

# 交通事故导致的高速公路拥堵状态判别方法\*

张 驰<sup>1▲</sup> 周郁茗<sup>1</sup> 张 敏<sup>2</sup> 罗昱伟<sup>3</sup> 陈嘉乐<sup>2</sup>

(1. 长安大学公路学院 西安 710064; 2. 长安大学运输工程学院 西安 710064;  
3. 深圳高速公路集团股份有限公司 广东 深圳 518057)

**摘 要:** 为量化分析不同交通事故条件下的高速公路路段拥堵情况,研究路段偶发性拥堵规律,本文构建了1个基于行程时间可靠性指标的高速公路路段拥堵判别方法。建立基于美国《公路通行能力手册》中行程时间可靠性分析方法的路段行程时间可靠性模型,并采用西南某高速公路路段实际数据校准模型。利用蒙特卡洛模拟方法生成交通事故场景,将交通事故解构为交通事故发生位置、交通事故严重程度、交通事故持续时间、交通事故发生频率4个特征,并以行程时间指数为路段拥堵量化指标,研究不同交通事故特征水平下的高速公路路段拥堵规律,并判别路段拥堵程度。研究表明:美国《公路通行能力手册》的行程时间可靠性分析方法具有可移植性,校准后可应用于国内高速公路路段;交通量接近饱和时,交通事故发生在出口匝道段的拥堵程度高于基本路段与入口匝道段,单车道关闭场景下的交通事故影响远高于路肩关闭场景下的交通事故;交通量接近自由流状态时,拥堵程度对严重程度不敏感;任何交通量水平下,单车道关闭场景下的交通事故持续时间一旦超过15 min,路段拥堵程度极有可能剧增。本文构建的路段拥堵判别方法,可以在精细化探究偶发性交通事故拥堵规律的同时划分路段拥堵等级,为相关部门的事故管理提供理论支撑。

**关键词:** 交通工程;高速公路;路段拥堵判别方法;交通事故影响规律;行程时间指数

**中图分类号:** U491.3 **文献标识码:** A **doi:**10.3963/j.jssn.1674-4861.2023.01.003

## A Method for Identifying Traffic Congestion Resulting from Accidents on Freeways

ZHANG Chi<sup>1▲</sup> ZHOU Yuming<sup>1</sup> ZHANG Min<sup>2</sup> LUO Yuwei<sup>3</sup> CHEN Jiale<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;  
2. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;  
3. Shenzhen Expressway Corporation Limited, Shenzhen 518057, Guangdong, China)

**Abstract:** Based on the reliability of travel time, a method for identifying traffic congestion resulting from accidents is proposed, in order to quantitatively study how random congestion takes place on freeway sections and how congestion evolves under various traffic accidents. A model based on the method for studying the reliability of travel-time outlined in the Highway Capacity Manual is developed, which is calibrated based on observed data from a section of a freeway in Southwest China. A Monte Carlo simulation method is adopted to simulate various traffic accident scenarios. These traffic accidents are featured by four characteristics: location, severity, duration, and frequency. The mechanism that traffic congestion takes place and evolves is investigated and travel time index is used to represent the level of congestion on freeway sections under different traffic accidents. Study results show that ①The method presented in the Highway Capacity Manual is portable. ②When traffic volume is closed to saturation, the impact of traffic accidents taking place at the off-ramp sections is higher than those occur in the basic and on-ramp sections, and their impact is much higher under the single-lane closure scenario than that under the shoulder-closure

收稿日期:2022-05-10

\* 国家重点研发计划项目(2020YFC1512005)、四川省科技计划资助(2022YFG0048)、四川省交通运输科技项目(2022-ZL-04)资助

▲ 第一作者(通信作者)简介:张 驰(1981—),博士,教授.研究方向:交通安全、道路基础设施数字化等.

E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

scenario. ③When the traffic flow is close to free flow, the congestion is not sensitive to the accident severity. ④Congestion would increase dramatically under the single-lane closure scenario when the accident lasts for more than 15 minutes at any traffic volume level. The proposed method for identifying traffic congestion can contribute to detailed exploration of the congestion patterns resulting from traffic accidents as well as classification of the congestion of freeway sections, which shall provide theoretical support to the accident management of relevant highway and transportation departments.

**Keywords:** traffic engineering; freeway; identification method of road congestion; influence of traffic accidents; travel time index

## 0 引言

拥堵导致的道路服务水平降低、排队延误、行程时间可靠性降低、能源消耗与污染物排放问题,给社会带来了较高的治理成本。拥堵可分为常发性拥堵与偶发性拥堵。其中,常发性拥堵源于交通需求与道路修建增速的不匹配,但由于交通需求具有规律性,常发性拥堵易被预测,相关部门能提前采取措施减轻不利影响;偶发性拥堵往往由不易预测的随机事件导致,如交通事故、天气、施工等,这些随机事件的不可预测性为拥堵治理带来难度,是交通运输行业亟待攻克的难题。

交通事故是偶发性拥堵的重要致因之一。近年来,交通事故治理虽有一定成效,但其随机性较强的特点使得交通事故数居高不下<sup>[1]</sup>。据中国国家统计局最新数据显示,2021年全国共发生道路交通事故273 098起,造成62 218人死亡,281 447人受伤,直接财产损失达14.5亿元<sup>[2]</sup>。交通事故造成大量生命财产损失的同时,导致路网运行效率下降,严重降低高速公路行程时间可靠性。

国内外基于传统的交通流理论方法判别拥堵情况时,最常用的是基于指标的方法。对于高速公路来说,行程时间与延误、占有率、服务水平是主流判别指标。美国国家高速公路合作研究项目根据行程时间定义交通拥堵,将其分为可接受拥堵与不可接受拥堵<sup>[3]</sup>;Koukis等<sup>[4]</sup>基于道路占有率数据,划定阈值判别拥堵状态;庄斌等<sup>[5]</sup>采用交通流量与占有率的增量变化率判别交通拥堵状态;美国交通管理部门根据V/C比将公路服务水平划分为6级,当其大于0.9时,则认为道路处于拥堵状态。

相对于其他基于交通流角度定义的拥堵判别指标而言,行程时间和延误是基于出行者感受定义的指标。行程时间可靠性也是出行者可感知的拥堵指标,它弥补了行程时间指标随路段、交通量取值不同的缺点。因此,行程时间可靠性可以作为拥堵等级

的判别指标。国外学者Lam<sup>[6]</sup>研究加利福尼亚州奥林奇郡的出行者路径选择行为,得出结论:行程时间的价值是0.006美元/s,行程时间可靠性的价值是0.009美元/s,相较于行程时间出行者更看重行程时间可靠性。近年来,Rafferty<sup>[7]</sup>提出应着重考虑行程时间可靠性在交通系统管理中的作用,Eliason<sup>[8]</sup>建议将可靠性纳入拥堵管理计划以及交通项目效益一成本分析<sup>[9]</sup>。

