

高速公路限速策略优化方法与评价模型*

杨雅钧¹ 张 驰^{1▲} 唐 翔³ 亓 鑫³ 赵一静²

(1. 长安大学公路学院 西安 710064; 2. 长安大学运输工程学院 西安 710064;
3. 广西交通设计集团有限公司 南宁 530029)

摘 要: 为解决限制速度值确定不合理、限速方式不适用以及限速区间长度设置不恰当等问题,对驾驶人行驶体验以及限速管理可信度的负面影响,优化了高速公路限速区间最小长度、限制速度值、限速区间划分的确 定方法,进而提出了以安全车速与通行效率为依据的高速公路限速区间优化与评价模型。依据驾驶人视认距 离、限速标志设置前置距离和驾驶人心理稳定距离,标定计算模型中的限速区间最小长度。以行驶速度是否 易发生突变为标准,采用不定长法将不同路段划分为6种组合类型,建立基于不同组合路段的限速预测模型。 采用有序聚类分析法中基于划分和层次的分析方法,以满足限速区间最小长度和交通延误最小2个方面为目 标进行优化限速区间的划分。同时,选取交通冲突率作为表征交通安全的指标,选取交通延误时间作为表征 交通效率的指标,建立评价指标模型;最后通过对比分析优化前后的指标来验证限速区间优化方法的有效性。 以某山区高速公路为对象应用VISSIM开展限速优化仿真实验,结果表明:优化后安全评价模型参数值比 原方案降低了约29.49%,效率评价模型参数值比原方案提高了约21.90%,优化后的高速公路整体安全性以及 通行效率均得到提高。所提出的高速公路限速区间确定方法以速度突变为基准,结合路段的属性及指标特 点,能够优化限速区间长度的制定和区间的划分。

关键词: 交通安全;高速公路;车速限制;聚类分析;限速区间

中图分类号: U412 **文献标识码:** A **doi:**10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.06.004

An Optimization Method and Evaluation Model for Designing Speed Control Zones of Freeway

YANG Yajun¹ ZHANG Chi^{1▲} TANG Xiang³ QI Xin³ ZHAO Yijing²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, 710064, China;

2. College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710064, China;

3. Guangxi Communication Design Group Co., Ltd, Nanning 530029, China)

Abstract: The problems such as unreasonable determination of the speed limit, invalid rate-limiting way, and improper setting of speed limit range can impact the road safety. These problems can impact driving experience and the credibility of speed limit management. A model is developed based on safe speed and traffic efficiency. Then, the minimum length of speed limit zone, the limit of vehicle speed, and the division of speed limit zone are optimized. On this basis, an evaluation model of speed limit zone of freeway is optimized. The minimum length of the speed limit zone is calibrated according to the driver's vision recognition distance, the pre-setting distance of speed limit sign, and the driver's psychological stability distance. These limitations include the drivers' visual distance, the pre-setting distance of speed limit sign, and the drivers' psychologically stable distance. Then, according to whether the speed is prone to sudden change, a road segment is divided into six different types of combination by

收稿日期:2022-04-23

* 国家重点研发计划项目(2020YFC1512005)、四川省交通运输科技项目(2022-ZL-04)、四川省交通运输厅项目(2019-ZL-12)、四川省科技计划项目(2022YFG0048)资助

第一作者简介:杨雅钧(1998—),硕士研究生。研究方向:交通安全与道路仿真。

E-mail:2020221324@chd.edu.cn

▲ 通信作者:张 驰(1981—),博士,教授。研究方向:交通安全与道路仿真。E-mail:zhangchi@chd.edu.cn

the method of variable length. On this basis, the speed limit prediction models of different combination roads are determined. The method based on partition and hierarchy in cluster analysis is used to optimize the partition of speed limit zone from two aspects. The minimum length of speed limit zone and the minimum traffic delay are optimized. At the same time, the traffic conflict rate is chosen as the index of traffic safety. And the traffic delay time is chosen as the index of traffic efficiency. The evaluation index model is established. Then, the validity of the method is verified by the comparison and analysis of the indexes before and after optimization. The simulation experiment of speed limit optimization is carried out on a mountain freeway with VISSIM. The results show that the parameters of the optimized safety evaluation model is reduced by about 29.49%. The parameters of the efficiency evaluation model is increased by about 21.90%. Moreover, the safety and overall traffic efficiency of the optimized freeway are improved. The speed limit zone determination method in this paper is based on the sudden change of the vehicle speed. This method combines the attribute and index characteristics of freeway sections. The proposed optimization method can significantly optimize the length of speed limit zone and the division of the zone.

Keywords: traffic safety; freeway; limit of vehicle speed; cluster analysis; speed limit zone

0 引言

随着我国经济的发展,公路里程迅速增长,高速公路路网的建设与完善也在快速发展,但与此同时也带来了各种安全问题。交通事故受人、车、路、环境等多方面影响,其中车速过高或失控是最主要的因素之一,超速行驶容易造成各种事故,对安全行车影响极大。因此采用限速手段对公路进行安全管理,可以达到“对症下药、精准治理”的效果。由于限速所考虑的因素复杂多样,行业内并未形成共识,缺乏相关规范的专业支撑,如何让限速更加安全、高效、合理,是需要思考的问题。

对于限速区间的优化方法研究,目前主要为限速区间长度值以及限制速度值确定2个方面。在限速区间长度值的研究中,结合道路行驶状况及线形设计参数,2011年,徐婷^[1]通过VISSIM仿真软件结合交通量、道路线形以及车辆行驶速度等数据给出了限速区间的设置长度以及过渡段长度的建议阈值;2017年,李瑞等^[2]通过构建公路安全与效率指数的评价指标模型,结合理论计算和问卷调查对限速区间长度进行了最小值的标定;2020年,季托等^[3]根据高速公路不同断面形式提出分流交织区的限速方案;在设计参数方面,美国、南非等国家通过制定规范的方式对公路中的限速区间最小长度值进行了规定^[4-5]。在限制速度确定值研究中,部分学者针对可变限速对交通运行的影响开展研究,2017年,Zhang等^[6]通过对传统可变限速策略进行改进,提出了入口匝道与上游公路延误间的平衡点;2018年,Papamichail等^[7]提出采用比例积分的可变限速控制算法,同时评估了道路通行能力的有效性;2018年,于德新等^[8]在可变限速控制算法中引入速度限制条件,并采用遗传算法求解出了优化模型;2018年,林莉^[9]为实

