

文章编号:1005-0523(2014)02-0020-06

山区高速公路立交出口匝道区域可变限速研究

熊鑫,郭忠印,方勇

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:基于山区高速公路立交出口匝道区域线形指标偏低、气候变化频繁的特点,在限速管理上,提出“匝道动态限速,主线联动限速”的可变限速策略。匝道的限速值是依据车辆横向稳定性和停车视距两个约束条件,并考虑路面附着系数和道路能见度的动态变化特性进行确定。主线受出口匝道影响路段的限速值是依附匝道圆曲线路段限速值和实际减速车道长度进行确定。在参数取值的探讨中,区分了纵向附着系数和横向附着系数的不同影响。研究成果可以为山区高速公路的运营安全管理尤其是限速管理提供借鉴。

关键词:山区高速公路;出口匝道;可变限速;附着系数

中图分类号:U412.35+2.12

文献标志码:A

高速公路立交匝道历来是高速公路事故频发路段,据交警对连霍高速与京港澳高速的事故调查统计发现,每年在高速公路匝道发生的交通事故占总事故的30%以上。在对高速公路立交匝道事故发生的具体位置进行分析时发现,发生在出口匝道的事故数约占匝道事故总数的70%^[1-2]。山区高速公路由于受地形、地质、水文、气候等复杂条件的限制,与平原区高速公路相比一般具有两个方面的特点:①线形指标偏低,尤其是在立交区域,容易出现出口匝道减速车道长度不足、匝道圆曲线半径偏小等情况;②气候变化频繁,尤其是发生恶劣气候(冰雪天气、浓雾天气等)的频率相对较高。这就导致山区高速公路立交出口匝道的行车安全问题更加严重。

为保障山区高速公路立交出口匝道区域的行车安全,车速限制是一种较好的手段。在影响车速的几个主要因素中,几何线形指标是“因地制宜”,气候影响因子是“因时而异”,因此就不能采取一成不变的限速对策,可以考虑采取可变限速的限速管理方式。所谓气候影响因子是指路面附着系数和道路能见度两个参数,研究发现气候是通过改变路面附着系数和道路能见度进而影响车速。另外,车速限制标准的制定要科学、合理,标准太高则不能很好地预防事故的发生,车速限制也就失去了意义;标准太低又会降低高速公路的通行能力,造成不必要的经济损失。

在分析山区高速公路立交出口匝道“线形指标偏低,气候变化频繁”的基础上,提出“匝道动态限速,主线联动限速”的可变限速策略,探讨并提出匝道圆曲线路段动态限速值计算模型和主线受出口匝道影响路段联动限速值计算模型,并具体分析了路面附着系数和道路能见度的取值方法,为山区高速公路的运营安全管理尤其是限速管理提供借鉴。

1 山区高速公路立交匝道出口区域可变限速策略

本文仅对直接式出口匝道进行研究,研究的匝道出口区域包括主线受出口匝道影响路段、渐变段、减

收稿日期:2013-10-23

基金项目:山西省科技厅科技项目(2013-1-21)

作者简介:熊鑫(1988—),男,硕士,研究生,主要研究方向为道路交通安全与环境工程;郭忠印(1962—),男,教授,博士,主要研究方向为道路交通安全。

速车道和匝道圆曲线路段4个几何部分,如图1所示。根据我国规范对立交标志设置距离的规定,认为主线受出口匝道影响路段的长度为500 m。

目前我国高速公路立交出口匝道区域的限速方式通常是仅对匝道路段进行车速限制,并以匝道圆曲线路段的设计速度作为固定不变的限速值。当遇到灾害性天气时,这种静态限速的模式并不能很好地保障车辆的安全行驶。另外,在山区高速公路立交出口匝道区域,如果减速车道的长度偏短,它所邻接的匝道的限速值又偏低,往往造成主线车辆经过减速车道减速作用后的速度仍高于匝道限速值,潜在安全隐患。

