

文章编号:1671-1637(2018)04-0132-11

网络行程时间可靠性评价方法与影响因素

陈喜群,刘教坤,胡浩强,崔尔佳,张帅超

(浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘 要:采用区域划分方法研究了网络行程时间率的概率分布,提出了基于 OD 对的网络行程时间可靠性指标以评价城市交通可靠性;选取影响行程时间可靠性指标的相关因素,建立了多元线性回归模型,用逐步回归法求解模型,并进行了模型参数显著性检验;根据杭州市和北京市的网约车数据计算了网络行程时间可靠性指标,并与高峰拥堵延迟指数进行对比,分析了网络行程时间可靠性指标的时空分布规律。研究结果表明:在多元线性回归模型中,规划行程时间率与等待时间、费用、距离、行程时间和 OD 对间行程次数这 5 个自变量拟合得到的决定系数为 0.772,平均行程时间率与 5 个自变量拟合得到的决定系数为 0.857,2 个模型拟合程度均较好,回归模型显著;规划行程时间率回归模型中等待时间、行程时间和实际行程距离的回归系数分别为 0.386、0.399 与 -1.286,平均行程时间率回归模型中等待时间、行程时间和实际行程距离的回归系数分别为 0.162、0.177 与 -0.676,2 个交通可靠性指标都与等待时间和行程时间呈正相关,和实际行程距离呈负相关;提出的网络行程时间可靠性指标与高峰拥堵延迟指数变化趋势一致,较好地符合现实交通状况,从多角度反映了交通可靠性特征,可以为路网规划提供决策支持,帮助居民更好地进行出行路径选择。

关键词:交通规划;行程时间率;多元线性回归;可靠性指标;显著性检验;高峰拥堵延迟指数

中图分类号:U491.13 **文献标志码:**A

Evaluation method and influence factors of network travel time reliability

CHEN Xi-qun, LIU Jiao-kun, HU Hao-qiang, CUI Er-jia, ZHANG Shuai-chao

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: The probability distribution of network travel time rate was studied based on the regional division approach, and the travel time reliability indexes based on OD pairs were proposed to appraise the reliability of urban traffic. The multivariate linear regression model was established by choosing the relevant factors that influenced the travel time reliability indexes. The model was solved by the stepwise regression method, and the significance test was conducted to verify the estimated model parameters. The network travel time reliability indexes were calculated by Hangzhou and Beijing ride-hailing data and compared with the peak congestion delay indexes, then the temporal and spatial distributions of network travel time reliability indexes were analyzed. Research result shows that in multivariate linear regression models, the fitting determination coefficient between the planning travel time rate and five independent variables, including the waiting time, cost, distance, travel time, and number of trips for OD pairs is 0.772, and the fitting determination coefficient between the average travel time rate and five

收稿日期:2018-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51508505,71771198);浙江省自然科学基金项目(LR17E080002)

作者简介:陈喜群(1986-),男,黑龙江宾县人,浙江大学研究员,工学博士,从事交通运输管理研究。

independent variables is 0.857, so both models have better fitting degrees and statistical significance. In the regression model of planning travel time rate, the regression coefficients of waiting time, travel time, and travel distance are 0.386, 0.399, and -1.286 , respectively. In the regression model of average travel time rate, the regression coefficients of waiting time, travel time, and travel distance are 0.162, 0.177, and -0.676 , respectively. The two traffic reliability indexes are positively correlated for the waiting time and travel time, and negatively correlated for the actual travel distance. The proposed network travel time reliability indexes are consistent with the peak congestion delay index and reflect the traffic reliability characteristics from various perspectives. They provide decision support for transportation planning and help residents choose propitious routes. 5 tabs, 7 figs, 26 refs.

Key words: transportation planning; travel time rate; multiple linear regression; reliability index; significance test; peak congestion delay index

Author resume: CHEN Xi-qun(1986-), male, professor, PhD, chenxiqun@zju.edu.cn.

0 引言

交通可靠性是指在给定的一段时间内,交通运输服务在一定的路段、区域中保持一致性的程度。城市道路交通系统在运行过程中,经常受到随机因素干扰,例如频繁的交通事故、临时性的道路维修与交通管制、突发性的自然灾害(地震、洪水、恶劣天气)等,均会给出行带来不确定性,极大地降低了交通系统运行的可靠性,对城市交通功能的发挥和城市发展都带来了不利影响^[1],因此,一个畅通的、可靠的道路交通系统不仅是出行者实现出行目的的基础,也是城市交通管理者追求的目标。

在已有的研究中,存在一系列交通可靠性定义及指标量化方法,包括最初由 Wakabayashi 等提出的基于静态路网的连通性评价方法^[2]、Asakura 等提出的基于行程时间的路网可靠性评价方法^[3]、Chen 等提出的基于路网容量的路网可靠性评价方法^[4-5],这3种是最基本的交通可靠性评价方法,其他的可靠性指标还包括交叉口清空可靠性^[6]、公交运行可靠性^[7]等。

其中,行程时间可靠性是居民日常出行最为关心,也是最具有经验感知意义的度量指标。Chen 等研究了基于驾驶人行为的行程时间可靠性^[8];熊志华等针对路段之间的相互影响模式分析了路网行程时间可靠性^[9],其提出的缓冲时间是指为了保证到达目的地的概率足够大而提前出行的额外时间,需要预留的额外时间越大,则路网越不可靠^[10];Chen 等将出租车实测数据应用于计算北京路网行程时间可靠性的实时分布^[11],并建立了基于动态交通仿真和统计学模型的大型活动下路网可靠性评价体系。

目前,国内外学者在行程时间可靠性理论和计算等方面的研究均取得了丰富的成果,但仍然存在不足。主要原因包括:一方面,对路网行程时间可靠性算法的研究多是从图论中的网络可靠性计算方法借鉴而来,仅适合于计算简单路网的可靠性,而在实际路网中,就显得计算量过大,出现不符合实际路网运行状态与难以正确描述路网随机流的弊端;另一方面,因为路网的实际运行状态缺乏精确的数据支持^[12],难以计算得到相应的行程时间可靠性^[13]。

本文利用网约车平台提供的数据,克服了大规模、大范围行程时间采集数据的困难,避免了只关注单一路段而造成网络可靠性难以高效计算的缺点;从行程时间率的概率分布出发,通过区域划分方法,提出基于出行 OD 对的网络行程时间可靠性研究思路,并给出了网络行程时间可靠性指标的计算方法,能够用于评价区域与总体网络的行程时间可靠性;选取杭州市和北京市的网约车数据进行网络行程时间可靠性指标的计算和对比,分析了网络行程时间可靠性指标的时间和空间分布规律。

