

基于智能路况信息下城市道路阻抗函数模型

张傲北,张 颖,刘艳秋

(沈阳工业大学 管理学院,沈阳 110870)

摘 要:为探讨车辆在城市道路上实际行驶时间,合理规划道路交通流,提出一种改进的城市道路阻抗函数模型。城市道路阻抗分为路段延误和交叉口延误,其中路段延误采用王素欣改进的道路阻抗函数模型对 SPIESS 路阻函数进行修正,利用城市道路交通流三参数速度、交通量、密度的关系推导出交通饱和度与交通密度的关系式。在交叉口节点延误中对 Webster 模型进行改进,并对整个道路阻抗函数模型进行相关道路影响因素(交叉口间距、行人自行车干扰、道路宽度)的修正,最后利用百度地图的智能实时路况查询服务来获取道路数据。通过对改进的城市道路阻抗函数模型得出的实验结果进行验证对比与独立样本 T 检验,结果表明改进的道路阻抗函数更贴近实际行驶时间,对路径规划和智能交通平台有参考意义。

关键词:城市交通;道路阻抗;交通流三参数;Webster 模型;交叉口延误;智能实时路况查询

中图分类号:U491 文献标识码:A 文章编号:1008-5696(2023)04-0020-07

Urban road impedance function model based on intelligent road condition information

ZHANG Aobei,ZHANG Ying, LIU Yanqiu

(School of Management,Shenyang University of Technology,Shenyang 110870,China)

Abstract:An improved urban road impedance function model is proposed to explore the actual driving time of vehicles on urban roads and reasonably plan the road traffic flow. The urban road impedance is divided into road section delay and intersection delay.Among them, the road section delay adopts the idea of improving the SPIESS road impedance function modified by Su-Xin Wang, and the relationship between traffic saturation and traffic density is derived by using the three parameters of urban road traffic flow: speed, traffic volume, and density. A simple improvement of the Webster model in the intersection node delay is carried out. Furthermore, the overall road resistance function model is improved by incorporating relevant road influence factors (intersection spacing, pedestrian and bicycle interference, and road width).Finally, the intelligent real-time road condition query service of Baidu Map is used to obtain road data. By validating the experimental results of the improved theoretical model with comparison and an independent sample t-test, it is shown that the improved road impedance function is closer to the actual driving time and has reference significance for path planning and an intelligent transportation platform.

Key words:urban traffic; road impedance; traffic flow triple parameter; Webster mode; intersection delay; intelligent real-time road condition query

近年来,城市交通拥堵问题已经引起了世界各国以及社会各界的广泛关注,随着机动车在城市道路上的占比逐年提升,如何合理分配道路交通流是城市交通规划的重点内容,也是众多学者研究的焦

点。在交通大数据研究中心发布的《2022 年第二季度中国城市交通报告》中显示,全国超七成城市通勤高峰拥堵指数较高、通勤耗时较长。在周末出行方面,过半城市周末出行需求呈增长趋势。为此结合我国城市交通情况,对道路阻抗进行分析,进一步获取与分配实时交通流是缓解交通拥堵状况与降低交通安全风险等目标的重要前提。

目前,大量的国内外学者开始围绕道路阻抗函数模型与实时交通问题展开研究,其中,早期研究主要偏重于道路阻抗计算方法的分析与改进。美

收稿日期:2022-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(70431003);辽宁省科学技术计划项目(2019JH1/10100028)