本文以行程时间可靠性指标为判别标准,提出1种交通事故场景下的交通拥堵程度判别方法。研究行程时间可靠性的方法根据研究对象不同,有以下分类:路段<sup>[10]</sup>、路径<sup>[11]</sup>、OD<sup>[12]</sup>和路网行程时间可靠性模型<sup>[13]</sup>。其中部分学者研究了交通事故等随机事件作用下的道路行程时间可靠性。冷军强<sup>[14]</sup>建立了冰雪条件下基于广义费用的路网行程时间可靠性模型;王婧等<sup>[15]</sup>、张琦等<sup>[16]</sup>建立了雨天高速公路路段行程时间可靠性模型;刘永红等<sup>[17]</sup>利用元胞传输模型加载路段流量,利用蒙特卡罗方法求解可靠性模型,分析交通事故持续时间对行程时间可靠性的影响。陈玲娟等<sup>[18]</sup>研究交通事故持续时间对路网行程时间可靠度的影响,提出基于Monte-Carlo法的路网行程时间可靠度算法。Ciszewskak等<sup>[19]</sup>研究了高速公路上不同交通事故类型、交通事故持续时间、交通事故发生位置对道路产生的影响,道路受到的影响表现为平均速度降低、行程时间延长、通行能力降低和服务水平降低。

上述研究已取得一定成果,但仍存在一些不足,主要体现在以下3个方面:①缺乏交通事故等偶发性拥堵致因下的研究,主要原因可能在于交通事故数据难以获取且数据质量不高,交通事故道路场景不易再现。为数不多的交通事故对行程时间可靠性的影响规律研究,多采用蒙特卡罗模拟方法,模拟精度不高,与实际有较大的差距;②大部分学者构建的行程时间可靠性模型评估周期较短,难对项目进行长期行程时间可靠性评估。而行程时

间可靠性降低带来的社会成本增量不容忽视,近年来,“经合组织”大力提倡将可靠性因素纳入交通项目的长期效益—成本评估<sup>[9]</sup>;③目前鲜有研究将交通事故解构为多维度进行研究,多研究交通事故某一特征的影响规律。

本文采用美国《公路通行能力手册》(*Highway Capacity Manual*, HCM)中的行程时间可靠性方法,在校验方法可移植性的前提下,将交通事故解构为4个要素:交通事故发生位置、交通事故严重程度、交通事故持续时间,以及交通事故发生频率,将交通事故对高速公路的影响建模为:通行能力调整因子(capacity adjustment factor, CAF)、自由流速度调整因子(free-stream velocity adjustment factor, SAF)、交通需求调整因子(demand adjustment factor, DAF),利用蒙特卡罗随机模拟方法生成不同交通事故特征水平下的道路场景。以方法输出的行程时间指数为路段拥堵判别指标,探索交通事故致因下的偶发性拥堵规律,并对高速公路路段拥堵程度进行等级划分。为长期交通管理与控制策略的提出与实施提供理论依据,节约交通事故治理成本。

## 1 HCM行程时间可靠性方法

### 1.1 方法概述

美国HCM的行程时间可靠性分析方法具备交通事故分析模块。交通事故模块可解构为交通事故发生位置、交通事故严重程度、交通事故持续时间、交通事故发生频率4部分,且可开展长达几年的行程时间可靠性评估。将其作为本文的研究方法,可有效探究交通事故拥堵机理,实现路段行程时间可靠性的长期评估。

HCM行程时间可靠性分析方法由空间维度、时间维度和可靠性维度架构,见图1。空间维度指研究路段的纵向维度,道路结构沿纵向被划分为基本路段、交织路段、合流路段与分流路段,图1中一列单元格代表1种路段类型。时间维度指研究时段,主要有研究期与分析期2个概念。研究期指每天的分析时长,图1中表征为17:00—20:00,分析期以15 min为单位时段,表征为1个单元格的高度。研究期由多个分析期组成,研究期由12个分析期组成。空间维度与时间维度共同构成研究路段的1个道路场景,图1中表征为1个平面。可靠性维度将研究路段的1个场景扩展到几个月或几年,模拟研究路段长期可靠性评估中可能出现的道路场景。可靠性维度定量表征为可靠性报告期,一般选取1年。

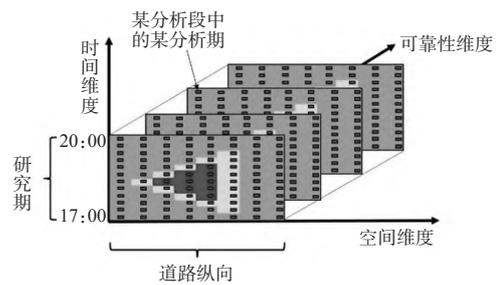


图1 HCM行程时间可靠性分析方法概念图

Fig. 1 Concept diagram of HCM travel time reliability analysis method

研究场景集基于基础场景生成。基础场景(即种子文件)具有平均交通需求水平,且不发生任何随机事件。通过预先定义交通事故严重程度分布、交通事故持续时间分布、交通事故发生频率分布,蒙特卡罗模拟方法将根据定义分布将交通事故随机分配到场景,被分配交通事故的场景对应调整CAF、SAF、DAF与车道数参数。附加各场景自身的交通需求水平,各场景可量化表征为以下矩阵的集合:CAF矩阵、SAF矩阵、DAF矩阵、车道数调整矩阵与交通需求矩阵。本文基于事故条件开展研究,而没有交通流也无法产生事故,故仅考虑交通事故与交通需求模块。而该方法还可以分析恶劣天气和施工区等模块,见图2。模型根据各场景的矩阵集合,计算并存储各分析期的行程时间,作为行程时间可靠性指标的计算依据。

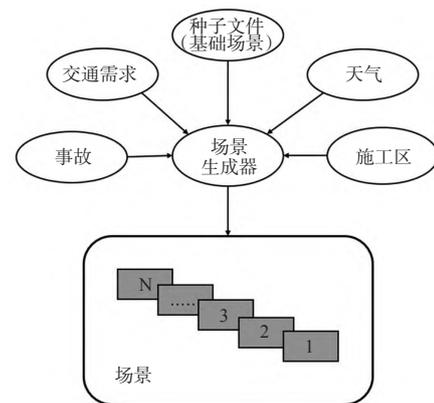


图2 场景生成模块

Fig. 2 Scenario generation module

### 1.2 指标选取

表征行程时间可靠性的指标繁多,大体可分为2类:①用概率表征,即规定时间内完成出行的概率;②用指数表征,即实际行程时间与自由流状态下行驶时间的比值。Asakura等<sup>[20]</sup>提出以一定服务水平下,出行者在规定时间内完成出行的概率,反应路网在随机波动交通状态下的应变性能,提出行程时间可靠性的概念。Asakura<sup>[12]</sup>重新定义为路网容量