1 行程时间可靠性指标

1.1 行程时间率

本文提出的行程时间可靠性是基于现有研究的行程时间可靠性指标,结合网约车数据,重新扩展其含义和适用范围而得到。首先定义行程时间率 τ 为^[14-15]

$$\tau = \frac{t}{d} \quad (1)$$

式中: t 为行程时间; d 为行程距离。

对于选取的研究区域,鉴于单一路段的相关数据难以获得,并且数据可靠性差,本文首先提出二维平面上的行程时间可靠性研究方法,即将所研究的区域划分为区域块(以 1 km 的正方形区域为例),研究 OD 对的交通可靠性。

通过获取网约车平台提供的单个乘客起讫点经纬度坐标、实际路径行程距离、上下车时间,根据上下车时间差计算得到乘客的旅行时间,再根据式(1)得到每个乘客的行程时间率,为

$$\tau_{ijk} = \frac{t_{ijk}}{d_{ijk}} \quad (2)$$

式中: τ_{ijk} 、 t_{ijk} 、 d_{ijk} 分别为从第 i 个区域到第 j 个区域内第 k 次出行的行程时间率、行程时间与实际行程距离。

1.2 网络行程时间可靠性指标

在出发时间选择上,出行者通常会考虑路网交通状态的波动性,通过一定的预留时间来抵消潜在的不确定性风险。为预防迟到风险而预留的时间通常被表述为不同的形式,例如有效行程时间^[16-17]、出行时间预算^[18]。基于以上思路,本研究通过计算 OD 对的行程时间率概率分布分位数,进一步定义了网络行程时间可靠性指标。

1.2.1 网络自由流行程时间率

网络自由流行程时间率为在给定时间段内,每个 OD 对间所有出行者行程时间率概率分布的 5% 分位数,通常认为在此状态下所得到的 OD 对的行程时间率跟在道路完全畅通时的情况相同,为

$$N_1 = \frac{\sum_i \sum_j \omega_{ij} \tau_{ij}^{(1)}}{\sum_i \sum_j \omega_{ij}} \quad (3)$$

$$\omega_{ij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} d_{ijk} \quad (4)$$

式中: N_1 为网络自由流行程时间率; $\tau_{ij}^{(1)}$ 为从第 i 个区域到第 j 个区域的自由流行程时间率; n_{ij} 为从第 i 个区域到第 j 个区域总的出行次数; ω_{ij} 为从第 i 个区域到第 j 个区域总出行次数距离之和。

1.2.2 网络平均行程时间率

网络平均行程时间率为在指定时间段内,每个 OD 对间所有出行者行程时间率分布的 50% 分位数,反映 OD 对与城市间的交通出行可靠性的平均状况(中位数),为

$$N_2 = \frac{\sum_i \sum_j \omega_{ij} \tau_{ij}^{(2)}}{\sum_i \sum_j \omega_{ij}} \quad (5)$$

式中: N_2 为网络平均行程时间率; $\tau_{ij}^{(2)}$ 为从第 i 个区域到第 j 个区域的平均行程时间率。

1.2.3 网络规划行程时间率

网络规划行程时间率为在指定时间段内,每个 OD 对间所有出行者行程时间率分布的 95% 分位数。规划时间是指出行者为了保证能准时到达目的地的可能性足够大,根据约定的到达时间,规划从出发地前往目的地的时间。网络规划行程时间率反映了总体网络区域在单位路程上需要规划的时间,为

$$N_3 = \frac{\sum_i \sum_j \omega_{ij} \tau_{ij}^{(3)}}{\sum_i \sum_j \omega_{ij}} \quad (6)$$

式中: N_3 为网络规划行程时间率; $\tau_{ij}^{(3)}$ 为从第 i 个区域到第 j 个区域的规划行程时间率。

1.2.4 网络缓冲行程时间率

网络缓冲行程时间率为在指定时间段内,每个 OD 对间所有出行者行程时间率分布的 95% 分位数和 50% 分位数的差值。缓冲时间是指出行者为了保证能准时到达目的地的可能性足够大,提前出行的额外时间。网络缓冲行程时间率反映了总体网络在单位路程上需要预留的时间,为

$$N_4 = \frac{\sum_i \sum_j \omega_{ij} \mu_{ij}}{\sum_i \sum_j \omega_{ij}} \quad (7)$$

$$\mu_{ij} = \tau_{ij}^{(3)} - \tau_{ij}^{(2)} \quad (8)$$

式中: N_4 为网络的缓冲行程时间率; μ_{ij} 为从第 i 个区域到第 j 个区域的缓冲行程时间率。

1.2.5 网络缓冲行程时间率指数

网络缓冲行程时间率指数为在指定时间段,网络缓冲行程时间率占平均行程时间率的比重,即出行者为了保证能准时到达目的地的概率足够大,预留的出行额外时间占平均出行时间的比重,为

$$N_5 = \frac{\sum_i \sum_j \omega_{ij} \eta_{ij}}{\sum_i \sum_j \omega_{ij}} \quad (9)$$

$$\eta_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\tau_{ij}^{(3)}} \quad (10)$$

式中: N_5 为网络的缓冲行程时间率指数; η_{ij} 为从第 i 个区域到第 j 个区域的缓冲行程时间率指数。

为了更好地理解网络行程时间可靠性指标的关系,各个指标含义及其作用见表 1。其中, $N_1 \sim N_3$ 一般用于反映城市交通可靠性特征,不用于具体的可靠性评价; N_4 、 N_5 用于具体的可靠性评价, N_4 用于城市交通可靠性的评价, N_5 为无量纲的相对指

标,可以用于不同城市之间比较,得到不同城市交通可靠性的优劣情况。通过统计数据对 N_4 和 N_5 的数值进行区间划分,可以得到城市交通可靠性等级,从而进行城市交通可靠性评价。区域行程时间可靠

性指标和网络行程时间可靠性指标的区别是前者是针对城市中区域的指标,后者是针对整体城市的指标,后者由前者通过区域之间总行程距离加权计算得到。

表 1 网络行程时间可靠性指标总结
Tab. 1 Summary of network travel time reliability indexes

指标	变量	含义	作用
网络自由流行程时间率	N_1	OD 对之间行程时间率的 5%分位数,可认为道路畅通	衡量 OD 对之间道路完全畅通时的行驶状况
网络平均行程时间率	N_2	OD 对之间行程时间率中位数,即为 50%,可认为正常的道路状况	衡量 OD 对之间正常情况下的行驶状况
网络规划行程时间率	N_3	OD 对之间行程时间率的 95%分位数,可认为道路最为拥堵情况	衡量 OD 对之间准时到达而需要规划的时间
网络缓冲行程时间率	N_4	OD 对之间行程时间率分布的 95%分位数和 50%分位数的差值,可认为准时到达需要的缓冲时间	衡量 OD 对之间准时到达,规划时间比正常情况多的时间,用于城市内可靠性的评价
网络缓冲行程时间率指数	N_5	OD 对之间区域缓冲行程时间率占区域平均行程时间率的比重	衡量 OD 对间预留的出行额外时间占平均出行时间的比重,用于不同城市交通可靠性对比

