

# 考虑服务水平的路段随机动态行程时间可靠性\*

智路平<sup>1,2</sup>, 周溪召<sup>1,2</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:** 在路段行程时间可靠性的研究中, 对于路口排队延误的处理多为设置固定延误值, 缺乏对随机路网条件下路口延误的动态分析。针对时变的道路网络, 根据交通流在交通网络上的运行特性, 考虑出行者与路况的交互作用, 综合考虑车辆排队、信号相位、车速速度的相互影响, 确定不同道路服务水平下的随机动态路段行程时间可靠性。研究表明, 考虑随机动态路口排队延误的行程时间具有较高的可靠性。

**关键词:** 服务水平; 随机动态; 行程时间; 可靠性

中图分类号: U121 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2017)04-0051-06

## Stochastic dynamic reliability of link travel time under service levels

ZHI Luping<sup>1,2</sup>, ZHOU Xizhao<sup>1,2</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 the study on the reliability of link travel time, the delay of intersection queue is set up with fixed delay value, and the dynamic analysis of the intersection delay under the condition of stochastic road network is lacking. Aiming at the time-varying road network, according to the operational characteristics of traffic flow, considering the interaction of passengers and traffic, considering the mutual influence of vehicle queuing, signal phase, and traffic speed, stochastic dynamic link travel time reliability under different road service level can be fixed. The results show that the travel time with stochastic dynamic intersection delay is highly reliable.

**Key words:** service level; stochastic dynamic; travel time; reliability

随着信息技术的不断发展, 人们对于生活品质的要求不断提高, 其中在出行方面最突出的一个要求便是对出行时间的精确把握。导航软件可以给出出行者某次出行的行程时间期望, 这个期望行程时间的准确性, 就是行程时间可靠性。Asakura 和 Kashiwadani 于 1991 年提出了行程时间可靠性的概念。其后的研究主要分为两个方向:

① 理论方法研究。第 1 种是基于传统均衡模型的行程时间可靠性研究。例如, Bell<sup>[1-3]</sup> 等曾假设出行者同质或者不同质, 建立了均衡分析可靠性模型。此类模型假定路段、路径的行程时间符合正

态分布, 路段间交通状态互不相关, 并利用蒙特卡洛仿真进行反复分配, 获得各条路径的行程时间期望与方差, 进而求得路网行程时间可靠性。第 2 种是从系统工程的角度进行可靠性估计。Al-Deek 等<sup>[4]</sup> 就用决策树方法给出了路段不相关条件下的路网行程时间可靠性的计算方法。袁鹏程等<sup>[5]</sup> 则将可靠性应用于交通网络不确定环境下的平衡分配问题, 提出了基于行程时间可靠性的路径选择行为。何娇娇等<sup>[6]</sup> 对概率型和方差型时间可靠性进行了对比分析, 给出了两者间的换算条件。② 应用研究。William 等<sup>[7]</sup> 指出行程时间的随机变动是

\* 收稿日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61273042); 上海理工大学人才引进启动项目(YJRC201601);

作者简介: 智路平(1982年生), 男; 研究方向: 交通规划与管理; E-mail: zhi19821027@163.com

影响配送车辆安排的重要因素, 基于行程时间可靠性解决了配送车辆的安排问题。唐连生等<sup>[8]</sup>在车辆路径规划模型的基础上, 考虑交通流量的随机变动, 建立了基于行程时间可靠度的配送车辆优化模型。Lyman 等<sup>[9]</sup>根据美国多个区域的交通规划进行了多类别分析, 得到了反映不同层次可靠性的行程时间可靠性指标。李蜜等<sup>[10]</sup>基于可靠度建立了交通拥堵时的网络静态分配模型。杨庆芳等<sup>[11]</sup>利用时空贝叶斯模型将行程时间可靠性预测误差降低了 20%。