本文提出一种对山区高速公路出口匝道减速车道进行首尾车速控制的变速限速策略,概括为“匝道动态限速,主线联动限速”。匝道动态限速是相对静态限速而言,是指根据动态变化的道路运行环境设置不同的匝道限速值,“动态”体现的是限速的时间变化性。主线联动限速是指在进行匝道限速的同时还应对主线受出口匝道影响路段进行限速,主线限速值的选取是随着匝道限速值的变化而改变,“联动”体现的是限速的变化依附性。这种限速策略虽然会给主线的通行能力造成一定的损失,却能显著提高出口匝道区域的行车安全,对于交通流量本就不大的山区高速公路而言是一种可行的策略。

在“匝道动态限速,主线联动限速”的实施方案中,需要在匝道圆曲线路段旁设置相关检测设备以检测动态变化的道路运行环境参数,再根据一定的算法可以确定匝道和主线限速值。另外需要在三处位置布设限速标志:①在主线受出口匝道影响路段的起始位置设置可变限速板,内容包含主线限速值和匝道限速值;②在减速车道旁设置可变限速板,内容为匝道限速值;③在主线分流鼻后设置解除限速标志。主控箱用于实时运算匝道与主线限速值并控制可变限速板发布内容的变化,主控箱安放在检测设备旁。

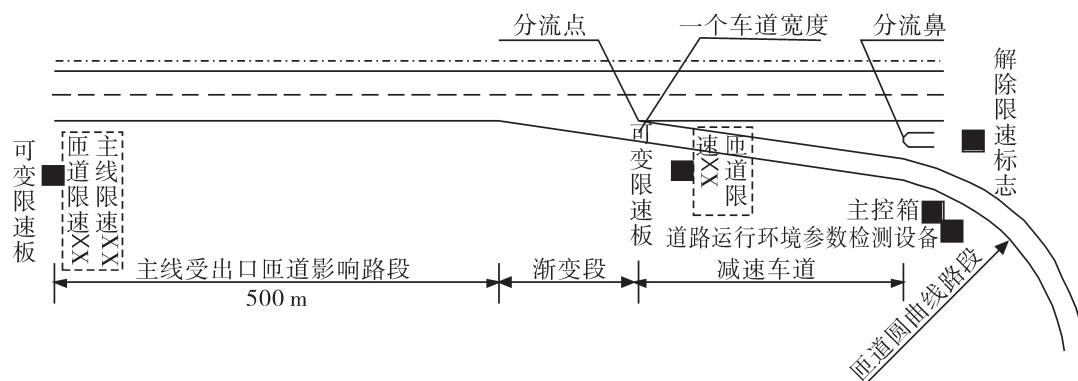


图1 山区高速公路出口匝道区域可变限速方式

Fig.1 Variable speed limit mode in off-ramp region of mountain highway interchange

2 匝道圆曲线路段动态限速值计算模型

在匝道圆曲线路段,可变限速值的选取目的是保证汽车在动态变化的外部因素(道路几何线形指标、道路运行环境状况)作用下仍能保持汽车的安全行驶。所谓安全行驶是指汽车在匝道圆曲线路段行驶时,既要保证汽车本身的行驶稳定性,又要避免汽车与车道前方的障碍物发生碰撞,因此可变限速值的选取应同时满足汽车横向稳定性和停车视距这两个约束条件。

2.1 基于汽车横向稳定性的安全限速 V_H

汽车在山区高速公路立交匝道圆曲线路段行驶时,离心力的作用可能使汽车向外侧横向滑移或横向倾覆。现代汽车在设计时一般轮距较宽、重心较低,汽车在曲线上行驶时,在发生横向倾覆之前先产生横向滑移现象(不考虑汽车装载过高的情况)。因此只需求解横向抗滑移约束条件下的临界车速,作为满足匝道圆曲线路段汽车横向稳定性的安全限速值^[3]。

根据文献^[4]中推导出的满足汽车横向抗滑移稳定条件的约束公式

$$R \geq \frac{v^2}{127(\delta_h + i_h)} \quad (1)$$

该公式是规范^[5]中计算道路平曲线半径的经典公式,求解 v 得到:

$$v \leq \sqrt{127(\delta_h + i_h)R} = V_H \quad (2)$$

式中: v 为车速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; V_H 为车辆安全行驶的临界车速值; δ_h 为路面横向附着系数; i_h 为匝道圆曲线超高; R 为匝道圆曲线半径, m 。

