<sup>[10]</sup>在有界双向动态规划约束的最短路径问题求解变量加速技术的基础上, 引入动态中途点来减少最短路径问题求解整体计算量; 石小法等<sup>[11]</sup>考虑交通信息对出行者选择出行路径的动态影响, 建立了一种动态路径选择模型; 张安英等<sup>[12]</sup>建立了动态路阻下的出行时间预测和路径选择模型, 将路径选择范围从最优路径扩大到随机路径; 张梦颖<sup>[13]</sup>研究了旅行时间不确定的车辆路径问题; 任小聪等<sup>[14]</sup>建立了基于事故信息的车辆路径选择模型; 苏贞旅等<sup>[15]</sup>构建了基于出发时刻的带有时间窗的动态最短路径模型。

然而此类研究并未对随机动态路网条件下单一车辆的路径选择问题进行深入分析, 且对路径构成单元路段的行程时间的研究多将路口延误固化, 得

到固定的行程时间预测值, 或者是对时变的行程时间进行理论性描述, 难于进行实时计算, 最终导致路径选择时对路网的动态波动性考虑不足, 影响路径选择方案的有效性。

基于此, 本研究将信号转换时刻目标车辆位置与车流排队队尾之间的相对位置关系的可能状态进行分类, 根据排队长度、车流消散速度及信号周期长度的不同, 按照集散波原理进行相应的行程时间预测, 获得可列的行程时间预测值集, 并求对应的行程时间可靠性, 将最短时间路径问题转化为最可靠路径问题。然后对单车网络简单网络路径选择问题和单车网络复杂网络路径选择问题分别提出对应的求解算法: 针对单车网络简单网络路径选择, 将期望行程时间、预测行程时间、行程时间可靠性与时间窗进行比对, 生成3段路径优化选择算法; 针对单车网络复杂网络路径选择问题, 提出一个全新的权值异化型 Dijkstra 算法进行求解, 并验证可行。

## 1 随机动态行程时间预测模型

根据集散波理论<sup>[16]</sup>, 将  $t$  时刻路段  $a$  及下游信号交叉口的行程时间  $T_a(t)$  分为两段<sup>[17-18]</sup>: 路段非拥挤区段的行程时间  $r_a(t)$  及排队区段的行程时间  $d_a(t)$ 。

$$\begin{aligned} T_a(t) &= r_a(t) + d_a(t), \\ r_a(t) &= \frac{L}{v_a(t)} - \frac{v_a^f k_a^j r}{2v_a(t)} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{v_a^f k_a^j}} \right] S_a, \\ d_a(t) &= \frac{v_a^f k_a^j r}{2Q_a(t)} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{v_a^f k_a^j}} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $L$  为路段长度;  $r$  为红灯时长;  $S_a$  为标准小汽车的平均空间长度;  $Q_a(t)$  为交叉口通行能力;  $v_a^f$  为自由流速度;  $k_a^j$  为阻塞密度;  $x_a^{up}(t)$  为上游驶入流量。

### 1.1 动态路段行程时间预测

如图1所示,  $O$  点为路段起点,  $D$  点为含下游交

叉口的路段终点。目标车辆在路段下游红灯信号亮起时进入路段, 根据第  $n$  次红灯信号结束时, 该车辆位置 ( $T$  点、 $K$  点或  $L$  点) 与下游排队队尾 ( $K$  点) 的相对位置关系, 分析后续车辆及车流运行状态, 进行行程时间分情况预测。各状态预测行程时