衰退情况下的行程时间与路网容量正常状态下的行程时间比值的函数。德克萨斯交通研究所 Bhattacharya 等<sup>[21]</sup>提出用缓冲时间来表征行程时间可靠性,定义为出行者为保证按时到达目的地所,多花的行程时间与平均行程时间的比值。近年来,衡量行程时间可靠性的主要为指数型指标:95%位行程时间<sup>[22]</sup>、行程时间指数(travel time index, TTI)<sup>[22]</sup>、TTI95<sup>[23]</sup>、TTI80<sup>[21]</sup>、TTImean<sup>[24]</sup>、TTI50<sup>[25]</sup>、计划行程时间指数(planning travel time index, PTI)<sup>[24]</sup>、缓冲时间指数(buffering time index, BTI)<sup>[23]</sup>等。指数型指标易于在多路段间进行对比评价,被广泛采用于当前研究中。

鉴于指数型指标的优越性,本研究选取 TTI 作为行程时间可靠性衡量指标。行程时间指数定义为实际行程时间与自由流状态行程时间之比,见式(1)。

$$TTI = \frac{T_{i,t}}{T_s} \quad (1)$$

式中:  $T_{i,t}$  为分析期  $t$  分析段  $i$  的实际行程时间,单位 s;  $T_s$  为自由流状态行程时间,单位 s。

根据定义可知,TTI 始终大于等于 1.0,数值越大,延误越长,行程时间可靠性越低。计算行程时间应首先计算基本路段自由流速度,见式(2)。

$$FFS = 0.172BFFS - 0.172f_{LW} - 0.172f_{RLC} - 0.015 \times TRD^{0.84} \quad (2)$$

式中:  $FFS$  为高速公路基本路段自由流速度,单位 m/s;  $BFFS$  为高速公路基本路段基本自由流速度,单位 m/s;  $f_{LW}$  为车道宽度修正系数;  $f_{RLC}$  为右侧净空修正系数;  $TRD$  为总匝道密度,单位 ramps/m。

接着计算行程率,行程率指车辆行驶单位长度所需时间,见式(3)。

$$TR_{i,t} = 10.33(\Delta RU_{i,t} + \Delta RO_{i,t} + TR_{FFS}) \quad (3)$$

式中:  $TR_{i,t}$  为分析期  $t$  分析段  $i$  的行程率,单位 s/m;  $\Delta RU_{i,t}$  为非饱和条件下的延误率,单位 s/m;  $\Delta RO_{i,t}$  为饱和条件下的延误率,单位 s/m;  $TR_{FFS}$  为自由流条件下的行程率,单位 s/m。

式(3)中  $\Delta RU_{i,t}$  和  $\Delta RO_{i,t}$  分别由式(4)和式(6)计算得到,  $TR_{FFS}$  值为  $FFS$  的倒数。

$$\Delta RU_{i,t} = \begin{cases} 0, & \frac{d_{i,t}}{c_i} < E \\ 4629.6(A(\frac{d_{i,t}}{c_i})^3 + B(\frac{d_{i,t}}{c_i})^2 + C(\frac{d_{i,t}}{c_i}) + D), & E \leq \frac{d_{i,t}}{c_i} < 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $d_{i,t}$  为分析期  $t$  分析段  $i$  的需求水平,单位 pcu/h;  $c_i$  为高速公路  $i$  段通行能力,pcu/(h·ln),计算见式(5)。

$$c_i = 2200 + 10 \times [\min(112.65, FFS) - 80.47] \quad (5)$$

$A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  参数取值见表 1。

表 1 非饱和条件公式参数取值

Tab. 1 Unsaturated formula parameter value

自由流速度/(km/h)	公式参数				
	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$
120	68.99	-77.97	34.04	-5.82	0.44
113	71.24	-85.48	35.58	-5.44	0.52
105	92.45	-127.33	56.34	-8.00	0.62
97	121.35	-184.84	83.21	-9.33	0.72
88	156.43	-248.99	99.20	-0.12	0.82

$$\Delta RO_{i,t} = \frac{45.6}{L_i} [\max(\frac{d_{i,t}}{c_i} - 1.0)] \quad (6)$$

式中:  $L_i$  为分析段  $i$  长度,单位 m;  $d_{i,t}$  为分析期  $t$  分析段  $i$  的需求水平,单位 pcu/h;  $c_i$  为高速公路第  $i$  段通行能力,单位 pcu/(h·ln)。

得到行程率  $TR_{i,t}$  后,行程时间计算见式(7),代入式(1)计算行程时间指数。

$$T_{i,t} = TR_{i,t} \times L_i \quad (7)$$

## 2 模型构建与校准

基于 FREEVAL 软件构建并校准仿真模型,实现 HCM 行程时间可靠性分析方法。

### 2.1 路段选取

HCM 可靠性分析方法研究长度大于 19 000 m 长的路段时,存在模型精度降低的问题<sup>[23]</sup>,故本文选择西南某高速公路长约 14 000 m 的某路段为研究对象。研究路段为包含 2 座互通式立交与 1 座隧道的交通事故多发路段,见图 3。2018—2020 年共发生交通事故 2 583 起,死亡 22 人。双向 4 车道,主线设计速度 80 km/h,研究方向为主线正向。

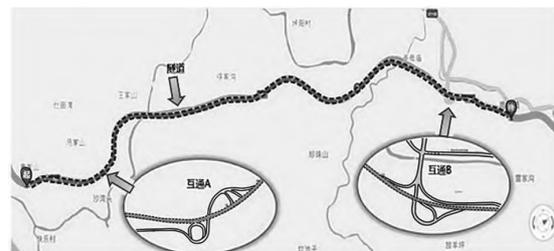


图 3 研究路段

Fig. 3 Study section

### 2.2 数据处理

数据分为 2 个部分:①基础场景数据,包括车道数、路段长度、路段类型、自由流速度和交通量等;②

可靠性分析数据,包括平均需求乘数矩阵和交通事故数据。数据具体获取途径见表2。

表2 数据类型与来源  
Tab. 2 Data type and source

数据	数据来源
车道数	实地调研
路段长度	百度API
路段类型	实地调研
自由流速度	修正基本自由流速度
交通量	ETC数据
平均需求乘数矩阵	实际交通量数据
交通事故数据	实际交通事故数据

平均需求乘数矩阵中的每个元素,代表某“月×星期”组合下,场景交通量与基础场景交通量的比值。选取未发生交通事故,具有平均交通需求水平的2018年9月24日作为基础场景,该天全天交通量为5 776 pcu/d。基于研究路段可靠性报告期内的其他交通量数据,与基础场景做比值后处理为“月×星期”的矩阵形式,得到平均需求乘数矩阵,见表3。