第一作者简介:张傲北(1997-),男,博士研究生,研究方向:复杂系统决策优化模型与算法研究

通信作者简介:张 颖(1964-),女,教授,博士,研究方向:物流管理与工程等。

国公路局通过对大量高速公路进行调查整理,进行回归分析得出道路阻抗函数模型,即 BPR 函数^[1](U. S. Bureau of Public Road)。由于此模型存在不足且适用性差,很多学者在此模型基础上进行分析与改进。Mori 等^[2]对 BPR 函数在阻抗影响参数取值过高时精度不能保证和当饱和度较低时行驶时间几乎不变的问题进行了改进。Zudhy^[3]针对 α 值的大小变化带来的精度问题进行了改进。Zhao 等^[4]提出了一个改进的混合交通道路的阻抗函数,在对基于分析和仿真结果的观测道路阻抗、经典的 BPR 函数和改进的道路阻抗函数进行比较和分析后,发现改进的道路阻抗函数在模拟观测道路阻抗方面更为准确,其误差从经典的 BPR 函数的 14.83 s 减少到改进函数的 6.50 s。Liang 等^[5]提出了一个基于速度的城市道路阻抗函数(SIF),并考虑了道路交叉口,将一条道路的行驶时间分为自由流驾驶部分和道路交叉口排队部分。Zhang 等^[6]提出了基于 BPR 函数的 ETT 和 TTB 模型,其中包含需求波动和容量退化。Hou 等^[7]分析出标准的 BPR 函数可能会在 PBR(部分阻塞道路)上给出不准确的旅行时间预测,这可能导致灾害后交通网络分析的结果不稳定,因此提出一种基于微观交通模拟预测城市地区 PBR 行程时间函数的方法。Mi 等^[8]为了在微观层面更准确地表达交通阻抗的变化规律,设计了一种基于道路阻抗函数的随机动态交通分配算法,分析不同路网饱和度条件中随机动态交通分配下拥堵道路的时间阻抗。Liu 等^[9]提出了一种混合交通阻抗模型,该模型通过熵权法归纳和组合交通阻抗的 3 个影响因素。在此基础上,设计了一种具有负载均衡策略的面向服务的协作路径规划机制。Ru 等^[10]通过现场试验,研究了在常规和模拟事故条件下,中国几个典型高速公路路段在各种交通条件下的行驶时间、交通量和速度。收集到的交通数据用于建立基于公共道路局(BPR)功能的高速公路基本路段在正常和事故条件下的行程时间模型,并获得模型参数。随着研究的深入,国内学者开始对城市道路阻抗模型进行探讨。温惠英等^[11]考虑了机动车与非机动车对道路阻抗的影响,提出利用行程时间波动性建立道路阻抗函数模型。虞春滨等^[12]考虑了感知行程时间、路段重要度和路段流量等因素,对道路阻抗函数进行改进。胡桂戎^[13]设计了一种道路交叉口的实时交通信号控制模型。研究发现,虽然对于改进城市道路阻抗函数模型的考虑因素更加全面,但对于道路交通信息获取的实时性仍待考量。

在大数据和智能交通的大背景下,有许多学者对交通数据进行研究,但主要聚焦于对高速公路交通信息进行采集^[14]、对实时交通流预测方法的研究^[15-17]以及对交通流饱和度与交通密度进行估计^[18-20],很少有对智能实时数据平台与交通流相结合的研究。

综上所述,已有的道路阻抗函数模型研究大多是在 BPR 函数模型上进行改进,适用性较差。而城市道路交通复杂且影响因素众多,现有模型考虑的影响因素大都比较片面,不能全面的反映城市道路交通阻抗。此外,目前还未有利用智能实时数据平台来获取道路阻抗函数模型有关数据的研究。针对城市混合交通的特点,综合考虑交叉路口、行人以及非机动车等影响因素构建适用性较强的道路阻抗函数模型,并对相关参数进行标定。通过百度地图的实时路况查询功能获取交通数据,通过与其他道路阻抗函数模型进行对比来验证文中改进的道路阻抗函数模型的适用性,为城市交通规划与管理的实际应用提供基础。

1 道路阻抗函数模型分析

1.1 路段延误函数和交叉口延误函数分析

BPR 函数模型是通过城市间的公路进行大量数据调查与回归得到的模型,没有把城市内的节点阻抗考虑在内。在城市交通中,车辆行驶到交叉口产生的延误,主要由信号灯或者避让行人等造成,且延误时间大约占平均出行时间的 20%~40%,在城市交通中影响较大,不可忽略^[21]。

1) 路段延误

BPR 函数是传统计算路段阻抗的函数模型,但存在一些不足,首先不能反映路段交通量大于该路段通行能力时道路阻抗的实际情况;其次当路段交通量 Q 较小,参数值 β 较大时会导致车辆行驶时间无限接近自由流时间,其表达式为

$$t = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{Q}{C} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

式中: t 为实际通行时间; t_0 为路段自由通行时间; Q 为路段上交通量; C 为路段通行能力; α 、 β 为待标定的参数,美国公路局推荐为 $\alpha=0.15$ 和 $\beta=4.0$ 。

BPR 函数仅适用于城市间公路交通阻抗时间的求解,未考虑城市内道路交通中信号灯与实际道路状况的影响。

2) 交叉口延误

车辆在交叉口处的延误主要由信号灯排队和避让行人、非机动车等造成。

下面对计算道路信号交叉口延误的 Webster 模型进行分析与修正。

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{c2+5x} \quad (2)$$

式中： d 为车辆的时间阻抗； c 为信号周期； x 为路段饱和度； λ 为绿信比； q 为到达交叉口的交通流量。

其中第一部分 $\frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}$ 是车辆到达交叉口停车或排队时产生的基本延迟项，第二部分 $\frac{x^2}{2q(1-x)}$ 是随机延迟项，第三部分 $0.65 \left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{c2+5x}$ 是随机延迟项的修正项。

Webster 后来研究发现第三部分在整个模型的比重较小，故可对公式简化为

$$d = \frac{9}{10} \left[\frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right] \quad (3)$$

Webster 模型是计算交叉口延误具有代表性的模型，但在城市交叉口一般不只是有直行，还包括右转、左转等一共 3 个车辆流向，这是该模型忽略的延误类别。在普遍情况下，3 个延误类别的延误大小：右转 < 直行 < 左转。

