

高速公路平曲线半径设置合理性数值仿真

冷慧康^{1,2}, 黄兵³, 程起光³, 阳恩慧^{1,2}, 邱延峻^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 道路工程四川省重点实验室; 3. 四川雅康高速公路有限责任公司)

摘要:中国长久以来将设计速度作为公路路线设计的关键性指标,针对这种设计方法中可能存在的安全性、舒适性缺陷,该文依托雅康高速公路工程实例,探讨了汽车模型和速度控制模型及其参数的选择对路线方案舒适性及安全性的影响规律,建立了基于预瞄跟随理论的复杂路段行车仿真分析模型,通过系统理论分析,获得不同最大控制速度(期望速度)下,小汽车的速度差、横向和轴向加速度沿路线的变化规律,对雅康高速公路的特殊路段选线设计方案进行了评估。结果表明:在设计速度为80 km/h的高速公路上,半径大于800 m的平曲线不宜设置过多;在半径小于800 m的平曲线上至少应做100 km/h限速处理。研究成果可供类似高速公路复杂路线的设计与线形评价参考。

关键词:藏区高速公路; 复杂路线; 仿真分析; 安全评价

1 前言

20世纪50年代以来,中国将设计速度作为公路路线设计的标准。在JTG B01-2014《公路工程技术标准》和JTG D20-2017《公路路线设计规范》中,规定了不同等级公路的设计速度,并将其视为确定公路设计要素的最关键参数,一旦设计速度确定了,其他设计要素诸如:车道宽度、圆曲线半径、纵坡坡度、竖曲线半径、停车视距等就必须与之匹配。然而,多年的实践和研究表明,这种方法存在一些不足。首先,此方法仅给出了选定设计速度下的其他设计要素最小指标,并没有给出其上限。因此,在设计一条公路时,设计者可选范围太大,仅能凭经验来设计,这种设计方法的指导性有限;其次,此方法将各种公路设计要素完全独立开来设计,没有考虑多种设计要素组合的合理性以及整体的一致性;最后,在实际行车过程中,驾驶员不会按照设计速度行驶,实际车速会根据驾驶员的个性、道路线形、周围环境和汽车性能等因素的不同而不同,在条件允许的情况下,驾驶员往往会采取高于设计速度的车速行驶,当驾驶员从高指标路段驶入低指标路段时,过高的车速会带来较差的行车舒适性,甚至引发交通事故。公路一旦建成,要改变公路路线几乎是不可能的,因此,如何合理、准确地评价公路线形一直是各国研究的重点之一。

目前,国内外评价公路线形优良的方法主要有:运用公路透视图,判断路线的平纵线形组合是否连续,立体线形对驾驶员视线的诱导是否良好;根据交通事故的统计资料,通过回归分析,建立起各线形指标与交通事故发生率之间的关系;将公路路段上第85%位的实际车辆运行速度 V_{85} 作为设计速度,以此来检验线形设计要素是否与实际行驶速度搭配不合理;考虑平、纵、横三个方面与横向加速度变化率之间的关系,从而实现线形几何要素进行控制。

预瞄跟随理论是由郭孔辉等提出,该理论描述了根据未来输入信息进行跟随控制系统的特性。一般来说合格的驾驶员开车行为是满足预瞄跟随理论。熟练的驾驶员在驾驶汽车时会对前方路线进行判断,对汽车预期行驶轨迹进行决策,根据对自身特性和汽车性能的了解,对驾驶行为进行调整,使汽车跟随运动能够基本复现出预期行驶轨迹主要趋势这一特性。驾驶员对汽车速度的控制实质上是由驾驶员对预期路径跟随运动决定的。

该文以雅康高速公路为依托,该公路工程位于四川盆地西缘山地,路线跨越极高山、高山、中山、低山、丘陵、河谷阶地、浅丘、平坝等地貌形态,布线条件受限,具有线形迂回曲折,路线高差大、长大纵坡多、桥隧比例大等特点,在地理位置和复杂地形的共同作用下,雅康高速公路沿线的气候,既有地带性,又具备立体分布的属性。文中选取具有代表性的复杂路段,运用预

瞄跟随理论建立复杂道路模型,模拟驾驶员实际驾驶行为,借助 Carsim 软件进行仿真运算。依据纵向、横向加速度为行车舒适性控制因素,模拟在不同最大控制速度即期望速度下,汽车在复杂道路上的行驶速度,对路线设计合理性进行分析研究。