1.3 高峰拥堵延迟指数

为了验证本文中的行程时间可靠性模型是否符合正常的交通流分布状态,下文将行程时间可靠性指标和现行常用的一种城市拥堵评价指标(即高峰拥堵延迟指数)进行对比。高峰拥堵延迟指数反映的是自由流状态下的车速和早晚高峰平均车速的比值。在其他条件不变的情况下,其值越大,城市道路越拥堵。高峰拥堵延迟指数 I 为

$$I = \frac{V_f}{V_h} \tag{11}$$

式中: V_f 为自由流车速,即 0:00~6:00 平均车速; V_h 为早晚高峰平均车速,即 7:00~10:00 和 17:00~20:00 的平均车速。

2 行程时间可靠性影响因素分析

城市道路网络交通可靠性研究的对象是由道路、交叉口所组成的为人、车出行提供交通服务的网络系统,其本质特征具有复杂性和随机性。一方面是需求方的随机变动,有多种因素影响出行者的出行,如出行目的、出行费用、个人偏好、路网状态等;另一方面是供给方的随机变动,多种不确定性因素能够改变交通网络通行能力与服务水平。对道路网络来说,交通事故、自然灾害、日常的交通拥堵、交通组织的变化、道路的改造维护、路况恶化与乱停车等违法行为都会影响路网的通行能力^[19-20]。

从理论上讲,对于交通可靠性模型的分析,考虑的影响因素越多越好,可以更好地拟合模型。然而,实际上任何一种模型都不可能涵盖所有的影响因

素,并且考虑的因素越多,建模所需的样本量就越大,在数据量有限的条件下,建立的模型精度可能降低。此外,如果考虑的因素过多,就会出现模型泛化能力变差现象,不利于分析实际问题,因此,本文基于已有的数据,根据一般性、简洁性和实用性原则,选取打车等待时间、出行时间、出行距离、打车费用与 OD 对之间的行程次数作为自变量,行程时间可靠性指标作为因变量进行具体分析。

2.1 行程时间可靠性多元线性回归模型

日常出行最重要的行程时间可靠性指标为区域规划行程时间率和区域平均行程时间率,选取这 2 个指标分别作为因变量,选取打车等待时间、行程时间、出行距离、打车费用与 OD 对之间的行程次数为自变量进行分析。2 个指标的多元线性回归模型分别为

$$R_1 = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 X_5 + \epsilon_1 \tag{12}$$

$$R_2 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \epsilon_2 \tag{13}$$

式中: R_1 为区域规划行程时间率; R_2 为区域平均行程时间率; $X_1 \sim X_5$ 分别为等待时间、费用、距离、行程时间、OD 对间行程次数; $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 和 $\beta_0 \sim \beta_5$ 分别为区域规划行程时间率和区域平均行程时间率相对应的回归系数; ϵ_1, ϵ_2 为 2 个均值为 0 的随机变量。

由于自变量之间具有相关性,同时存在对因变量影响不显著的自变量,本文通过逐步回归法,来确定最优的回归模型。将变量逐步引入回归模型,引入变量的条件是偏回归平方和检验是显著的;同时,

每引入一个新变量后,对已选入的变量进行逐个检验,将不显著的自变量剔除;取显著性水平为 0.05,运用逐步回归法找到对 R_1 和 R_2 具有显著影响的变量,舍弃影响不显著变量,得到最优回归模型。

2.2 回归模型的显著性检验

本文采用决定系数 R^2 作为检验回归模型与样本值拟合优度的指标,其值为 0~1,当其越接近于 1 时,表示回归模型与样本拟合得越好。

显著性检验是对回归模型中因变量和自变量之间的线性关系的显著性进行的检验,采用假设检验的方法来检验回归参数的显著性。先作出原假设,即 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$;再作出备择假设 $H_1: \beta_i (i=1 \sim 5)$ 不全为 0。在显著性水平 α 为 0.05 时, p 值小于 0.05,所建立的回归模型统计量 $F \geq F_{\alpha}(k, N-k-1)$ 时,拒绝 H_0 ,认为回归模型显著成立;当 $F < F_{\alpha}(k, N-k-1)$ 时, p 值大于 0.05,接受 H_0 ,认为回归模型无显著。其中, k 为自变量个数,本文 $k=5$; N 为订单样本数; p 为原假设为真时所得到的样本观察结果或更极端结果出现的概率。在多元回归显著性检验,即 F 检验中,统计量 F 由回归平方和与残差平方和经过构造得到, $F_{\alpha}(k, N-k-1)$ 是统计量 F 的分布函数,由 k 和 $N-k-1$ 的值查 F 分布表得到 $F_{\alpha}(k, N-k-1)$ 。本文只利用显著性检验对模型因变量和自变量的线性相关性进行分析,其具体原理较为繁琐,本文不做展开。

3 计算结果分析

3.1 数据准备

本文采样的数据为滴滴出行平台提供的杭州市 2015 年 11 月的随机抽样数据,样本量为 727 341 个;北京市 2015 年 11 月到 2016 年 1 月的随机抽样数据,样本量为 361 452 个。数据包括车辆类型、订单编号、乘客编号、驾驶人编号、订单创建时间、接单时间、开始计费时间、订单结束时间、出发地经纬度、目的地经纬度、订单实际里程与费用等。

数据的剔除按照以下原则进行:出发地或目的地不在分析区域内的数据;不合法的数据,如实际里程小于 0,以及订单创建时间、接单时间、开始计费时间、订单结束时间不合理的数据;数值异常大或异常小的数据。