2.2 基于停车视距的安全限速 V_L

停车视距是指同一车道上,车辆行驶时遇到前方障碍物,紧急刹车制动至障碍物前完全停车所需要的最短行车距离,山区高速公路立交匝道主要为单向车流,不必考虑会车的影响,可以根据停车视距模型反算出车辆的安全车速^[6-8]。

根据 AASHTO 停车视距模型

$$0.694v + \frac{v^2}{254(\delta_v - i)} + L_{\text{安}} + L_{\text{前车}} \leq L_v \quad (3)$$

求解关于 v 的一元二次不等式,得到

$$v \leq -88.14(\delta_v - i) + \sqrt{7768.31(\delta_v - i)^2 + 254(\delta_v - i)(L_v - L_{\text{安}} - L_{\text{前车}})} = V_L \quad (4)$$

式中: v 为车速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; V_L 为车辆安全行驶的临界车速值; δ_v 为路面纵向附着系数; i 为纵坡坡度; $L_{\text{安}}$ 为安全距离,一般取 5 m; $L_{\text{前车}}$ 为前车行驶距离,模型中取 5 m; L_v 为路段的可视距离, m 。

2.3 动态参数 δ 与 L_v 的确定方法

2.3.1 路面附着系数 δ

当法向荷载分布在整个接触表面,而滑动摩擦只发生在接触面的部分区域时,作用在接地面上的切向反作用力之和称为附着力。作用在接触面上的切向力之和对整个接触面所承受的法向荷载之比称为附着系数。路面附着系数的大小与车轮荷载、胎压、胎面花纹、胎面橡胶性质、轮胎结构、接地压力分布、速度、道路材料、湿度和路面状态等因素相关,因此尚无法对路面附着系数进行直接测量,只能对路面附着系数的大小进行估算。路面附着系数按车辆行驶方向可以分为纵向附着系数和横向附着系数,研究发现,路面附着系数与轮胎滑移率 s 之间存在着某种固定的变化关系,如图 2 所示^[9]。

纵向附着系数的峰值(即峰值附着系数 K_p)总是出现在滑移率 15%~25% 的范围之内,现代汽车大都配有防抱死系统(ABS),防抱死系统的标准是将制动时轮胎的滑移率控制在 20% 左右。在进行基于停车视距的安全限速计算时,需要将无 ABS 和 ABS 失效的情况考虑在内,取最不利的情况,因此路面纵向附着 δ_v 取滑移率为 100% 时的路面附着系数(即滑动附着系数 K_s)。

横向附着系数随轮胎滑移率 s 的增大而减小,当 $s=0$,横向附着系数最大, $s=100\%$,横向附着系数最小。当车辆在匝道圆曲线上正常行驶时,轮胎滑移率 s 并不会等于 0,在进行基于横向稳定性的安全限速计算时,横向附着系数 $\delta_h = (0.6 \sim 0.7)K_s$ ^[4]。

国内对滑动附着系数 K_s 的估算方法已做过相关试验研究,本文根据 GA/T643-2006^[10]推荐的汽车纵向

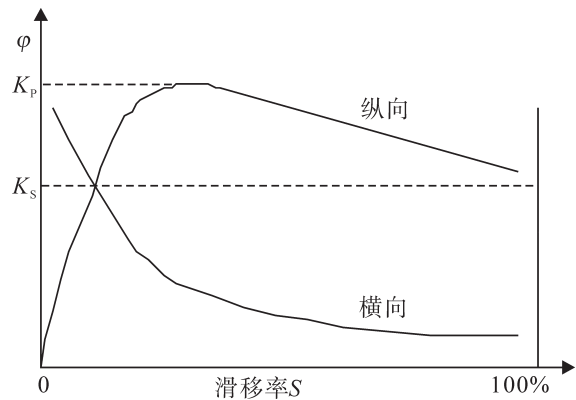


图 2 附着系数与滑移率之间的变化关系^[9]

Fig.2 Relationship between adhesion coefficient and slip rate^[9]

滑动附着系数参考表以及冰雪路面的汽车纵向滑动附着系数参考值表,结合山区高速公路立交出口匝道的特点,归纳出纵向滑动附着系数取值表如表1所示。在实际应用中,就可以根据表1通过检测当前时刻的路面状态来选取对应的路面纵向滑动附着系数值,检测设备可以采用专门的路面状态传感器直接检测,或采用图像传感器进行图像识别。