2 建模仿真

2.1 汽车模型和参数选择

Carsim 软件结合了传统的车辆动力学与现代多体动力学建模方法,将前后悬架均为独立悬架的车辆抽象为共 27 个自由度的 10 个刚体,将车辆模型分为车体、空气动力学、传动系、制动系、转向系、悬架和轮胎共 7 大子系统,使用者只需输入 7 大子系统所包含的特性参数或曲线,软件会利用求解器根据车辆特性和初始条件进行求解。

目前,雅康高速公路刚建成通车,交通组成主要是小型汽车,因此该文采用 Carsim 软件中自带的 C 型小汽车模型,具体参数见表 1。

表 1 汽车参数

参数名称	单位	参数值
轴距	mm	2 910
轮距	mm	1 675
整车质量	kg	1 270
转动惯量 I_{xx}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	536.6
转动惯量 I_{yy}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	1 536.7
转动惯量 I_{zz}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	1 536.7
前悬挂刚度	N/mm	27
后悬挂刚度	N/mm	30

2.2 速度控制模型和参数选择

文中选取 Carsim 数据库中 Target Speed from Path Preview 作为速度控制模型,此模型的理论基础为预瞄跟随原理。

速度控制的本质是对速度的调整,而速度的调整是通过加速度来实现的。当行驶速度符合驾驶员所期望的速度时,不需要调整;当行驶速度没有达到驾驶员所期望的速度时,就需要通过加速度来调整行驶速度。在 Carsim 软件中,通过式(1)来获取目标加速度:

$$A_x = K_p \times V_{err} + KI \times I_{err} + K_{p3} \times V_{err}^3 \quad (1)$$

式中: A_x 为目标加速度; K_p 、 KI 、 K_{p3} 为增益系数; V_{err} 为期望速度与实际速度之差; $I_{err} = \int V_{err} dt$ 。

该模型中汽车的目标速度主要受使用者设置的最

大控制速度即期望速度 V_e 、横向加速度 a_y 、轴向加速度 a_x 共 3 个因素控制。在模拟中,软件将自动调节目标速度的大小,使其在沿着道路行驶的同时,满足 5 个控制因素的要求,以达到控制速度的目的。

横向加速度是汽车在平曲线上行驶产生的,其值大小通常被用来作为评价行车舒适性的重要指标。根据各国对横向加速度的取值,结合雅康高速公路处于四川盆地到青藏高原过渡段,地势复杂多变的实际情况,在保证路线舒适性良好的情况下,选取 1.0 m/s^2 作为横向加速度控制指标。

轴向加速度一般在线形发生变化时产生,比如由直线变为曲线。若驾驶员在由直线驶入曲线时,在直线上的行驶速度与在曲线上行驶的期望速度不一致,驾驶员会采取加速或减速措施,以使行驶速度达到期望速度,此时行车舒适性与加速度有关。在保证路线舒适性良好的情况下,采取高建平、郭忠印提出的基于加速度线形评价指标作为轴向加速度控制指标,其中轴向加速度分别取加速 0.9 m/s^2 , 减速 -1.3 m/s^2 。

为协调横向加速度和轴向加速度对速度的控制, Carsim 中设置了 0、1、2 共 3 种限制等级。等级 0 表示横向加速度和轴向加速度不相关,目标速度的调整仅通过横向加速度或轴向加速度,两者不能同时起作用;等级 1 表示横向加速度和轴向加速度之间为线性相关,软件通过这种线性组合来调整速度,但没有充分结合摩擦;等级 2 表示通过摩擦椭圆将横向和轴向加速度组合起来,使其不管总加速度矢量的方向如何,都能结合摩擦。这种方法主要考虑路径的几何形状和沿着路径的速度。因此,该文仿真分析中选用等级 2。

雅康高速公路设计速度为 80 km/h ,而在实际行驶中,驾驶员往往倾向于采用较高的行驶速度。因此,分别选取 80 、 100 、 120 km/h 作为最大控制速度。

2.3 道路行驶仿真分析模型与参数

结合雅康高速公路路线情况,综合上述汽车模型和速度控制模型,建立如图 1 所示仿真分析模型,选取的复杂路段道路参数如下:雅康高速公路全长 90 km ,分为 14 个合同段,很多合同段路线设计具有相似性。因此,该文选用路线复杂,平曲线半径相差大的右线 C8 合同段 $K29+505 \sim K38+408$ 作为模拟路段。由于该段路起始和终止位置均位于平曲线内,为方便研究,计算里程范围取为 $K30+000 \sim K38+661$,此时该段路起始和终止位置均位于直线上,路线总长约为 $8 661 \text{ m}$,共含有 12 个平曲线,约占此段路线总长的 69%,其中最小半径为 560 m ,最大半径为 $2 600 \text{ m}$,同