3.2 行程时间可靠性计算

利用滴滴出行平台的抽样数据,以杭州市和北京市为研究对象,对上述行程时间可靠性指标和高峰拥堵延迟指数进行相应计算,结果见表 2,可以发

现:杭州市行程时间可靠性指标 $N_1 \sim N_5$ 与高峰拥堵延迟指数 I 均大于北京市。

表 2 行程时间可靠性指标对比

Tab. 2 Comparison of travel time reliability indexes

指标	杭州市	北京市
$N_1/(\text{min} \cdot \text{km}^{-1})$	2.04	1.79
$N_2/(\text{min} \cdot \text{km}^{-1})$	3.06	2.70
$N_3/(\text{min} \cdot \text{km}^{-1})$	5.69	4.66
$N_4/(\text{min} \cdot \text{km}^{-1})$	2.62	1.97
N_5	0.86	0.72
I	1.80	1.61

进一步选取杭州市 2015 年 11 月 7 日至 30 日的网约车抽样数据,分别计算每日的 N_5 和 I ,得到图 1,可以看出:虽然 N_5 和 I 的实际含义不同,但两者具有相似的变化趋势;由行程时间可靠性定义可知,行程时间可靠性指标越大,单位距离所用的行程时间分布范围越大,城市的交通可靠性状况越差,这一点与高峰拥堵延迟指数所反映的交通状况趋势一致,即高峰拥堵延迟指数越大,城市的交通可靠性越差;行程时间可靠性指标虽然每日都有波动,但总体趋于平缓。根据实际情况,在一段时间内,城市每天的交通状况整体趋于稳定,部分时间和区域会因为随机因素而产生波动,图 1 曲线也大致吻合了现实情况,由此看出本文提出的行程时间可靠性指标具有一定现实适用性。

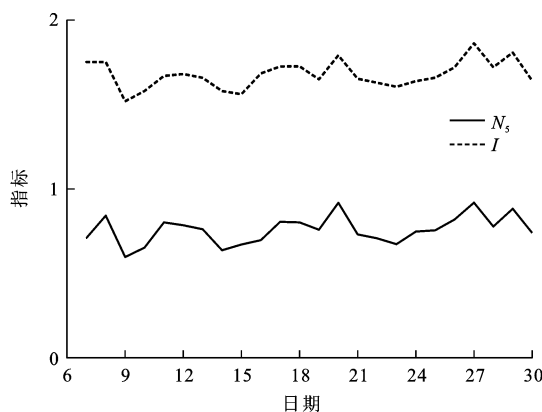


图 1 杭州市 N_5 和 I 对比

Fig. 1 Comparison of N_5 and I in Hangzhou

3.3 行程时间可靠性指标时间分布

为了探究行程时间可靠性随时间的变化规律,本文基于杭州市 2015 年 11 月的抽样数据,选取了 OD 对间样本数大于 10 的数据,计算得到 5:00~24:00 的交通网络行程时间可靠性指标随小时的波动情况,见图 2,可以看出:早晚高峰期间 4 个行程时间可靠性指标均偏高,以网络规划行程时间率 N_3

为例, N_3 早高峰为 $5.83 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$, 晚高峰为 $6.91 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$, 很好地表明了早晚高峰的特征, 其他 3 个指标也可以看出早晚波峰的特征。由定义可知, 行程时间可靠性指标越高, 表明区域内单位距离居民出行花费的时间越长, 交通状况越拥堵。由于行程时间可靠性指标是用于衡量交通可靠性的一种指标, 因此, 由图 2 也可以得出早晚高峰期间杭州的交通可靠性较差这一符合现实情况的结论。

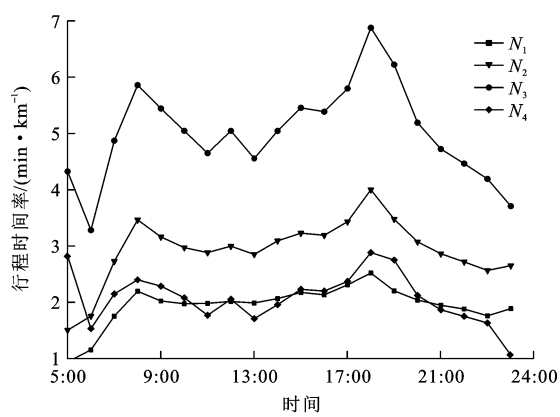


图 2 杭州市行程时间可靠性指标变化曲线
Fig. 2 Variation curves of travel time reliability indexes in Hangzhou

通过对比杭州市工作日和非工作日的行程时间可靠性指标见表 3, 可以看出: 行程时间可靠性并没有显著变化。由于现在城市发展的多元化, 大众职业多样化, 居民工作时间更具灵活性, 受到工作日和非工作日的影响减少, 所以在行程时间可靠性指标上并没有呈现出太大差异。

表 3 工作日与非工作日的行程时间可靠性指标对比
Tab. 3 Comparison of travel time reliability indexes between weekdays and weekends

指标	非工作日	工作日
$N_1/(\text{min} \cdot \text{km}^{-1})$	2.05	2.04
$N_2/(\text{min} \cdot \text{km}^{-1})$	3.07	3.06
$N_3/(\text{min} \cdot \text{km}^{-1})$	5.67	5.69
$N_4/(\text{min} \cdot \text{km}^{-1})$	2.60	2.63
N_5	0.85	0.86

3.4 行程时间可靠性指标空间分布

由于交通供需、经济发展和资源分布的不均衡性, 同一个城市不同区域的行程时间可靠性指标也具有差异性。本文以杭州市为研究对象, 将其划分为实际边长 1 km 的正方形区域块, 研究行程时间可靠性的空间分布情况, 见图 3。

基于杭州市 2015 年 11 月的抽样数据, 对于每个样本数大于 100 的区域, 选取以该区域为出发地

的乘客订单, 根据这些订单数据, 计算该区域到其他区域的行程时间可靠性, 再由区域间的乘客出行距离和以该区域为出发地的所有 OD 对行程时间可靠性指标做加权计算, 得到该区域交通可靠性指标。

3.4.1 区域自由流行程时间率的分布情况

在道路畅通情况下, 某一区域的自由流行程时间率分布为 $1.5 \sim 2.5 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$ 。具体而言, 杭州市下城区附近以及外围部分区域的自由流行程时间率大于 $2.5 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$, 交通可靠性较差; 相比于拱墅区、下城区、上城区、江干区、萧山区, 下沙和滨江区的交通可靠性略好。对图 3 中所有区域关于乘客行程距离进行区域自由流行程时间率加权, 得到杭州市网络自由流行程时间率为 $2 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$, 与图 3(a) 中大致符合。

3.4.2 区域平均行程时间率的分布情况

在正常交通状况下, 除了上城区和其他个别区域的平均行程时间率大于 $4 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$ 外, 拱墅区、下城区、江干区、萧山区的平均行程时间率为 $3 \sim 4 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$, 下沙和滨江区的平均行程时间率分布则为 $2 \sim 3 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