现有的路网行程时间可靠性估计模型简化了交通流量与行程时间之间的相互关系, 多为静态交通流分配方法, 固化了路口排队延误。而, 实际的路网是受多种不确定因素影响的时变网络, 在路网随机变动的情况下, 必须考虑出行者与路网条件之间的交互作用, 得到的行程时间可靠性才更具实用性。本研究针对实际的道路条件, 对含信号控制的路段的实际行程时间进行了分析, 根据特定观测时刻目标车辆在路段中所处位置及其与路口排队车辆队尾位置之间的相对位置, 结合信号周期与车流消散速度, 利用集散波理论得到了该路段非拥挤段、排队段和路段的随机动态行程时间。并根据实际的路网条件, 将某一时刻的路段动态行程时间族枚举, 对路段行程时间可靠性进行了预测。

## 1 考虑服务水平的随机动态实际行程时间

不考虑事故对行程时间的影响, 用 Davidson 函数计算期望行程时间:

$$T_{\varphi} = T_0 \left[ 1 + J \left( \frac{v}{c-v} \right) \right] =$$

$$T_0 \left[ 1 + J \left( \frac{v/c}{c/c - v/c} \right) \right] = T_0 \left[ 1 + J \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \right] \quad (1)$$

其中:  $T_0$  为自由流行程时间,  $\alpha$  为服务水平 ( $\alpha = v/c$ , 其中  $v$  为路段流量,  $c$  为路段通行能力),  $J$  为路段服务水平参数 (与道路类型、道路宽度、交通信号配时等因素有关)。

### 1.1 路段行程时间构成分析

根据车辆行程特征, 时刻  $t$  车辆通过路段  $a$  所需要的行程时间  $T_a(t)$  可划分为两部分非拥挤路段行程时间  $r_a(t)$  和排队路段行程时间  $d_a(t)$ , 即  $T_a(t) = r_a(t) + d_a(t)$ 。将路段划分为对应的两部分: 非拥挤路段, 其长度用  $L'_a(t)$  表示; 排队路段, 其长度用  $L''_a(t)$  表示。则路段  $a$  的长度  $L$  可表示为  $L = L'_a(t) + L''_a(t)$ 。

### 1.2 路段行程时间基础模型

根据集散波理论<sup>[12]</sup> 停车波波速  $w_{\text{stop}}(t)$  为:

$$w_{\text{stop}}(t) = -v_a(t) \frac{k_a^{\text{up}}(t)}{k_a^j(t)} \quad (2)$$

式中,  $v_a(t)$  为非拥挤状态下的行程速度。且:

$$v_a(t) = \frac{v_a^f}{1 + J \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right)} \quad (3)$$

其中,  $v_a^f$  为自由流速度,  $k_a^j$  为阻塞密度, 路段上游交通流密度  $k_a^{\text{up}}(t)$  为

$$k_a^{\text{up}}(t) = \frac{k_a^j}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{\text{up}}(t)}{k_a^j v_a(t)}} \right] \quad (4)$$

其中,  $x_a^{\text{up}}(t)$  为上游驶入流量,  $x_a^{\text{up}}(t) \leq \frac{1}{4} k_a^j v_a(t)$ 。

正负号的选择依据的驶入流量确定。当上游驶入流量值较大时, 取正号; 当上游驶入流量值较小时, 取负号。在红灯期间  $r$  秒内, 停车波向上游移动的距离为  $|w_{\text{stop}}(t)|r$ , 停下来的车辆数  $N_a(t)$  为

$$N_a(t) = r |w_{\text{stop}}(t)| k_a^j(t) = \frac{rk_a^j v_a(t)}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{\text{up}}(t)}{k_a^j v_a(t)}} \right] \quad (5)$$

时刻  $t$  路段上的排队长度  $L_a^q(t)$  及延误时间  $d_a(t)$  分别为

$$L_a^q(t) = \frac{rk_a^j v_a(t)}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{\text{up}}(t)}{k_a^j v_a(t)}} \right] S_a \quad (6)$$

