

基于实时路况地图的短期养护 作业开始时间优化

许哲谱¹, 杨 群²

(1. 上海应用技术大学 轨道交通学院, 上海 201418; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘 要: 首先, 提出了一种基于实时路况地图的实时路况数据采集方法; 然后, 提出可以将实时路况转换成实时交通量的方法, 基于此实时交通量数据和经典的基于排队论的延误计算参数法, 可计算不同养护作业开始时间下的延误, 进而计算不同开始时间对应的养护总费用; 最后, 将得到的使总费用最小的时间作为最优养护作业开始时间。通过实际案例验证了本文提出的实时路况到实时交通量的转换方法的可靠性, 以及基于实时路况地图数据对养护作业开始时间进行优化的可行性。

关键词: 道路工程; 养护作业; 时间优化; 实时路况地图; 数据采集; 排队论

中图分类号: U418.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2021)05-1763-12

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200138

Short-term maintenance operation start time optimization based on real-time traffic map data

XU Zhe-pu¹, YANG Qun²

(1. School of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 2. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A real-time traffic status data acquisition method based on real-time traffic map was first proposed, and then a method that can convert real-time traffic status into real-time traffic volume was put forward. Based on this real-time traffic volume data and the classic delay calculation method based on queuing theory, the delays caused by maintenance operations at different start time can be calculated, the total cost due to the maintenance can be further obtained and compared, and therefore the optimal maintenance operation start time can be obtained. The reliability of the real-time traffic status data to real-time traffic volume data conversion method and the feasibility of optimizing the maintenance operation start time based on real-time traffic map data are verified by actual cases.

Key words: road engineering; maintenance operation; time optimization; real-time traffic map; data

收稿日期: 2020-03-08.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600301); 上海市科委地方院校能力建设计划项目(20090503100); 上海应用技术大学中青年教师科技人才发展基金项目(10120K209043-A06).

作者简介: 许哲谱(1993-), 男, 讲师, 博士. 研究方向: 道路养护. E-mail: xuzhepu@126.com

通信作者: 杨群(1975-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 道路养护. E-mail: qunyang.w@tongji.edu.cn

acquisition; queuing theory

0 引言

随着汽车保有量的增加,道路拥堵问题愈发严重。这些拥堵大致可分为常发性拥堵和非常发性拥堵,其中非常发性拥堵会给出行者带来无法预期的延误,而养护作业是导致这种延误的重要因素之一^[1]。养护作业按照定点作业持续时间可以分为长期养护作业和短期养护作业,短期养护作业持续时间小于 24 h。随着人们对预养护的重视以及考虑到大型养护作业的影响,更倾向于日常中小修,避免大中修。短期养护作业越来越多,为减少短期养护作业对出行的影响,人们针对作业开始时间优化做了很多工作,在最佳的时间开始作业,可尽可能减少延误。

开始时间优化的关键在于延误的计算,常见的方法有参数法^[2-5]、非参数法^[6,7]和仿真方法^[8,9]。其中参数法凭借着其简单易操作,对数据要求相对较低的特点有很多的运用场景,特别是在养护作业数据量不足的情况下可以为养护决策和规划提供一定的参考。基于排队论的延误计算方法是常用的参数法,该方法的关键参数之一是交通路况数据。常用的路况数据采集方法有人工采集法、基于固定设施的自动采集法和浮动车法^[10]。尽管现有的采集方法较为丰富,但面对短期养护作业还是存在较大局限性。短期养护可能发生在道路的任意位置,最理想的状态是掌握道路任意位置的交通状况。这一点采用人工采集和固定式交通路况检测方法不可行,而采用基于浮动车法所采集的数据又都集中在少数商业公司,养护部门很难获取。因此,考虑其他间接方法获取道路任意位置的实时路况数据很有现实意义。在这一方面,国内外研究有过一些尝试^[11-13],比如:Pokorny^[11]利用谷歌地图开发接口,编程实现了一个实时路况获取系统,用于评价城市实时交通水平;王芹等^[13]基于高德地图,采用类似手段获取实时交通大数据,研究城市交通拥堵热点判别方法。

随着数据获取技术的进步,基于实时路况地图获取实时交通量数据可以为参数法准备更充分的数据基础,能更好发挥参数法的优势。本文基于商业地图的实时路况数据,采用基于排队论的

参数法构建短期养护作业开始时间优化模型,弥补现有方法的不足,以期减少养护所造成的非常发性拥堵对出行者的影响。

1 方法

如图 1 所示,方法由 4 个步骤组成:①基于实时路况地图获取交通量;②养护作业区通行能力估计;③基于排队论计算延误;④养护作业开始时间优化。其中,第一步基于实时路况地图获取交通量可以划分为 3 个小步骤:采集与积累实时路况数据,将实时路况数据定量化,然后将实时路况转换成交通量。

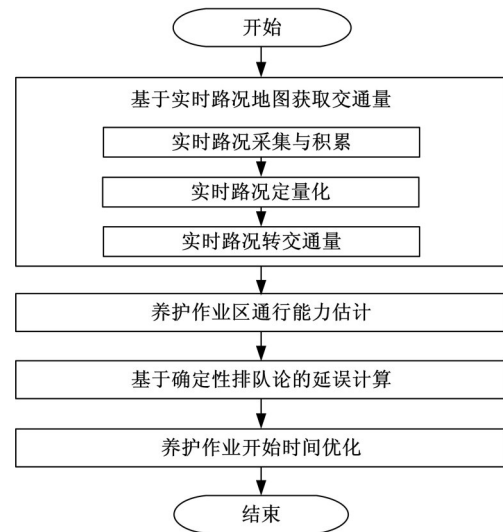


图 1 本文方法主要流程

Fig. 1 Main method of this paper

1.1 实时路况采集与积累

实时路况是电子地图(如百度地图)常见的功能,用不同的颜色将道路的实时拥堵情况反映出来,方便用户出行参考。根据实时路况数据粒度的粗细程度,实时路况地图通常采用 3~5 种颜色不等。通常绿色表示畅通、橙色表示缓行、红色表示拥堵、紫色表示严重拥堵。

实时路况采集与积累要实现的效果是输入某地理位置坐标,可以监测该位置的实时路况,从而达到采集和积累实时路况数据的目的。根据各商业地图提供的调用接口,实现上述目的大概可以分为 3 个步骤:

Step1 构建参数,即构建调用接口需要的参

数。其中,关键的是坐标之间的转换。整个过程会涉及到5种坐标的转换:地理坐标系统、平面坐标系统、像素坐标系统、图块坐标系统和可视区域坐标系统,即将所要监测位置的地理坐标转换成可视区域坐标,关于坐标转换的详细介绍可以参考文献[14]。

Step2 获取地图切片,即调用商业地图开放的接口,获取第一步中传入参数所对应的切片。以百度地图为例,获取切片的地址为“http://its.map.baidu.com:8002/traffic/TrafficTileService?time=1527043432323&label=web2D&v=016&level=19&x=105113&y=27854”,其中“x”和“y”就是Step1中构建的坐标参数。

Step3 路况状态识别,即识别切片上可视区域坐标位置的交通状态,可以通过像素的RGB进行识别,比如对于百度地图的状态,可采用表1的值进行识别。

表 1 交通状态与 RGB 范围对照表

Table 1 Traffic status and corresponding RGB range

实时交通状态	颜色	RGB 阈值
顺畅	绿	$G \neq B$ and $R \leq 240$
缓行	橙	$G \neq B$ and $R > 240$
拥堵	红	$G = B$ and $R \geq 200$
严重拥堵	紫	$G = B$ and $R < 200$

有了上述基础,可以实现输入一个指定坐标,就获得该位置实时交通状态的效果。通过设置定时器,可进一步实现按照一定频率监测指定位置的交通状况。

由于养护事件可能会发生在道路的任意位置,因此必须实现能自动采集道路任意位置的交通状况。考虑到道路发生交通拥堵时都是以段落的形式呈现,即一个指定点的交通状态可以从它周边点的交通状态估计,因此可以先将道路网离散成点网,然后运用上述基于位置的交通状态采集手段监测所有点,达到监测道路网的效果^[12,13]。

1.2 实时路况量化

通过1.1节实时路况数据采集系统采集到的是交通的状态量(比如顺畅、缓行、拥堵和严重拥堵)。实时路况地图是地图公司融合浮动车数据、道路固定监测装置采集的数据、人工采集数据等得到的。研究表明,实时路况数据与车辆平均速度有很强的相关性^[15,16],因此可以通过标定建立

路况与车辆平均速度的对应关系,从而对实时路况进行量化。主要思想是用1.1节实时路况采集系统采集某位置处的实时路况数据,同时在现场采集车辆速度数据,通过分析两套数据的统计特征得到实时路况数据和速度的对应关系,之后只要用路况采集系统采集到了交通状态,就能估计出当时的平均速度。为保证得到完整的实时交通状态与速度的对应关系,在数据采集位置选择时应该选择容易发生拥堵的位置。

1.3 实时路况转交通量

通过1.2节的量化过程,将交通状态量转化成了速度,而延误计算需要的是交通量,因此需要将速度转换成交通量,这很容易让人想起经典的速度-流量模型^[17]:如图2所示,在连续交通流中,假设密度 K 与流量 V 呈线性关系,则可推导出速度 U 与流量 V 的二次抛物线关系模型:

$$V = K_j \left(U - \frac{U^2}{U_0} \right) \quad (1)$$

式中: K_j 为阻塞密度; U_0 为零流量时平均车速。

然而,该模型有一个很大的局限性是不能预测交通量大于通行能力时($V/C > 1$)的车辆行驶速度。理论上说,当交通量大于通行能力时,路段交通阻塞,此时,即使到达车辆数增加,能通过的交通流量仍只能是通行能力,即路段流量不能大于通行能力,剩余车辆数(到达车辆数 V - 通行能力 C)会排队等候。但养护作业延误分析仍需要预测当路段上的交通需求量(即车辆到达数)超过通行能力时,这些车辆的平均行驶速度,但经典模型却无能为力了。王伟^[18]提出了一个实用车速-流量关系模型,可弥补经典模型的不足。

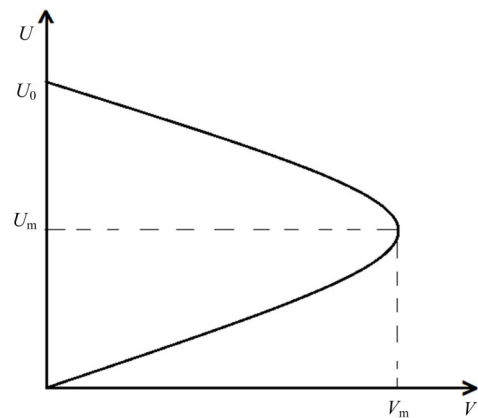


图 2 U-V 典型图式

Fig. 2 Classic relationship of U-V

1.3.1 道路交通流车速-流量实用关系模型

实用关系模型认为车速-流量模型应该是 S 型曲线,其数学表达式为:

$$\begin{cases} U = \frac{\alpha_1 U_s}{1 + (\frac{V}{C})^\beta} \\ \beta = \alpha_2 + \alpha_3 (\frac{V}{C})^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 为修正系数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为回归参数; U_s 为设计车速, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,在有实测自由流速度时,宜采用自由流速度。

表 2 列出了高速公路车速-流量实用模型参数,其他等级道路参数参考文献[18]。

由式(2)确定的高速公路不同设计车速下的车速-流量曲线如图 3 所示。

表 2 高速公路车速-流量通用模型参数表

Table 2 Parameters of practical model for expressways

设计车速 $U_s/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	单车道通行能力 $C/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$	α_1	α_2	α_3
120	2200	0.93	1.88	4.85
100	2200	0.95	1.88	4.86
80	2000	1.00	1.88	4.90
60	1800	1.20	1.88	4.88

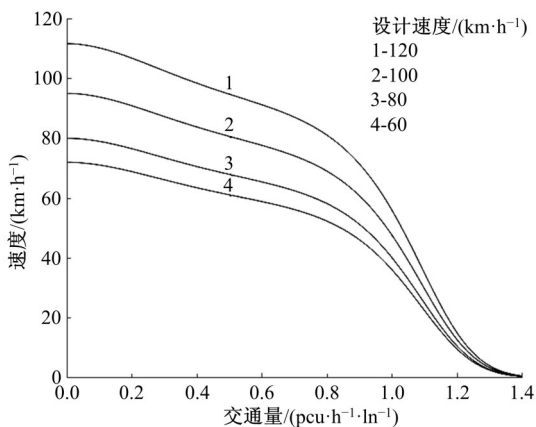


图 3 高速公路实用 U-V 曲线

Fig. 3 Practical U-V model for expressways

1.3.2 正常道路通行能力估计

实用模型的一个重要参数是正常道路通行能力,已有成熟的方法和文献可供参考。以高速公路基本路段通行能力为例,参考《公路通行能力手册》^[19],可以通过如下步骤确定其通行能力。