现分车道控速的决策参考,提出了不同车型的换道限速模型;2019年,Qian等^[10]通过对道路实测限速效果回归,得到双间隔一致性检查可保证变限速控制最稳定,但限速区间行驶时间最长的结论;2020年,柳本民等^[11]以追尾事故数据为样本,对比不同限速条件下的事故百分比,发现道路限速对事故产生的影响较大。在限速方案可信度研究方面,2017年, Lee等^[12]研究发现大多数驾驶人认为限速信息不同于预期速度,提出限速值的确定需考虑限速可信度这一因素;部分研究考虑不同环境条件下的限速策略,如2018年,张弛等^[13]首次将雾天不同能见度下车辆横向偏移系数作为评价指标,建立雾天的动态限速模型。

综上,目前国内外关于限速区间长度值的研究大多基于驾驶人角度,主要考虑驾驶人满足视认距离的基本条件,仅能保证驾驶人的行驶安全,忽略了通行效率的降低。关于高速公路限速值的研究,大多只针对某一路段或者全线,缺乏对路段间差异性的考虑,结合路段划分提出限速标准。由于我国地形复杂,很多高速公路地处山区,存在较多大型构造物路段和不良线形路段,路段间差异大。例如山区高速公路中的隧道路段,因其行驶环境封闭,驾驶人行驶过程中难以准确估计车速,需采取交通控制措施以增加行驶安全性,但目前研究较多针对每条隧道的单独限速措施,忽略了山区高速公路中隧道占比较高路段间的行车安全性。为了完善目前我国高速公路中限速相关的理论研究及应用方法,笔者从限速区间长度、划分和优化组合这3个方面进行分析,提出1种基于聚类分析的高速公路限速区间确定方法。首先,以满足驾驶人视认标志以及平稳操作为目的,对限速区间最小长度进行了计算分析;其次,以速度突变作为控制因素对高速公路进行了路段分类,并且给出了各个路段限制速度的建议值;然

后,基于有序聚类法对限速路段进行优化组合,保证了限速区间的规范性及合理性;最后,通过对我国某山区高速公路进行实例分析,以现有的限速方案与本文提出的限速方案进行对比分析,论证说明本文提出的确定方法的有效性。

1 限速区间长度研究

JTG/T 3381—02—2020《公路限速标志设计规范》^[29]中对于限速区间的划分仅给出了推荐划分方式,将限速路段划分为一般限速路段以及特殊限速路段,而没有给出不同类型区间限制速度的具体措施;对于区间长度的规定,仅考虑2种类型路段分类提出统一的参考值,仅规定限速路段的长度不宜小于规范值。难以适应我国线形指标复杂多变的山区高速公路。

限速区间长度的研究理论较为成熟,主要研究限速标志设置条件及驾驶人对限速标志的视认等方面,同时驾驶人对限速信息的接收和处理也十分重要,需要充足的时间保障驾驶人对信息进行反应和操作^[14]。

高速公路限速区间长度包括驾驶人对限速标志的视认距离、限速标志设置的前置距离,以及驾驶人的心理稳定距离,见图1。

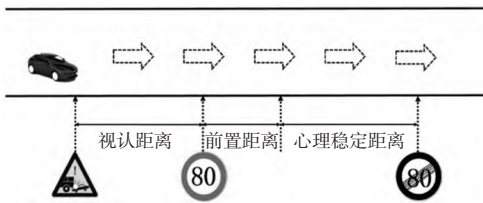


图1 限速区间组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the composition of the speed limit section

1.1 标志视认距离

视认距离为在特定速度下驾驶人能够认清标志内容的最短距离,该距离计算见式(1)^[15]。

$$S = \frac{h}{a} \times 57.3 \quad (1)$$

式中: S 为标志视认距离, m; h 为汉字高度, m; a 为驾驶人视角, °。

相关分析表明:路侧标志最理想的视线偏角为 $10^\circ \sim 15^\circ$ ^[16],见图2。考虑满足最短视认距离,选取偏移视角最大值 20° 来进行视认距离的计算。

运行速度与汉字高度的关系相关规定^[17]见表1。

根据驾驶人偏移视角、运行速度与汉字高度的关系相关规定^[17],采用式(1)计算不同速度限制值情况下限速标志视认距离,其取值见表1。

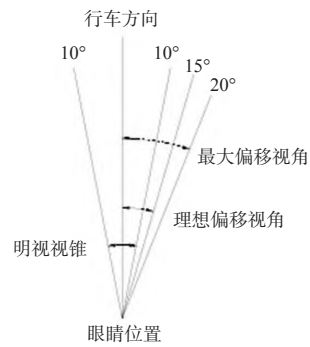


图2 驾驶人视角偏移图

Fig. 2 Driver's angle deviation figure

表1 不同限制速度下标志视认距离

Tab. 1 Sign recognition distance at different speed limits

限制速度 $V_{限}/(\text{km/h})$	汉字高度/cm	视认距离/m
≥ 120	60	171.90
$\geq 100 \sim 120$	50	143.25
$\geq 80 \sim 100$	40	114.60
$\geq 60 \sim 80$	30	85.95
$\geq 40 \sim 60$	20	57.30
< 40	10	28.65

1.2 标志设置前置距离

前置距离表征限速标志应在距离限速区间起点前的一定距离处设置,从而保障驾驶人从前一段进入限速区间路段之前有充足的时间按照限速标志内容进行减速、变换车道或采取其它必要措施。本研究前置距离参考 GB 5768.5—2009《道路交通标志和标线 第2部分:道路交通标志》^[18]中警告标志的前置距离一般值来选取,其取值见表2。

表2 警告标志前置距离一般值

Tab. 2 The general value of the front distance of the warning sign

单位:m

当前区段限制速度/(km/h)	前1个区段限制速度/(km/h)									
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
0	*	*	30	50	80	110	130	170	200	
10	*	*	*	40	60	90	120	160	190	
20	*	*	*	30	55	80	115	150	185	
30	*	*	*	*	50	70	110	140	180	
40	*	*	*	*	40	60	100	130	170	
50	*	*	*	*	30	40	90	120	160	
60	*	*	*	*	*	70	110	140		
70	*	*	*	*	*	60	90	130		
80	*	*	*	*	*	*	40	70	110	
90	*	*	*	*	*	*	*	50	90	
100	*	*	*	*	*	*	*	*	60	
110	*	*	*	*	*	*	*	*	40	

附注:*不提供具体建议值,视当地具体条件确定。

1.3 驾驶人心理稳定距离

当驾驶人驶入限速区间后的一段时间内,驾驶人期望能以平稳的速度(限制速度)行驶,缓解之前一系列行为而带来的紧张疲劳感,另外也为驾驶人适应限速区间的交通环境预留较为充足的时间。