表3 平均需求乘数矩阵  
Tab. 3 Average demand multiplier matrix

月份	星期						
	一	二	三	四	五	六	日
一	1.14	1.05	1.09	1.09	1.12	1.11	1.19
二	1.42	1.68	1.69	1.16	1.42	1.52	1.41
三	1.77	1.59	1.65	1.66	1.77	1.67	1.94
四	2.19	1.78	2.02	2.08	2.30	2.47	2.27
五	1.73	2.21	1.72	1.76	2.10	1.82	2.13
六	1.70	1.62	1.74	1.59	1.95	1.80	1.96
七	1.29	1.38	1.31	1.33	1.40	1.28	1.35
八	1.10	1.13	1.12	1.11	1.25	1.27	1.27
九	1.00	0.97	1.01	0.97	1.12	1.05	1.21
十	1.11	1.12	1.15	1.21	1.31	1.20	1.26
十一	1.02	0.98	0.92	0.99	1.23	1.05	1.16
十二	1.12	1.09	1.07	1.06	1.16	1.20	1.24

交通事故数据指可靠性报告期内的交通事故严重程度分布、交通事故持续时间分布和交通事故发生频率分布。前二者默认取值,见表4。交通事故发生频率分布基于交通事故原始数据取得,见表5。

表4 默认交通事故严重程度与交通事故持续时间分布  
Tab. 4 Default accident type distribution and accident duration distribution

参数	路肩关闭	单车道关闭
分布比例/%	75.4	24.6
平均持续时间/min	34.0	34.6
标准差/min	15.1	13.8
最小持续时间/min	8.7	16.0
最大持续时间/min	58.0	58.2

表5 交通事故发生频率分布表  
Tab. 5 Accident frequency distribution

月份	交通事故频率
1	0.25
2	0.2
3	0.25
4	0.2
5	0
6	0
7	0.05
8	0.1
9	0.25
10	0.05
11	0.3
12	0.15

### 2.3 模型构建

根据基础场景数据和自定义参数,在FREEVAL中构建研究路段基础场景仿真模型,见图4。输入研究路段2018年可靠性分析数据,研究期设定为17:00—19:00,可靠性报告期设定为1年,仅分析工作日,每个场景取4个副本,共生成 $12 \times 5 \times 4 = 240$ 个场景。核心计算模型为每个分析期计算并存储1个行程时间数值,全年共产生 $8 \times 240 = 1\,920$ 个行程时间数据点。模型构建流程所需部分参数初值见表6~7。

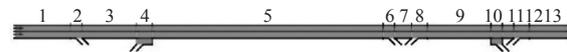


图4 研究路段仿真模型

Fig. 4 Simulation model for analyzing road section

表6 全局参数初值

Tab. 6 Initial value of global parameters

参数	取值
主线自由流速/(m/s)	30.56
匝道自由流速/(m/s)	13.33
拥挤密度(pcu/m)	0.118
瓶颈处通行能力下降值/%	7
加速车道长度/m	250
减速车道长度/m	200
货车当量PCE	2
货车率/%	24
拖挂车率/%	8

表7 场景参数初值

Tab. 7 Initial values of scenario parameters

参数	取值
基础场景日期	2018-09-24
研究期	17:00—19:00
可靠性报告期/年	1
可靠性报告开始日期	2018-01-01
可靠性报告结束日期	2018-12-31
场景涉及到的事件类型	交通事故
需求组合副本数/次	4
每周分析天数/d	5(仅工作日)
剔除需求量异常日	节假日及特殊活动

## 2.4 校准与验证

HCM行程时间可靠性分析方法涉及的众多默认参数,由美国研究人员根据实测数据开发,直接使用会降低模型评估精度。为验证HCM可靠性分析方法在国内高速公路的可移植性,本文在HCM第25章校准方法的基础上<sup>[21]</sup>,根据实际研究路段调整参数,校准后可高精度仿真实际路段场景,为后文分析交通事故对行程时间可靠性的影响规律提供技术支持。

校准是对研究路段全年的行程时间分布进行校准,只是这个行程时间分布会受研究路段全年的交通事故情况影响,而非仅对交通事故场景进行校准。校准后,由仿真模型搭建的场景用于分析交通事故场景时,能输出更准确的行程时间指数,从而开展交通事故影响规律探究。校准从基础场景水平与可靠性分析水平先后展开,两阶段内参数校准顺序可灵活调整。

基础场景水平下,首先校准自由流速,该步骤实质上是调整HCM的Ideal FFS Capacity参数,以实现整体优化;其次校准全局参数,包括:Overall facility demand level, Percent drop in capacity during breakdown, Overall jam density。根据Schroeder等<sup>[26]</sup>的研究成果,3个参数建议取值分别为0.0%, 3.0%, 6.0%; 5.0%, 7.0%, 9.0%; 190, 210, 230,按照L9(3<sup>4</sup>)正交表设计全局参数调整实验,同时校准交通需求,使得模型预测行程时间与实际行程时间误差小于10%。

可靠性水平下,首先校准需求矩阵,由于本实验中基础场景水平中交通需求校准效果良好,故在该水平下不校准平均需求乘数矩阵。交通事故模块校准通过调整 $N_3$ , CAF, DAF这3个参数实现。交通事故持续时间与CAF默认值见表4与表8,根据默认值下模型预测的行程时间指数分布与实际分布差异,微调参数实现校准。微调幅度以5 min为单位增减交通事故持续时间;以0.1为单位增减CAF;以0.1为单位增减DAF,同样采用正交表设计实验,确定交通事故模块最佳组合参数,校准目标是模型预测值与实际值的第50%位TTI误差控制在10%内。其中,实际行程时间指数分布,利用实际交通量数据计算“月-星期”组合下的平均速度,根据距离与平均速度之比得到对应组合下的行程时间;根据表6估算的主线自由流速度计算自由流状态下的行程时间;再根据式(1)计算实际行程时间指数。

表8 通行能力调整因子

Tab. 7 Capacity adjustment factors

单向车道数	无交通事故	路肩关闭	单车道关闭
2	1.00	0.81	0.70

注:表中值为可以正常通行车道的通行能力折减。

校准前、后与实际TTI累积频率分布见图5。对校准后与实际分布进行Kolmogorov-Smirnov检验,置信概率95%水平下,2个分布不存在统计学上的显著差异。