间见表 1。

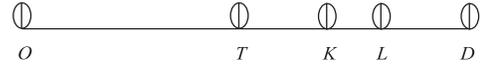


图 1 路段关键点相对位置图示

Fig. 1 Relative positions of key points of section

表 1 路段行程时间分状态分型预测表

Tab. 1 Prediction table for section travel time by states

序号	位置	车辆状态	行为分析	预测行程时间
1	$T$	车队消散, 直接通过	以速度 $v_a(t)$ 两兼通过全程	$r_a(t) = \frac{L}{v_a(t)}$ $d_a(t) = 0$
2	$T$	车队消散, 处于停车线	等待一次红灯后通过	$r_a(t) = \frac{L}{v_a(t)}$ $d_a(t) = r + t_0$
3	$T$	部分消散, 位于队尾 $L$	下一次绿灯时排队通过	$r_a(t) = n(r + g)$ $d_a(t) = \frac{L - r_a(t) \cdot v_a(t)}{S_a \cdot Q_a(t)} + r$
4	$T$	部分消散, 位于队尾 $L$	接下来第 $m$ 次绿灯时通过	$r_a(t) = n(r + g)$ $d_a(t) = \frac{L - r_a(t) \cdot v_a(t)}{S_a \cdot Q_a(t)} + mr$
5	$K$	车队消散, 位于队尾 $K$	绿灯结束刚好通过	$r_a(t) = nr + (n - 1)g$ $d_a(t) = g$
6	$K$	车队消散, 位于队尾 $K$	绿灯结束前通过	$r_a(t) = nr + (n - 1)g$ $d_a(t) = \frac{v_a^f k_a^j r}{2Q_a(t)} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{v_a^f k_a^j}} \right]$
7	$K$	部分消散, 位于队尾 $L$	$n = 1$ , 下 $m$ 次绿灯时通过	$r_a(t) = r$ $d_a(t) = \frac{v_a^f k_a^j r}{2Q_a(t)} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{v_a^f k_a^j}} \right] + mr$
8	$K$	部分消散, 位于队尾 $K$	$n > 1$ , 下 $m$ 次绿灯时通过	$r_a(t) = nr + (n - 1)g$ $d_a(t) = \frac{L - r_a(t) \cdot v_a(t)}{S_a \cdot Q_a(t)} + (m - 1)r$
9	$L$	车队消散, 位于 $L$	$n = 1$ , 直接通过	$r_a(t) = \frac{L}{v_a(t) +  w_{stop}(t)  k_a^j(t) S_a}$ $d_a(t) = r - r_a(t) + \frac{v_a^f k_a^j r}{2Q_a(t)} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{v_a^f k_a^j}} \right]$
10	$L$	部分消散, 位于 $L$	$n = 1$ , 下 $m$ 次绿灯时通过	$r_a(t) = \frac{L}{v_a(t) +  w_{stop}(t)  k_a^j(t) S_a}$ $d_a(t) = mr - r_a(t) + \frac{v_a^f k_a^j r}{2Q_a(t)} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{v_a^f k_a^j}} \right]$ $r_a(t) = nr + (n - 1)g$
11	$L$	车队消散, 位于 $L$	$n > 1$ , 直接通过	$d_a(t) = \frac{L - [nr + (n - 1)g] \cdot v_a^f / \left[ 1 + J \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \right]}{S_a \cdot Q_a(t)}$ $r_a(t) = nr + (n - 1)g$
12	$L$	部分消散, 位于 $L$	$n > 1$ , 下 $m$ 次绿灯时通过	$d_a(t) = \frac{L - [nr + (n - 1)g] \cdot v_a^f / \left[ 1 + J \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \right]}{S_a \cdot Q_a(t)} + mr$

注:  $v_a(t)$  为非拥挤状态下  $t$  时刻的车辆行驶速度,  $v_a(t) = v_a^f / \left[ 1 + J \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \right]$ , 其中  $\alpha$  为服务水平;  $J$  为服务水平参数;  $t_0$  为车辆停车、启动后通过下游交叉口的延误时间;  $g$  为绿灯时长;  $w_{stop}(t)$  为  $t$  时刻的停车波波速。

### 1.2 动态路径行程时间及可靠性预测

设路径行程时间  $T_i(t)$  为路径上各路段行程时间之和。

$$T_i(t) = \sum_{a=1}^n T_a(t), \quad (2)$$

式中  $a$  为构成路径  $i$  的各条路段编号。

预测行程时间为考虑路网及交通流随机性的与时刻  $t$  相关的行程时间, 将该预测行程时间与期望行程时间之比在可接受水平之内的概率称为随机动态行程时间可靠性。

$$R_a(t) = P\{T_a(t)/T_\varphi \leq \gamma, \gamma \geq 1\}, \quad (3)$$

式中,  $R_a(t)$  为随机动态路段行程时间可靠性;  $T_\varphi$  为期望行程时间;  $\gamma$  为可接受水平。对于可接受水平  $\gamma$  的取值, 根据本研究对期望行程时间、预测行程时间的设定, 由于预测行程时间需要考虑路网的随机动态特征, 相关变量多达 28 个, 而期望行程时间的约束条件较少, 对期望行程时间的估计值偏小, 因此设定  $\gamma$  取值范围为  $\gamma \in [2, 3]$ 。

