

高速公路养护工程安全变道控制距离研究

李大鹏¹, 陈龙庭², 金坚定²

(1.浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310000; 2.浦江县公路与运输事业发展中心, 浙江 金华 321000)

摘要: 为探究高速公路养护工程安全变道概率条件下车辆行驶的控制距离,对变道过程中车辆跟驰行驶安全约束条件进行分析,并运用概率论与交通流理论研究车辆变道概率组合特性,推导出安全变道控制距离与成功变道概率之间的关系。结合实例计算,对推导模型与规范中的建议值和计算值进行吻合性验证。

关键词: 概率论; 交通流理论; 安全变道概率

中图分类号: U418

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)01-0224-02

0 引言

自我国改革开放以来,随着国内经济的快速发展,公路行业进入了快速发展阶段。公路事业由20世纪末建设为主的发展阶段逐渐转变为21世纪前叶建管并重的发展阶段。截至2021年,国内高速公路每年总养护里程已突破10 000 km。我国高速公路陆续进入大中修养护周期,未来十年将逐步进入养护为主的发展阶段。公路养护工作的日益增多,造成因养护作业诱发的交通事故逐年增多,对我国公路养护安全作业提出了新的要求。

1 国内研究现状

《公路养护安全作业规程》在2015年得到了修订,修订的内容主要包含:细化了特殊路段及特殊气象条件下养护安全作业的要求;按作业时间划分公路养护作业类型;公路养护作业区限速,修订最终限速值;修订公路养护作业控制区划分及各区段长度,增加了横向缓冲区;引入了高速公路及一级公路养护作业控制区两侧差异化布置,修订并补充了二、三级公路养护作业控制区布置^[1]。根据规范中假定,公路强制变道包含警告区和上游过渡区两个控制区域。车辆限速过程在警告区内完成,车辆从警告区终点封闭车道平稳地横向过渡到缓冲区起点在上游过渡区内完成。

警告区长度按照公路的设计速度、交通量分级情况在规范中规定了最小长度值,可查规范表4.0.4

中规定值,也可计算取值。警告区长度的计算包括:从正常行驶降至最终限速值所需的距离;车辆到达警告区排队尾部时的最小安全距离;因封闭车道、车道数减少、行车条件改变等因素引起的车辆排队长度,可按式计算:

$$S = \frac{v_{xq} - v_{sh}}{10} \times 100 + \frac{v_{xq}}{3.6} \tau + \frac{v_{xq}^2}{2g(\varphi \pm i) \times 3.6^2} + S_3 \quad (1)$$

式中: v_{xq} 为车辆减速前的速度,km/h; v_{sh} 为车辆限速后的速度,km/h; τ 为驾驶员反应时间,取2.5s; φ 为道路纵向摩擦系数,取0.29~0.44; i 为道路纵坡,上坡取+,下坡取-; g 为重力加速度,取9.8 m/s²; S_3 为车辆拥堵而产生的排队长度,在规范条文说明表4-2查取。

上游过渡区长度按照限速值、封闭车道宽度情况在规范中规定了最小长度值,可查表4.0.5中规定值。

交通系统是多因素耦合系统,主要包含人、车、路及路域环境四因素。修订规范中的控制区长度及限速指标要求从人、车两因素进行了考虑,尚缺路况和路域环境两因素。

本文尝试从概率论的角度研究车辆行驶过程中遭遇障碍物时,驾驶员做出的变道行为,通过建立强制变道概率条件下变道所需的最小控制距离模型,并对临界交通量进行求解,作为养护工程中进行交通管制的预警值。

2 跟驰行驶安全约束条件

为了确保跟车安全,在后车 n 完成制动后,其与前车 $n-1$ 的车辆间距应至少大于需要的最短安全距离 L 。 L 包括前车 $n-1$ 的设计车身长度和最小的安全

收稿日期: 2023-02-17

作者简介: 李大鹏(1981—),男,硕士,高级工程师,从事公路设计工作。

停车距离(取2 m)。

$$\frac{\dot{x}_{n-1}^2}{254(\mu_l \pm i)} + \frac{\dot{x}_n h_{n,n-1}}{3.6} \geq \frac{\dot{x}_n \tau}{3.6} + \frac{\dot{x}_n^2}{254(\mu_l \pm i)} + L \quad (2)$$

整理不等式,得:

$$h_{n,n-1} \geq \frac{\dot{x}_n^2 - \dot{x}_{n-1}^2}{70.56(\mu_l \pm i)} + \frac{\dot{x}_n \tau}{\dot{x}_{n-1}} + \frac{3.6 L}{\dot{x}_{n-1}} \quad (3)$$