理论上交叉口信号灯解决了交叉口复杂的车流冲突点问题，但在实际交通中，车辆主驾驶员在交叉口行驶时心理上仍然会有所顾忌，驾驶员行驶时在心理上对交叉口冲突点的潜在担忧称为隐性冲突点。大量数据表明，车辆行驶在交叉口时，驾驶员会下意识降低车速直至安全驶过交叉路口。由驾驶员心理上的因素造成的时间延误称为心理延误。

用排队理论来对心理延误项进行分析，首先车辆从交叉口的停车线到隐性冲突点的到达率为 q' ，车辆驾驶员对隐性冲突点的反应时间为 t' ，也就是驶出该隐性冲突点的输出率为 $1/t'$ ，记为 θ 。因此在停车线与隐性冲突点之间就有一个 M/D/1 的排队系统，故在此系统中车辆的心理延误为：

$$d_1 = \frac{q'}{2\theta(\theta - q')} \quad (4)$$

在前面提到延误大小：左转 > 直行 > 右转，实际为生活中车辆右转不路过隐性冲突点，故没有心理延误项，而左转和直行受实际心理反应强度系数 θ 影响。由相关数据可知，驾驶员直行时平均反应时间为 0.5~1 s，左转时平均反应时间为 1~1.5 s。

因此，研究的交叉口延误模型为

$$d = \frac{9}{10} \left[\frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right] + \frac{q'}{2\theta(\theta - q')} \quad (5)$$

1.2 改进的道路阻抗函数具备的性质

为保持与 BPR 函数模型的兼容，已知的道路阻抗函数都应当具有如下性质 1)~4)，由于 BPR 函数自身存在缺陷，故给文中的模型增加 5)、6) 两个性质，用来验证模型的完备性。

1) 随交通密度的增加，改进的道路阻抗函数 $f(x)$ 应当是严格单调递增的，这样可以反映道路拥挤的实际情况，在数学描述上不会出现自我矛盾现象。

2) 改进的道路阻抗函数曲线通过 $(0, t_0)$ 点，即 $f(0) = t_0$ 。

3) $f(\alpha^{-\frac{1}{\beta}}) = 2t_0$ ，在改进的函数中取特定点 $\alpha^{-\frac{1}{\beta}}$ 满足等式，是因为在 BPR 公式中满足此等式，即当路段交通量与通行能力之比为 $\alpha^{-\frac{1}{\beta}}$ 时，车辆在路段上的速度刚好为自由流速度的一半，取这特定点是为了改进的道路阻抗函数更好地与 BPR 函数兼容。

4) $d^2(f(x))/dx^2 > 0$ ，对交通流与通行能力之比进行二阶偏导大于零，即与 BPR 函数相同，道路阻抗时间为关于 x 的凸函数。

5) $d(f(x))/dx < M\beta$ ，其中 β 为待标定参数， M 是一个正的常数，此不等式可以确保当 $x > 1$ 时且 β 值较大时，交通流的变动不会导致车辆行驶时间变化幅度太大。

6) $d(f(x))/dx |_{x=0} > 0$ ，确保改进道路阻抗函数中 x 值较小时，道路阻抗函数的函数图像也具有斜率。

2 城市道路阻抗函数模型的建立

2.1 改进道路阻抗函数的形式

城市道路阻抗函数公式可表示为

$$Z = Z_1 + Z_2 \quad (6)$$

式中： Z 为城市道路阻抗； Z_1 为路段阻抗； Z_2 为交叉口阻抗。

1) Z_1 的确定

Z_1 为不考虑交叉口等因素影响的路段行驶时间，行驶特征和在基本无干扰的公路上行驶相似，因此路段行驶时间阻抗函数是基于 BPR 函数进行改进。在 BPR 函数模型中，无法反映路段随着交通流密度的增大，交通流量先增加再减少的事实，即道路交通由畅通到拥挤的情况。为了解决这一问题，使交通流不受通行能力的限制，可以采用文献

[22]对 BPR 函数的改进思想。其中一种改进方法是随着拥挤程度的增加,将交通减小量与路段通行能力相加的结果作为交通量用于 BPR 函数,使得到的路阻值能够反映实际路况;另一种改进方法是用交通量和密度的关系式替换 BPR 函数的交通量,并根据前一种改进方法的思想对新得到的函数进行再改进,获得一个单调递增函数,这样可以不受路段通行能力限制,从而反映交通路况所对应的道路阻抗^[22]。

为了使道路阻抗函数模型不受通行能力的限制,利用城市道路交通流三参数(速度、交通量、密度)的关系进行推导,随着拥挤程度增加,密度增加,速度减小,道路阻抗增加,从而路段行驶时间增加,即通过用密度来替换交通量的变化从而反映出实际道路交通阻抗变化。