路径行程时间可靠性为各构成路段行程时间可靠性之积:

$$R_i(t) = \prod_{a=1}^n R_a(t), \quad (4)$$

式中  $a$  为构成路径  $i$  的各条路段编号。

## 2 单车辆简单网络路径选择算法

对于单车辆简单网络路径选择, 已有算法<sup>[2,6,9-10]</sup>多将行程时间作为路径选择的关键变量, 然而在拥挤网络条件下, 出行者关注的重点除了行程时间, 还有行程时间可靠性。基于此, 提出以下算法: 将行程时间及行程时间可靠性综合考虑, 同时作为路径选择的依据。步骤如下:

路径集合表示为  $PS$ , 且  $PS = \{i | i=1, 2, \dots, n\}$ , 其中  $i$  表示第  $i$  条路径; “ $\vee i$ ”、“ $\wedge i$ ”为扎德算子, 其中“ $\vee i$ ”表示各元素中取大值、“ $\wedge i$ ”表示各元素中取小值。

### 2.1 预判阶段

比较各路径期望行程时间  $T_{\varphi_i}$  与时间窗上界  $T_{\max}$  (一般根据历史经验设定, 为预期中通过该路径的最大行程时间与根据工作计划留给完成该路径的行程时间的权衡值), 按照以下规则进行路径选择:

(1) 若期望行程时间都在时间窗内, 则选择期望行程时间较短的路径为选择方案;

(2) 若某一条路径的期望行程时间在时间窗内, 其他皆在时间窗外, 则选择期望行程时间在时间窗内的路径;

(3) 若期望行程时间都在时间窗外, 则认为没有可选方案, 需重新界定时间窗。

算法如下:

- (1) 若  $T_{\varphi_i} < T_{\max}, i=1, 2, \dots, n$ , 则  $PS = \{i | \wedge_{i=1}^n T_{\varphi_i}\}$ ;
- (2) 若  $T_{\varphi_i} < T_{\max}, T_{\varphi_j} > T_{\max}, i, j=1, 2, \dots, n, i \neq j$ , 则  $PS = \{i\}$ ;
- (3) 若  $T_{\varphi_i} > T_{\max}, i=1, 2, \dots, n$ , 则  $PS = \{\varphi\}$ 。

### 2.2 初选阶段

预测行程时间  $T_i(t)$  为一预测值组, 取其中的最大值  $T_{i\max}(t)$ 、最小值  $T_{i\min}(t)$  为预测行程时间取值区间的上下界, 即  $T_i(t) \in [T_{i\min}(t), T_{i\max}(t)]$ , 将预测行程时间最大值  $T_{i\max}(t)$  与时间窗上界  $T_{\max}$  进行比对, 按照以下规则进行路径选择:

(1) 若预测行程时间最大值都在时间窗内, 则选择期望行程时间最大值较小的路径为选择方案;

(2) 若某一条路径的预测行程时间最大值在时间窗内, 其他皆大于时间窗上界, 则选择预测行程时间最大值在时间窗内的路径;

(3) 若预测行程时间最大值都在时间窗外, 则比较各条路径的预测行程时间集, 选择集合中值在时间窗内的样本数占组内总样本数的比例大的路径。

算法如下:

(1) 若  $T_{i\max}(t) \leq T_{\max}, i, j=1, 2, \dots, n$ , 则  $PS = \{i | \wedge_{i=1}^n T_{i\max}(t)\}$ ;

(2) 若  $T_{i\max}(t) \leq T_{\max}, T_{j\max}(t) > T_{\max}, i, j=1, 2, \dots, n, i \neq j$ , 则  $PS = \{i\}$ ;

(3) 若  $T_{i\max}(t) > T_{\max}, i=1, 2, \dots, n$ , 则

$PS = \{i | \vee_{i=1}^n \{ \sum_{j=1}^k [j=1 | T_{ij}(t) \leq T_{\max}] / k \}$ , 其中  $T_{ij}(t)$  为路径  $i$  的第  $j$  个预测行程时间,  $j=1, 2, \dots, k$ 。