将雾、雨雪等恶劣天气事件的影响构筑于跟车安全模型中,即驾驶反应时间 τ 包括正常反应时间 τ_s 和雾、雨雪天反应延迟时间 τ_w ,来约束恶劣天气事件对车辆跟车行驶安全约束条件。

$$h_{n,n-1}^s \geq \frac{\dot{x}_n^2 - \dot{x}_{n-1}^2}{70.56(\mu_l \pm i)} + \frac{\dot{x}_n (\tau_s + \tau_w)}{\dot{x}_{n-1}} + \frac{3.6 L}{\dot{x}_{n-1}} \quad (4)$$

式中: $h_{n,n-1}^s$ 为前车 $n-1$ 与换道车辆 n 的跟车行驶安全车头时距,s; \dot{x}_n 为计划变换车道的车辆 n 的车速,km/h; \dot{x}_{n-1} 为目标车道上前车 $n-1$ 的车速,km/h; μ_l 为路面纵向附着系数; i 为路线纵坡; τ_s 为驾驶员反应时间,取2.5 s; τ_w 为雾、雨雪天驾驶反应的延迟时间,s。

3 变道概率模型

变道车辆依次观察相邻车道的车头间距,当相邻车道车头间距大于安全变道临界值时,则变道成功。假定变道车辆的行驶状态与相邻车道行驶车辆的行驶状态相互独立,可推导平均车头时距与交通量之间的关系式如下:

$$\lambda = \bar{h}_v = \frac{3600}{Q} \quad (5)$$

式中: \bar{h}_v 为平均车头时距,s; Q 为高峰小时交通量,辆/h; λ 为指代参数。

假设相邻车道车辆,在车辆 n 进行车辆位置调整时,以车辆 n 与前车 $n-1$ 的最小车头时距满足安全跟驰距离为目标,在高速公路允许的车速范围内,车辆在下式所列的时间范围可通过调整获得足够安全距离。

$$t = \frac{h_{n,n-1}^s \bar{v}_n}{\Delta v} = \frac{h_{n,n-1}^s \dot{x}_n - \dot{x}_n t}{2 \ddot{x}_n t} \quad (6)$$

车辆的到达具有随机性,描述这种随机性的方法有两种。一种是离散型分布,研究在一定时间内到达的交通数量的波动性。另一种是连续型分布,研究车辆间隔时间、车速等交通流参数的统计分布^[3]。研

究车头时距的概率分布为连续型分布,可采用的数学模型有负指数分布、移位负指数分布和爱尔朗分布。本次研究车头时距分布采用二阶爱尔朗分布,车头时距大于 x 的概率密度如下:

$$p(x) = \lambda^2 x e^{-\lambda x}, x \geq 0 \quad (7)$$

若保证前后保持安全距离进行变道,则单次决策变道能够成功的概率分布函数为:

$$p_{lc}(x_n) = p(h \geq x) = e^{-\lambda x} (1 + \lambda x) \quad (8)$$

式中: h 为车头时距,s。

4 基于变道概率模型的临界交通量计算

假设相邻车道行驶着交通量为 Q 的交通流(服从二阶爱尔朗分布)^[2],则变道车辆完成安全变道所需要的车头时距 $h_{n,n-1}^s$ 可由式(4)计算得到,而大于 $h_{n,n-1}^s$ 的车头时距出现的概率可按式(8)算出,则拟变道车辆所能完成安全变道的次数可由下式求得:

$$n = Q \times p(h \geq x) = Q e^{-\lambda x} (1 + \lambda x) \quad (9)$$

将 $h_{n,n-1}^s$ 代入上式的变量 x 即可得到变道车辆所能完成安全变道的次数 n 。反之,给定安全变道的次数 n 值后,通过迭代法可以反算出临界交通量 Q_{\max} 。当实际通行交通量大于临界交通量 Q_{\max} 时,则拟变道车辆无法完成安全变道,将造成交通流紊乱,诱发交通事故,需要进行交通疏解降低实际通行交通量,以确保车辆完成安全变道行为。临界交通量 Q_{\max} 可作为养护工程中进行交通管制的预警值。

5 基于变道成功概率的距离控制

由安全变道概率模型可得变道总时长与变道概率的关系:

$$t = f(x_i, p_{lc}) = f(x_i, Q, h_{n,n-1}^s, x_n, \dot{x}_n, \ddot{x}_n) \quad (10)$$

通过求解 t ,可得到强制变道控制的最小距离,即在施工封闭区前进行安全变道提醒的最短距离:

$$D_{lim} = t \dot{x}_n + x_0 \quad (11)$$

$$x_0 = \frac{\dot{x}_n \tau}{3.6} + \frac{\left(\frac{\dot{x}_n}{3.6}\right)^2}{2g(\mu_l \pm i)} + L \quad (12)$$