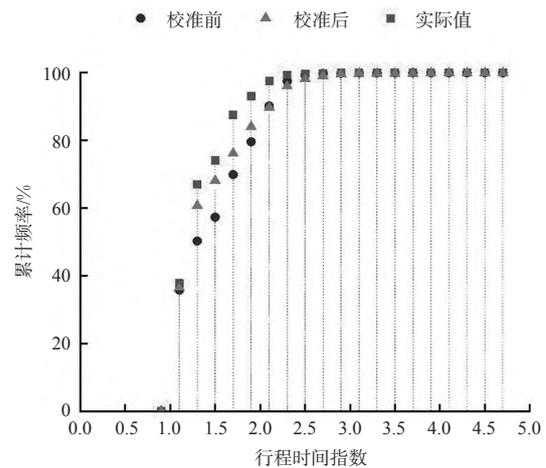


图5 行程时间指数累积分布对比图

为检验校准后模型的有效性,基于研究路段第二年的实测数据,验证校准后的可靠性分析模型,预测行程时间指数分布与实际行程时间指数分布不存显著差异,见图6。

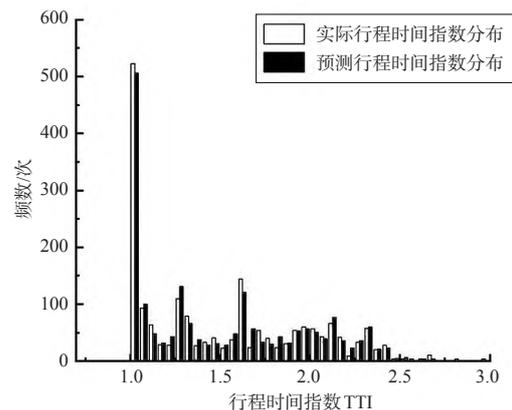


图6 行程时间指数分布对比图

Fig. 6 Comparison of travel time index distribution

## 3 基于交通事故的拥堵规律分析

实现前述校准目标后,可认为仿真模型能够复刻研究路段全年交通量与交通事故共同影响下的实际行程时间分布情况<sup>[23]</sup>。本节将基于此开展场景级的交通事故拥堵规律分析。

2016版HCM<sup>[23]</sup>、Chen等<sup>[27]</sup>相关研究结论表明:

交通事故特征可从交通事故发生位置、交通事故严重程度<sup>[28-29]</sup>、交通事故持续时间、交通事故发生频率4个角度描述。此外,交通事故发生时刻、交通事故发生时的天气状况等因素也有影响。由于实验条件的限制,暂不考虑上述2个因素,并将交通事故发生时刻统一设置为18:00—18:15,天气晴朗,照明条件设置为良好,以避免对其他因素的影响。

因此,本文将交通事故发生位置  $N_1$ 、交通事故严重程度  $N_2$ 、交通事故持续时间  $N_3$ ,以及交通事故发生频率  $N_4$  视作特征变量,以TTI为指标进行规律探究。后文中的行程时间指数仅表征主线路段的行程时间可靠性,但实验中考虑出入口匝道交通量。

由于交通事故发生时的交通量水平对行程时间可靠性影响差异显著,故在1 000,2 000,3 000,4 000,5 000 pcu/h这5种设计交通量水平下开展实验。仿真路段设置为单向双车道,单向通行能力3 545 pcu/h。

### 3.1 交通事故发生位置

交通事故仿真场景发生于图4构建的仿真路段,不存在交织区,故交通事故位置  $N_1$  取值为基本路段  $N_{11}$ 、出口匝道段  $N_{12}$  及入口匝道段  $N_{13}$ 。控制交通需求水平为基础场景需求水平,交通事故开始于分析期5,持续时间15 min,严重程度为单车道关闭。从仿真场景中筛选符合上述条件的交通事故场景。不同交通量水平、不同交通事故位置的行程时间指数结果见图7。

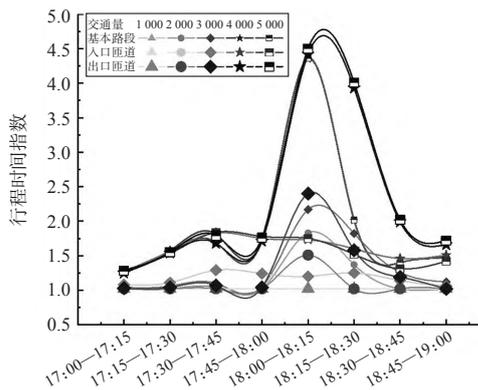


图7 不同交通事故位置的行程时间指数分布图

Fig. 7 Travel time index distribution for different accident locations

注:交通需求水平为基础场景需求水平、交通事故开始时间分析期5(18:00—18:15)、交通事故持续时间15 min、单车道关闭场景。

从交通事故发生位置来看,当交通量大于等于3 000 pcu/h时,发生在出口匝道段的行程时间指数最大,入口匝道段最小。交通量较小时,交通事故发生在不同位置的影响无较大差异。行程时间指数值

越大,交通事故对行程时间可靠性扰动越强。

根据图7曲线趋势,可确定:交通量接近或大于道路通行能力时,交通事故发生位置对路段行程时间可靠性影响由强至弱依次为:出口匝道段、基本路段、入口匝道段。出口匝道段的影响最大,原因大概率是交通事故阻碍主线交通流出通道,造成主线流量大于通行能力从而发生拥堵。发生在入口匝道段后阻塞交通流汇入主线,降低主线交通需求水平,一定程度上减弱对行程时间可靠性的影响。当交通量远小于主线通行能力时,交通事故发生位置基本没有影响,因为此时交通事故并未侵占正常行驶车辆的道路空间,对交通流的扰动作用微弱。

对于交通量接近饱和的路段,在资源不充足的情况下,通过交通事故管控措施提高服务水平。建议首先改善出口匝道段的交通安全设施,其次考虑基本路段和入口匝道段。实现经济资源高效利用的同时减轻交通事故对高速公路运营效率的消极影响。

### 3.2 交通事故严重程度

交通事故严重程度用车道关闭数表征,严重程度从轻至重依次为:路肩关闭、单车道关闭、2车道关闭。仿真路段主线单向2车道,不考虑车道全关闭场景,仅讨论路肩关闭  $N_{21}$  和单车道关闭  $N_{22}$  场景。控制交通需求水平为基础场景需求水平,交通事故开始于分析期5,持续时间15 min,发生在基本路段5。从仿真场景中筛选符合上述条件的交通事故场景。不同交通量水平、不同交通事故严重程度的行程时间指数结果见图8。

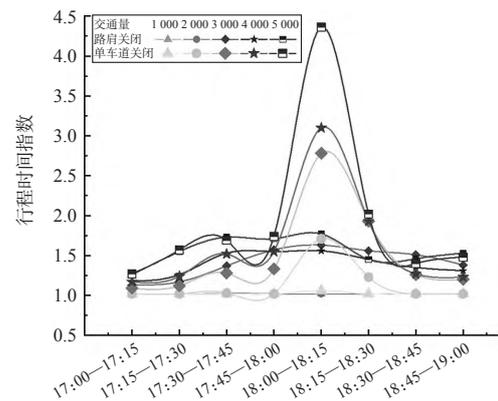


图8 不同交通事故严重程度的行程时间指数分布图

Fig. 8 Travel time index distribution for different severity accident

注:交通需求为基础场景需求水平、交通事故位置在分析期5(图5)、交通事故开始时间为分析期5(18:00—18:15)