交通量与速度、密度之间的线性表达式为

$$Q = VK \tag{7}$$

从 Greenshield 模型中可知速度和密度之间的线性关系表达式为

$$V = V_f \left(1 - \frac{K}{K_j}\right) \tag{8}$$

式中: V 为行驶平均速度; V_f 为路段畅通时自由流速度; K 为车流密度; K_j 为车速为 0 时道路阻塞密度。

将式(8)代入式(7)得

$$Q = V_f K - \frac{V_f}{K_j} K^2 \tag{9}$$

令 $\frac{dQ}{dK} = 0$, 当 $V = 0.5V_f, K = 0.5K_j$ 时, Q 有最大值为 $0.25V_f K_j$, 即为路段通行能力 $C = 0.25V_f K_j$ 。

将式(9)及 $C = 0.25V_f K_j$ 代入式(1)得到

$$t = t_0 \left\{ 1 + \alpha \left[1 - \left(1 - \frac{K}{K_j}\right)^2 \right]^\beta \right\} \tag{10}$$

$$K \in [0, 2K_j]$$

由上可知,饱和度 Q/C 用密度公式进行替换,

令 $x = \frac{Q}{C}$, 即

$$x = 1 - \left(1 - \frac{K}{K_j}\right)^2 \tag{11}$$

路段阻抗函数的改进原型是由 SPIESS 提出的道路阻抗函数模型,即

$$f(x) = t_0 \left[2 + \sqrt{\beta^2 (1-x)^2 + \gamma^2} - \beta(1-x) - \gamma \right] \tag{12}$$

式中: $\gamma = (2\beta - 1)/(2\beta - 2), \alpha > 0, \beta > 1$ 。由于此模型不满足上面提出的性质 3, 参数 α 的影响也没有

考虑进去,因此对此模型进行改进如下:

$$f(x) = t_0 \left[2 + \sqrt{\beta^2 (1-x)^2 + \gamma^2} - \beta \left(1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}} x\right) - \gamma \right] \tag{13}$$

其中饱和度 $x = 1 - \left(1 - \frac{K}{K_j}\right)^2$ 。

2) Z_2 的确定

Z_2 为交叉口阻抗函数,函数模型为在 1.1 节对 Webster 函数进行简化并添加心理延误项,改进的公式为

$$Z_2 = \frac{9}{10} \left[\frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2Q(1-x)} \right] + \frac{Q'}{2\theta(\theta - Q')} \tag{14}$$

2.2 道路阻抗函数模型的修正

在城市道路行驶中,车辆的速度大小受众多因素影响。通过速度-密度的关系可知,当车辆速度为 0 时的道路的阻塞密度 K_j 的大小也受到众多因素影响。其中,除了前面提到的路过交叉口时驾驶员的心理因素之外,还要考虑城市道路基础情况的影响。

$$K_j = \frac{n}{h + h_1} \tag{15}$$

式中: n 为单向机动车车道的数量; h 为车辆的平均长度; h_1 为道路阻塞时平均车间距,综合考虑各种车型,文中统一取 $h_1 = 1.5 \text{ m}$ 。

因此对路段阻塞密度进行行人干扰、自行车影响、车道宽度影响、交叉口影响修正后可得到

$$K_j = \frac{r_1 r_2 r_3 r_4 n}{h + h_1} \tag{16}$$

式中: r_1 为自行车影响修正系数; r_2 为行人干扰修正系数; r_3 为交叉口影响修正系数; r_4 为车道宽度影响修正系数。

修正系数的计算方法分析与确定如下:

1) 自行车影响修正系数的确定

自行车的行驶对机动车的影响分为三种情况:

第一种是道路上有隔离带,取 $r_1 = 1.0$ 。第二种是在无隔离带的情况下非机动车道上未达到饱和状态,对机动车干扰较小,建议取 $r_1 = 0.8$ ^[23]。第三种是在有隔离带的情况选非机动车道超饱和状态,此时自行车会有侵占机动车道的可能,对机动车辆行驶造成很大干扰,此时影响系数为:

$$r_1 = 0.8 - \left(\frac{Q_n}{[Q_n]} + 0.5 - W_2 \right) / W_1 \tag{17}$$

式中: Q_n 为非机动车道交通量,辆·h⁻¹; $[Q_n]$ 为每米宽非机动车道的实际通行能力,辆·h⁻¹,可取 800~1 000 辆·h⁻¹; W_1 为单向机动车道道路宽度, m; W_2 为单向非机动车道道路宽度, m。