式中: x_0 为变道车辆在抵达施工路段进入排队区前驾驶员反应延迟行驶距离、发生制动滑行距离及两车之间的安全间距之和。

6 结论

本文分析了高速公路养护工程交通受阻情况下,车辆强制变道时的模型假定,研究车辆安全变道

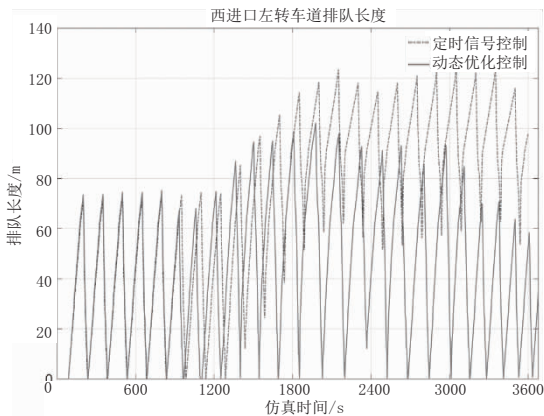


图8 西进口左转车道排队长度对比

在采用现状定时控制方案情况下,西进口过饱和状态下,匝道排队长度达126 m,左转排队长度达124 m,且后续车辆不断到达,匝道排队车辆将会溢出到高架主线。采用动态优化控制模型后,左转车道排队长度逐周期下降,排队长度维持在60 m左右。

(2) 交叉口饱和度对比

不同控制方案交叉口饱和度见图9。

采用定时信号控制方案,在第13~25周期,交叉口饱和度大于1,已处于过饱和状态。

利用本文提出的动态优化模型进行信号配时优化后,交叉口整体饱和度整体稳定在0.8左右,交叉口交通流处于非饱和的较为稳定状态。

5 结论

通过实例验证分析,本文所构建的匝道及下游

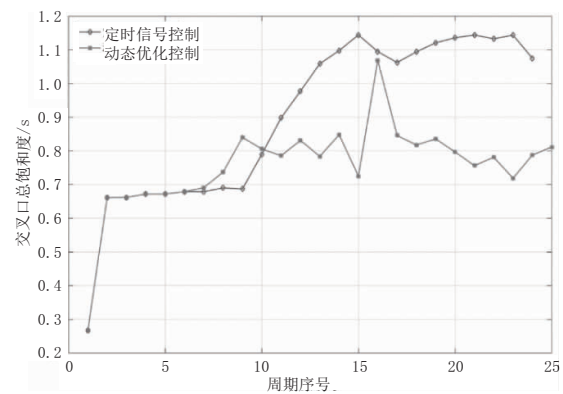
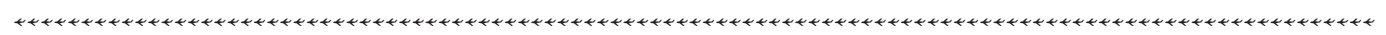


图9 各周期交叉口整体饱和度对比

交叉口 CTM 模型可实时仿真预测和同步更新交叉口的交通流,获取信号优化所需的各个指标;基于本文提出的交叉口的信号控制优化模型,可有效控制交叉口的整体饱和度,使其保持在相对稳定的状态,并有效降低了交叉口整体延误和各进口道及匝道的排队长度,减小了下游交叉口对匝道和快速路主线的交通影响,同时提升了该类型交叉口的整体通行效率。

参考文献:

[1] 龙科军,杨晓光.城市高架道路出口匝道路边型接地纵向位置研究[J].交通信息与安全,2004,22(5):3-5.
 [2] 钱喆.过饱和交通状态下的信号控制关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2014.
 [3] 王力,李志军,修伟杰,等.基于MLD-MPC的快速路出口与辅路协调控制[J].控制工程,2014,21(4):487-490.
 [4] Daganzo C.The Cell Transmission Model. Part I: A Simple Dynamic Representation Of Highway Traffic[J].1993,288.



(上接第225页)

的概率分布及各参数之间的推导公式。在满足安全变道临界间隙的基础上,建立安全变道概率条件下的关系模型,得出以下结论:

(1)跟驰行驶安全约束条件下,考虑天气因素对驾驶反应时间的延迟、路面纵向附着系数、路线纵坡三方面因素对跟车行驶安全车头时距进行公式修正,更符合实际工程情况。

(2)车头时距分布采用二阶爱尔朗分布,代入完成安全变道所需要的车头时距后,可求得变道车辆所能完成安全变道的次数。反之,给定安全变道的次

数后,通过迭代法可以反算出临界交通量,作为养护工程中进行交通管制的预警值。

(3)由安全变道概率模型可求解变道所需总时长和既定变道成功概率条件下的安全变道提醒的最短距离。

参考文献:

[1] JTG H30—2015,公路养护安全作业规程[S].
 [2] 曹荣吉,孙家驷.互通式立交匝道线形质量评价[J].重庆交通学院学报,1998,17(3):44-49.
 [3] 王炜,过秀成,等.交通工程学[M].2版.南京:东南大学出版社,2011.