首先确定高速公路基本路段的基准通行能力,比如对于基准自由流速度为 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,基准通行能力值为 $1800 \text{ pcu}\cdot(\text{h}\cdot\text{ln})^{-1}$ 。

实际道路条件往往达不到基准条件,需要对自由流速度进行修正:

$$v_{FF} = v_{BFF} + \Delta v_w + \Delta v_N \quad (3)$$

式中: v_{FF} 为高速公路基本路段实际自由流速度, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; v_{BFF} 为基本路段的基准自由流速度, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; Δv_w 为车道宽度和路侧宽度对基准自由流速度的修正值, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; Δv_N 为车道数对基准自由流速度的修正值, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

那么,实际道路交通条件下的通行能力为:

$$C_r = C_b \times f_{HV} \times f_p \times N \quad (4)$$

式中: C_r 为实际道路、交通条件下单车道的通行能力, $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$; C_b 为基准条件下五级服务水平 $V/C=1$ 对应的单车道基准通行能力, $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$; f_{HV} 为交通组成修正系数; f_p 为驾驶人总体特征修正系数; N 为单向车道数。

1.4 养护作业区通行能力估计

排队论计算延误的另一个重要参数是养护作业区的通行能力,这也可以参考现有的道路通行能力手册进行估计。实际通行能力如下^[19]:

$$C_{rs} = C_{bs} \times f_n \times f_{iw} \times f_{ic} \times f_{HV} \times f_{se} \times f_{wi} \times f_{is} \quad (5)$$

式中: C_{rs} 为施工区实际通行能力, $\text{pcu}\cdot(\text{h}\cdot\text{ln})^{-1}$; C_{bs} 为施工区基准通行能力, $\text{pcu}\cdot(\text{h}\cdot\text{ln})^{-1}$; f_n 为车道数修正系数; f_{iw} 为车道宽度修正系数; f_{ic} 为侧向净空修正系数; f_{HV} 为交通组成修正系数; f_{se} 为限制速度修正系数; f_{wi} 为作业强度修正系数; f_{is} 为光照条件修正系数。

1.5 养护作业区延误计算

养护作业区的交通延误可以分为 4 个部分^[20,21]:①进入作业区范围后,车辆由正常速度降低到作业区要求的速度所造成的减速延误;②车辆以比较低的速度通过作业区造成的运行延误;③车辆通过作业区后恢复到正常速度时的加速延误;④作业区范围内的排队延误。

这 4 部分交通延误中,前 3 项延误可以比较车流通过作业区的速度和正常路段时的速度得到。第 4 项排队延误,对于拥挤状态有此项延误很容易理解,因为拥挤状态下车流会在作业区内排队。但是,非拥挤状态也可能会形成排队,这是由于车流到达的随机性,在道路流量没超过作业区通行能力的部分时段内,也会出现排队现象。排队延误可以用排队论计算,但非拥挤状态和拥挤状态

的排队延误计算方法有一定的差异。

现假定车流在正常路段上的行驶速度为 V_1 , 在作业区段的行驶速度为 V_2 , 在驶入作业区时的减速度和加速度分别为 a_1 和 a_2 , 作业区长度为 L , 作业总时间为 T , 作业区的通行能力为 C , 假定每个数据采集小间隔 t_d 内达到作业区的交通流是均匀的, 为 Q_i 。根据 t_d 时间段内车辆累积情况以及车辆到达交通量和通行能力的关系划分成两级判

断条件, 那么每个 t_d 内单个车辆的减速延误 d_1 , 运行延误 d_2 , 加速延误 d_3 , 排队延误 d_4 , 所有车辆的排队延误 D_4 , 以及车辆总延误 DL_i 计算式如表 3 所示, 具体的推导过程参考文献[21]。

养护作业导致的总延误就是所有 DL_i 的总和。值得注意的是, 日常情况下道路也可能会发生拥堵产生延误, 本文延误特指由养护作业造成的额外延误。

表 3 作业区每个 t_d 的总延误 DL_i 计算公式汇总

Table 3 Summary of total delay DL_i calculation formula for each t_d in work zone

一级判断	二级判断	当前时段延误计算公式	备注
当前无累积排队车辆	$Q_i \leq C$	$d_1 = (V_1 - V_2)^2 / (2 \cdot a_1 \cdot V_1)$ $d_2 = (1/V_2 - 1/V_1) \cdot L$ $d_3 = (V_1 - V_2)^2 / (2 \cdot a_2 \cdot V_1)$ $d_4 = Q_i / [C \cdot (C - Q_i)]$ $DL_i = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) \cdot Q_i \cdot t$	此时路况畅通
	$Q_i > C$	$d_1 = (V_1 - V_2)^2 / (2 \cdot a_1 \cdot V_1)$ $d_2 = (1/V_2 - 1/V_1) \cdot L$ $d_3 = (V_1 - V_2)^2 / (2 \cdot a_2 \cdot V_1)$ $D_4 = Q_{i-1} t_d + \frac{1}{2} (Q_i - C) t_d^2$ $DL_i = (d_1 + d_2 + d_3) \cdot Q_i \cdot t + D_4$	排队开始形成
当前有累积排队车辆	$Q_i < C$	$d_1 = (V_1 - V_2)^2 / (2 \cdot a_1 \cdot V_1)$ $d_2 = (1/V_2 - 1/V_1) \cdot L$ $d_3 = (V_1 - V_2)^2 / (2 \cdot a_2 \cdot V_1)$ $D_4 = \frac{Q_{i-1}^2}{2(C - Q_i)}$ $DL_i = (d_1 + d_2 + d_3) \cdot Q_i \cdot t + D_4$	排队开始消散
	$Q_i \geq C$	$d_1 = (V_1 - V_2)^2 / (2 \cdot a_1 \cdot V_1)$ $d_2 = (1/V_2 - 1/V_1) \cdot L$ $d_3 = (V_1 - V_2)^2 / (2 \cdot a_2 \cdot V_1)$ $D_4 = Q_{i-1} t_d + \frac{1}{2} (Q_i - C) t_d^2$ $DL_i = (d_1 + d_2 + d_3) \cdot Q_i \cdot t + D_4$	排队继续增加