根据交通部公路安全保障工程技术组^[19]在不同行驶速度下,当 $V_{\text{限}} \leq 80 \text{ km/h}$ 、 $80 \text{ km/h} < V_{\text{限}} \leq 100 \text{ km/h}$ 、 $100 \text{ km/h} < V_{\text{限}} \leq 120 \text{ km/h}$ 时,满足驾驶人心理稳定行驶的最短时间分别为40, 72, 144 s, 计算后其取值见表3。

表3 限速区间最小长度

Tab. 3 Speed limit section minimum length

限制速度/ (km/h)	驾驶人心理 稳定距离/m	限速区间 最小长度/m
60	666.67	800
70	777.78	900
80	888.89	1 100
90	1 800	2 000
100	2 000	2 200
110	4 400	4 600
120	4 800	5 000

1.4 限速区间最小长度确定

限速区间的最小长度为标志的视认距离、限速标志设置的前置距离以及驾驶人心理稳定行驶距离最小值的代数和,见表3。为了方便驾驶人遵从限速标志上的信息,按照100 m为最小单位对计算长度进行取整。

2 限制区间划分

研究表明^[20]:发生交通事故时,碰撞车辆瞬时速率变化越大,事故的严重程度也越大,车辆产生的冲击力同样增大,从而发生严重事故的概率也明显上升。因此,为保障行驶车辆的运行安全,需考虑减小车辆的速度差,即降低不同路段间速度的离散性。因此,减少事故发生频率才是高速公路限速管理的根本目的。

根据高速公路事故数据统计以及工程经验分析,高速公路易造成车速突变的路段主要有隧道路段、互通式立体交叉路段、小半径曲线与直线衔接路段、连续下坡路段等,均为高速公路的事故多发点^[21]。因此,本文路段划分的依据是是否会产生车速突变。

2.1 划分方法

在研究路段划分时,我国学者通常采用2种方

法来进行,即定长法与非定长法。考虑到在应用到限速区间划分时,定长法最大的缺陷为不能保证限速区间内路段属性保持一致,与实际情况不相符。且当路段存在隧道、立交等构造物时,盲目划分限速区间会降低模型可信用,见图3。

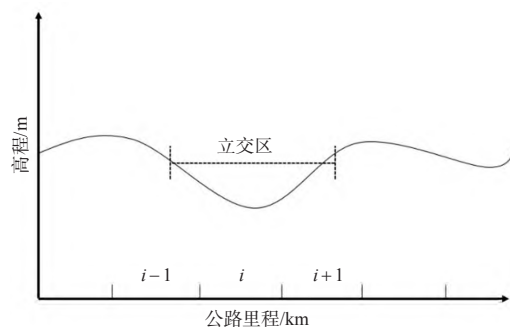


图3 定长法的缺陷

Fig. 3 Defects of fixed length method

考虑定长法存在上述不足之处,不定长法的“不确定性”更能适应公路中存在多种不同属性路段的特点,并且能够满足多种限速值下的不同限速区间长度的要求,因此本文选择不定长法作为路段划分的方法。

2.2 区间划分

GB 5768.5—2017《道路交通标志和标线 第5部分:限制速度》^[23]中规定限制速度应该将道路设计速度作为基准,仅分类对限制速度可提高或减少的值给出了参考值,难以满足随着车辆性能提升,设计速度与实际车速间的差异。

本文采用不定长法将路段分为基本路段、桥梁路段、隧道与隧道群路段、互通式立体交叉路段、长直线接小半径曲线路段、连续下坡路段和复杂组合路段,研究不同路段的限速值确定方式。

2.2.1 隧道与隧道群路段

考虑我国高速公路很多位于山区,山区公路中隧道占比较高,隧道限速成为高速公路限速的难点。目前,我国通常采用设计速度来进行隧道路段的限速管理,因此当隧道洞口前路段线形条件较好时可以结合下述预测模型以及公路设计速度进行限速管理:①平纵线形指标满足3 s一致性要求;②视距条件良好;③隧道内视线诱导、照明设施设置良好。当隧道洞口前路段线形条件受限时(特别是在山区高速公路中),宜采用设计速度进行限速管理,如:①横断面宽度在洞口衔接处突变;②洞口处设置缓和和曲线。

高速公路隧道与隧道群路段的限速取值采用JTG B05—2015《公路项目安全性评价规范》^[17],见表4。

表 4 隧道路段运行速度预测模型

Tab. 4 Prediction model of running speed of tunnel section

车型	特征点	计算模型
小型车	隧道洞口	$v_1 = 0.99v_m - 11.07$
	隧道内	$v_2 = 0.81v_m + 8.22$
	驶出隧道洞口后 100 m	$v_3 = 0.74v_m + 16.43$
大型车	隧道洞口	$v_1 = 0.98v_m - 6.56$
	隧道内	$v_2 = 0.85v_m + 3.89$
	驶出隧道洞口后 100 m	$v_3 = 0.45v_m + 42.61$

附注： v_m 为距离入隧道洞口 200 m 衔接路段单元的速度 (km/h)；除短隧道 (隧道长度 ≤ 500 m) 外，其他隧道均按照上述模型计算。

2.2.2 其余路段

基本路段及互通式立体交叉路段按照 JTG B05—2015《公路项目安全性评价规范》^[17] 中相关规定进行限速计算。桥梁路段按照 GB 5768.5—2017《道路交通标志和标线 第 5 部分：限制速度》^[23] 相关规定采取限速措施。

长直线接小半径曲线路段限速值计算采用方超^[22]给出的运行速度与半径间的关系式，同时考虑到该模型的适用性后对其进行相关修正，见式(2)。

$$v_{\text{曲}} = 16.446 \ln R - 28.517 \quad (2)$$

式中： $v_{\text{曲}}$ 为限速值，km/h； R 为圆曲线半径，m。

连续下坡路段限速值计算采用张驰^[24]利用某高速公路特征断面长大下坡的实测数据，得到该路段货车速度的分布特性，并对现有的模型进行误差分析，最后修正得到有效性较高的预测模型。根据特征断面速度得到的连续长大下坡路段运行速度预测模型，见式(3)。

$$v_{\text{truck}} = \exp[4.1491 + 0.188 \ln G + 0.0366 \times (\ln G)^2 + 0.1241 \ln L - 0.1129 \ln L \ln G] \quad (3)$$

式中： v_{truck} 为大货车的运行速度，km/h； G 为路段 (即车辆行驶处至坡顶) 平均纵坡，(°)； L 为累计坡长，m。

可将该预测模型简化，见式(4)。

$$v_{\text{truck}} = f(G)g(L) \quad (4)$$

对现有的模型进行误差分析，根据实际交通密度值进行修正，见式(5)，修正后得到有效性较高的预测模型，见式(6)。

$$K = \frac{Q}{v} \quad (5)$$

式中： K 为平均交通密度，veh/km； Q 为平均流量，pcu/h； v 为路段平均车速，km/h。

$$v_s = f(G)g(L)e^{-\frac{K}{K_m}} \quad (6)$$

式中： v_s 为限速值，km/h。

本文定义复杂组合路段为：在一定的路线长度范围内，可能产生速度突变的单元路段存在 2 种或 2 种以上的路段。本文中的复杂组合路段包括连续下坡路段+隧道路段、弯坡路段+隧道路段、连续下坡路段+互通式立体交叉路段、弯坡路段+互通式立体交叉路段这 4 种。