3.4.3 区域规划行程时间率的分布情况

从图 3(c) 中可以看出, 杭州市很多区域的规划行程时间率都大于 $6 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$, 交通可靠性比较差。在道路比较拥堵时, 为了保证能准时到达目的地, 出行者往往需要在行程上预留出更多时间。而杭州市 2015 年 11 月的网络规划行程时间率也达到了 $5.69 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$, 整体而言也是相对较高的。

3.4.4 区域缓冲行程时间率的分布情况

杭州市 2015 年 11 月的网络缓冲行程时间率达到了 $2.62 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$, 整体而言是相对较高的。除了下沙和滨江以外, 大部分地方的居民可能需要每公里路程额外预留至少 2 min 来保证及时到达目的地。

3.5 行程时间可靠性影响因素多元线性回归结果

为了保证数据样本的充分性和可靠性, 选取了网约车平台上 2015 年杭州市 11 月抽样数据中月行程总数大于 100 的 OD 对, 共计 763 个样本, 计算每个 OD 对之间的行程时间可靠性指标, 以及每个 OD 对之间用户的平均等待时间、平均费用、平均行程距离、平均行程时间与总的行程次数。

初步观察区域规划行程时间率 R_1 与区域平均行程时间率 R_2 和自变量的关系, 作出散点图 4、5, 可以看出: R_1 和 R_2 分别与打车等待时间、行程时间、出行距离、打车费用之间大致呈线性相关。

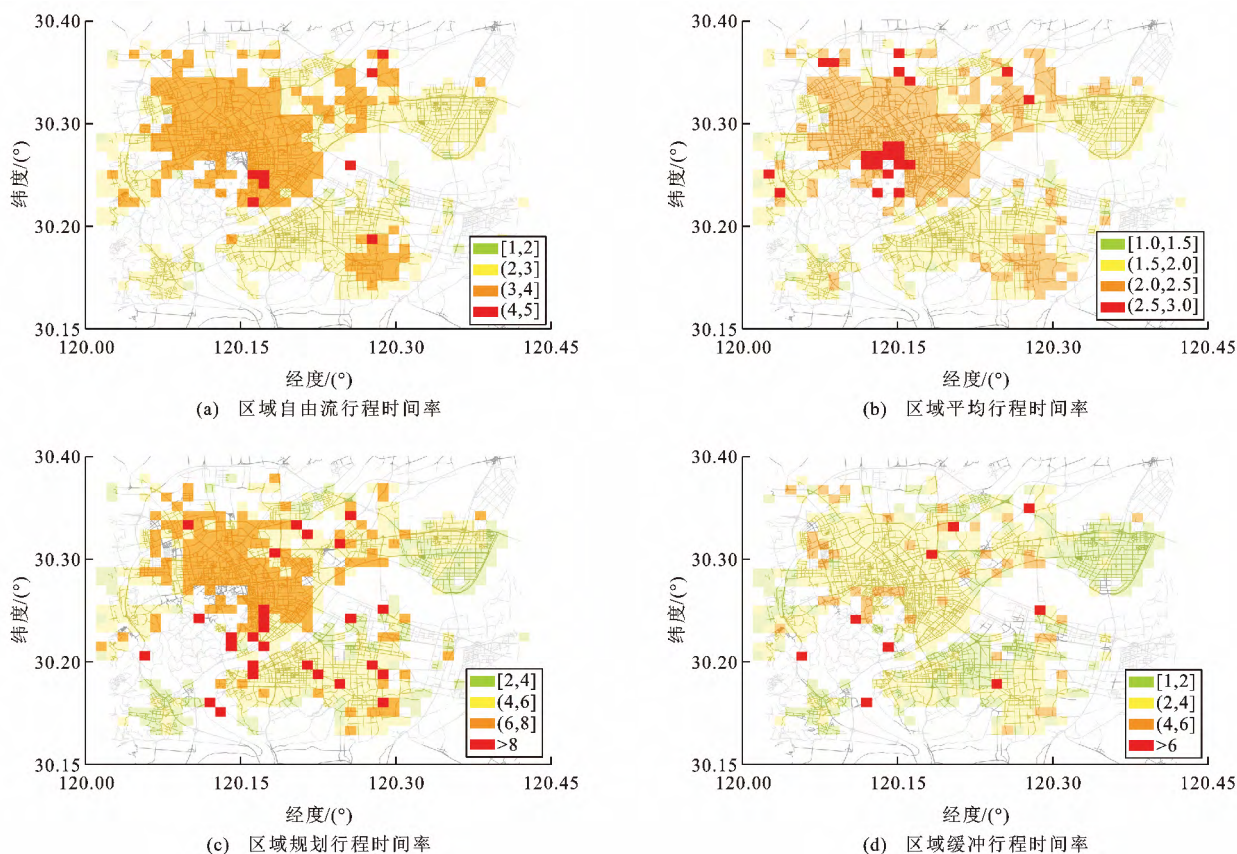


图 3 杭州市行程时间可靠性指标空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of travel time reliability indexes in Hangzhou

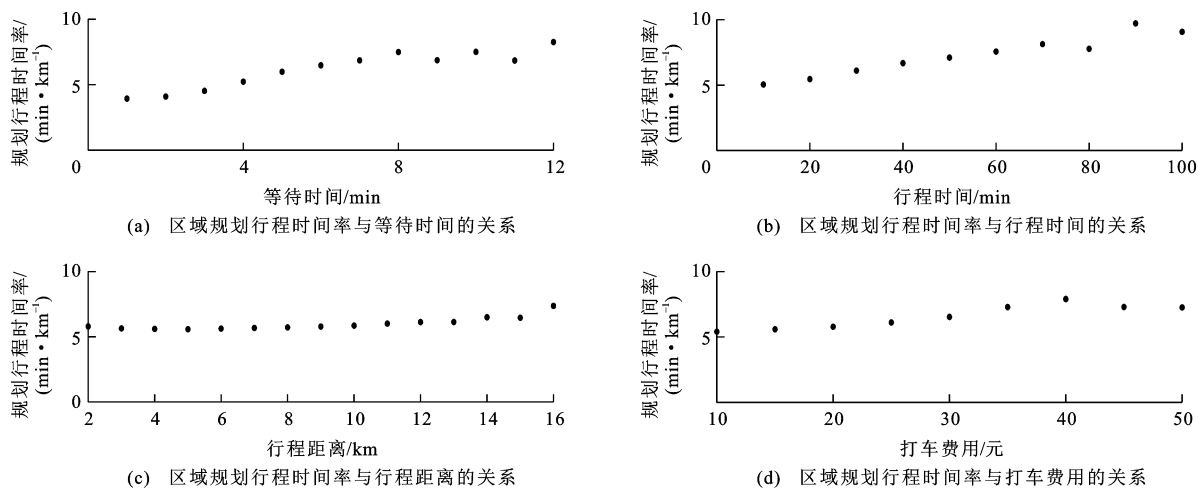


图 4 区域规划行程时间率与相关因素的关系

Fig. 4 Relationships between regional planning travel time rate and related factors