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} =$$

$$\frac{rk_a^j v_a(t)}{2Q_a(t)} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{\text{up}}(t)}{k_a^j v_a(t)}} \right] \quad (7)$$

式中,  $Q_a(t)$  为交叉口通行能力。

时刻  $t$  路段上的非拥挤段长度  $L'_a(t)$  及行程时间  $r_a(t)$  为

$$L'_a(t) = L - L''_a(t) =$$

$$L - \frac{rk_a^j v_a(t)}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{\text{up}}(t)}{k_a^j v_a(t)}} \right] S_a \quad (8)$$

$$r_a(t) = \frac{L'_a(t)}{v_a(t)} =$$

$$\frac{L}{v_a(t)} - \frac{rk_a^j}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{\text{up}}(t)}{k_a^j v_a(t)}} \right] S_a \quad (9)$$

### 1.3 随机动态路段行程时间模型

结合信号配时方案, 依据红灯结束时刻, 车辆与排队队尾的相对位置 (如图 1, 圆圈为车辆位置, A-E 为路径关键点), 建立包含不同排队延误的随机动态路段行程时间模型。

当  $t = 0$  时, 车辆进入路段  $a$ , 位于路段的起点 A 处, 路段终点 C 处有信号控制。  $t = nr + (n-1)g$  时, 车辆可能处于 3 个位置 (以第  $n$  次红灯结

束时刻，该车与排队队尾的相对位置情况进行划分）：

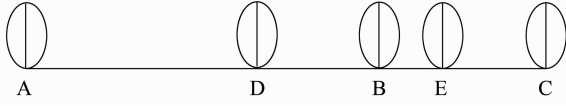


图 1 车辆位置与排队队尾的位置关系  
Fig. 1 Position relationship between vehicle position and queue tail

(1) 车辆处于 D 处。此时，经过  $n$  个红灯产生排队，排队长度为 BC 段，车辆从 A 行至 D 处，未到达排队的末尾 B 处。在接下来的第一个绿灯时长  $g$ ，该车可能产生直接通过交叉口、未通过交叉口、第  $n+1$  次绿灯时通过交叉口、以及第  $n+m$  次绿灯时通过交叉口的 4 种情况。

**第 1 种情况：**排队车流全部消散，该车直接通过交叉口。此时，该车在整个路段  $a$  上以速度  $v_a(t)$  通过全程，车辆通过该路段的行程时间为  $T_a(t) = \frac{L}{v_a(t)}$ ；

**第 2 种情况：**排队车流全部消散，但该车未通过交叉口。此时，该车停在停车线处，等待一次红灯后直接通过该路段，车辆通过该路段的行程时间为  $T_a(t) = \frac{L}{v_a(t)} + r$ ；

**第 3 种情况：**在第  $n$  个绿灯时排队车流部分消散，第  $n+1$  次绿灯时通过交叉口。此时，该车在第  $n$  次绿灯结束位于 E (B 与 C 之间某点)，处于排队队尾，然后在下一次绿灯时排队通过交叉口，车辆在非拥挤区段的行程时间为  $r_a(t) = n(r+g)$ ，该车在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} + r = \frac{L_{EC}/S_a}{Q_a(t)} + r = \frac{L - n(r+g) \frac{v_a^f}{1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)}}{S_a Q_a(t)} + r$$

**第 4 种情况：**在第  $n$  个绿灯时排队车流部分消散，第  $n+m$  次绿灯时通过交叉口。此时，该车在第  $n$  次绿灯结束位于 E，处于排队队尾，然后在接下来第  $m$  次绿灯时排队通过交叉口，车辆在非拥挤区段的行程时间仍为  $r_a(t) = n(r+g)$ ，该车在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} + mr = \frac{L_{EC}/S_a}{Q_a(t)} + mr =$$

$$\frac{L - n(r+g) \frac{v_a^f}{1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)}}{S_a Q_a(t)} + mr$$