针对连续下坡和互通式立体交叉的组合路段，一方面做好连续下坡路段相关限速措施，限速值一般为设计速度或适当提高 10 km/h；另一方面通过设置预告标志提醒驾驶人在坡底存在互通式立体交叉，使得车辆能够减速，提高行车安全性。

连续下坡与隧道的组合路段，存在路基和隧道护栏衔接问题和隧道洞口存在白洞效应，车辆在连续下坡路段行驶速度较高，驾驶人在洞口容易出现制动不及时引发交通事故的安全隐患。高伟^[25]采用不同方法研究连续下坡与隧道组合路段的限速值，得到的结果均以设计速度作为限速值。因此对该组合路段本文以设计速度作为限制速度基准值，并根据相邻限速路段进行调整。

根据前文分析以及相关规范^[26-27]可知：当隧道的圆曲线半径值为 710~1 000 m，纵坡为 3%~4% 时，称为弯坡与隧道组合路段。隧道路段洞口运行速度和道路线形指标关系不大，隧道内车辆行驶过程分为调整阶段、稳定阶段和恢复阶段。结合弯坡路段线形特点和隧道内光线不足的特点，从安全角度考虑，该组合路段以设计速度作为限制速度基准值。

当互通式立交主线范围圆曲线半径值为 700~1 000 m，纵坡为 3%~4% 时，称为弯坡与互通式立交组合路段。该组合路段运行速度特征与互通式立交路段类似，对互通立交范围内的主线路段做速度预测，实验结果为不同情况下的车辆运行速度差值集中在 3~8 km/h 之间。GB 5768.5—2017《道路交通标志和标线 第 5 部分：限制速度》^[23] 中规定将第 85% 位的速度作为基准，可在该速度的基础上取上下 5~10 km/h 范围内的速度值为限制速度。因此弯坡与互通式立交的组合路段参照运行速度预测模型^[17]，限制速度参考值在弯坡路段的速度预测基础上进行 5~8 km/h 的折减。

3 限速区间优化组合

根据前文对不同路段进行了简单的划分后，应该考虑不同区间之间的重新划分、融合，即优化组合的可能性，来满足限速区间的最小长度要求。

视认距离、前置距离及心里稳定距离均是从安全角度考虑,但是在确定限速区间最小长度值时不仅要从安全角度考虑,保证效率性也是科学限速的重要因素,因此需要选择1个表征效率的指标描述通行效率水平。

通常用交通延误、行驶时间、通行能力以及饱和度等来描述道路的通行效率水平。通行能力以及饱和度作为宏观指标,数据获取难度较大且独立性较差,交通延误与行驶时间数据获取较为容易。但行驶时间较难表征通行效率的高低,交通延误表征了车辆行驶过程中受到阻碍所损失的时间,所受到的阻碍主要包括其他车辆干扰。交通延误较低时,驾驶人受到其他车辆影响较小,交通流相对稳定,因此路段的通行效率采用交通延误表征是可取的。

3.1 限速区间优化方法

聚类分析法将样本中的相似个体按照物以类聚的方式划分。有序聚类分析法中基于划分和层次的分析法适用于存在层级关系的样本数据,与限速区段的划分特点相适应,因此本文选用此聚类方法对高速公路的限速区间进行优化。

结合高速公路特点及限速路段设置原则,根据第2节中划分区间的限速值进行区间的初步分段限速。本文所采用的优化限速区间的有序聚类分析法,可以在不打乱次序的条件下按照一定原则对区间进行合并优化。假设高速公路全线路段划分 N 个限速路段,并对每个限速路段进行编号,见图4,令 v_i 表示第 i 个限速路段的限制速度值, l_i 表示第 i 个限速路段的区间长度 ($i=1, 2, \dots, N$)。



图4 限速路段划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of speed limit road segmentation

本文区间划分优化方法存在以下假设:①限速区间内车辆均以限制速度匀速行驶;②限速区间如果发生拥堵能迅速疏散;③车辆在全线路段服从均匀分布;④不考虑驾驶人对限速区间措施的服从概率。

根据以上假设,本文限速区间划分原理为:由前文提出的限速区间划分及限速值初步分段限速,之后根据限速区间最小长度判断各个路段是否需要优化组合,对不满足要求的路段通过与相邻路段直接组合或分割相邻路段重新组合构成新的限速区间,新限速区间应满足长度要求并且交通延误最小,并对优化后的新限速区间采用限速区限速的方式。

分割相邻路段的具体过程如下,其具体步骤见图5,该过程假设第 i 个区间段长度不满足要求。

1) 当相邻限速区间均满足长度要求。分割相邻限速区间 $i-1$ 和 $i+1$,当分割后 $i-1$ 限速区间依然满足最小长度要求时,将分割的单元与限速区间 i 合并为新的限速区间 $i_{i-1,i}$,计算交通延误值为 $d_{i-1,i}$;同理当分割后 $i+1$ 限速区间满足最小长度要求时,进行同样操作,新的限速区间为 $i_{i,i+1}$,交通延误值为 $d_{i,i+1}$ 。比较 $d_{i-1,i}$ 和 $d_{i,i+1}$,选择交通延误较小者作为最终的划分区间。在保证相邻限速区间分割后长度满足要求的情况下形成的新限速区间依然无法满足最小长度要求时,同时分割相邻限速区间 $i-1$ 和 $i+1$,分割方法同上,以交通延误最小作为指标选择最终限速区间。

2) 当相邻限速区间均不满足长度要求。先将限速区间 $i-1$ 与限速区间 i 合并为新的限速区间 $i_{i-1,i}$,计算交通延误值 $d_{i-1,i}$;同理合并限速区间 i 和 $i+1$,新的限速区间为 $i_{i,i+1}$,交通延误值为 $d_{i,i+1}$ 。比较 $d_{i-1,i}$ 和 $d_{i,i+1}$,选择交通延误较小者作为最终的划分区间。若合并后的区间仍不满足长度要求,将合并后的区间再假设为区间 i ,进行相同的区间分割方法。

3) 当相邻限速区间中1个满足长度需求。当限速区间 $i-1$ 长度不满足要求,合并限速区间 i 和 $i-1$,新的限速区间为 $i_{i-1,i}$;当限速区间 $i+1$ 长度不满足要求,合并限速区间 i 和 $i+1$,新的限速区间为 $i_{i,i+1}$ 。