2) 行人干扰修正系数的确定

采取定量与定性相结合的方法,根据道路周围环境与区域特征对干扰程度系数进行确定。下表为建议的行人干扰修正系数值。

3) 交叉口影响修正系数的确定

表 1 行人干扰修正系数建议值

干扰程度	很严重	严重	较严重	一般	很小	无
r_2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

由于交叉口的存在,城市交通流为间断流,交叉口控制方式及交叉口间距决定了交叉口影响系数的取值。当交叉口间距由 200 m 增加到 800 m 时,车辆行驶速度与道路通行能力增幅较大且可拟合为线性关系。采用下式计算交叉口影响修正系数值。

$$r_3 = \begin{cases} S_0 & L \leq 200 \\ S_0(0.0013L + 0.73) & 200 < L < 800 \end{cases} \quad (18)$$

式中: S_0 为交叉口绿信比,当 $S_0 > 1$ 时, S_0 取 1; L 为相邻交叉口间距, m。

4) 车道宽度影响修正系数的确定

车道宽度对车速、路段通行能力和路段阻塞密度等都有较大影响,由《城市道路设计规范》中可知我国城市标准车道宽度为 3.5 m。车道宽度影响修正系数的计算公式为

$$r_4 = \begin{cases} 0.5(W - 1.5) & W \leq 3.5 \\ -0.54 + \frac{1.88W}{3} - \frac{0.16W^2}{3} & W > 3.5 \end{cases} \quad (19)$$

式中: W 为机动车车道宽度, m。

2.3 城市道路阻抗函数模型

城市道路阻抗模型为关于车流密度 K 的函数,表达式为:

$$Z = Z_1 + Z_2 = t_0 [2 + \sqrt{\beta^2 (1-x)^2 + \gamma^2} - \beta(1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x) - \gamma] + \frac{9}{10} \left[\frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2Q(1-x)} \right] + \frac{Q'}{2\theta(\theta - Q')} \quad (20)$$

式中: $x = 4 \left(\frac{KK_j - K^2}{K_j^2} \right)$, $K_j = \frac{r_1 r_2 r_3 r_4 n}{h + h_1}$, 即

$$x = 4 \left[\frac{K(h_1 + h)}{r_1 r_2 r_3 r_4 n} - K^2 \right] \left[\frac{r_1 r_2 r_3 r_4 n}{K(h_1 + h)} \right]^2 \quad (21)$$

2.4 改进道路阻抗函数的性质证明

下面对改进的路段延误函数进行性质证明,依次证明该路段延误函数具有 1.2 节中提到的 6 个性质。

$$1) \frac{df(x)}{dx} = t_0 \beta \alpha^{\frac{1}{\beta}} \left[1 - \frac{\beta(1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)}{\sqrt{\beta^2 (1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)^2 + \gamma^2}} \right].$$

显然, $\frac{\beta(1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)}{\sqrt{\beta^2 (1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)^2 + \gamma^2}} < 1$, 由于给出条件中 $\beta > 0$, $\alpha^{\frac{1}{\beta}} > 0$ 和 $t_0 > 0$, 因此 $\frac{df(x)}{dx} > 0$, 故性质 1 是一个严格的单调递增函数得以证明。

2) 可推导 $f(x) = t_0 (2 + \sqrt{\beta^2 + \gamma^2} - \beta - \gamma)$ 。

由 $\gamma = (2\beta - 1) / (2\beta - 2) \Rightarrow 2\beta\gamma - 2\beta - 2\gamma + 1 = 0 \Rightarrow \beta^2 + \gamma^2 + 2\beta\gamma - 2\beta - 2\gamma + 1 = \beta^2 + \gamma^2 \Rightarrow (\beta + \gamma - 1)^2 = \beta^2 + \gamma^2$, 又知 $\beta + \gamma - 1 > 0$, 故可得出 $f(0) = t_0$, 性质 2 得证。

3) 在上面对路段阻抗函数 Z_1 进行修正时, 针对性质 3 进行了简单改进, 故将 $x = \alpha^{-\frac{1}{\beta}}$ 代入函数公式容易得到 $f(\alpha^{-\frac{1}{\beta}}) = 2t_0$ 。

4) 证明函数的凸性。 $\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = \frac{t_0 \beta \alpha^{\frac{2}{\beta}} [\beta^2 (1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)^2 + \gamma^2] - t_0 \beta^4 \alpha^{\frac{2}{\beta}} (1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)^2}{[\beta^2 (1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)^2 + \gamma^2]^{\frac{3}{2}}} = \frac{t_0 \alpha^{\frac{2}{\beta}} \beta^2 \gamma^2}{[\beta^2 (1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)^2 + \gamma^2]^{\frac{3}{2}}} > 0$, 故性质 4 得证。

5) 易知 $\frac{\beta(1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)}{\sqrt{\beta^2 (1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)^2 + \gamma^2}} \in (-1, 1)$, 则可得

$$\frac{df(x)}{dx} = t_0 \beta \alpha^{\frac{1}{\beta}} \left[1 - \frac{\beta(1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)}{\sqrt{\beta^2 (1 - \alpha^{\frac{1}{\beta}}x)^2 + \gamma^2}} \right] < 2t_0 \alpha^{\frac{1}{\beta}} \beta.$$