根据多元线性回归模型,用 MATLAB 逐步回归的 stepwise 命令计算后得到式(12)、(13)的模型,见表 4,可知:2 个回归模型的决定系数 R^2 都较高,分别为 0.772 和 0.857,模型拟合程度较好,由显著性分析,本例中自由度 $k=5$,样本数 $N=763$,显著性水平为 0.05, p 小于 0.05, $F \geq F_{\alpha}(k, N-k-1)$,回归模型显著。

回归模型显著成立,但是并不意味着每个解释变量对因变量的影响都是重要的,通过参数的显著性检验,发现费用与 OD 对之间的行程次数对于行程时间可靠性指标并没有显著性影响。用户的打车等待时间与行程时间和可靠性指标有正相关性,对于 R_1 的影响大于对于 R_2 的影响。打车等待时间与行程时间越长,区域道路的交通可靠性越差,需要规

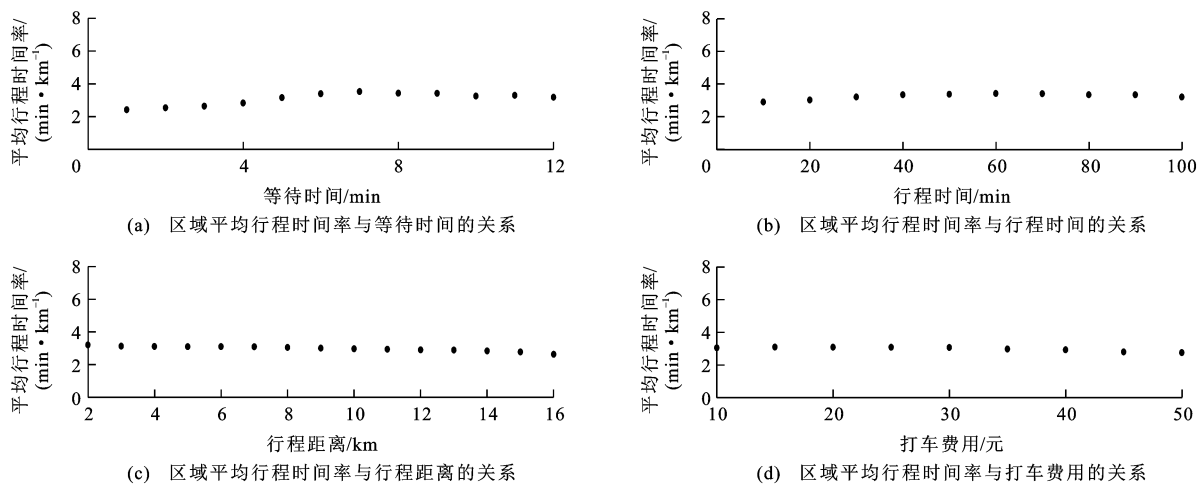


图 5 区域平均行程时间率与相关因素的关系

Fig. 5 Relationships between regional average travel time rate and related factors

表 4 多元线性回归模型参数

Tab. 4 Parameters of multiple linear regression model

R_1		R_2	
α_0	3.532	β_0	2.234
α_1	0.386	β_1	0.162
α_2	0.000	β_2	0.045
α_3	-1.286	β_3	-0.676
α_4	0.399	β_4	0.177
α_5	0.000	β_5	0.000
R^2	0.772	R^2	0.857
F	643.352	F	1 139.772
p	0.000	p	0.000

划的出行时间更多。

图 6 为区域规划行程时间率和行程距离的关系,可以看出:实际行程距离和可靠性指标呈负相关关系。为了排除行程时间因素的影响,对 763 个 OD 对样本点在给定的行程时间下,作出图 7 的散点图并进行拟合,可以看出:行程距离越长,规划行程时间率越小,交通可靠性越好。这可以理解为当行程时间一定时,出行者的行程距离越长,那么出行者可以经过交通可靠性更好的区域,总的行程时间可靠性指标降低,道路状况变好。也可以换个角度