时根据 JTG B01-2014《公路工程技术标准》和 JTG D20-2017《公路路线设计规范》设置超高。具体设计参数值及平曲率变化见表 2 和图 2,表 2、图 2 中均以平曲线左偏为正,右偏为负。

度 a_y 、轴向加速度 a_x 共 3 种控制因素条件下,分别获得 80、100、120 km/h 作为最大控制速度的模拟路段速度变化如表 3 所示,其速度变化曲线见图 3。

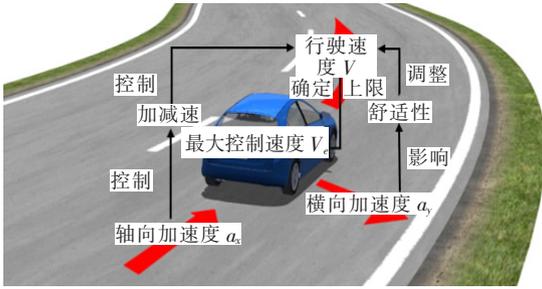


图 1 仿真分析模型

表 2 平曲线参数

曲线半径/m	第一缓和曲线长/m	圆曲线长/m	第二缓和曲线长/m	超高/%
-714	110	182	110	-4
866	100	99	100	4
-1 312	180	216	180	-3
2 500		338		
-710	110	491	110	-4
900	100	113	100	4
-755	100	97	100	-4
714	100	202	100	4
560	150	183	150	5
-2 600		879		
1 757	220	349	220	2
-710	100	248	100	-4

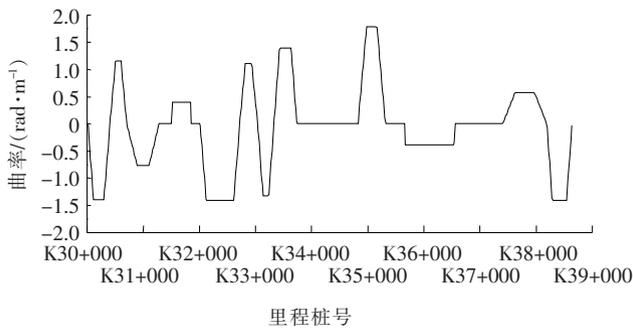


图 2 平曲线曲率变化图

表 3 模拟路段速度变化关系

最大控制速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	模拟路段里程范围	含平曲线半径/m	保证良好的行驶舒适性下降速幅值/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
80	K30+000 ~ K38+661	—	0
	K30+000 ~ K30+418	714	4.2
	K30+418 ~ K30+718	866	0
	K30+718 ~ K31+294	1 312	0
	K31+520 ~ K31+859	2 500	0
	K32+021 ~ K32+732	710	4.6
	K32+732 ~ K33+045	900	0
	K33+045 ~ K33+342	755	1.1
	K33+342 ~ K33+745	714	4.3
	K34+840 ~ K35+324	560	15.2
100	K38+202 ~ K38+651	710	4.6
	K30+000 ~ K30+418	714	24.2
	K30+418 ~ K30+718	866	5.5
	K30+718 ~ K31+294	1 312	0
	K31+520 ~ K31+859	2 500	0
	K32+021 ~ K32+732	710	24.6
	K32+732 ~ K33+045	900	5.3
	K33+045 ~ K33+342	755	16.1
	K33+342 ~ K33+745	714	13.7
	K34+840 ~ K35+324	560	35.2
120	K38+202 ~ K38+651	710	24.6