表1 不同路面状态下纵向滑动附着系数推荐表

Tab.1 Recommended values of longitudinal sliding adhesion coefficient in different pavement conditions

路面状况	K_s
干燥沥青路面	0.65~0.80
潮湿沥青路面	0.45~0.65
积雪路面(积雪上撒上砂、盐)	0.30~0.45
积雪路面(普通雪、粗雪、开始溶解的雪)	0.20~0.30
积雪路面(新雪、接近冰的压实雪)	0.10~0.20
结冰路面	0.05~0.10

2.3.2 道路可视距离 L_v

道路可视距离指的是在同一个车道内,驾驶员所能看到前方物体的最远距离。道路可视距离受匝道圆曲线路段视距以及道路能见度的影响,道路可视距离的确定公式为: $L_v = \min\{L_s, L_n\}$ 。

匝道圆曲线路段视距 L_s 的确定方法为:匝道建成之后,在天气晴好的时候,对匝道圆曲线路段进行视距检查,统计出匝道圆曲线路段各点视距的最小值作为 L_s 的取值。视距检查的手段可以采用全站仪进行人工观测。如果在限速控制时,未有视距检查的数据资料,就只考虑道路能见度的影响,此时 $L_v = L_n$ 即可。

道路能见度 L_n 的确定方法为:通过安装在匝道圆曲线路段附近的道路能见度检测设备检测动态变化的道路能见度状况,检测值作为 L_n 的取值。目前能见度检测设备主要为光学能见度仪,然而传统的能见度仪(大气透射仪和前向散射式能见度自动测量仪)在原理上的缺陷使之并不能完全表征人眼观测的能见度,迄今国内外尚未有能够取代人工观测能见度的、符合能见度定义的能见度自动观测仪问世^[1]。在限速管理中,仍采用光学能见度仪的检测值来近似表征道路能见度 L_n 。

2.4 匝道圆曲线路段可变限速值 V_{ramp} 的确定

综上所述,匝道圆曲线路段允许的最大安全速度为

$$V_{\text{safe1}} = \min\{V_H, V_L, V_S\} \quad (5)$$

式中: V_H 为基于汽车横向稳定性的安全限速; V_L 为基于停车视距的安全限速; V_S 为匝道圆曲线路段的设计车速。

在实际应用中,考虑到电子显示屏内容的简洁性和驾驶员辨认的方便性,限速值采用 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的整数倍为宜,因此匝道圆曲线路段可变限速值为

$$V_{\text{ramp}} = \left\lceil \frac{V_{\text{safe1}}}{5} \right\rceil \times 5 \quad (6)$$

3 主线受出口匝道影响路段联动限速值计算模型

对我国高速公路出口匝道车辆的行驶过程进行分析时发现,直接式减速车道的车辆运行状态与美国 AASHTO 的车辆分流减速模型的假设相当接近^[12]。美国 AASHTO 的假设认为车辆先按主线的平均行车速度由三角段转移车道进入减速车道,然后再减速,第一次采用发动机减速,第二次利用制动器减速,到达减速车道终点时,车速减至匝道的平均行车速度。根据该假设可以得到减速车道长度的计算公式为

$$L \geq \frac{1}{3.6} v_0 t - \frac{1}{2} a_1 t^2 + \frac{1}{25.92 a_2} (v_1^2 - v_2^2) \quad (7)$$

其中: $v_1 = v_0 - a_1 t$, 求解关于 v_0 的一元二次不等式, 得到

$$v_0 \leq 3.6(a_1 - a_2)t + \sqrt{12.96(a_2 - a_1)a_2 t^2 + 25.92a_2 L + v_2^2} = V_M \quad (8)$$

式中: v_0 为主线受出口匝道影响路段的行车速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; V_M 为基于匝道限速值和减速车道长度的主线车辆安全行驶的临界车速值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; a_1 为发动机减速度, 根据 AASHTO 推荐值偏安全选取 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; a_2 为制动器制动减速度, 根据我国汽车驾驶手册中的建议范围 $1.5 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 通常取 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; t 为发动机制动时间, 根据 AASHTO 的研究成果, $t = 3 \text{ s}$; L 为减速车道长度, m ; v_2 为匝道速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, 计算时采用匝道限速值。