### 2.3 修正阶段

使用行程时间可靠性  $R_a(t)$  对路径选择方案的校核是在初选阶段的基础上进行的。

(1) 当预测行程时间最大值都在时间窗内, 若预测行程时间最大值小的路径行程时间可靠性高, 则选择该路径; 若预测行程时间最大值大的路径行程时间可靠性高, 对行程时间可靠性定义进行形式变换, 得:  $R_a(t) = P\{T_a(t) \leq \gamma T_\varphi, \gamma \geq 1\}$ , 可知, 行程时间可靠性越高, 预测行程时间小于期望行程时间的可接受倍数的可能性越高, 即行程时间取得较小值的可能性越大。依据安全的前提下追求效率的原则, 可以选择预测行程时间最大值大但行程时间可靠性高的路径。总之, 若预测行程时间最大值都在时间窗内, 则选择行程时间可靠性高的路径。

(2) 若某一条路径的预测行程时间最大值在时间窗内, 其他皆在时间窗外, 无论该路径的行程时间可靠性是否最高, 根据优先满足时间窗的安全限制原则, 皆选择该路径。

(3) 若预测行程时间最大值都在时间窗外, 进一步检查各路径期望行程时间的某一可接受倍数是否都在时间窗, 若均在时间窗内, 则选择对应行程时间可靠性高的路径; 若只有一条路径的该值在时间窗内, 则选择该路径; 若各路径的该值均超过时间窗上界, 则需对时间窗修正后重新计算。

算法如下:

(1) 若  $T_{imax}(t) \leq T_{max}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 则:

$$PS = \{i | \bigwedge_{i=1}^n R_a(t)\};$$

(2) 若  $T_{imax}(t) \leq T_{max}$ ,  $T_{jmax}(t) > T_{max}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ,  $i \neq j$ , 则:  $PS = \{i\}$ ;

(3) 若  $T_{imax}(t) > T_{max}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 则:

$$PS = \begin{cases} i | \bigwedge_{i=1}^n R_a(t), \gamma T_{\varphi i}(t) < T_{max} \\ i | \gamma T_{\varphi i} \leq T_{max}, \gamma T_{\varphi i}(t) > T_{max} & i, j = \dots, n, i \neq j \\ \varphi, \gamma T_{\varphi i}(t) > T_{max} \end{cases}$$

总之: 3 段选择模型, 重点都在各路径行程时间均在时间窗内的选择问题上; 一内一外情况下的选择很明确, 皆选内; 均在外情况暂时可以进行路径选择, 未来需调整时间窗。时间窗的调整需要结合预测行程时间与工作计划, 保证调整后的时间窗上界大于预测的行程时间最大值。

3 个阶段是递进关系, 也是循序验证过程, 最终路径的选择由修正阶段的结果确定。

### 2.4 案例分析

两条路径选择案例, 如图 2 所示: LINE1:  $O - A - B - D$ ; LINE2:  $O - C - D$ 。

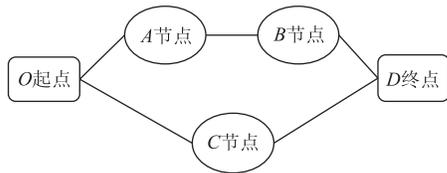


图 2 双路径数学模型

Fig. 2 Two-path mathematical model

假设  $D$  处未形成排队入场的情况。路径中各关键节点情况如表 2 所示。

表 2 路径关键节点情况表

Tab. 2 Situations of key nodes on path

节点 A	节点 B	节点 C
无信号控制。虚拟周期 30 s, 东西向 15 s, 南北向 15 s	周期 57 s, 南北向绿灯 30 s, 东西向绿灯 27 s	周期 73 s, 南北向绿灯 44 s, 东西向绿灯 29 s

根据预测行程时间算法, 给出各路段的预测行程时间集, 如表 3 所示。然后计算各路径行程参数, 见表 4。

表 3 各路段预测行程时间表

Tab. 3 Forecasted travel time of each section

分类	n	m	预测行程时间/s				
			OA	AB	BD	OC	CD
1	1	1	27	78	42	67	88
2	1	1	42	105	42	96	88
3	1	1	29	131	42	80	88
4	1	2	44	158	42	109	88
5	2	1	60	114	42	146	88
6	2	1	57	125	42	129	88
7	1	1	42	95	42	85	88
8	1	2	57	122	42	114	88
9	2	2	72	152	42	158	88
10	1	1	27	68	42	56	88
11	1	2	42	95	42	85	88
12	1	3	57	122	42	114	88
13	2	1	57	125	42	128	88
14	2	2	87	179	42	186	88