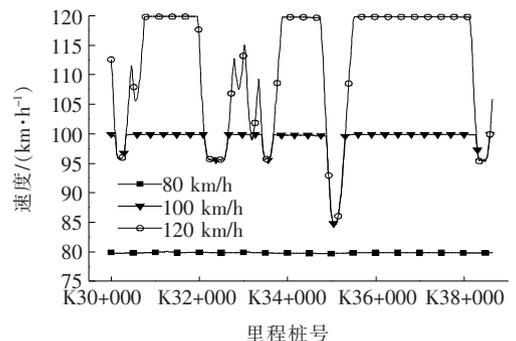


图 3 不同最大控制速度下速度曲线图

3 计算结果与分析讨论

3.1 仿真计算结果

经过 Carsim 仿真,在最大控制速度 V_c 、横向加速

由表 3 和图 3 可以看出:① 将 80 km/h 作为最大控制速度时,在模拟路段全线上完全可以以最大控制

速度行驶,也能保证良好的行驶舒适性;② 将 100 km/h 作为最大控制速度,在经过半径为 710、714、755 m 的平曲线时,需要采取小幅减速措施,最大需要减速约 4.6 km/h,而在经过半径为 560 m 的平曲线时,需要采取大幅减速措施,减速幅度约为 15.2 km/h 才能保证行车舒适性;③ 将 120 km/h 作为最大控制速度时,在经过半径小于 1 000 m 的平曲线均需要采取减速措施,其中在经过半径为 560、710、714、755 m 的

平曲线,需要采取速度差达到 20 km/h 以上的减速措施,最大速度差可达到约 35 km/h。根据 JTG B05—2015《公路项目安全性评价规范》,当相邻路段速度差大于 20 km/h 时,说明该路段的速度协调性不良,需要调整平纵设计或采取安全改善措施。

为进一步了解不同最大控制速度下的行车舒适性,该文提取了模拟路段全线轴向、横向加速度变化如表 4,其变化曲线如图 4、5 所示。

表 4 模拟路段轴向加速度变化关系

最大控制速度/(km·h ⁻¹)	模拟路段里程范围	含平曲线半径/m	轴向减速幅值/(m·s ⁻²)	轴向加速幅值/(m·s ⁻²)
80	K30+000~K38+661	—	0	0
	K30+000~K30+418	714	-0.70	0.58
	K30+418~K30+718	866	0	0
	K30+718~K31+294	1 312	0	0
	K31+520~K31+859	2 500	0	0
100	K32+021~K32+732	710	-0.47	0.62
	K33+045~K33+342	755	-0.20	0.26
	K33+342~K33+745	714	-0.53	0.59
	K34+840~K35+324	560	-0.97	0.87
	K38+202~K38+651	710	-0.57	0.61
120	K30+000~K30+418	714	-1.22	0.97
	K30+418~K30+718	866	-0.76	0.92
	K30+718~K31+294	1 312	0	0
	K31+520~K31+859	2 500	0	0
	K32+021~K32+732	710	-1.32	0.88
	K32+732~K33+045	900	-0.60	0.85
	K33+045~K33+342	755	-1.27	0.86
	K33+342~K33+745	714	-1.14	0.86
	K34+840~K35+324	560	-1.30	0.88
K38+202~K38+651	710	-1.31	0.84	

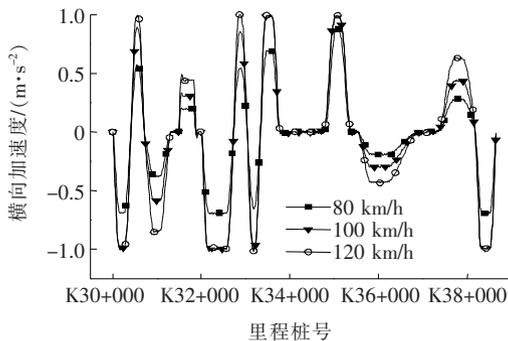


图 4 不同最大控制速度下横向加速度曲线图

由表 4 及图 4、5 可知:① 当最大控制速度为 80 km/h,无需采取加减速措施;② 当最大控制速度为 100 km/h 时,轴向加速度绝对值一般为 0.6 m/s² 及

以下,最大达到约 1.0 m/s²,均未达到限值,说明在保证舒适性的前提下,驾驶员在行车时对速度的调整还存在“富余”空间;③ 当最大控制速度为 120 km/h 时,需要频繁采取加减速措施,在经过半径低于 800 m 的平曲线时,轴向加速度需要达到限值,甚至超出限值才能使行车及时减速,难以保持良好的行车舒适性,同时也对汽车的刹车性能以及驾驶员的反应、操作能力有较高的要求。

3.2 分析讨论

经过 Carsim 计算软件仿真分析,对 3 种不同速度下车辆行驶的最大控制速度、横向加速度、轴向加速度等进行系统分析,基于以上仿真分析成果,可得:在保证舒适性的前提下,经过半径较小的平曲线时,最低速