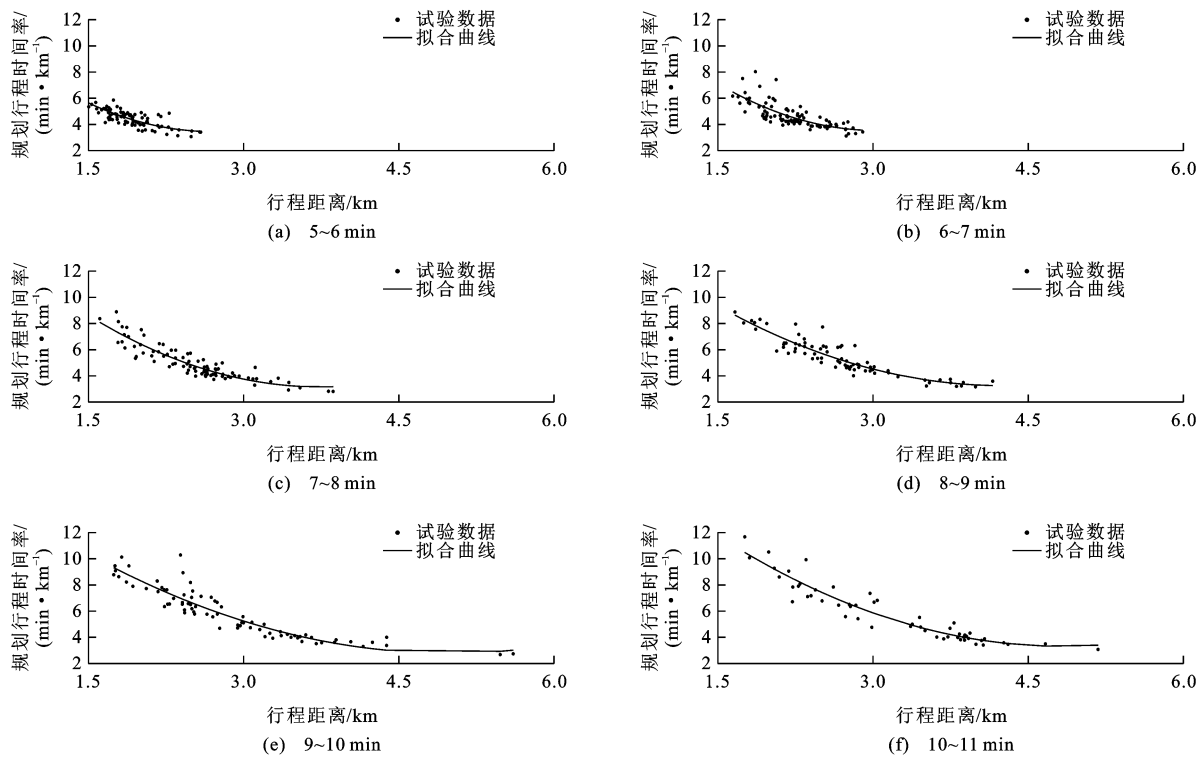


图 6 区域规划行程时间率和行程距离的关系

Fig. 6 Relationship between regional planning travel time rate and travel distance

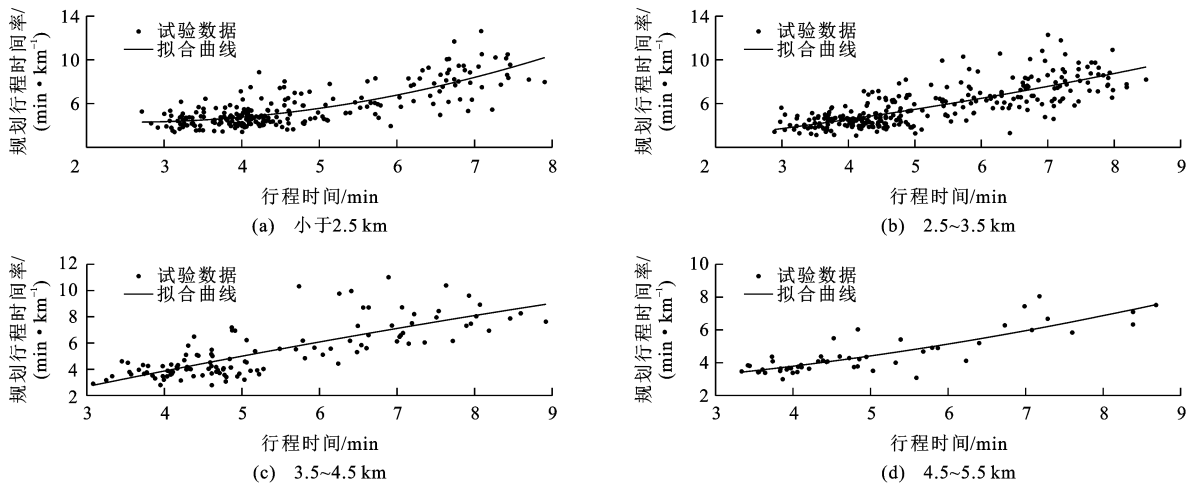


图 7 区域规划行程时间率和行程时间的关系

Fig. 7 Relationship between regional planning travel time rate and travel time

理解,在给定的行程距离下,行程时间越长,规划行程时间率越大,交通可靠性越差,这一点也可以由行程时间可靠性的定义得到。

4 行程时间可靠性意义

4.1 多角度反映交通可靠性特征

本文基于网约车数据,通过对其分析研究,从多角度反映交通可靠性。在给定时间内,根据区域之间的车辆行驶路程之和对区域的交通可靠性指标进行加权计算,避免了传统单一路径计算的不足,评价指标更加多元化,更加合理可靠。有助于探索城市交通流变化的规律,依据城市的特点有不同的区域划分方法,对不同城市的实际情况深入研究,进行特定的 OD 对划分,将有助于进一步完善交通可靠性指标的评价体系。通过对不同状态下城市交通运行状态的比较,使交通管理者更加正确的认识所面临的交通形势。

具体来说,分析行程时间可靠性随时间变化和空间变化情况,可以动态地反映一个城市的交通可靠性。其中,时间变化包括月变化、周变化、日变化、时变化等,空间变化上包括交通枢纽、旅游景点、重点商圈的变化情况。通过以上分析,可以多角度、多维度地对城市交通可靠性进行分析与评价,对于分析得到的可靠性差的时间段或者空间段,进行相应地改善,提高交通可靠性。

4.2 提供路网布局或规划决策支持

在现有路网资源条件下,利用行程时间可靠性分析城市路网,寻找路网的薄弱环节,并对这些单元进行改善,以达到提高整个路网性能的目的。在此基础上,准确地预测道路拥挤发生的可能性,从而解决交

通问题,确保未来路网具有可靠的可达性和畅通性。

本文通过选取杭州市 2015 年 11 月 OD 对行程数大于 50 的 OD 对,在这些 OD 对当中再随机抽取 100 个 OD 对样本,分别计算各个 OD 对的区域缓冲行程时间率指数,将城市路网的可靠性初步分级,如表 5 所示,分为 5 个等级。通过行程时间可靠性指标,可以帮助决策者从定量和定性角度更加合理地分析评估交通现状,对制定切实可行的改善方案或解决办法有指导作用。

表 5 城市行程时间可靠性等级

Tab. 5 Levels of urban travel time reliability

等级	1	2	3	4	5
区域缓冲行程时间率指数	<0.25	$(0.25, 0.50]$	$(0.50, 0.75]$	$(0.75, 1.00]$	>1.0
可靠性划分	非常可靠	基本可靠	轻度不可靠	中度不可靠	严重不可靠

4.3 保证出行者准时到达目的地

行程时间率及其他可靠性指标的概念可以帮助居民出行更好地规划出行时间。通过估计出发地和目的地的位置和距离,结合交通大数据平台提供的可靠性指标,居民可以定量地得到出行需要预留出的额外时间,以保证准时到达目的地。

例如根据图 3(d)区域的缓冲行程时间率的分布情况,居民可以根据出发地的缓冲行程时间率来规划出行。根据实例数据,在 2015 年 11 月,除了下沙和滨江以外,大部分地方出发的居民可能需要每公里路程额外预留 2 min 以上来保证及时到达目的地。与传统的行程规划时间不同,缓冲行程时间率是考虑了出行需要预留的额外时间,能更好地保证出行准时到达。未来的应用中,基于实时的行程

时间可靠性更新数据,可以定量地指导出行者规划自身的出行时间,帮助出行者有效利用时间。

4.4 其他应用领域

行程时间可靠性还可应用于交通信息系统、动态路线诱导以及停车诱导等系统中,以便为出行者提供更丰富的出行信息与更合理的交通流的时空分布,提高路网的服务水平^[21-26]。