(2) 车辆处于 B 处。此时，经过  $n$  个红灯产生排队，排队长度为 BC 段，车辆从 A 行至排队的末尾 B 处。在接下来的第一个绿灯时长  $g$ ，该车可能产生 4 种情况。

**第 1 种情况：**在该绿灯结束时，排队车流全部消散，该车刚好通过交叉口。此时，则该车在非拥挤区段的行程时间为  $r_a(t) = nr + (n-1)g$ ，车辆在排队区段的行程时间为  $d_a(t) = g$ ，车辆通过该路段的行程时间为  $T_a(t) = n(r+g)$ ；

**第 2 种情况：**在该绿灯结束前，排队车流全部消散，该车提前通过交叉口。此时，车辆在非拥挤区段的行程时间为  $r_a(t) = nr + (n-1)g$ ，车辆在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{rk_a^j v_a^f / \left[1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\right]}{2Q_a(t)}$$

$$\left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{k_a^j v_a^f / \left[1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\right]}}\right]$$

**第 3 种情况：**排队车流部分消散，车辆第  $n+1$  次绿灯时通过交叉口。当  $n=1$ ，该车在第 1 次红灯结束位于 B，处于排队队尾，在第 1 次绿灯结束位于 E，然后在下一次绿灯时排队通过交叉口，车辆在非拥挤区段的行程时间为  $r_a(t) = r$ ，车辆在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} + r =$$

$$\frac{rk_a^j v_a(t)}{2Q_a(t)} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{k_a^j v_a(t)}}\right] + r$$

当  $n > 1$ ，若一个红灯形成的排队，在一个绿灯时间无法全部消散，则  $n$  个周期后，排队的队尾位置将移至位置 D。若车辆此时到达位置 D，无法在一个绿灯时间内消散，故本情况不存在；

**第 4 种情况：**排队车流部分消散，第  $n+m$  次绿灯时通过交叉口。当  $n=1$ ，该车在非拥挤区段的行程时间为  $r_a(t) = r$ ，车辆在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} + mr = \frac{rk_a^j v_a^f / \left[1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\right]}{2Q_a(t)}$$

$$\left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4x_a^{up}(t)}{k_a^j v_a^f / \left[1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\right]}}\right] + mr$$

当  $n > 1$ , 若一个红灯形成的排队, 在一个绿灯时间无法全部消散, 则  $n$  个周期后, 排队的队尾位置将移至位置 D, 若车辆此时到达位置 D, 在  $m$  个绿灯时间内消散, 车辆在非拥挤区段的行程时间仍为  $r_a(t) = nr + (n-1)g$ , 车辆在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} + (m-1)r = \frac{(L - L_{AD})/S_a}{Q_a(t)} + (m-1)r = \frac{L - [nr + (n-1)g] \cdot v_a^f / \left[1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\right]}{S_a \cdot Q_a(t)} + (m-1)r$$

(3) 车辆处于 E 处, 此时, 经过  $n$  个红灯时长  $r$ , 产生排队, 排队长度为 EC 段, 车辆从 A 行至排队的末尾 E 处。该车可能产生 5 种情况。

**第 1 种情况:** 排队车流全部消散, 该车直接通过交叉口。此时, 车辆在非拥挤区段的行程时间为

$$r_a(t) = \frac{L}{v_a(t) + |w_{\text{stop}}(t)| k_a^j(t) \cdot S_a}$$

车辆在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} + r - r_a(t) = \frac{v_a(t) \cdot |w_{\text{stop}}(t)| \cdot k_a^j(t)}{Q_a(t)} + r - r_a(t)$$

**第 2 种情况:**  $n = 1$ , 排队车流部分消散, 第 2 次绿灯时通过交叉口: 此时, 该车停在停车线处, 等待一次红灯后直接通过该路段, 车辆通过该路段的行程时间为

$$T_a(t) = \frac{v_a(t) \cdot |w_{\text{stop}}(t)| \cdot k_a^j(t)}{Q_a(t)} + r + r = \frac{v_a(t) \cdot |w_{\text{stop}}(t)| \cdot k_a^j(t)}{Q_a(t)} + 2r$$