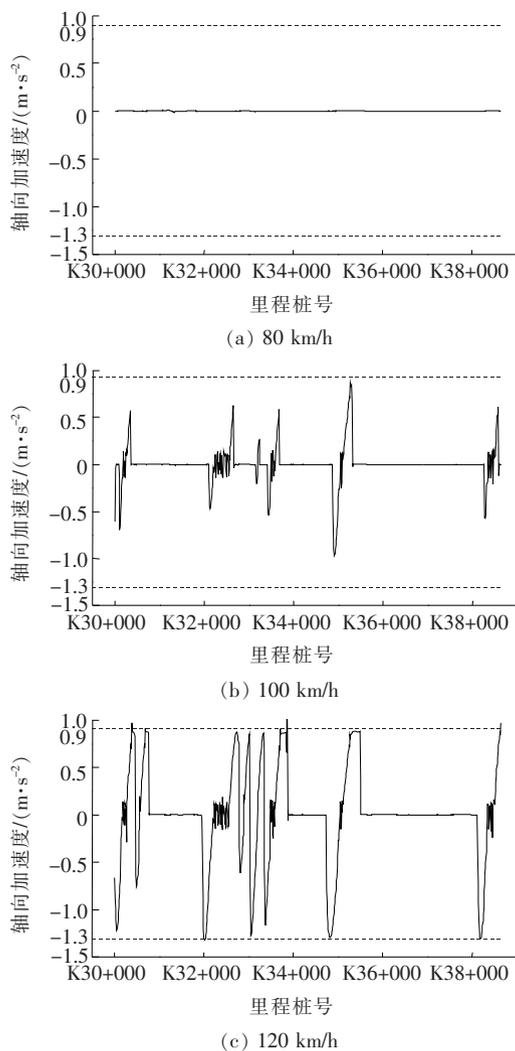


图5 不同最大控制速度下轴向加速度曲线图

度以及横向加速度跟最大控制速度无关,仅跟平面线形要素有关,最大控制速度影响相邻路段间的速度差以及轴向加速度,可以据此为公路线形设计和限速提供建议。

根据雅康高速公路桥隧比大,路线复杂等实际情况,选用80 km/h作为设计速度是合理的;在周围环境理想的情况下,以100 km/h的速度在半径大于800 m的平曲线路段上行驶时能保证良好的行车舒适性,当设置过多大半径平曲线时,会使驾驶员继续提高车速,以至会以大于100 km/h的车速行驶。根据JTG B05—2015《公路项目安全性评价规范》行驶速度与设计速度差值大于20 km/h时,说明该公路线形连续性不好,故在设计速度为80 km/h的高速公路上,半径大于800 m的平曲线占比过大是不合理的;在半径小于800 m的平曲线路段上,若以大于100 km/h的速度行驶,会产生较大的速度差以及轴向加速度,舒适性

较差;而将100 km/h作为期望速度,产生的速度差以及轴向加速度都会在合理范围内,驾驶员能从容应对,舒适性良好。因此在半径小于800 m的平曲线路段上至少应做100 km/h限速处理;针对雅康高速,在任何情况下都不应该以120 km/h的速度行驶。

以上速度限制实际是通过限制路线设计时过大的线形指标出现,从而降低驾驶员在实际行车过程中过高的期望速度,使驾驶员能以接近设计速度的实际行驶速度行车,这样可以防止实际行车速度过快,保障行车的舒适、安全性以及路线设计的合理性、连续性。

该文将车辆运行车速与线形指标有机联系起来,从整体上对雅康高速公路平曲线设置合理性进行了分析与评价,在一定程度上对高速公路限速以及保证线形连续性提供了参考,但本质上仍没有脱离现有规范与研究从二维层面上对公路线形进行评价的局限。符锌砂等提出从三维角度,即采用空间曲线路径长度即弧长为三维线形设计参数,曲率、挠率为三维线形指标进行公路三维线形设计及分析,指出公路线形的三维特性与公路安全之间存在可靠的相关性,为日后开辟全新的公路空间线形评价方法提供了可信的理论基础和思路。

4 结论

(1) 经过系统仿真分析,获得不同最大控制速度即期望速度下,小汽车的速度差、横向和轴向加速度数值变化规律,并对雅康高速公路的线形设计进行了评价,根据雅康高速公路桥隧比大,路线复杂等实际情况,选用80 km/h作为设计速度是合理的,路线半径取值应尽量考虑连续性。