从交通事故严重程度来看,当交通量大于1 000 pcu/h时,单车道关闭的影响远高于路肩关闭。图8中,分析期18:00—18:15开始发生1起15 min的交

通事故,单车道关闭事故的TTI相较于前1个分析期的增加量高于路肩关闭,增量最高达2.5,而小符号组增量为0.1。说明交通量大于1 000 pcu/h时,单车道关闭的交通事故影响远高于路肩关闭。当交通量小于1 000 pcu/h时,2种交通事故严重程度对应的行程时间指数增量基本为0。说明接近自由流状态时,2种交通事故对主线交通流均无显著影响。

对于主线单向2车道工况来说,交通量水平直接影响单车道关闭交通事故对行程时间可靠性的影响程度,而几乎不影响路肩关闭交通事故。总的来说,在交通量接近饱和与过饱和时,单车道关闭的负面影响远高于路肩关闭,后者几乎为0。在交通量较小时,二者均无影响。路肩交通事故基本不影响主

线交通流运行,不会显著降低道路实际通行能力,故在任何交通量水平下,路肩关闭事故对行程时间指数变化基本没有贡献。而单车道关闭直接减少驾驶人一半的行驶空间,影响主线交通流运行。建议在交通量接近饱和状态时,采取管控措施避免发生更严重的交通事故。

### 3.3 交通事故持续时间

依据前人研究成果<sup>[30-31]</sup>,交通事故持续时间 $N$ ,分别取值为15,30,45,60 min。控制交通需求水平为基础场景需求水平,交通事故开始于分析期5,发生在基本路段5。从仿真场景中筛选符合上述条件的交通事故场景。不同交通量水平、不同持续时间下的行程时间指数结果见图9~10。

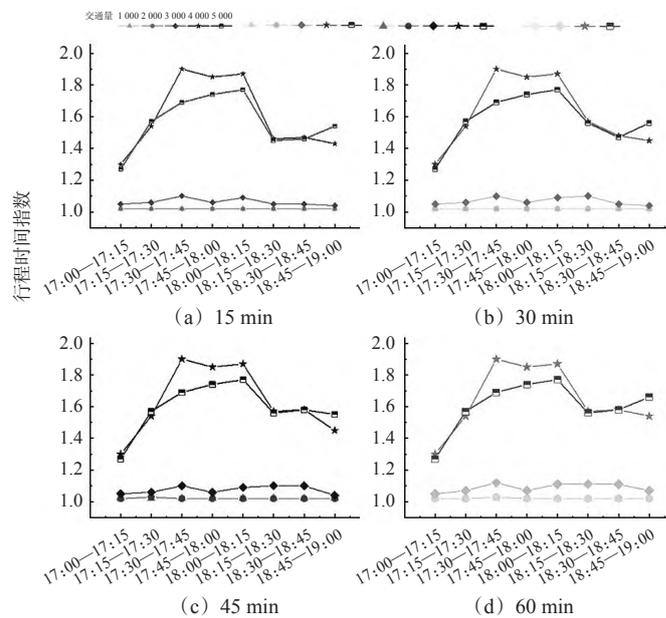


图9 不同交通事故持续时间的行程时间指数分布(路肩关闭)

Fig. 9 Distribution of different traffic accident duration travel time index for shoulder closure accidents

图9表示路肩关闭交通事故在不同持续时间下的行程时间指数分布情况。该情况下,持续时间长短对行程时间指数的影响几乎没有差异。不同持续时间、相同交通量水平下,交通事故发生前后的行程时间指数增量几乎相等。小交通量水平下,最大增量约为0.05,大交通量水平下,最大增量约为0.1。说明路肩关闭交通事故的持续时间长短对行程时间可靠性影响无显著差异。

图10表示单车道关闭交通事故在不同持续时间下的行程时间指数分布情况。18:00—18:15开始发生的交通事故会使得该分析期的行程时间指数剧增,增长幅度取决于交通量。以图9(a)为例,交通量为1 000 pcu/h时,18:00—18:15开始发生的交通事故基本不影响交通流,交通量为5 000 pcu/h时,突发

的交通事故会使行程时间指数从1.5增加至4.5。

以交通量水平为3 000 pcu/h的工况为例,观察图10不同持续时间下行程时间指数分布的峰值。峰值从15 min对应的2.2,30 min对应的4.3,45 min对应的4.5变化到60 min对应的5.3。说明交通流较拥堵时,单车道关闭交通事故持续时间越长,对行程时间可靠性的影响越大,且影响程度突增点产生于15~30 min,行程时间指数从2.2突增至4.3。同理,分析其他交通量水平下,普遍存在持续时间在15~30 min内,行程时间指数剧增的现象。建议加强应急响应速度,及时采取交通事故疏散措施,将交通事故持续时间尽量控制在15 min内。

由图9还可以看出,交通事故的消散时间,即从交通事故发生时刻经历相应持续时间到达某一指数

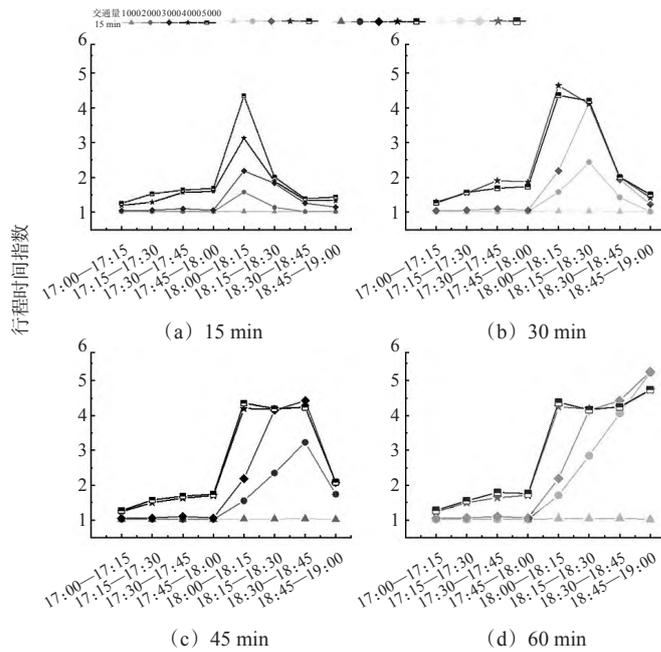


图10 不同交通事故持续时间的行程时间指数分布(单车道关闭)