3.2 限速区间优化方法有效性分析

当完成高速公路限速区间划分及其优化组合后,需对其进行优化前后的指标对比分析来验证所提出方法的有效性。在分析指标的选择上,本文同样从安全以及效率2个方面来进行。目前研究中主要的安全评价指标为:交通事故率、冲突率,速度离散性以及车头间距与车头时距;效率评价指标为:交通延误、车辆行驶时间、道路通行能力和饱和度。根据指标的适用性及代表性,具体选取结果见表5。

因此,在交通量一定的前提下,根据各个指标间的关系建立了对应的交通安全以及效率评价指标模型,由于选取的安全评价指标与交通安全间的关系均为负相关,建立式(7);根据所选效率评价指标与交通效率间的正、负相关关系,建立式(8)。其中,速度离散性指标根据郝亮^[28]的相关成果,以相对速度差来表征路段的速度离散程度,其定义见式(9)。

$$f_{安} = V_{R85-15} \times Q \times T_C \quad (7)$$

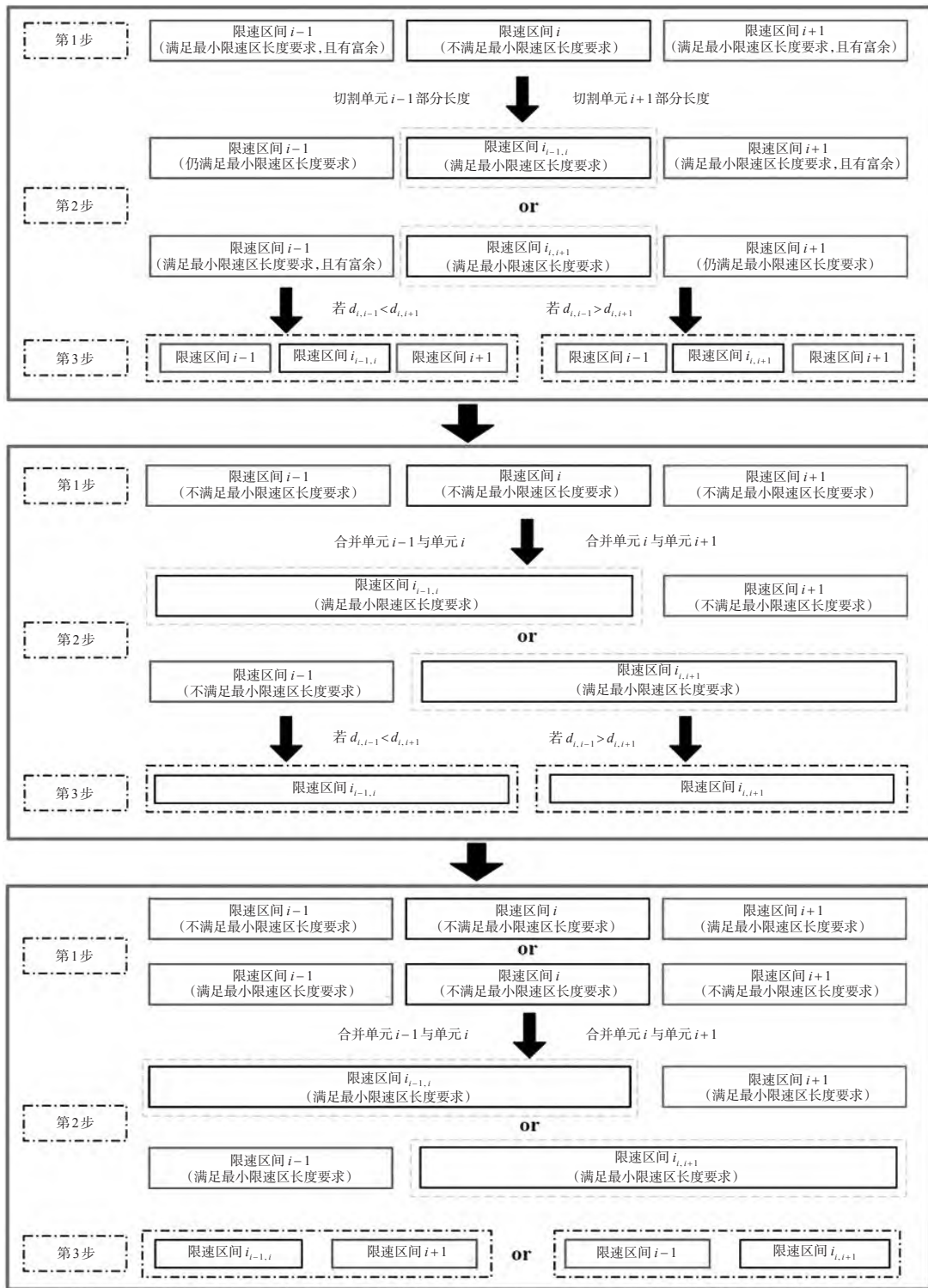


图5 限速路段划分优化方法流程图

Fig. 5 Flow chart of optimization method for speed limit road segmentation

$$f_{\text{效}} = \frac{Q \times \bar{V}}{t \times d \times \rho_t} \quad (8)$$

$$V_{R85-15} = \frac{V_{85} - V_{15}}{\bar{V}} \quad (9)$$

式中: $f_{\text{安}}$ 为交通安全评价指标; V_{R85-15} 为相对速度差, km/h; Q 为路段交通量, pcu/h; T_c 为交通冲突

数; $f_{\text{效}}$ 为交通效率评价指标; \bar{V} 为路段平均速度, km/h; t 为路段行程时间, s; d 为路段交通延误, s; ρ_t 为大型车比例, %; V_{85} 为路段第 85% 车速, km/h; V_{15} 为路段第 15% 车速, km/h。

当 V_{R85-15} 大于 20 km/h 时, 应考虑按 JTG/T

表5 分析指标选取
Tab. 5 Analysis index selection

分析指标	选取结果	备注
交通事故率	剔除	获取较难,成因复杂
安全 交通冲突率	保留	
指标 速度离散性	保留	
车头间距与车头时距	剔除	适用于跟驰状态交通流
交通延误	保留	
效率 行驶时间	剔除	较难表征通行效率的高低
指标 通行能力	剔除	影响因素较多
饱和度	剔除	受限速影响程度有限