1.6 养护作业开始时间优化

前述方法可以计算以给定时刻作为养护作业开始时间的延误, 那么很容易想到, 通过遍历一天中的任意时刻作为养护开始时间, 分别计算延误, 取使延误最小的开始时间作为实际作业开始时间可以得到一个优化的结果。然而这个结果仅反映了养护作业对出行一个方面的影响, 即引发延误; 实际上, 养护活动还会增加交通事故率, 增加燃油消耗, 而在不同的时间(白天或者夜间)进行养护作业, 也会有不同的养护成本^[22]; 在开始时间优化过程中, 应该将上述因素都考虑进去。为了让不同方案有可比性, 一个常用的做法是将这些因素统一换算成以货币为单位进行分析。

本文研究的场景养护措施(比如采用雾封层还是微表处)往往是确定的, 而同一个养护措施, 在白天施工和夜间施工的成本存在一定的差异, 主要是夜间施工需要额外的设施(比如照明和安全防护等), 且施工效率更低, 施工质量更差^[22]。对于夜间施工因素的考虑, 可根据实际情况在维修费用中乘以一个调整系数, 即:

$$Cost_{intervention} = \alpha \times Cost_{normal} \quad (6)$$

式中: α 为成本调整系数, 若白天施工, 则 $\alpha=1$, 若夜间施工, 则 $\alpha=1.15$ ^[23]; $Cost_{intervention}$ 为维修费用; $Cost_{normal}$ 为白天维修费用。

延误费用为:

$$Cost_{time} = DL \times S \quad (7)$$

式中:DL为延误总时间,h;S为每辆车的单位时间成本,取值为38元/h/车^[24]。

事故费用为:

$$Cost_{\text{accident}} = t \times length \times \vartheta \times \beta \times c_r \times Volume \times r \quad (8)$$

式中:t为养护作业持续时间,h;length为养护路段长度,km; ϑ 为光照条件事故率调整系数,白天施工时 $\vartheta=1$,夜间施工时 $\vartheta=1.8$ ^[23]; β 为养护作业区事故率调整系数,取值为1.39^[25];c_r为伤亡的单位费用,取值为 9×10^{-4} 元/人/公里^[26];Volume为交通量,pcu/h;r为每辆车的乘客人数平均值,取值为3人/车。

接下来介绍燃油费用的计算。研究表明,汽车单位油耗(FL,升/百公里)、车辆速度(V,km/h)和国际平整度指数(IRI,m/km)之间的关系为^[27]: $FL=0.0013V^2-0.2164V+0.2481IRI+13.3658$ 。那么,车辆燃油消耗费用为:

$$Cost_{\text{fuel}} = t \times length \times FL \times Volume \times P \quad (9)$$

式中:P为车辆的燃油单价,取值为6.5元/升。

本养护作业开始时间优化的目标函数是最小化总费用,即:

$$\text{Min } Cost_{\text{total}} \quad (10)$$

其中: $Cost_{\text{total}} = Cost_{\text{intervention}} + Cost_{\text{time}} + Cost_{\text{accident}} + Cost_{\text{fuel}}$ 。

上述优化过程可通过一种简单的方式进行,即遍历一天中的任意时刻作为养护开始时间,分别计算延误,进而计算 $Cost_{\text{total}}$,将使 $Cost_{\text{total}}$ 最小的开始时间作为最优开始时间。通过算法可以实现优化过程的自动化,伪代码如下:

输入:路段日常交通量、正常路段通行能力、养护作业区通行能力、正常路段限速、作业区限速、作业区长度、正常路段总车道数、作业期间开放车道数、作业持续时间t

步骤1:根据表3公式计算日常情况下一天每个小时段对应的延误值,累加得到日常总延误D_{normal_sum}

步骤2:

For each time_start in [1:1:24]:

将time_start至time_start+t时间段内的参数赋值为养护作业情况下的值,其他时间段参数不变,根据表3公式计算一天中每个小时段对应的延误值,累加得到养护总延误D_{work_sum}

计算养护总延误与日常总延误的差值(D_{work_sum}-D_{normal_sum}),得到time_start对应的养护额外延误D_{work_i}

计算time_start对应的养护维修费用Cost_{intervention},延误费用Cost_{time},事故费用Cost_{accident},燃油费用Cost_{fuel}

计算time_start对应的总费用Cost_{total}

End

输出:养护开始最佳时间time_start,即Cost_{total}最小值对应的time_start

2 验证与应用

本章以实例的方式验证实时路况定量化和速度-流量实用模型的有效性,并演示养护作业开始时间优化在实践中的应用。

2.1 实时路况定量化以及实用模型的验证

2.1.1 数据采集

数据采集主要分为3个部分:实时路况采集、交通量采集和速度采集。实时路况利用1.1节所述的采集系统进行自动采集,确定采集位置后系统按照每分钟一次的频率采集所在位置的交通状态。本实例中,实时路况地图采用百度地图。交通量和速度数据采用现场架设摄像机录制交通流视频,后期通过视频分析的方式获取。

为了采集到多个路况状态下的交通数据,本次数据采集选择在上海市内环高架某局部路段进行,该路段限速80 km/h,会发生常发性拥堵。

如图4所示,采用两台摄像机分别在A处和B处录制交通视频,其中A为易发生拥堵的地方,B在A的上游1公里处,B基本上处于畅通状态。录制视频的同时,利用实时路况采集系统采集该路段的实时路况数据。

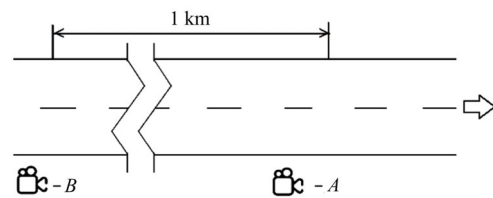


图4 数据采集地点示意图

Fig. 4 Illustration of data collection

2.1.2 实时路况定量化

通过交通流录像分析,得到车辆的速度,并结合实时路况数据,对不同路况的车辆速度进行分析,拟合成正态分布^[17],可以得到图5所示速度分布图。取各状态曲线的交点作为各状态的分界点,并取各拟合正态曲线的均值作为该状态的定量指标,如表4所示。其中,速度范围是地图公司状态划分标准在实际道路上的表现情况^[16]。