**第 3 种情况:**  $n = 1$ , 排队车流部分消散, 第  $m$  次绿灯时通过交叉口: 此时, 该车停在停车线处, 等待  $m-1$  次红灯后通过该路段, 车辆通过该路段的行程时间为

$$T_a(t) = \frac{v_a(t) \cdot |w_{\text{stop}}(t)| \cdot k_a^j(t)}{Q_a(t)} + r + (m-1)r = \frac{v_a(t) \cdot |w_{\text{stop}}(t)| \cdot k_a^j(t)}{Q_a(t)} + mr$$

若  $n > 1$ , 该车在经过  $nr + (n-1)g$  时长之后位于 E 点, 车辆在非拥挤区段的行程时间为  $r_a(t) = nr + (n-1)g$ , 该车在排队区段的行程时间分两

种情况:

**第 4 种情况:** 该车直接通过交叉口: 此时, 该车在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} = \frac{L_{\text{EC}}/S_a}{Q_a(t)} = \frac{L - [nr + (n-1)g] \cdot v_a^f / \left[1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\right]}{S_a \cdot Q_a(t)}$$

**第 5 种情况:** 第  $n+m$  次绿灯时通过交叉口: 此时, 车辆在排队区段的行程时间为

$$d_a(t) = \frac{N_a(t)}{Q_a(t)} + mr = \frac{L - r_a(t) \cdot v_a(t)}{S_a \cdot Q_a(t)} + mr = \frac{L - [nr + (n-1)g] \cdot v_a^f / \left[1 + J\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\right]}{S_a \cdot Q_a(t)} + mr$$

与行程时间可靠性相关的参数如表 1 所示。

表 1 相关参数表<sup>1)</sup>

Table1 Relative parameter

名称	数值	单位
路段长度 $L$	0.51	km
路段服务水平 $\alpha$	0.7	
服务水平参数 $J$	0.4	
设计车速 $v_0$	60	km/h
自行车折减系数 $r_e$	1	
车道宽度 $w_0$	3.5	m
车道宽度影响系数 $\eta$	1	
交叉口有效通行时间比 $S_0$	0.5	
交叉口影响系数 $S$	0.70	
自由流速度 $v_a^f$	41.79	km/h
非拥挤状态下的行程速度 $v_a(t)$	21.62	km/h
自由流行程时间 $T_0$	0.01	h
期望行程时间 $T_\varphi$	0.02	h
信号周期 $T_c$	50	s
红灯时长 $r$	25	s
绿灯时长 $g$	25	s
路段上每辆车的平均空间长度 $S_a$	6	m
绿灯时第一辆车通过停车线耗时 $t_1$	2.3	s
车辆通过停车线的平均时间 $t_{sr}$	2.65	s/veh
折减系数 $\varphi$	0.9	
一条车道的理论通行能力 $Q_{s0}$	620	veh/h
车道数 $n_i$	2	条
交叉口的通行能力 $Q_a(t)$	1 240	veh/h
阻塞密度 $k_a^j$	167	veh/km/lane
上游的驶入车流量 $x_a^{\text{up}}(t)$	868	veh/h

1) 根据 GB 50220-1995 城市道路交通规划设计规范

$S = S_0(0.0013l + 0.73)$ ;  $v_a^f = r_e S \eta v_0$ ;