令 $M = 2t_0 \alpha^{\frac{1}{\beta}}$, 得 $df(x)/dx < M\beta$, 性质 5 得证。

6) $\frac{df(x)}{dx} \Big|_{x=0} = t_0 \beta \alpha^{\frac{1}{\beta}} \left(1 - \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}} \right) > 0$, 性质 6 得证。

3 实例验证

3.1 数据采集

通过百度地图开放平台实时路况查询服务 (Traffic API) 来获取沈阳工业大学到地铁口之间路段的数据, 车辆行驶路径如图 1 所示。

Traffic API 有以下优势:

1) 路况更新频率为 1 min, 确保获得的是最新的实时路况数据。

2) 既支持对路况进行整体评价, 也支持对具体拥堵路段的详细评价。

3) 描述路段拥堵趋势 (较 10 min 前拥堵加重、持平或缓解)。

4) 路网覆盖率高, 支持全部百度地图道路路况。



图 1 车辆行驶路径

如图 2 和图 3,在早高峰 6:00~10:30 和晚高峰 17:00~21:00 的交通密度 K 和饱和度 x 的曲线趋势图中可以看出,交通密度随着饱和度增高而增高、降低而降低。

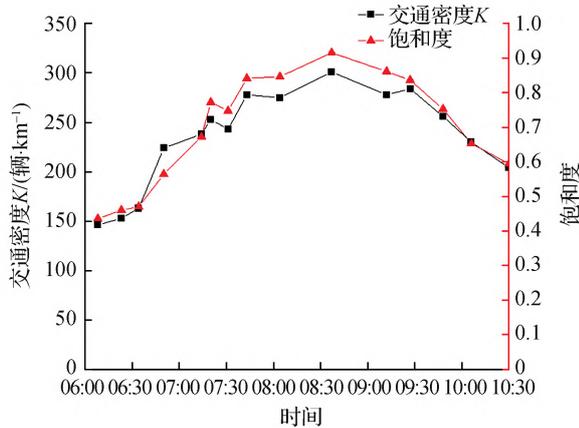


图 2 早高峰饱和度、交通密度变化

根据 2.2 节中关于各影响因素修正系数的计算公式,对路段数据进行分析,其中各参数值如表 2 所示,车辆在交叉口行驶时心理延误项的左转延误时间取 1.5 s,直行取 1 s,右转延误较小,忽略不计。

表 2 公式中相关参数值

参数	参数值	参数	参数值
r_1	1	n	4
r_2	0.8	L_1/m	1.5
r_3	0.525	L/m	4.5
r_4	2.14	α/β	0.15/4.0

3.2 模型对比与应用

按照上节参数值和对路段 6:00、10:00、14:00、

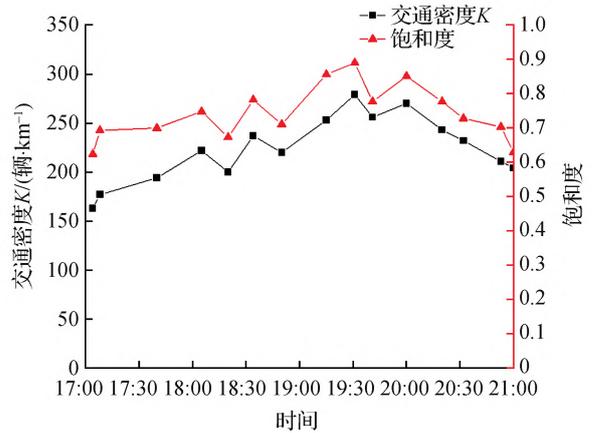


图 3 晚高峰饱和度、交通密度变化

18:00、20:00 的道路交通密度数据(见表 3)分别使用 BPR 阻抗函数模型、王素欣改进道路阻抗函数公式和文中改进的道路阻抗函数模型计算总行驶时间,结果如表 4 所示。并进一步将 3 个道路阻抗函数与实际行驶时间进行对比和验证。对比如图 4 所示,可以看出 BPR 函数计算的整个行驶时间明显低于实际值,主要因为 BPR 阻抗函数的原理是不考虑道路节点阻抗的。使用王素欣改进的道路阻抗函数模型计算得到的行驶时间偏高于实际值。本文改进的道路阻抗函数模型的计算结果与实际行驶时间较为接近,明显优于其他道路阻抗函数。

表 3 路段对应时间下的交通密度与饱和度

时间	交通密度/(辆·km ⁻¹)	饱和度
06:00	145.11	0.42
10:00	229.91	0.63
14:00	201.34	0.51
18:00	227.31	0.74
20:00	231.10	0.62