2.1.3 实用模型验证

由于案例采集到了实际的速度和交通量数

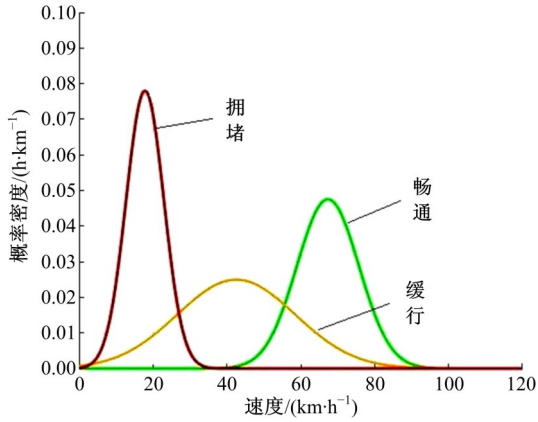


图 5 内环线速度分布图

Fig. 5 Speed distribution of neihuan road

表 4 内环线实时路况状态定量表

Table 4 Quantification values for real-time traffic status of neihuan road

路况	畅通	缓行	拥堵
速度范围/(km·h ⁻¹)	55~92	27~55	0~27
定量化值/(km·h ⁻¹)	67	42	18

据,因此可以根据实际数据得到真实的通行能力和自由流速度,否则在没有条件的情况下就只能采用手册推荐的值。

通过视频数据提取,获取不同时间段、不同路况状态下的交通量和对应的速度,并按照经典的速度-流量抛物线模型进行拟合,可以得到如图 6 所示的数据分布图, $R^2=0.8$ 。可以把最大流率 $1662 \text{ pcu} \cdot (\text{h} \cdot \ln)^{-1}$ 作为该路段的通行能力,自由流速度为 $83 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

根据 1.3.1 节所述模型以及上述实测数据,对于本路段,取 $\alpha_1=1$ 、 $\alpha_2=1.88$ 、 $\alpha_3=4.90$ 、 $U_s=83$,可以得到图 7 所示的实用速度-流量曲线,可

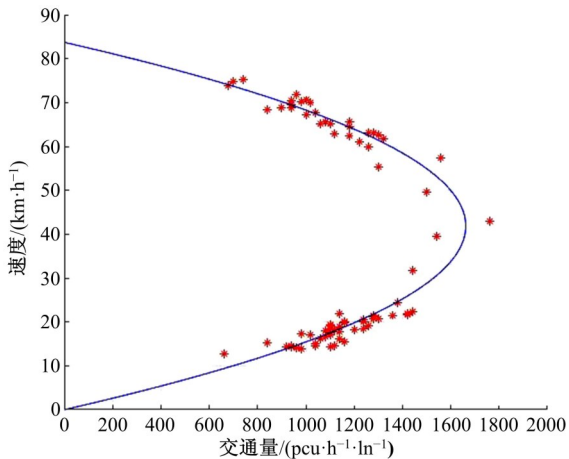


图 6 内环线经典 U-V 曲线

Fig. 6 Classic U-V model of neihuan

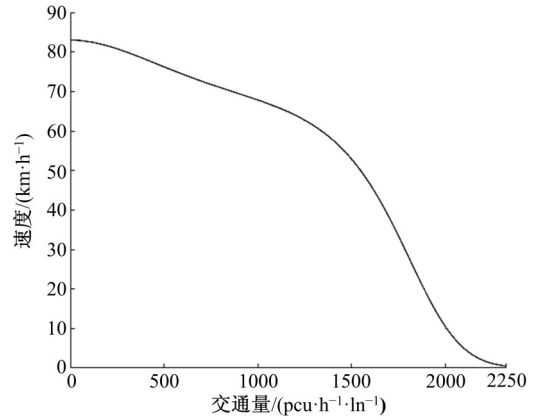


图 7 内环线实用 U-V 曲线

Fig. 7 Practical U-V model of neihuan

见按照该模型的估计,当 $V/C=0.63$ 即交通量为 $1047 \text{ pcu} \cdot (\text{h} \cdot \ln)^{-1}$ 时,速度是 $67 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。通过视频处理,找到交通量为该值且交通状态属于畅通部分的速度(见表 5)。可见,本速度-流量模型在 $V/C < 1$ 的情况下对速度和流量的估计是比较准确的。从图 7 也可以看到,当交通量达到路段通行能力时(即 $V/C=1$),路段车辆速度的平均值在 $42 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,对应着实时交通路况的缓行状态,即路段的通行能力可以用路段交通量从不拥堵到拥堵变化的交通量表示,这个观点正是文献[28]提出的路段通行能力界定方法。最后,验证该模型在 $V/C > 1$ 情况下的适用性。显然,该情况一定出现在实时路况为拥堵状态的时间段。由表 4 可知,拥堵状态下车辆的平均速度为 $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,由图 7 可得对应的 $V/C=1.15$,即交通量为 $1911 \text{ pcu} \cdot (\text{h} \cdot \ln)^{-1}$ 。根据经典的速度-流量曲线,当道路拥堵时,其交通量甚至小于路段通行能力,实际数据采集时也发现确实存在该现象,所以通过测量拥堵路段交通量的方法不能得到交通需求量(即车辆到达数),必须通过计

表 5 $V/C=0.63$ 时的速度和流量数据(部分)

序号	交通量/ [pcu·(h· ln) ⁻¹]	速度均值/ (km·h ⁻¹)	序号	交通量/ [pcu·(h· ln) ⁻¹]	速度均值/ (km·h ⁻¹)
1	1040	67.7	7	1080	65.7
2	1100	65.1	8	1060	61.1
3	1080	61.7	9	980	62.5
4	1020	69.9	10	1060	65.1
5	1100	60.2	11	1000	67.1
6	940	68.8	12	940	65.1

算路段上游不拥堵区段车辆到达数实现。选取上游处于畅通状态而下游处于拥堵路段的时间段统计车辆达到数,得到表 6 所示数据,可见在道路拥堵情况下,交通流量达到了 $1911 \text{ pcu} \cdot (\text{h} \cdot \text{ln})^{-1}$,从而验证了实用模型的适用性。

表 6 上游交通量数据(部分)

Table 6 Upstream volume data(part)

序号	交通量/[$\text{pcu} \cdot (\text{h} \cdot \text{ln})^{-1}$]	序号	交通量/[$\text{pcu} \cdot (\text{h} \cdot \text{ln})^{-1}$]	序号	交通量/[$\text{pcu} \cdot (\text{h} \cdot \text{ln})^{-1}$]
1	1800	5	1740	9	1860
2	1800	6	1920	10	1860
3	1740	7	1680	11	1680
4	1920	8	1680	12	1740