3381—02—2020《公路限速标志设计规范》^[29]设置必要的过渡段。

4 实例分析

用于实例分析的高速公路应具有较长的里程数、具有一定的复杂组合路段和设计指标不宜过高几个特点,因此本次分析选用的高速为我国西南某山区高速公路,其设计指标见表6。

表6 设计指标参数
Tab. 6 Design index parameters

指标	参数	备注
设计标准	双向4车道	
设计速度/(km/h)	80	
路线长度/km	123	
最小平曲线半径/m	420	规范中圆曲线最小半径一般值400 m
最大纵坡/%	4	纵坡大于3%共8处,较为集中
连续长下坡平均坡度/%	2.8, 2.6	存在2处连续长下坡,共计16 km

虽然该高速公路未突破规范规定要求^[26],但是在实际运营过程中道路上的运行速度达到100 km/h,

某些路段运行速度甚至达到了120 km/h,因此指标采用存在一定的安全隐患。统计该高速公路2017—2019年共计309起交通事故,发现事故形态主要是制动不及时,车辆撞向路侧和中分带护栏,主要原因是车辆超速导致的。

经过实地调研,该高速公路限速统计见表7。

表7 限速统计表(部分)
Tab. 7 Speed limit statistics table (part)

限速 起点桩号	限速 终点桩号	区间 长度/km	限速 标志/(km/h)
K341+950	K343+120	1.17	120
K343+120	K344+250	1.13	100
K344+250	K345+100	1.85	80
K345+100	K352+800	6.7	120
K352+800	K353+940	1.14	80
K353+940	K354+900	0.96	60
K354+900	K356+500	1.6	120
K356+500	K357+780	1.28	100
K357+780	K358+200	0.44	80
K358+200	K368+000	9.8	120
K368+000	K369+170	1.17	60
∴	∴	∴	∴
K459+280	K460+900	1.62	100
K460+900	K461+920	1.02	80
K461+920	K464+000	2.08	120

全线共设计44个限速区间,一方面制定限速方案时没有考虑限速区间长度的问题;另一方面限速区间过于密集,影响驾驶人驾驶体验,也增加了行车操作难度。因此该高速公路事故频发的原因除了自身建设条件有限以外,限速方案的不合理也是重要原因。

根据所提出的模型对该山区高速限速路段进行梳理及优化,对比相邻区间组合前后的交通延误值重新对区间进行划分,优化后的限速区间见表8。

表8 优化后的限速区间
Tab. 8 Optimized speed limit section

限速起点桩号	限速终点桩号	区间长度/km	限制速度/(km/h)	备注
K341+500	K349+200	7.7	120	
K349+200	K356+880	7.68	100	短隧道、立交
K356+880	K369+400	12.52	120	
K369+400	K373+300	3.9	100	立交、弯坡路段
K373+300	K377+500	4.2	80	弯坡路段、中隧道
K377+500	K381+750	6.25	90	短隧道、立交
K381+750	K391+800	9.05	80	连续小半径曲线接连续下坡
K391+800	K400+400	8.6	100	立交、短隧道、纵坡路段
K400+400	K435+600	35.2	120	
K435+600	K441+800	6.2	100	短隧道、纵坡路段
K441+800	K452+000	10.2	80	中隧道、连续下坡
K452+000	K458+000	6.0	100	中隧道、短隧道
K458+000	K464+000	6.0	120	

应用 VISSIM 仿真软件对该高速公路限速方案进行仿真模拟,按照 1:1 比例尺进行建模,对该高速公路 3% 以上的纵坡进行了修正。并将限制速度作为期望速度,在路段的起点、中间位置及终点设置数据采集点,并针对较长区间路段及线形指标变

化较大的路段进行适当加密。仿真参数设置为:车道宽度 3.75 m,单向 4 车道,路段长度 123 km。仿真车辆参数见表 9,数据输出起始节点选择仿真的第一辆车到达路段终点时刻,仿真 1 h 后结束仿真试验。

表 9 仿真车辆参数

Tab. 9 Simulation vehicle parameters

类型	总长/m	总宽/m	轴距/m	期望速度/(km/h)	最大减速度/(m/s ²)	最大加速度/(m/s ²)
小客车	6	1.8	3.8	80~120	6.0	2.0
大货车	12	2.5	6.5	80	5.5	1.0

对该高速公路进行实地调研后,选取 7 个特征断面,测得其平均小时交通量约为 1 082 辆/h,见表 10。选择小客车、大货车作为代表车型,大型车比例为 17.47%,其余车型均已根据 JTG D20—2017《公路路线设计规范》^[26]中的车辆折算系数进行换算。

表 10 实测小时交通量统计

Tab. 10 Measured hourly traffic volume statistics

单位: 辆/h

桩号	大货车	小客车	总计
K355+600	26	126	152
K393+500	32	98	130
K410+350	24	192	216
K420+350	24	24	54
K423+850	14	62	76
K448+400	24	196	220
K459+900	16	218	234

运用 VISSIM 进行仿真模拟,其操作界面、仿真参数设置见图 6。

分析 VISSIM 输出的数据,并把车辆行驶轨迹输出后利用 SSAM 交通冲突安全分析软件处理,原限速方案的路段仿真及交通冲突分析结果见图 7。

优化后方案的路段仿真及交通冲突分析具体结果见图 8 和表 11。

根据前文提出的有效性评价模型,原限速方案的安全评价模型参数及效率评价模型参数为

$$f_{安} = V_{R85-15} \times Q \times T_c = 0.242 \times Q \times 104 = 25.168Q \quad (10)$$

$$f_{效} = \frac{Q \times \bar{V}}{t \times d \times \rho_t} = \frac{93.3 \times Q}{4\,680.5 \times 18.9 \times \rho_t} = 0.001\,05 \frac{Q}{\rho_t} \quad (11)$$

优化后方案的安全评价模型参数及效率评价模型参数为

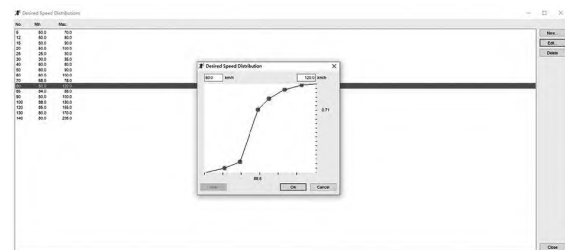
$$f_{安} = V_{R85-15} \times Q \times T_c = 0.195 \times Q \times 91 = 17.745Q \quad (12)$$

$$f_{效} = \frac{Q \times \bar{V}}{t \times d \times \rho_t} = \frac{97.3 \times Q}{4\,631.5 \times 16.4 \times \rho_t} = 0.001\,28 \frac{Q}{\rho_t} \quad (13)$$