表 4 模型计算行驶时间对比 min

时间	实际	本文改进模型	王素欣改进模型	BPR 模型
06:00	8.32	8.40	8.16	4.70
10:00	9.92	9.52	11.68	5.12
14:00	8.80	9.20	10.88	4.96
18:00	9.76	9.60	11.36	5.60
20:00	8.16	8.00	8.64	4.72

为进一步验证理论模型计算结果的效果优良,取 20 组实际行程时间与文中模型计算行程时间的数据,利用 SPSS 25 软件对其进行独立样本 T 检验。T 检验用于比较两个总体均值是否存在显著性差异,首先从表 5 数值基本统计量的均值中可以看

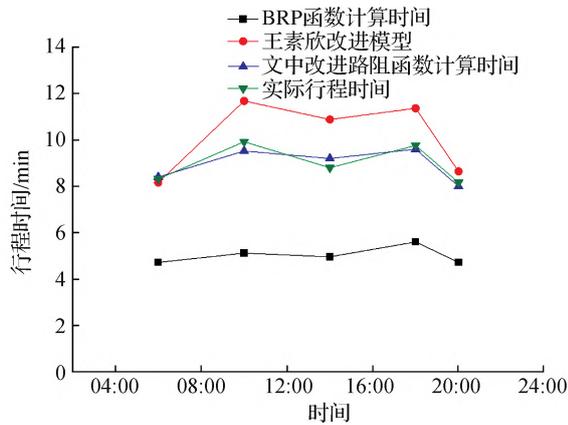


图 4 行程时间对比

出行程时间相差无几,主要看表 6 独立样本检验的结果,从第一行中 $F=0.096$,显著性指标 $Sig.=0.759 > 0.05$,则表示方差齐性检验,即两组数据没有显著差异,接下来看 T 检验结果中假定等方差这一行的数据,其中 $P=0.160 > 0.05$,表明行程时间结果无明显差异。因此验证了文中改进路阻模型的可行性。

表 5 分组统计量列表

行程 个案	平均值	标准偏差	标准误差
时间 数			平均值
文中模型计算结果	20 9.092 090 395	0.358 090 394 2	0.080 071 446 3
实际行程时间	20 9.255 819 209	0.364 651 776 6	0.081 538 616 1

表 6 独立样本的检验结果

行程 时间	莱文方差等同性检验		t	自由度	Sig. (双尾)
	F	显著性			
假定等方差	0.096	0.759	-1.433	38.000	0.160
不假定等方差			-1.433	37.987	0.160

由上面实验对比可知,模型计算时间与实际行驶时间较为符合,比其他路阻函数更适合城市道路情况。该模型可应用于以下情况:

- 1)在百度地图的路线规划与智能调度功能中计算实际道路通行时间,该模型可供参考。
- 2)无人车在物流配送领域的实时通信与路径选择。
- 3)为城市交通部门在道路阻抗模型理论研究方面提供新思路。

4 结 论

1)文中将相关城市交叉口延误模型进行研究修正,考虑了大部分城市道路延误影响因素,构建

改进的城市道路阻抗函数模型,并利用百度地图的智能实时路况系统获取相关交通数据,进一步增加道路阻抗函数模型计算行程时间的精准度。

2)通过与其他现有道路阻抗模型进行对比,表明了文中改进的城市道路阻抗函数模型计算的车辆行驶时间更接近实际行驶时间。

3)通过文中模型计算数据与实际数据进行的独立样本 T 检验,进一步验证了模型的精确性与可行性。

4)文中主要针对城市主干路影响因素对道路阻抗模型进行改进,其他等级的城市道路阻抗函数会受到更多随机因素的干扰,包括出入口增多,支路的路边停车等模型。因此未来将对其他等级道路路阻函数模型进行深入研究。

参 考 文 献:

- [1] ROADS U S B O P. Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer [M]. US Department of Commerce, Bureau of Public Roads, Office of Planning, 1964.
- [2] MORI U, MENDIBURU A, ALVAREZ M, et al. A review of travel time estimation and forecasting for advanced traveler information systems [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015, 11(2): 119-157.
- [3] ZUDHY M. Implementation of the 1997 Indonesian highway capacity manual (MKJI) volume delay function [J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2010, 8(1): 46-69.
- [4] ZHAO F, FU L, ZHONG M, et al. Development and validation of improved impedance functions for roads with mixed traffic using taxi GPS trajectory data and simulation [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 54(2): 1-12.
- [5] LIANG L, YANG Y, WANG H, et al. Traffic impedance estimation driven by trajectories for urban roads [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Vision, Image and Signal Processing, 2019: 1-7.
- [6] ZHANG J, LIU M, ZHOU B. Analytical model for travel time-based BPR function with demand fluctuation and capacity degradation [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 1-14.
- [7] HOU G, CHEN S, BAO Y. Development of travel time functions for disrupted urban arterials with microscopic traffic simulation [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 593: 126961-126976.
- [8] MI J, BAI Y, LUO M, et al. Microscopic estimation of road impedance by decomposing traffic delay into individual road segments: an analytical approach [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019(6): 1-11.