表 4 路径行程参数表 ( $\gamma=2$ )

Tab. 4 Path travel parameters ( $\gamma=2$ )

路径	路段	$T_{max}/s$	$T_{\varphi}/s$	$T_a(t)$ 区间/s	$R_a(t)$
1	OA		27	[27, 87]	0.5
	AB		78 + 27	[68, 179]	0.86
	BD	[0, 350]	42	42	1
2	OC		67 + 29	[56, 186]	0.79
	CD		88	88	1

进行单车辆简单网络路径选择, 如表 5 ~ 表 7 所示。

表 5 路径选择预判表

Tab. 5 Routing prejudgment

路径	$T_{max}/s$	$T_{\varphi}/s$	对比	判断	方案
1	[0, 350]	174	$T_{\varphi 1} < T_{max}$	$T_{\varphi 1} < T_{\varphi 2}$	✓
2		184	$T_{\varphi 2} < T_{max}$		✗

表 6 初始路径选择表

Tab. 6 Initial routing

路径	$T_{max}/s$	$T_i(t)/s$	对比	判断	方案
1	[0, 350]	308	$T_{1max}(t) < T_{max}$	$T_{1max}(t) >$	✗
2		274	$T_{2max}(t) < T_{max}$	$T_{2max}(t)$	✓

表 7 修正路径选择表

Tab. 7 Modified routing

路径	$T_{max}/s$	$T_i(t)/s$	对比	$R_i(t)$	判断	方案
1	[0, 350]	308	$T_{1max}(t) < T_{max}$	0.5	$R_1(t) >$	✗
2		274	$T_{2max}(t) < T_{max}$	0.79	$R_2(t)$	✓

案例最终结果为各路径期望行程时间、预测行程时间均在时间窗内的情况。

在预判阶段，两条路径的期望行程时间均小于时间窗上界，而 LINE1 的期望行程时间较小，依据模型，本阶段路径选择为 LINE1；

在初选阶段，两条路径的预测行程时间最大值均小于时间窗上界，而 LINE2 的预测行程时间最大值较小，依据模型，本阶段路径选择为 LINE2；

在修正阶段，LINE2 的行程时间可靠性更高，则依据模型，最终确认路径选择方案为 LINE2。

### 3 单车辆复杂网络路径选择算法

根据复杂网络的特性，设定车辆在路网中满足先进先出的运行规则，且车辆行驶在没有环路的路径上。

如图 3 所示的复杂路网模型中用各路段的行程时间可靠性值作为路网模型中各边的权值，车辆由起点  $O$  点到达终点  $D$  点，点  $A, B, C, E$  代表交叉口，寻找最可靠路径。

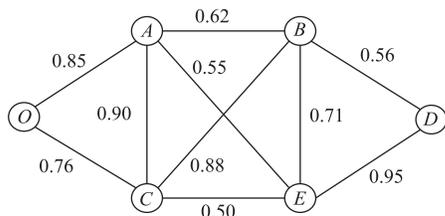


图 3 复杂路网模型

Fig. 3 Complex road network model

#### 3.1 权值异化的 Dijkstra 算法

根据对数函数运算规则：正数积的对数，等于同一底数的这几个正数的对数和，而路径可靠性等于各组成路段的可靠性之积，则可转换为路径可靠性的对数值等于各路段可靠性的对数值之和。同时根据对数的单调性，求各路径可靠性中的最大值等价于求以小于 1 的正数为底的路径可靠性对数值中的最小值，从而将原问题变换为满足传统的最短路问题设定的模式，然后即可使用 Dijkstra 算法求解。将模型中各边权值以 0.1 为底进行对数变换后各边的权值如图 4 所示。