5 结 语

(1)提出了衡量交通可靠性的网络行程时间可靠性指标,从行程时间可靠性时间和空间分布的角度进行探究,并将其与传统高峰拥堵延迟指数进行对比。基于网约车数据对行程时间可靠性影响因素进行了多元线性回归分析,以及行程距离和行程时间对行程时间可靠性指标的敏感性分析。分析结果表明行程时间可靠性指标和用户的打车等待时间与行程时间呈正相关,与实际行程距离呈负相关。

(2)提出了基于区域划分的行程时间可靠性表示方法,即网络行程时间可靠性指标,可以从多角度反映区域交通可靠性状况,避免了单一指标衡量交通可靠性的缺陷,为路网规划和布局提供决策支持,为居民出行路径选择提供依据;利用网约车平台数据,克服了传统数据采集困难的弊端,进行了网络行程时间可靠性指标的相关计算,新的指标较好地符合交通流的基本特征,能够很好地评价路网交通流的实际运行状态。

(3)本文的方法的不足之处是行程时间可靠性影响因素没选取道路上的交通量作为自变量:一方面是由于数据的限制,本文只有网约车的数据,而没有路网上所有车辆数据;另一方面是行程时间率在一定程度上可以反映道路的拥挤程度,行程时间率越小,表明道路的交通状况越好,因此,用行程时间率来反映交通量的影响。

(4)未来的研究工作主要包括区域合理划分标准、路网所有交通量的数据(流量、密度、速度等)对行程时间可靠性影响、交通流相关因素角度对行程时间可靠性的影响。

参考文献:

References:

- [1] SIU B W Y, LO H K. Doubly uncertain transportation network: degradable capacity and stochastic demand[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 191(1): 166-181.
- [2] WAKABAYASHI H, IIDA Y. Upper and lower bounds of

terminal reliability of road networks: an efficient method with Boolean algebra[J]. Journal of Natural Disaster Science, 1992, 14(1): 29-44.

- [3] ASAKURA Y, KASHIWADANI M. Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow[C]// TRB. 19th PTRC Summer Annual Meeting. Washington DC: TRB, 1991: 73-84.
- [4] CHEN A, YANG H, LO H K, et al. A capacity related reliability for transportation networks [J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 183-200.
- [5] CHEN A, YANG H, LO H K, et al. Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(3): 225-252.
- [6] LO H K. A reliability framework for traffic signal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 250-260.
- [7] 侯立文, 蒋 馥. 城市道路网络可靠性的研究[J]. 系统工程, 2000, 18(5): 44-48.
HOU Li-wen, JIANG Fu. Study on the reliability of urban road network[J]. Systems Engineering, 2000, 18(5): 44-48. (in Chinese)
- [8] CHEN A, TATINENI M, LEE D H, et al. Effect of route choice models on estimating network capacity reliability[J]. Transportation Research Record, 2000(1733): 63-70.
- [9] 熊志华, 姚智胜, 邵春福. 基于路段相关的路网行程时间可靠性[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(10): 81-84.
XIONG Zhi-hua, YAO Zhi-sheng, SHAO Chun-fu. Travel time reliability in road network associated with road section[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(10): 81-84. (in Chinese)
- [10] 熊志华. 道路网行程时间可靠性基础理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
XIONG Zhi-hua. Study on basic theory and method of travel time reliability of road network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [11] CHEN Kun, YU Lei, ZHAO Hui, et al. Simulation-based assessment of the effect of large-scale events on urban road network reliability[C]// ASCE. International Conference on Transportation Engineering 2007. Reston: ASCE, 2007: 388-393.
- [12] NICHOLSON A, DU Zhen-ping. Degradable transportation systems: an integrated equilibrium model[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1997, 31(3): 209-223.
- [13] 王殿海, 祁宏生, 徐 程. 交通可靠性研究综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 12-21.
WANG Dian-hai, QI Hong-sheng, XU Cheng. Reviewing traffic reliability research [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(5): 12-21. (in Chinese)
- [14] RICHARDSON A J, TAYLOR M A P. Travel time variability on commuter journeys[J]. High Speed Ground Transportation Journal, 1978, 12(1): 77-99.

- [15] MAHMASSANI H, HOU Tian, SABERI M. Connecting networkwide travel time reliability and the network fundamental diagram of traffic flow[J]. *Transportation Research Record*, 2013(2391): 80-91.
- [16] SHAO Hu, LAM W H K, TAM M L. A reliability-based stochastic traffic assignment model for network with multiple user classes under uncertainty in demand[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2006, 6(3/4): 173-204.
- [17] BELL M G H, CASSIR C. Risk-averse user equilibrium traffic assignment: an application of game theory[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002, 36(8): 671-681.
- [18] LO H K, LUO X W, SIU B W Y. Degradable transport network: travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006, 40(9): 792-806.
- [19] 邹志云, 宋新生, 宋 程. 城市道路网可靠性影响因素研究[J]. *物流技术*, 2009, 28(2): 1-2, 10.
ZOU Zhi-yun, SONG Xin-sheng, SONG Cheng. Study on influential factors of the reliability of urban road network[J]. *Logistics Technology*, 2009, 28(2): 1-2, 10. (in Chinese)
- [20] CHEN Xi-qun, LI Zhi-heng, LI Li, et al. A traffic breakdown model based on queueing theory[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2014, 14(3/4): 485-504.
- [21] CHEN Xi-qun, CHEN Xiao-wei, ZHENG Hong-yu, et al. Understanding network travel time reliability with on-demand ride service data[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2017, 4(4): 388-398.
- [22] CHEN X, ZAHIRI M, ZHANG S. Understanding ridesplitting behavior of on-demand ride services: an ensemble learning approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 76: 51-70.
- [23] KE Jin-tao, ZHENG Hong-yu, YANG Hai, et al. Short-term forecasting of passenger demand under on-demand ride services: a spatio-temporal deep learning approach [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 85: 591-608.
- [24] CHEN Xi-qun, ZHANG Lei, HE Xiang, et al. Simulation-based pricing optimization for improving network-wide travel time reliability[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2018, 14(1/2): 155-176.
- [25] CHEN Xi-qun, CHEN Chu-qiao, NI Ling-lin, et al. Spatial visitation prediction of on-demand ride services using the scaling law [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, 508: 84-94.
- [26] NI Ling-lin, WANG Xiao-kun, CHEN Xi-qun. A spatial econometric model for travel flow analysis and real-world applications with massive mobile phone data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 86: 510-526.