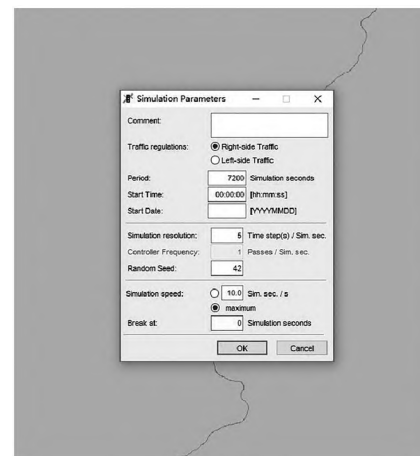
安全评价模型数值越小越安全,而效率评价模型数值越大效率越高。分析可知:安全评价模型参数值优化后比原限速方案降低了约 29.49%,效率评



(a) 实验公路



(b) 仿真界面



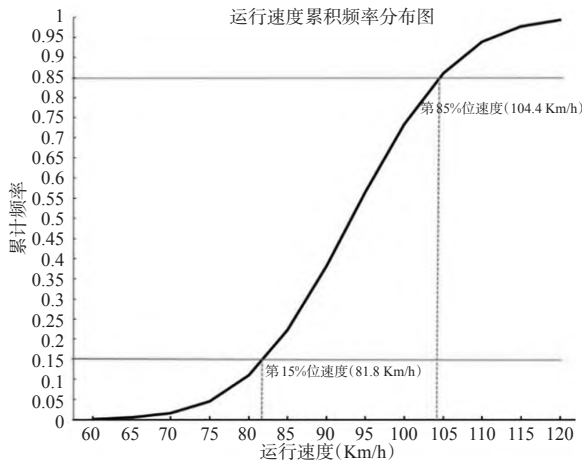
(c) 参数设置

图 6 VISSIM 模拟仿真

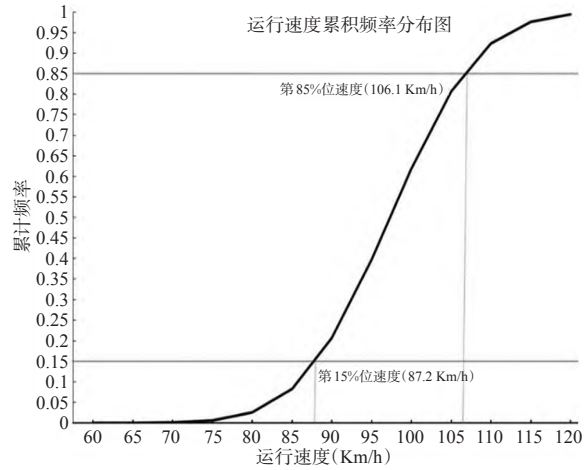
Fig. 6 The VISSIM simulation

价评价模型参数值优化后比原限速方案提高了约 21.90%。

本文以是否造成路段行驶速度突变作为划分依据,将路段分为不同属性的限速单元,采用有序聚类方法对其限速段进行聚类整合,并基于交通延误最



(a) 运行速度累积频率分布图



(a) 优化后运行速度累积频率分布图

SSAM3

Configuration | Conflicts | Summary | Filter | test | Map

NO FILTER APPLIED

Summary Group	SSAM_Measure	Min	Max	Mean	Variance
Unfiltered-All F...	TTC	0.00	3.50	1.90	1.95
Unfiltered-All F...	RET	0.00	2.40	0.72	0.40
Unfiltered-All F...	MaxS	5.37	31.46	24.71	24.67
Unfiltered-All F...	DeltaS	0.04	22.00	5.78	23.35
Unfiltered-All F...	DR	-6.66	0.13	-1.23	3.48
Unfiltered-All F...	MaxD	-6.91	0.13	-3.69	4.82
Unfiltered-All F...	MaxDeltaV	0.02	13.03	3.87	12.19
Unfiltered-All F...	P(U&A)	1.00	1.00	1.00	0.00
Unfiltered-All F...	mTTC	99.00	99.00	99.00	0.00
Unfiltered-All F...	mRET	99.00	99.00	99.00	0.00

(b) 交通冲突分析

图7 原限速方案

Fig. 7 Original speed limit scheme

SSAM3

Configuration | Conflicts | Summary | Filter | test | Map

NO FILTER APPLIED

Summary Group	SSAM_Measure	Min	Max	Mean	Variance
Unfiltered-All F...	TTC	0.00	3.50	1.61	1.83
Unfiltered-All F...	RET	0.00	2.40	0.66	0.45
Unfiltered-All F...	MaxS	7.11	31.46	24.34	21.94
Unfiltered-All F...	DeltaS	0.29	22.00	6.58	20.71
Unfiltered-All F...	DR	-7.86	0.13	-1.62	4.86
Unfiltered-All F...	MaxD	-7.86	0.13	-3.48	5.45
Unfiltered-All F...	MaxDeltaV	0.15	13.03	4.48	11.39
Unfiltered-All F...	P(U&A)	1.00	1.00	1.00	0.00
Unfiltered-All F...	mTTC	99.00	99.00	99.00	0.00
Unfiltered-All F...	mRET	99.00	99.00	99.00	0.00

(b) 交通冲突分析

图8 优化后方案

Fig. 8 Optimized scheme

表 11 限速方案对比

Tab. 11 Speed limit plan comparison

方案	行程时间/s	交通延误/s	平均速度/(km/h)	相对速度差/(km/h)	交通冲突数/起	
					换道冲突数	追尾冲突数
原限速方案	4 680.5	18.9	93.3	0.242	20	84
优化后限速方案	4 631.5	16.4	97.3	0.195	21	70

小方法进行限速单元的优化。通过对比分析各指标,可得优化后该高速行程时间变短,交通延误减少并且平均速度提高,这表明优化后的高速公路车辆行驶的整体通行效率提高;优化后该高速相对速度差变小,这表明优化后的高速公路整体的速度连续性得到提高,速度离散性减小;优化后交通冲突数变小,其中换道冲突数大致没变,追尾冲突数大大减少,这表明优化后的高速公路整体的安全性得到提升。综上所述,优化后的高速公路无论是安全性还是通行效率均得到增强,这表明所提出的模型方法是可行有效的。

5 结束语

针对目前高速公路限速标准存在的问题,分别

对限速区间长度取值、限制速度确定以及限速区间划分优化进行研究,综合提出了一套高速公路限速区间确定方法。

1) 通过对标志视认距离、标志设置前置距离以及驾驶人稳定行驶距离进行分析,综合确定了高速公路限速区间长度的最小值;以行驶速度易发生突变为标准对路段进行划分,并确定各路段的限速值;基于有序聚类分析法结合最小交通延误值重组限速区间,优化了各限速区间的组合。

2) 根据我国某山区高速限速方案,采用本文的模型方法进行优化,利用 VISSIM 软件仿真分析,经对比后发现安全方面优化后模型参数值降低了约 29.49%,效率方面优化后模型参数值提高了约 21.90%,结合各指标变化表明经过优化后高速公路