Fig. 10 Distribution of different traffic accident duration travel time index for single lane closure accidents  
注:交通需求为基础场景需求水平、交通事故位置在分析段5(图5)、交通事故开始时间为分析期5(18:00—18:15)。

水平后,从该水平恢复至交通事故发生时刻指数水平的用时。图10(a)中,2 000 pcu/h 消散时间为30 min,3 000 pcu/h为45 min,4 000 pcu/h和5 000 pcu/h为22 min左右;图10(b),各种交通量水平下的交通事故消散时间均为30 min左右。由图10(c),图10(d)并不能直接看出具体消散时间,但从图(c)趋势判断消散时间亦为30 min左右。

### 3.4 交通事故发生频率

对比分析交通事故发生频率水平分别为  $N_{41}=300$  次/ $L_{Pcu \cdot km}$ 、 $N_{42}=600$  次/ $L_{Pcu \cdot km}$ 、 $N_{43}=900$  次/ $L_{Pcu \cdot km}$  下的交通事故场景,依据行程时间指数分布,探寻交通事故发生频率与路段行程时间可靠性的影响规律,见图11。

由图11可见:斜纹柱状图对应的低交通事故发生频率水平的行程时间指数分布呈左偏趋势,分析期数在行程时间指数小的类别中占比更多;横纹柱状图对应的高交通事故发生频率水平的行程时间指数分布呈右偏趋势,分析期数在行程时间指数大的类别中占比更多。基于分布的变化趋势,发现随着交通事故发生频率的增加,行程时间指数值较大类别的分析期数在增加,说明各场景分析的行程时间均在增加,意味着高速公路行程时间可靠性逐渐降低。

### 3.5 基于行程时间指数的拥堵判别方法

3.1至3.4中对交通事故发生位置、交通事故严

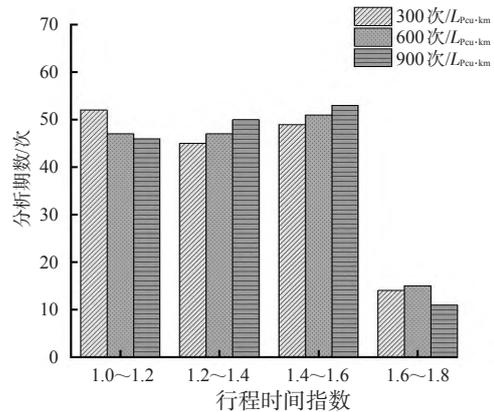


图11 不同交通事故发生频率的行程时间指数分布图

Fig. 11 Travel time index distribution for different frequency of accident

注:交通需求为基础场景的需求水平、交通事故位置在分析段5(见图5)、交通事故开始时间为分析期3(17:30—17:45)、交通事故持续时间为15 min、单向2车道公路路肩关闭场景。

重程度、交通事故持续时间、交通事故频率的分析表明:不同特征的事故对TTI影响特点各有不同,而TTI值在不同区间内能表征不同等级的拥堵状态( $F_i$ ),故构建如图12所示的基于交通事故的高速公路路段拥堵判别方法。输入交通量与事故特征,利用本文的行程时间可靠性模型输出TTI,判断TTI所在范围以确定拥堵等级。图中, $R_{TTI,i}$ 代表以TTI确定的拥堵等级阈值,具体取值由实际路段交通量水平等参数确定。

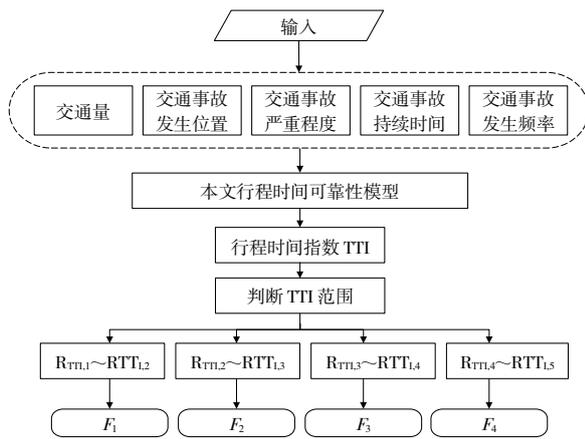


图 12 基于交通事故的高速公路路段拥堵判别方法

Fig. 12 Congestion identification method of highway section based on traffic accidents

## 4 结束语

1) 本文构建了基于交通事故特征的高速公路路段拥堵判别方法。输入交通量水平、事故特征因子(交通事故发生位置、交通事故严重程度、交通事故持续时间、交通事故频率),得出研究路段 TTI 值并对该路段拥堵等级进行判别。该方法校准了美国 HCM 行程时间可靠性分析方法内置参数。利用两阶段校准方法,逐级调整模型参数,使得校准后的模型输出行程时间指数分布与实际分布无显著差异,证明 HCM 行程时间可靠性分析方法在国内高速公路的可移植性。同时,本文使用该方法对我国西南某高速公路进行具体分析,探究不同事故特征因子对路段拥堵状态的影响规律。

2) 交通事故发生位置  $N_1$ : 交通量接近饱和的情况下,交通事故发生在出口匝道段对主线交通流运行效率的影响更大。交通事故严重程度  $N_2$ : 在交通量接近饱和与过饱和时,对于主线单向双车道场景而言,单车道关闭交通事故影响远高于路肩关闭交通事故;在交通流接近自由流状态下,交通事故影响对其严重程度不敏感。交通事故持续时间  $N_3$ : 在任何交通量水平下,单车道关闭交通事故的持续时间超过 15 min 后,行程时间可靠性可能发生骤降,建议将交通事故应急响应时间控制在 15 min 内。对于主线单向双车道关闭单车道场景而言,各类严重程度交通事故造成的拥堵消散时间均在 30 min 左右,本方法可拓展至其他场景以分析拥堵消散时间。

3)  $N_3$  与  $N_2$  耦合作用对行程时间可靠性的影响,随交通事故严重程度的增加呈迅猛上涨趋势。路肩关闭场景下,与不同持续时间耦合后的行程时间指数值基本没有变化;单车道关闭场景下,持续时

间大于 15 min 将导致指数值增加约 2 倍。建议加强对严重交通事故的应急救援能力。

4) 本文的不足之处在于未考虑交通事故发生的时间、天气、道路线形等环境因素,且研究对象范围较窄。未来研究工作将考虑改进 HCM 可靠性分析方法,纳入环境因素以开展更全面的研究。