应用 Dijkstra 算法，求从  $O$  点到  $D$  点权值之和最小的路径，即最可靠路径，标号结果如图 5 所示。由图 5 可知，从  $O$  点到  $D$  点的路径可靠性对数值为 0.35，根据标号过程逆推最可靠路径。

$$\log_{0.1}^{R(OAED)} = 0.07 + 0.26 + 0.02 = 0.35,$$

$$\log_{0.1}^{R(OACBED)} = 0.07 + 0.05 + 0.06 + 0.15 + 0.02 = 0.35,$$

$$\log_{0.1}^{R(OCBED)} = 0.12 + 0.06 + 0.15 + 0.02 = 0.35.$$

可见可靠性最高的路径有 3 条： $OAED$ ,

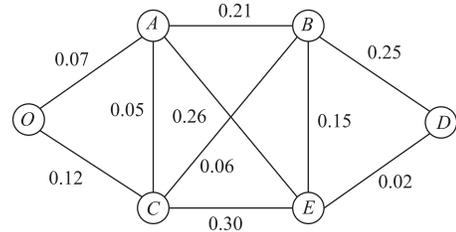


图 4 权值对数化复杂路网

Fig. 4 Weight value logarithmic complex road network

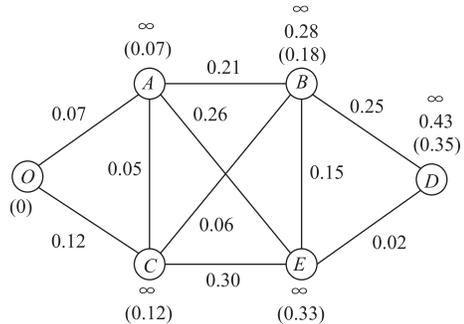


图 5 权值对数化复杂路网标号结果图

Fig. 5 Weight value logarithmic complex road network marking result

$OACBED, OCBED$ 。

#### 3.2 路径枚举法

为了验证权值异化算法的有效性，对图 3 所示路网用路径枚举法罗列出全部的路径，用构成路径的各路段可靠性之积作为路径行程时间可靠性，见表 8。

表 8 路径及路径可靠性枚举表

Tab. 8 Path and path reliability enumeration

序号	路径	路段可靠性	路径可靠性
1	$OABD$	$0.85 \times 0.62 \times 0.56$	0.30
2	$OABED$	$0.85 \times 0.62 \times 0.71 \times 0.95$	0.36
3	$OABCED$	$0.85 \times 0.62 \times 0.88 \times 0.5 \times 0.95$	0.22
4	$OAED$	$0.85 \times 0.55 \times 0.95$	0.45
5	$OAEBD$	$0.85 \times 0.55 \times 0.71 \times 0.56$	0.19
6	$OACED$	$0.85 \times 0.9 \times 0.5 \times 0.95$	0.36
7	$OACBD$	$0.85 \times 0.9 \times 0.88 \times 0.56$	0.38
8	$OACBED$	$0.85 \times 0.9 \times 0.88 \times 0.71 \times 0.95$	0.45
9	$OCED$	$0.76 \times 0.5 \times 0.95$	0.36
10	$OCEBD$	$0.76 \times 0.5 \times 0.71 \times 0.56$	0.15
11	$OCEABD$	$0.76 \times 0.62 \times 0.55 \times 0.5 \times 0.56$	0.07
12	$OCBD$	$0.76 \times 0.88 \times 0.56$	0.37
13	$OCBED$	$0.76 \times 0.88 \times 0.71 \times 0.95$	0.45
14	$OCABD$	$0.76 \times 0.9 \times 0.62 \times 0.56$	0.24
15	$OCAED$	$0.76 \times 0.9 \times 0.55 \times 0.95$	0.36
16	$OCAEBD$	$0.76 \times 0.9 \times 0.55 \times 0.71 \times 0.56$	0.15

分析表 8，各路径中可靠性最大者为 0.45，对应的路径有 3 条： $OAED, OACBED, OCBED$ ，取此

可靠性值的对数, 得  $\log_{0.1}^{0.45} = 0.35$ 。对比第 3.1 节的结果可知, 由枚举法取得的最可靠路径与由权值异化的 Dijkstra 算法取得的最可靠路径结果一致。由此可见, 本研究将权值异化后使用 Dijkstra 算法进行路径选择问题的求解是可行的。