2.2 养护作业区延误计算以及开始时间优化

仍以内环高架为例,演示养护作业开始时间优化。优化过程需要养护路段的日常路况数据,采用 1.1 节中所介绍的系统,添加事件对要进行养护的位置进行实时路况监测,持续采集了一周该位置的实时路况数据,期间没有任何施工情况以及特殊节假日,最后取各天的平均路况作为该路段的日常交通情况,如图 8 所示。

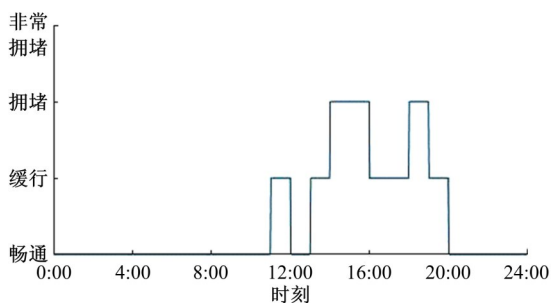


图 8 养护作业位置处日常交通变化折线图

Fig. 8 Daily traffic status of road where maintenance located

2.2.1 实时路况转交通量

由 2.1 节的定量化过程,很容易将养护路段的日常交通状况定量化为速度(见图 9),再由实用速度-流量模型转换到交通量(见图 10)。

2.2.2 养护作业区通行能力估计

施工拟采用图 11 所示的作业区布局。原来单向有三车道,每个车道 3.5 m,现封闭一个车道施工,左、右侧向净空都为 0.25 m,均为小车,施工区限速为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,作业区长度为 0.1 km。

由 1.4 节可得,该养护作业区基准通行能力为 $1800 \text{ pcu} \cdot (\text{h} \cdot \text{ln})^{-1}$ 。根据实际通行能力式(5),可以得到:

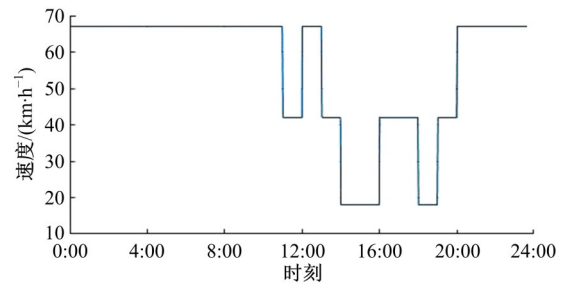


图 9 实例养护作业位置处日常交通定量化后的折线图

Fig. 9 Daily traffic of case study after quantification

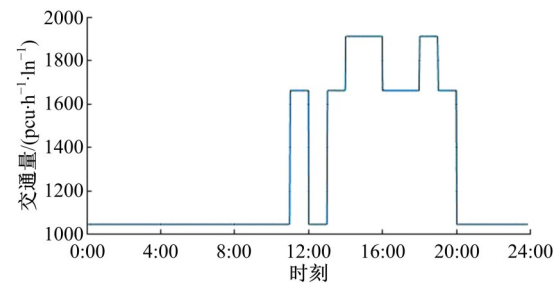


图 10 养护作业位置实时交通转换成流量后的折线图

Fig. 10 Line chart of traffic flow converted from real-time traffic data at maintenance operation location

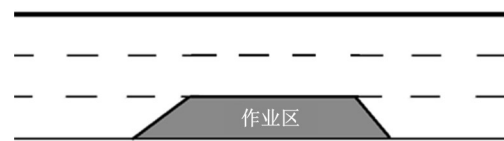


图 11 实例拟采用的作业区布局

Fig. 11 Layout of work zone

$$C_{rs} = C_{bs} \times f_n \times f_{lw} \times f_{lc} \times f_{HV} \times f_{sc} \times f_{wi} \times f_{ls} = 1800 \times 1 \times 0.97 \times (1 \times 0.96) \times 1 \times 0.8 \times 1 \times 0.96 = 1287$$

2.2.3 养护作业开始时间优化

本次施工拟采用薄层罩面,施工成本预计 1 万元,当地日出时间为 6:00,日落时间为 18:00,路面国际平整度指数 $IRI=3.5 \text{ m/km}$ 。根据 1.6 节算法,在 Matlab 中编程实现了优化过程的自动化。不同作业开始时间下的总费用如图 12 所示,可见在不同时间开始施工对总费用有很大的影响。为了尽可能降低延误,最优的养护作业开始时间是晚上 9 点~凌晨 2 点之间的任意时刻。

2.3 讨论

2.3.1 定量化精度对优化结果的影响

实际应用时,实用速度流量模型比较容易建立,在知道正常路段基本参数后查询手册估计自由流速度和通行能力即可获得,而实时交通状态定量化为速度,必须通过标定进行。由于每个状

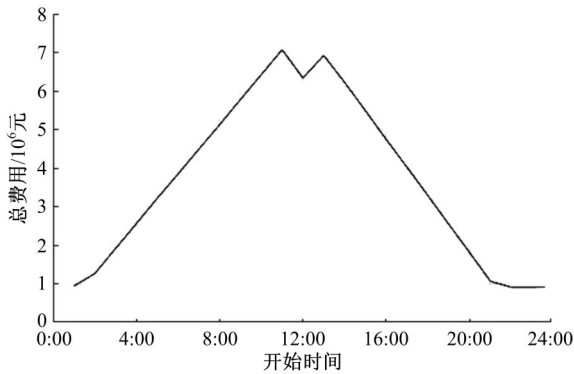


图 12 以不同的时间开始施工的总费用变化图

Fig. 12 Total cost changing with different operation start time

态对应一个较大的速度范围,在实际标定过程中,可能在不同时刻量化得到的结果有较大的差异,因此有必要研究量化精度对优化结果的影响。

仍以内环高架为例,分析表 7 中 4 个场景时间优化结果的区别。其中,场景 1 即是 2.2 节中场景,其他场景在场景 1 的基础上改变一个参数值,比如场景 2 仅将畅通状态的量化值由 67 减为 63 km/h。值得注意的是,本文认为缓行状态所对应的交通量即路段的通行能力,由于实用速度流量曲线已经确定,因此缓行状态所对应的速度也是确定的。