(下转第 35 页)

- [12] CAO J, HAN H, JIANG Y P, et al. Emergency rescue vehicle dispatch planning using a hybrid algorithm[J]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2018, 17(6): 1865-1890.
- [13] ZHANG J, LIU H, YU G, et al. A three-stage and multi-objective stochastic programming model to improve the sustainable rescue ability by considering secondary disasters in emergency logistics[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 135(9): 1145-1154.
- [14] CHIU Y C, ZHENG H. Real-time mobilization decisions for multi-priority emergency response resources and evacuation groups; model formulation and solution [J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2007, 43(6): 710-736.
- [15] TZENG G H, CHENG H J, HUANG T D. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems[J]. Transportation Research Part E, 2007, 43(6): 673-686.
- [16] ZHU L, GONG Y M, XU Y S, et al. Emergency relief routing models for injured victims considering equit and priority[J]. Annals of Operations Research, 2019, 283(1): 1573-1606.
- [17] LI J, XIONG Y Y, JIANG B. Distribution fairness in emergency material vehicle scheduling based on uncertain time and demand [J]. Journal of Uncertain Systems, 2021, 14(2): 2150014.
- [18] 白东.疫情背景下应急医疗物资分配及车辆路径规划研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [19] 王红伟.我国突发公共卫生事件应急管理体系建设研究[J].卫生经济研究,2021,38(9):41-44.
- [20] WANG Y M, YANG J B, XU D L, et al. The evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis using interval belief degrees [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175 (1): 35-66.
- [21] WANG Y M, YANG J B, XU D L. Environment impact assessment using the evidential reasoning approach [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(3): 1885-1913.
- [22] XUE Y, ZHAO Y. Structure and weights search for classification with feature selection based on brain storm optimization algorithm[J]. Applied Intelligence, 2022, 52(5): 5857-5866.
- [23] 狄卫民,杜慧莉,张鹏阁.考虑动态拥堵的多车型绿色车辆路径问题优化[J].计算机工程与设计,2021,42(9):2614-2620.
- [24] 刘娜,张玺,石超峰.疫情期间社区商超物资配送路径优化研究[J].交通科技与经济,2020,22(5):39-44.

[责任编辑:林新宇]

(上接第 26 页)

- [9] LIU Y, ZHANG K, HOU B, et al. Real-time traffic impedance and priority based cooperative path planning mechanism for SOC-ITS: efficiency and equilibrium[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 21(5): 102683-102697.
- [10] RU H, XU J, DUAN Z, et al. Modelling travel time after incidents on freeway segments in china[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 162465-162475.
- [11] 温惠英,卢德佑,汤左淦.考虑行程时间波动性的城市道路阻抗函数模型 [J].公路工程.2019,44(3):27-32.
- [12] 虞春滨,杜牧青,刘海生.基于模糊感知阻抗的交通分配研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019,43(3):548-553.
- [13] 胡桂戎.城市道路交叉口的实时交通信号控制研究[J].自动化技术与应用,2020,39(2):5-8.
- [14] 张成,颜银慧,刘咏平.基于 5.8G 路径识别系统的路网信息采集与应用[J].中国新技术新产品,2019,(22): 12-16.
- [15] 付理想,陈嘉祺,张鑫.基于 AI 人工智能的道路监控监测系统的设计[J].洛阳理工学院学报(自然科学版), 2022,32(1):47-52.
- [16] 章茂庭,杨楠,蒋顺英,等.基于 Spark 框架的实时交通流量预测方法 [J].现代信息科技, 2020,4(4):1-8.
- [17] 陈孟,干可,李凯,等.基于实时多模态时空数据的时空图卷积网络精准鲁棒交通流预测模型[J].公路交通科技,2021,38(8):134-139,158.
- [18] 姚荣涵,王荣贇,张文松,等.基于生成对抗网络的交通流参数实时估计模型[J].交通运输系统工程与信息, 2022,22(3):1-12.
- [19] 王殿海,郭佳林,蔡正义.基于自动车牌识别数据的混合交通流饱和和流率实时估计[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(2):37-43.
- [20] 陈志华.基于移动网络信令的交通信息估计方法[J].中国新通信,2021,23(19):32-35.
- [21] HE N, ZHAO S. Discussion on influencing factors of free-flow travel time in road traffic impedance function [J].Procedia-Social and Behavioral Sciences,2013(96): 90-97.
- [22] 王素欣,王雷震,高利,等.BPR 路阻函数的改进研究 [J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2009,33(3):446-449.
- [23] 王炜.城市交通网络规划理论与方法研究[D].南京:东南大学,1989.

[责任编辑:林新宇]