整体的安全性和通行效率均得到提高。

3) 本文选择小客车、大货车作为代表车型进行研究,用VISSIM对该高速公路限速方案进行仿真模拟,模拟的车辆行驶轨迹难免会与实际情况有出入。后续应进一步分析不同车型的行驶特征,深入研究高速公路限速区间长度和区间的划分的优化方法。

本文建立的高速公路限速区间确定方法,优化了在制定限速区间长度以及限速区间划分方面相关问题,为我国高速公路限速值制定不科学、限速区间划分不合理等问题提供了参考。

参考文献

References

- [1] 徐 婷. 公路限速区划分与限速梯级过渡段设置研究[D]. 北京:北京工业大学,2011.
XU T. Speed zone division and speed transition zone setting research[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 李 瑞, 马荣国, 梁国华, 等. 高速公路限速区段安全与效率优化协调模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 158-164.
LI R, MA G R, LIANG G H, et al. Optimization and coordination model for speed limit section in freeway[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 158-164. (in Chinese)
- [3] 季 托, 周 颖, 吕能超. 多车道高速公路分流交织区交通流特性与交通组织策略[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(2): 126-136+152.
JI T, ZHOU Y, LV N C. Traffic flow characteristics and traffic organization strategy in a diversion and interleaving area of multi-lane freeways[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(2): 126-136+152. (in Chinese)
- [4] Federal Highway Administration. Manual on uniform traffic control devices 2003[S]. Washington D. C. : National Committee on Uniform Traffic Control Devices, 2003.
- [5] RIBBENS H. Guidelines for setting speed limits[R]. South Africa: National Institute for Transport and road Research, 1986.
- [6] ZHANG L, ZHANG L, HALE D K, et al. Cycle-based variable speed limit methodology for improved freeway merging[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(10): 632-640.
- [7] PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIU M, STAMATAKI I. Feedback traffic control at highway work zones using variable speed limits[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(9): 329-336.
- [8] 于德新, 刘 珩, 郑黎黎, 等. 高速公路瓶颈区域可变限速控制方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 120-125.
YU D X, LIU H, ZHENG L L, et al. Variable speed limit control method for freeway bottleneck area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 120-125. (in Chinese)
- [9] 林 莉. 多车道高速公路速度限制值确定方法研究[D]. 南京:东南大学,2018.
LIN L. Research on determination method of speed limits of multilane freeway[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [10] QIAN G B, LEE J. An analysis of threshold criteria and conditions for variable speed limit deactivation[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(4): 1786-1796.
- [11] 柳本民, 闫 寒. 基于SVM事故分类的连环追尾事故影响因素分析[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(1): 43-51.
LIU B M, YAN H. An analysis of influencing factors of multi-vehicle rear-end accidents based on accident classification of SVM[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(1): 43-51. (in Chinese)
- [12] LEE Y M, CHONG S Y, GOONTING K, et al. The effect of speed limit credibility on drivers' speed choice[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2017, 45: 43-53.
- [13] 张 驰, 贺亚龙, 黄 星, 等. 雾天不同能见度条件下高速公路限速建议值研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(5): 25-33.
ZHANG C, HE Y L, HUANG X, et al. A study on speed limit of expressways under different visibility on foggy weather[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(5): 25-33. (in Chinese)
- [14] 马艳丽. 驾驶人驾驶特性与道路交通安全对策研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
MA Y L. Study on characteristics of driving and its countermeasures to road safety[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [15] 戴 权, 王 芳, 倪安宁. 认知过程中交通标志视认有效性影响因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(12): 57-60.
DAI Q, WANG F, NI A N. Influence factors of traffic sign comprehension effectiveness in cognitive process[J]. China safety science journal, 2009, 19(12): 57-60. (in Chinese)
- [16] 张 瑾. 道路交通标志标线警示能力研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2005.
ZHANG J. Research on warn ability of the road traffic sign and marking[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路项目安全性评价规范: JTG B05—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for highway safety audit: JTG B05—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)

- [18] 国家标准化管理委员会. 道路交通标志和标线 第2部分: 道路交通标志: GB 5768. 5—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Road traffic signs and markings-Part 2: Road traffic signs: GB 5768. 5—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [19] 交通部公路安全保障工程技术组. 公路安全保障工程实施技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Technical Group of Highway Safety Enhancement Project. Ministry of Communications, Guideline for implementation of highway safety enhancement project[M]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese)
- [20] 陈敏. 公路限速值控制探析[J]. 科技与创新, 2015(20): 38-39.
CHEN M. Analysis on control of highway speed limit value[J]. Science and Technology & Innovation, 2015(20): 38-39. (in Chinese)
- [21] 贺玉龙, 孙小端. 公路速度限制与速度控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
HE Y L, SUN X D. Highway speed limit and speed control technology[M]. Beijing: People's Transportation Publishing House, 2011. (in Chinese)
- [22] 方超, 袁方, 宗卫锋, 等. 双车道公路长直线接小半径曲线路段限速研究[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 160-164+179.
FANG C, YUAN F, ZONG W F, et al. Research on speed limit of long straight line combined with sharp curve of dual lane highway[J]. Highway Engineering, 2018, 43(4): 160-164+179. (in Chinese)
- [23] 国家标准化管理委员会. 道路交通标志和标线 第5部分: 限制速度: GB 5768. 5—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Road traffic signs and markings-Part 5: Speed limit: GB 5768. 5—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [24] 张驰, 任士鹏, 王博等. 长大下坡路段货车运行速度特性及预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 38-49.
ZHANG C, REN S P, WANG B, et al. Speed characteristics and prediction of trucks on long and steep downgrade sections[J]. Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition), 2022, 50(3): 38-49. (in Chinese)
- [25] 高伟. 山区高速公路长下坡隧道群限速问题研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
GAO W. Study on the speed limit of long steep downgrades and freeway tunnels[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国交通部. 公路路线设计规范: JTG D20—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design specification for highway alignment: JTG D20—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017. (in Chinese)
- [27] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范 第一册 土建工程: JTG 3370. 1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway tunnels Section 1 Civil engineering: JTG 3370. 1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)
- [28] 曲大义, 郝亮, 陈秀锋, 等. 车流速度离散对运行安全的影响研究[J]. 青岛理工大学学报, 2013, 33(6): 1-5.
QU D Y, HAO L, CHEN X F, et al. Speed difference influence on safety of vehicle in motion[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2013, 33(6): 1-5. (in Chinese)
- [29] 中华人民共和国交通部. 公路限速标志设计规范: JTG/T 3381—02—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design Specification for Highway Speed Limit Signs: JTG/T 3381—02—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)