## 参考文献

### References

- [1] 李淑庆,彭面朗,肖莉英,等. 道路交通事故发生机理研究现状与趋势分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 14-19.  
LI S Q, PENG Y L, XIAO L Y, et al. Analysis of mechanism of the road traffic accidents in-situ and the future research trends[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(3): 14-19. (in Chinese)
- [2] 国家统计局. 2021年交通事故数据[EB/OL]. (2022-1)[2022-1-17]. <https://data.stats.gov.cn/search.htm?s=%E4%BA%A4%E9%80%9A%E4%BA%8B%E6%95%85>.  
NATIONAL BUREAU OF STATISTICS. Traffic accident data for 2021 [EB/OL]. (2022-1) [2022-1-17]. <https://data.stats.gov.cn/search.htm?s=%E4%BA%A4%E9%80%9A%E4%BA%8B%E6%95%85>. (in Chinese)
- [3] LOMAX T, TURNER S, SHUNK G, et al. Quantifying congestion. Volume 1: final report [R]. Texas: Texas Transportation Institute, 1997.
- [4] KOUKIS D, ANTONATOS S, ANTONIADES D, et al. A generic anonymization framework for network traffic[J]. IEEE International Conference on Communications, 2006, 19(3): 2302-2309.
- [5] 庄 斌,杨晓光,李克平. 道路交通拥挤事件判别准则与检测算法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 82-86.  
ZHUANG B, YANG X G, LI K P. Criteria and detection algorithm of road traffic congestion events [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 82-86. (in Chinese)
- [6] LAM T. The effect of variability of travel time on route and time-of-day choice[D]. California: University of California, 2000.
- [7] RAFFERTY P. Practical benefits analysis of travel time reliability from automated detection[J]. Transportation Research Record, 2009(2115): 119-126.
- [8] ELIASSON J. The relationship between travel time variability and road congestion[C]. 11<sup>th</sup> World Conference on Transport Research, Berkeley CA, Unites States: TRB, 2007.
- [9] YANG M L, LIU Y G, YOU Z S. The reliability of travel time forecasting[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(1): 162-171.
- [10] 黄帅凤. 基于手机数据的高速公路行程时间可靠性评估方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
HUANG S F. Research on freeway travel time reliability

- evaluation method based on mobile phone data[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [11] WOODARD D, NOGIN G, KOCH P, et al. Predicting travel time reliability using mobile phone GPS data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017(75):30-44.
- [12] ASAKURA A. Reliability measures of an origin and destination pair in a deteriorated road network with variable flows[C]. 4<sup>th</sup> EURO Transportation Meeting on Transportation Networks, Newcastle, Australia; Elsevier Science BV, 1998.
- [13] 薛晓姣, 杨宏志, 任楠. 应急条件下区域路网行程时间可靠性研究[J]. *交通信息与安全*, 2019, 37(2):25-32.  
XUE X J, YANG H Z, REN N. Travel time reliability of regional road network under emergency conditions[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2019, 37(2):25-32. (in Chinese)
- [14] 冷军强. 冰雪条件下城市路网行程时间可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
LENG J Q. Travel time reliability of urban road network under ice and snowfall conditions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [15] 王婧, 何杰, 吴炼. 雨天高速公路网行程时间可靠性评价方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(6):117-123.  
WANG J, HE J, WU L. Evaluating approach of travel time reliability for highway network under rain environment[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(6):117-123. (in Chinese)
- [16] 张琦, 陈红, 刘至真, 等. 降雨量对OD行程时间可靠性影响分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(6):243-249.  
ZHANG Q, CHEN H, LIU Z Z, et al. Analysis of effects of rainfall on origin-destination-based travel time reliability[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(6):243-249. (in Chinese)
- [17] 刘永红, 李进龙, 陈欣, 等. 先进出行信息下交通事故对行程时间可靠性的影响[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(3):36-41.  
LIU Y H, LI J L, CHEN X, et al. Impact of incident on travel time reliability in advanced traveler information systems[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(3):36-41. (in Chinese)
- [18] 陈玲娟, 刘海旭, 蒲云. 交通事故持续期内行程时间的可靠性研究[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(2):376-382.  
CHEN L J, LIU H X, PU Y. Travel time reliability during incident duration time[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(2):376-382. (in Chinese)
- [19] CISZEWSKAK E, ROMANOWSKAA, KUSTRAW. Analysing the impact of traffic incidents on express road traffic flow using FREEVAL [C]. 12<sup>th</sup> International Road Safety Conference GAMBIT 2018, Gdansk, Poland: EDP Sciences, 2018.
- [20] ASAKURA Y, KASHIWADANI M. Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow[C]. 19<sup>th</sup> PTRC Summer Annual Meeting, University of Sussex, United Kingdom: TRB, 1991.
- [21] BHATTACHARYA M, MAZUMDER P, LOMAX R J. FD-TLM electromagnetic field simulation of high-speed III-V heterojunction bipolar transistor digital logic gates[C]. 14<sup>th</sup> International Conference on VLSI Design, Bangalore, India: IEEE, 2001.
- [22] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual[M]. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 2016.
- [23] FHWA. Travel time reliability: making it there on time, all the time[EB/OL]. [2022-4-18]. [http://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt\\_reliability/TTR\\_Report.htm](http://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm).
- [24] PU W J. Analytic relationships between travel time reliability measures[J]. *Transportation Research Record*, 2011 (2254):122-130.
- [25] LAM T C, SMALL K A. The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2001, 37(2-3):231-251.
- [26] SCHROEDER B J, ROUPHAIL N M, AGHDASHI S. Deterministic framework and methodology for evaluating travel time reliability on freeway facilities[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2396(1):61-70.
- [27] CHEN H, YOU Y S, ZHOU J B, et al. A simplified approach to estimate the urban expressway capacity after traffic accidents using a micro-simulation model[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013(5):656345.
- [28] 郑来, 顾鹏, 卢健. 基于T-S模糊故障树和贝叶斯网络的重特大交通事故成因分析[J]. *交通信息与安全*, 2021, 39(4):43-51.  
ZHENG L, GU P, LU J. A cause analysis of extraordinarily severe traffic crashes based on T-S fuzzy fault tree and bayesian network[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2021, 39(4):43-51. (in Chinese)
- [29] 胡骥, 闫章存, 卢小钊, 等. 基于有序Logit与Probit模型的交通事故严重性影响因素分析[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(3):836-843.  
HU J, YAN Z C, LU X Z, et al. Analysis for the influential factors of the accident severity based on the ordinal logit and probit models[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(3):836-843. (in Chinese)
- [30] 刘伟铭, 管丽萍, 尹湘源. 基于决策树的高速公路事件持续时间预测[J]. *中国公路学报*, 2005, 18(1):99-103.  
LIU W M, GUAN L P, YIN X Y. Prediction of freeway incident duration based on the decision tree[J]. *China Journal Highway and Transport*, 2005, 18(1):99-103. (in Chinese)
- [31] 蓝岚, 路峰, 王军. 城市交通事故现场处理时间及影响因素分析[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(3):1173-1181.  
LAN L, LU F, WANG J. Analysis of the on-site processing time and the influential factors of the urban traffic accidents[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(3):1173-1181. (in Chinese)