(2) 雅康高速公路汽车行驶仿真分析表明:在设计速度为80 km/h的高速公路上,为保证线形的连续性,在全路线上半径大于800 m的平曲线占比不宜过高;在半径小于800 m的平曲线上,为保证行车舒适性和安全性,至少应做100 km/h的限速处理,全线行车速度不能超过120 km/h。

参考文献:

- [1] 潘兵宏,许金良,杨少伟,等.公路三维建模应用研究[J].西安公路交通大学学报,2001(1).
- [2] 邹健.浅论道路线形设计对交通安全的影响及改善措施[J].公路,2002(6).
- [3] A. A. MAJnani, A. HRhodes, A. V Metcalfe. Speed, Speed Limits and Road Traffic Accidents under Free Flow Conditions[J]. Accident Analysis and Prevention,1999,31(1).

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.06.003

装配式边坡防护在京雄城际铁路中的应用

宋向荣

(中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 边坡防护是基坑放坡法开挖的关键环节,传统的边坡防护多采用混凝土喷锚或喷锚或土钉墙与喷锚结合的防护方式。但这种边坡防护方式具有施工量大、环境污染较明显等缺陷。为了优化边坡防护形式,该文以京雄铁路机场2号线明挖隧道边坡工程为依托,探索了一种绿色装配式边坡防护形式。通过理论研究、试验总结与现场跟踪相结合的方法,对这种新型防护结构的合理结构形式、施工关键技术及质量控制要点进行了研究与总结。建立了这种防护形式的合理锚固结构,施工关键技术,并制定了其质量控制要点与质量指标。研究表明:这种防护方式具有施工便捷、质量可控、环境污染小等优势,可作为传统混凝土喷锚防护的替代产品。

关键词: 边坡防护; 装配式; 土钉墙; 施工工艺; 质量控制

近年来,装配化理念在建筑领域得到大范围推广,将工艺中的固定设备、结构进行标准化,可以大幅度地提高生产效率、质量,具有显著的经济性。基坑支护的装配化也有研究和探索,例如采用十字形装配式基坑支护结构、现浇加装配式连拱内撑的结构等。在相似地质条件下开挖的标准断面,采用的支护结构相似性程度较高,为装配式方法的应用提供了较好的基础,然而目前缺乏针对该类型工程的研究。以标准化设计降

低施工难度,提高施工的精准程度,有利于开展边坡的稳定性控制,防护构件的工厂化生产,也能够减少对环境的扰动。该文以京雄铁路机场2号线为工程背景,开展装配式边坡防护技术研究。主要采用绿色的、可回收的装配式土钉墙,取代传统土钉墙开展支护,以此为基础开发支护形式、配套工艺措施以及相关质量标准体系等,取得了较好的应用效果。

[4] 杨峰. 基于线形风险指数的高速公路线形风险评估方法研究[J]. 公路交通科技, 2017(6).

[5] 范振宇, 张剑飞. 公路运行车速测算模型的研究和标定[J]. 中国公路学报, 2002(1).

[6] 胡浩林, 刘毅超. 基于运行速度的高速公路安全性评价研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2016(4).

[7] 杨少伟, 许金良, 杨宏志. 考虑平、纵、横三方面关系的横向加速度变化率[J]. 中国公路学报, 1999(4).

[8] YANG Shao-wei, XU Jin-liang, YANG Hong-zhi. Lateral Change of Acceleration According to the Relationship of the Horizontal, Vertical and Lateral Geometry of Highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999(4):15-19.

[9] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.

[10] 高振海, 管欣, 李谦, 等. 基于预瞄跟随理论的驾驶员跟

随汽车目标速度的控制模型[J]. 吉林工业大学学报(工学版), 2002(1).

[11] GAO Zheng-hai, GUAN Xin, LI Qian, et al. Control Model of Driver Following Vehicle Target Speed Based on Preview Follower Theory[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2002(1):1-5.

[12] JianyongCao, HuiLu, KonghuiGuo, et al. A Driver Modeling Based on the Preview-Follower Theory and the Jerky Dynamics[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013.

[13] 陈天幸. 基于加速度的公路线形连续性评价研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2014.

[14] 高建平, 郭忠印. 基于运行车速的公路线形设计质量评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004(7).

[15] 符铎砂, 何石坚, 鲁岳, 等. 公路线形评价方法的工程实用性探讨[J]. 中外公路, 2018(1).

收稿日期: 2020-07-14

作者简介: 宋向荣, 男, 大学本科, 高级工程师, E-mail: 877933948@qq.com