$Q_{s0} = \frac{3600}{T_c} \left( \frac{g - t_1}{t_{sr}} + 1 \right) \varphi$

## 2 路段行程时间可靠性案例分析

选取一段城市道路作为研究对象，如图 2 所示。

将上述参数代入随机动态路段行程时间模型，得到了一组预测行程时间数组。将预测行程时间与期望行程时间进行对比，结果如表 2 所示。



图 2 案例路段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of case section

表 2 预测行程时间及与期望行程时间之比

Table 2 The ratio of prediction travel time and expected travel time

分类	$n$ / 次	$m$ / 次	实际行程 时间/s	$\frac{T_a(t)}{T_\varphi}$
A	1	0	84.94	1.00
B	1	0	109.94	1.29
C	1	0	176.53	2.08
D	1	2	201.53	2.37
E	2	0	100.00	1.18
F	2	0	118.26	1.39
G	1	0	93.26	1.10
H	1	2	118.26	1.39
	2	2	128.88	1.52
I	1	1	117.12	1.38
J	1	2	142.12	1.67
K	1	3	167.12	1.97
L	2	0	103.88	1.22
M	2	2	153.88	1.81

### 2.1 行程时间可靠性预测

根据实际行程时间与期望行程时间之比，并与可接受水平进行比较，得到的数组称为在时刻  $t$  车辆通过路段  $a$  的行程时间可靠性数组。该样本组中小于可接受水平的数量占样本总数的比值称为可接受水平  $\gamma$  下时刻  $t$  车辆通过路段  $a$  的行程时间可靠性，其值  $R_a(t)$  如公式 (10) 所示。

$$R_a(t) = P\{T_a(t)/T_\varphi \leq \gamma, \gamma \geq 1\} \quad (10)$$

本研究针对该路段较常出现的 3 种服务水平等级，选取某一定值进行时间可靠性预测，结果如表 3 所示。

表 3 三种路段服务水平的随机动态行程时间可靠性

Table 3 Stochastic dynamic travel time reliability when the link service level is D, and  $\alpha$  equal 0.7

服务水平	$\gamma$			
	1.2	1.3	1.5	2.0
D 级, $\alpha = 0.7$	0.21	0.36	0.57	0.86
C 级, $\alpha = 0.6$	0.21	0.21	0.36	0.57
B 级, $\alpha = 0.3$	0.29	0.29	0.36	0.50

当可接受水平  $\gamma = 1.2$  时, 各服务水平下的  $R_a(t)$  仅为 0.21 ~ 0.29, 表明该时刻路段行程时间可靠性较低。造成这一结果的原因有两方面, 一方面是由于可接受水平选取过于严苛, 另一方面是该服务水平下的期望行程时间较短所致。相同服务水平下, 随着可接受水平数值上升, 路段在时刻  $t$  的行程时间可靠性增加, 这一结果符合常规认知。相同可接受水平下, 随着服务水平的提升, 路段在时刻  $t$  的行程时间可靠性下降。

### 3 模型验证

实测得到该路段 100 个连续工作日上午 8:00 时的路段行程时间, 对行程时间样本进行有效性筛选之后得到有效样本 (无事故发生、当日当时路段服务水平  $\alpha = 0.7$ ) 数为 78 个。将此数组与该服务水平下的期望行程时间  $T_a = 84.9$  s 代入公式 (10), 可得实测行程时间可靠性, 如表 4 所示。

表 4 路段服务水平  $\alpha = 0.7$  时,  
预测与实测行程时间可靠性对比表

Table 4 The comparison of prediction travel time and expected travel time when the link service level  $\alpha$  equal 0.7

项目	$\gamma$			
	1.2	1.3	1.5	2.0
预测 $R_a(t)$	0.21	0.36	0.57	0.86
实测 $R_a(t)$	0.22	0.37	0.60	0.85
差值幅度/%	2	4	5	-1

将实测可靠性值与预测值对比, 发现预测值与实测值差异较小, 最大的差值幅度 5% 以内, 说明模型拟合度良好。本模型预测路段的随机动态路段行程时间可靠性具有较高的精度, 可在一定程度上替代使用大量实测数据的计算模型, 尤其是当实测数据不容易获取的情况下, 本模型具有很好的预测精度。