同时, 随着路网复杂度的增加, 本算法在执行速度上呈现出明显的优势: 当全连通的路网节点数达到 20 以上时, 本算法运算耗时就远远低于枚举法; 当节点数达到 50 以上, 使用枚举法的执行时间就让人难以承受, 而本算法依然可行。

因此, 本研究提出的权值异化的 Dijkstra 算法是单车辆复杂网络路径选择问题求解的优化算法。

#### 4 结论

对于随机动态路网中单车辆的路径选择问题, 综合考虑道路服务水平、随机动态路网的特性等道路信息, 避免由于信息利用不全产生错误判断, 本研究将随机动态行程时间可靠性纳入路径选择的判断标准中。

对于单车辆简单网络路径选择问题, 本研究建立的 3 段选择算法, 可以确保选取的路径在行程时间及行程时间可靠性两方面均达到最优。通过案例分析表明, 本算法在保证取得高随机动态行程时间可靠性的同时, 将行程时间限定在时间窗内, 可有效降低出行时间损耗、提高出行效率。

对于单车辆复杂路网路径选择问题, 本研究建立了权值异化的 Dijkstra 算法, 为物流配送提供了一种高可靠性路径选择的优化算法, 该算法方便高效。

由于随机动态复杂网络中, 出行者对行程时间可靠性的要求高于对行程时间的要求, 使用权值为行程时间可靠性的 Dijkstra 算法, 一定程度上降低了对出行时间指标的要求。若在简单网络中使用权值异化的 Dijkstra 算法, 无法针对时间窗的限制进行分析, 可能将行程时间可靠性高但期望行程时间或预测行程时间过长的路径作为最优路径, 与实际简单网络出行者对行程时间及行程时间可靠性的双重最优要求相悖。故在简单网络中使用 3 段选择算法更有效。

总之, 基于随机动态行程时间可靠性, 本研究建立的 3 段路径选择算法, 对于结构简单的随机动态拥挤网络十分有效; 本研究建立的权值异化 Dijkstra 算法, 既考虑了复杂网络的随机动态性, 又提高了路径选择算法的运行效率。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] SIMON H A. Rational Decision Making in Business Organizations [J]. American Economic Review, 1979, 69 (4): 493 - 513.
- [2] GRANGIER P, GENDREAU M, LEHUÉDÉ F, et al. A Matheuristic Based on Large Neighborhood Search for the Vehicle Routing Problem with Cross-docking [J]. Computers & Operations Research, 2017, 84 (C): 116 - 126.
- [3] DU J, LI X, YU L, et al. Multi-depot Vehicle Routing Problem for Hazardous Materials Transportation: A Fuzzy Bilevel Programming [J]. Information Sciences, 2017, 399: 201 - 218.
- [4] ALVAREZ A, MUNARI P. An Exact Hybrid Method for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and Multiple Deliverymen [J]. Computers & Operations Research, 2017, 83: 1 - 12.
- [5] HALL R W. The Fastest Path through a Network with Random Time-dependent Travel Times [J]. Transportation Science, 1986, 20 (3): 182 - 188.
- [6] SWIHART M R, PAPASTAVROU J D. A Stochastic and Dynamic Model for the Single-vehicle Pick-up and Delivery Problem [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 114 (3): 447 - 464.
- [7] 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.
- [8] FU L, RILETT L R. Expected Shortest Paths in Dynamic and Stochastic Traffic Networks [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 32 (7): 499 - 516.
- [9] CHAI H, ZHANG H M, GHOSAL D, et al. Dynamic Traffic Routing in a Network with Adaptive Signal Control [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 85: 64 - 85.
- [10] TILK C, ROTHENBÄCHER A K, GSCHWIND T, et al. Asymmetry Matters: Dynamic Half-way Points in Bidirectional Labeling for Solving Shortest Path Problems with Resource Constraints Faster [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 261 (2): 530 - 539.
- [11] 石小法, 王炜, 卢林, 等. 交通信息影响下的动态路径选择模型研究 [J]. 公路交通科技, 2000, 17 (4): 35 - 37. SHI Xiao-fa, WANG Wei, LU Lin, et al. Study on Dynamic Route Choice Model with Travel Information [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17 (4): 35 - 37.