表 7 量化精度影响分析场景

Table 7 Scenarios studied considering impacts of different quantification values

场景	畅通速度/ (km·h ⁻¹)	畅通交通量/ (pcu·h ⁻¹ ·ln ⁻¹)	拥堵速度/ (km·h ⁻¹)	拥堵交通量/ (pcu·h ⁻¹ ·ln ⁻¹)
1	67	1047	18	1911
2	63	1200	18	1911
3	70	850	18	1911
4	67	1047	5	2100

4 个场景的最优开始作业时间如图 13 所示。当畅通状态量化值偏低时(场景 2),最优开始时间区间缩小到 22:00~23:00;当畅通状态量化值偏高时(场景 3),最优化开始时间区间扩大到 21:00~04:00(次日);同样,当拥堵状态量化值偏低时(场景 4),最优化开始时间区间也会收缩,变为 22:00~02:00。可以看到,量化精度对优化结果有明显的影 响。当量化值偏低时,会得到一个更小的最优化开始时间区间,这其实是一个更加保守的优化结果。所以,实际定量

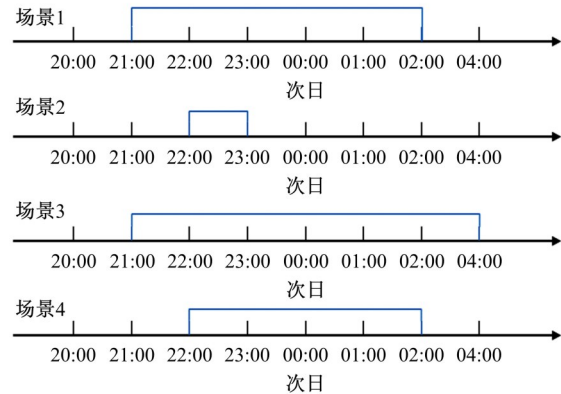


图 13 不同量化值场景的优化结果对照

Fig. 13 Comparison of optimization results under scenarios considering different quantification values

化过程中应尽可能保证量化过程的精度,可通过增加数据采集时长、扩大数据采集范围等方式加以提升;若条件限制,则应该在交通量较大的时间段进行数据采集(这时候量化值会偏低)。

2.3.2 养护作业因素对优化结果的影响

首先分析总费用中各部分费用的比重情况。以 2.3.1 节中场景 3 的结果为例,取总费用最大和最小两种情况进行分析,如表 8 所示,可见总费用中施工费用和延误费用是主要费用,且延误费用变化非常明显,在有些情况下远大于其他费用,这与现有研究结论一致^[29]。事故费用和燃油费用在本例中占比很小,主要是因为作业区长度短,且作业持续时间短。

表 8 总费用中各部分费用比重对比

Table 8 Percentages of costs in total cost

项 目	总费用最大	总费用最小
总费用/元	5 772 700	17 429
施工费用/元 占比/%	10 562 0.2	10 562 60.6
延误费用/元 占比/%	5 761 228 99.8	5 958 34.2
事故费用/元 占比/%	83 0.0	84 0.48
燃油费用/元 占比/%	824 0.0	825 4.7

考虑到本文场景养护措施是确定的,而施工费用随开工时间变化幅度小,因此总费用主要取决于延误费用。从第 1 节介绍可知,影响延误的养护作业因素有作业持续时间、作业区长度、作业区限速和封闭车道数。接下来研究这些因素改变对优化结果的影响以及检验优化方法在不同情形下的适用性。一共考虑表 9 所示的 5 个场景,其中场景 1 是基础场景,其他场景在场景 1 的基础上改

变一个参数的值。

表 9 养护作业因素影响分析场景

Table 9 Scenarios studied considering impacts of different maintenance factors

场景	持续时间/h	作业区长度/km	限速/(km·h ⁻¹)	封闭车道数
1	8	0.1	40	1
2	7	0.1	40	1
3	8	0.5	40	1
4	8	0.1	60	1
5	8	0.1	40	2

5个场景下总费用随作业开始时间变化的曲线如图 14 所示,清晰可见 4 个因素中,封闭车道数的改变对总费用的影响最大,其次是持续时间,而作业区长度和作业区限速影响较小。将作业持续时间缩短为 7 h(场景 2)会使最优开始作业时间区间由 21:00~02:00(次日),变为 21:00~03:00(次日);多封闭一个车道(场景 5),使最优开始作业时间区间变为 22:00~23:00;作业区长度和作业区限速的改变都不会影响最优开始作业时间区间。上述现象是合理的,因为与排队延误比起来,运行延误在总延误中的占比小得多,改变持续时间(场景 2)和封闭车道数(场景 5)主要影响排队延误,而改变作业区长度(场景 3)和限速(场景 4)主要改变的是运行延误。上述分析验证了本优化方法在不同场景下的适用性,也反映了开始作业时间优化的重要性,其能在很大程度上减小养护作业造成的延误。

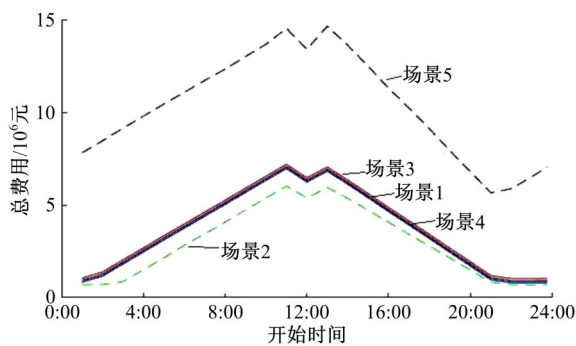


图 14 不同养护作业因素场景的优化结果对照

Fig. 14 Comparison of optimization results under scenarios considering different maintenance factors

3 结束语

提出了一种基于实时路况地图数据的养护作业开始时间优化方法。首先,提出了基于实时路

况地图的实时路况数据采集方法;然后,提出了将实时路况数据转换成实时交通量的方法;最后,基于经典的排队论延误计算参数方法,实现对养护作业开始时间的优化。通过实际案例验证了实时路况量化过程以及速度-流量实用关系模型的可靠性,验证了本文提出的将实时路况地图数据转换成实时交通量数据的可行性,也验证了基于实时路况地图实现对养护作业开始时间优化的有效性。本方法适用于不同的场景,可极大减小养护作业导致的交通延误。本研究的一个重要贡献是,可以获取到有实时路况地图数据的道路网任意位置的实时交通量并进行积累,解决了广泛采用的基于排队论的延误计算参数法在实时路况数据采集上的困难,使该方法可以更好地为养护决策和规划提供支撑,特别适用于养护作业历史数据不足或不全的场合。