因此, 主线受出口匝道影响路段允许的最大安全速度为

$$V_{\text{safe2}} = \min\{V_M, V_S\} \quad (9)$$

其中: V_S 为主线的设计车速。同理, 在实际应用中, 主线受出口匝道影响路段联动限速值为

$$V_{\text{mainline}} = \left[\frac{V_{\text{safe2}}}{5} \right] \times 5 \quad (10)$$

根据上述方法, 表 2 示例出了主线设计车速为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 不同匝道限速值和不同减速车道长度下的主线联动限速标准。

表 2 不同匝道限速值和不同减速车道长度下主线联动限速标准

Tab.2 Linked speed limit standard on mainline under different ramp speed limit values and deceleration lane lengths

减速车道长度/m	匝道限速值/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$									
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
80	55	55	60	60	65	70	70	75	80	85
90	70	75	75	75	80	80	85	85	90	95
100	85	90	90	90	90	95	95	100	100	100
110	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

4 结论

1) 通过对山区高速公路立交出口匝道进行特性分析, 提出了可变限速的控制策略, 即“匝道动态限速, 主线联动限速”, 并提出了山区高速公路立交出口匝道可变限速的实施方案。

2) 基于汽车横向稳定性和基于停车视距两个安全车速约束条件, 提出了匝道圆曲线路段的动态限速值计算模型, 并探讨了模型中两个重要的动态参数路面附着系数和道路能见度的取值方法。

3) 从出口匝道车辆分流减速模型出发, 推出了主线受出口匝道影响路段的联动限速值计算模型, 从模型可以看出, 主线限速值是依附匝道限速值的变化而改变。

4) 提出的“匝道动态限速, 主线联动限速”的限速管理策略还有待于在今后的研究和实践应用中进一步论证。

参考文献:

- [1] 赵江. 匝道线形设计与匝道超高设计的探讨[J]. 湖南交通科技, 2012, 38(1): 31-35.
- [2] 徐秋实. 高速公路互通式立交桥安全设计方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008: 63-66.
- [3] 方勇, 李志勇, 岳志平, 等. 山区公路平曲线路段动态限速与预警方案[J]. 公路工程, 2012, 37(4): 1-5.
- [4] 杨少伟. 道路勘测设计[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2008: 50-52.
- [5] 中华人民共和国交通部. JTG D20-2006 公路路线设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [6] 袁浩, 史桂芳, 黄晓明, 等. 停车视距制动模型[J]. 东南大学学报, 2009, 39(4): 860-862.

- [7] 胡超,胡瑜.高速公路汽车安全距离模型[J].华东交通大学学报,2010,27(5): 63-66.
- [8] 郭忠印,刘天龙,周小焕.基于驾驶员视认性的畸形交叉口安全视距计算[J].华东交通大学学报,2012,29(3): 46-50.
- [9] 绍祖峰.综合附着系数的确定方法及其车速鉴定中的应用[J].湖北警官学院学报,2012(10):42-45.
- [10] 公安部道路交通安全管理标准化技术委员会.GA/T643-2006 典型交通事故形态车辆行驶速度技术鉴定[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [11] 王京丽,刘旭林,雷鸣,等.新型能见度自动观测系统研究[J].电子测量与仪器学报,2013(7):576-603.
- [12] 朱铭.山区高速公路互通立交设计要点研究[D].南京:东南大学,2007: 19-21.

Variable Speed Limit for Off-ramp Region of Mountain Highway Interchange

Xiong Xin, Guo Zhongyin, Fang Yong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the features of poor geometry and labile climate in mountain expressway interchange off-ramp regions, this paper proposes a variable speed limit management strategy called “dynamic speed limit on ramp and linked speed limit on mainline”. The speed limit value on ramp was formulated based on vehicle lateral stability and stopping sight distance, in which road adhesion coefficient and road visibility were considered. The speed limit value on mainline section affected by off-ramp was linked with the speed limit value on ramp and actual length of the deceleration lane. The difference between lateral adhesion coefficient and longitudinal adhesion coefficient was discussed. This research provides a reference for mountain highway operation safety management especially for speed limit management.

Key words: mountain highway; off-ramp; variable speed limit; adhesion coefficient