(下转第 84 页)

- Transportation Engineering, 2004, 130 (3): 322 - 329.
- [9] TANG Y, CHIEN S. Optimization of Work Zone Schedule Considering Time-varying Traffic Diversion [C] // Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D. C. : Transportation Research Board, 2009.
- [10] WANG Y, CHEU R L, FWA T F. Highway Maintenance Scheduling Using Genetic Algorithm with Microscopic Traffic Simulation [C] // Proceedings of the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D. C. : Transportation Research Board, 2002.
- [11] LEE H Y. Optimizing Schedule for Improving the Traffic Impact of Work Zone on Roads [J]. Automation in Construction, 2009, 18 (8): 1034 - 1044.
- [12] ZHENG H, CAI C D, NAVA E J, et al. Optimization of Renewal-based Project Scheduling in an Urban Network [C] // Proceedings of the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D. C. : Transportation Research Board, 2012.
- [13] ZHENG H, NAVA E, CHIU Y C. Measuring Networkwide Traffic Delay in Schedule Optimization for Work-zone Planning in Urban Networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15 (6): 2595 - 2604.
- [14] FWA T F, CHEU R L, MUNTASIR A. Scheduling of Pavement Maintenance to Minimize Traffic Delays [J]. Transportation Research Record, 1998, 1650: 28 - 35.
- [15] MUNTASIR A. Scheduling of Pavement Maintenance Activities [D]. Singapore: National University of Singapore, 1998.
- [16] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty [J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5 (4): 297 - 323.
- [17] 李晓伟, 陈红, 邵海鹏, 等. 基于累积前景理论的公路建设项目灰关联排序模型 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (10): 130 - 135.
- LI Xiao-wei, CHEN Hong, SHAO Hai-peng, et al. Grey Correlation Priority Decision Model of Highway Construction Project Based on Cumulative Prospect Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (10): 130 - 135.
- [18] 刘玉印, 刘伟铭, 田世艳. 出行者有限理性条件下混合策略网络均衡模型 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (7): 136 - 141.
- LIU Yu-yin, LIU Wei-ming, TIAN Shi-yan. Network Equilibrium Model with Mixed Strategies under Bounded Rationality [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (7): 136 - 141.
- [19] PRELEC D. The Probability Weighting Function [J]. Econometrica, 1998, 66 (3): 497 - 527.
- [20] AVINERI E. The Effect of Reference Point on Stochastic Network Equilibrium [J]. Transportation Science, 2006, 40 (4): 409 - 420.
- ~~~~~
- (上接第77页)
- [12] 张安英, 孙全欣, 韦伟, 等. 动态路阻下的出行时间预测和路径选择模型 [J]. 公路与汽运, 2014 (2): 48 - 52.
- ZHANG An-ying, SUN Quan-xin, WEI Wei, et al. Travel Time Prediction and Route Choice Model under Dynamic Path Obstruction [J]. Highways & Automotive Applications, 2014 (2): 48 - 52.
- [13] 张梦颖. 不确定因素下路径规划问题研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- ZHANG Meng-ying. Vehicle Routing Problems with Uncertain Factors [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [14] 任小聪, 向红艳, 陈坚. 交通事故信息对路径选择行为的影响建模与分析 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (7): 103 - 107.
- REN Xiao-cong, XIANG Hong-yan, CHEN Jian. Modeling and Analysis of Influence of Traffic Accident Information on Route Choice Behavior [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (7): 103 - 107.
- [15] 苏贞旅, 周和平, 陶亭. 大数据下基于出发时刻的动态最短路 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2017, 14 (3): 35 - 40.
- SU Zhen-lü, ZHOU He-ping, TAO Ting. Dynamic Shortest Path Based on Departure Time under Big Data [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2017, 14 (3): 35 - 40.
- [16] 王殿海. 交通流理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- WANG Dian-hai. Traffic Flow Theory [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [17] 宋博文, 张俊友, 李庆印, 等. 基于交通波理论的改进动态路阻函数 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2014, 33 (1): 106 - 110.
- SONG Bo-wen, ZHANG Jun-you, LI Qing-yin, et al. Improved Dynamic Road Impedance Function Based on Traffic Wave Theory [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2014, 33 (1): 106 - 110.
- [18] 王荣彦. 城市交通流诱导系统动态路阻函数及最优路径算法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- WANG Rong-yan. Study on Dynamic Impedance Functions and Routing Optimizing Methods for City Traffic Flow Guidance System [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.