实时路况地图现在已经是电子地图非常常见的功能,其具有开放、更新及时、覆盖范围广等特点,可以为养护作业决策提供简单高效而成本低的数据来源,期待养护部门充分利用这一数据源,搭建相关的数据采集系统以及决策支持模块,优化养护作业的实际工作。

参考文献:

- [1] Committee on a study for a future strategic highway research program. Strategic Highway Research: Saving Lives, Reducing Congestion, Improving Quality of Life—Special Report 260[M]. National Academies Press, 2001.
- [2] 曲大义, 杨晶茹, 邴其春, 等. 基于干线车流排队特性的相位差优化模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48(6): 1685-1693.
Qu Da-yi, Yang Jing-ru, Bing Qi-chun, et al. Arterial traffic offset optimization based on queue characteristics at adjacent intersections[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2018, 48(6): 1685-1693.
- [3] 姚荣涵, 刘美妮, 徐洪峰. 信号控制交叉口车均延误模型适用性分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(2): 390-398.
Yao Rong-han, Liu Mei-ni, Xu Hong-feng. Applicability analysis of vehicle delay models for isolated signalized intersection[J]. Journal of Jilin University

- (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(2): 390-398.
- [4] Lin H F, Fu Q, Zhang H J, et al. Influence of heavy vehicles on traffic flow in highway work zone based on delay analysis[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2008(3): 335-338.
- [5] Chen C P, Evans D, Schonfeld P M. Work zone optimization for multiple-lane highway resurfacing projects with time constraints and alternate route[C]// 85th Annual Meeting of the Transportation Research Record, Washington DC, 2006: 30-45.
- [6] Du B, Chien S, Lee J, et al. Artificial neural network model for estimating temporal and spatial freeway work zone delay using probe-vehicle data[J]. Transportation Research Record, 2016, 2573(1): 164-171.
- [7] Du B, Chien S, Lee J, et al. Predicting freeway work zone delays and costs with a hybrid machine-learning model[J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017: 1-8.
- [8] Lee H Y. Optimizing schedule for improving the traffic impact of work zone on roads[J]. Automation in Construction, 2009, 18(8): 1034-1044.
- [9] 朱永光. 高速公路施工区交通组织与作业段长度优化研究[D]. 西安: 长安大学材料科学与工程学院, 2010.
- Zhu Yong-guang. Optimization of traffic organization & work zone lengths in freeway[D]. Xi'an: School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, 2010.
- [10] 徐吉谦, 陈学武. 交通工程总论[M]. 3版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [11] Pokorny P. Determining traffic levels in cities using google maps[C]//International Conference on Mathematics & Computers in Sciences & in Industry, Greece, 2017: 144-147.
- [12] 刘瑶杰. 基于实时路况的交通拥堵时空聚类分析[D]. 北京: 首都师范大学资源环境与旅游学院, 2014.
- Liu Yao-jie. Clustering analysis of traffic congestion based on real-time traffic conditions[D]. Beijing: College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, 2014.
- [13] 王芹, 谢元礼, 段汉明, 等. 基于实时路况的西安交通拥堵研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2017, 47(4): 622-626.
- Wang Qin, Xie Yuan-li, Duan Han-ming, et al. On Xi'an traffic congestion based on real-time traffic data[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2017, 47(4): 622-626.
- [14] 佚名. 百度地图API详解之地图坐标系统[EB/OL]. [2011-07-02]. <http://www.jiazhengblog.com/blog/2011/07/02/289/>
- [15] 江波. 基于浮动车数据的实时交通状态估计[D]. 济南: 山东大学控制科学与工程学院, 2011.
- Jiang Bo. Estimation of real-time traffic state based on floating car data[D]. Jinan: School of Control Science and Engineering, Shandong University, 2011.
- [16] 周洋. 基于GPS浮动车的高速公路实时路况系统的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学航空制造工程学院, 2012.
- Zhou Yang. Research on real-time traffic system of the highway based on GPS floating vehicle[D]. Nanchang: School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, 2012.
- [17] 张亚平, 杨龙海, 刘丽华, 等. 交通流理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2016.
- [18] 王炜. 公路交通流车速-流量实用关系模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(4): 487-491.
- Wang Wei. Practical speed-flow relationship model of highway traffic-flow[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2003, 33(4): 487-491.
- [19] 周荣贵, 钟连德. 公路通行能力手册[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [20] Jiang Y. A model for estimation of traffic delays and vehicle queues at freeway work zones[J]. Transportation Quarterly, 2001, 55(4): 65-81.
- [21] 周茂松. 公路养护作业区交通优化的若干问题研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2005.
- Zhou Mao-song. Study on several issues of traffic optimization in highway maintenance work zone[D]. Shanghai: College of Transportation Engineering, Tongji University, 2005.
- [22] Park S B, Douglas K D, Griffith A S, et al. Factors of importance for determining daytime versus nighttime operations in oregon[J]. Transportation Research Record, 2002, 1813(1): 305-313.
- [23] 李晓龙. 运营高速公路施工作业区安全保障技术及工作区长度研究[D]. 西安: 长安大学运输工程学院, 2014.
- Li Xiao-long. A study on optimization design of safety control technology and length for highway work

- zone[D]. Xi'an: College of Transportation Engineering, Chang'an University, 2014.
- [24] 许国初. 道路用户成本分析与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2008.
- Xu Guo-chu. Road user cost analysis and applied research[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2008.
- [25] 吴江玲. 高速公路养护作业区车辆换道行为及模型研究[D]. 西安: 长安大学运输工程学院, 2017.
- Wu Jiang-ling. Lane-changing behavior analysis and modeling of lane-changing in work zones on freeways [D]. Xi'an: College of Transportation Engineering, Chang'an University, 2017.
- [26] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [27] 谢胜加. 高速公路沥青路面养护效益评价方法研究 [D]. 南京: 东南大学交通学院, 2016.
- Xie Sheng-jia. Research on evaluation method of maintenance benefit of highway asphalt pavement[D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2016.
- [28] Dixon K K, Hummer J E, Lorscheider A R. Capacity for North Carolina freeway work zones[J]. Transportation Research Record, 1996, 1529(1): 27-34.
- [29] 潘玉利. 路面管理系统原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.