### 4 结论

1) 对随机动态实际行程时间的研究表明: 某一时刻  $t$  车辆通过路段  $a$  的行程时间具有多种可能, 即路口排队延误具有差异性。

2) 以红灯结束时刻车辆所处位置与排队队尾的相对位置的关系为切入点, 进行分类讨论, 得到

了各种可能行程时间构成的数组, 实现了对路段行程时间可靠性的随机动态分析。

3) 随着路段长度的增长, 延误分类数亦成倍增长, 这在一定程度上限制了模型的应用范围。本模型适宜的道路为一般城市道路, 路段长度一般在 1 000 m 以内。超长的路段或者无信号控制的高速路宜采用传统的行程时间可靠性模型进行计算。同时, 本文提出的模型具有较高的预测精度, 在道路投入使用初期、实测数据缺乏或不易获取的情况下, 具有很好的实用性。

### 参考文献:

- [1] BELL, MICHAEL G H, SHIELD C M, et al. Stochastic user equilibrium path flow estimator [J]. Transportation Research C: Emerging Technologies, 1997, 5: 197 - 210.
- [2] CLARK S, WATLING D. Modeling network travel time reliability under stochastic demand [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(2): 119 - 140.
- [3] HIDA Y. Basic concepts and future directions of road network reliability analysis [J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 125 - 134.
- [4] AL-DEEK H M, EMAM E B. Computing travel time reliability - in transportation networks with multistates and dependent link failures [J]. Journal of computing in civil engineering, 2006, 20(5): 317 - 327
- [5] 袁鹏程, 韩印, 马万达. 基于行程时间可靠性的随机交通网络均衡模型 [J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(4): 352 - 356.
- [6] YUAN P C, HAN Y, MA W D. Stochastic transportation network equilibrium model based on travel - time reliability [J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2008, 30(4): 352 - 356.
- [6] 何娇娇, 张勇. 行程时间可靠性及其价值估计分析 [J]. 系统工程, 2016, 34(7): 110 - 117.
- [7] HE J J, ZHANG Y. Analysis on travel time reliability and its value [J]. System Engineering, 2016, 34(7): 110 - 117.
- [7] WILLIAM H K, LAM Chichen, et al. Optimizing vehicle fleet management with travel Time Reliability Constraint [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5(10): 121 - 135.

- [8] 唐连生, 程文明, 梁剑, 等. 基于行程时间可靠性的车辆路径问题研究[J]. 统计与决策, 2008, 20: 169 - 171.
- TANG L H, CHENG W M, LIANG J, et al. Research on vehicle routing problem based on travel time reliability [J]. Statistics and Decision Making, 2008, 20: 169 - 171.
- [9] LYMAN K, BERTINI R L. Using travel time reliability measures to improve regional transportation planning and operations [J]. Transportation Research Record, 2008, 2046: 1 - 10.
- [10] 李蜜, 王霞, 李金良. 交通拥堵下基于可靠度的出行路径模型及算例分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(9): 67 - 71.
- LI M, WANG X, LI J L. Travel path model and case study under traffic congestion environment [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(9): 67 - 71.
- [11] 杨庆芳, 韦学武, 林赐云, 等. 基于时空贝叶斯模型的行程时间可靠性预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 115 - 122.
- YANG Q F, WEI X W, LIN Z L, et al. Reliability prediction of travel time based on Spatio - Temporal Bayesian model [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 115 - 122.
- [12] 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 B W, ZHANG J Y, LI Q Y, et al. Improved dynamic road impedance function based on traffic wave theory [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(1): 106 - 110.
- [13] 张汉林, 黄敏, 张学强. 基于车道级基础路网的 DynasTIM 仿真路网建模[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 56(1): 53 - 57.
- ZHANG H L, HUANG M, ZHANG X Q. Modeling DynasTIM simulation road network based on lane - level basic road network [J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2017, 56(1): 53 - 57.