

基于轿车撞击的跨线桥中墩波形护栏改进方案分析

王智钊¹, 王银辉^{1,2}, 罗征², 朱奇挺³

(1.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2.浙江大学 宁波理工学院 土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100;

3.宁波市交通规划设计研究院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 中央分隔带内桥墩受到失控车辆撞击不仅威胁跨线桥梁结构安全,还会造成巨大生命和财产损失,对跨线桥中墩处防护措施开展研究十分迫切。文中通过分析跨线桥中墩处护栏防护目的和控制指标,提出利用护栏立柱加密、增设护栏梁板及两种措施结合的 3 种改进方案,通过建立护栏—车辆有限元模型开展碰撞仿真分析。结果表明,增设护栏梁板既能增大护栏刚度、减小护栏变形,还能增大车头及车身与梁板的撞击和摩擦接触面,对防护效果有适量改善;立柱加密在达到增大护栏刚度、减小护栏变形效果的同时增加了车辆侧翻和乘员受伤的危险;将立柱加密和增设梁板相结合,既能大幅减小护栏最大横向变形,又具有较好的耗能能力,在满足护栏阻挡、缓冲、导向功能的前提下,是针对小轿车撞击跨线桥中墩防护的合理方案。

关键词: 交通工程;波形梁护栏;跨线桥;中墩防护;轿车撞击;碰撞仿真

中图分类号:U491.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2021)02-0037-06

随着高速公路网线的不断完善,高速公路线路相互交叉及与普通公路交叉的情况日益增多,为跨越较宽的既有高速公路,往往将跨线桥的中墩设置于下穿公路中央分隔带内,城市高架桥也一般将桥墩设置于地面道路的中央分隔带内。这种方式虽能节约用地和建造成本,但对公路运营带来一定安全隐患。根据文献[1],车辆撞击高速公路跨线桥中墩事故已成为高速公路发生频率较高的交通事故类型之一,不仅造成严重人员伤亡和财产损失,还严重影响高速公路交通和结构安全。高速公路车辆越出路外撞击跨线桥中墩事故与防撞护栏性能密切相关,在不断提高汽车安全性能的基础上,提升高速公路跨线桥中墩防护波形护栏的防撞性能十分重要。

1 问题的提出

大量研究表明,波形护栏防撞性能与其结构形式和结构参数密切相关。刘建勋等在原护栏的基础上建立双条波形防护栏,通过仿真分析验证,双条护栏的防撞性能有很大提升。田东翔从立柱间距入手开展优化研究,发现适当减小立柱间距可提高护栏的防撞性能,但间距太小会导致车体撞击时加速度过大,威胁乘员生命安全。Borovinšek M.提出立柱上增加钢条、防阻块上增加钢条和两波形梁板波峰处增加钢缆 3 种波形梁护栏改造方案,CAE 仿真分析发现立柱上增加钢条可对车辆起到良好的导向作

用。闫书明等通过实车足尺碰撞试验与有限元仿真,分析护栏梁板高度和结构刚度对波形梁护栏防护性能的影响,发现同时提高防护梁高度和增加防护梁板对大客车和小客车撞击都能有很好的防护作用。Faller R. K.等提出防护横梁安装高度对护栏防撞性能的影响很大。但针对跨线桥中墩防护的研究成果还不多,规范关于跨线桥的防撞设施也未有明确规定。

当前常用高速公路 A 级波形护栏在发生车辆碰撞时会通过产生较大变形耗能降低车辆速度,并拨转车辆行进方向。这种护栏形式简单移植于跨线桥中墩处,由于护栏距离桥墩较近,可产生的横向变形有限,会导致车辆撞击中墩,威胁跨线桥结构安全,同时无法达到对车辆和司乘人员的保护作用。因此,需对跨线桥中墩位置防撞护栏进行特定需要的防撞性能提升研究,优化出合理可行的防撞措施。

该文提出立柱加密波形梁护栏、双层梁板波形梁护栏、立柱加密—双层梁板波形护栏 3 种优化方案,展开轿车撞击下数值分析,对比分析不同优化方案下护栏系统的最大横向变形、车辆碰撞后加速度及车辆动能曲线时程,提出适用于跨线桥中墩防护的较优护栏改进方案。

2 跨线桥中墩处护栏的防护目的

如前所述,由于跨线桥桥墩位于道路中央分隔

带内,该区段防护栏必须从保护桥墩和保护车辆两个角度予以考虑,其防护目的在于:

(1) 护栏允许变形小。JTG B01—2003《公路工程技术标准》规定,针对不同设计速度,高速公路中央分隔带宽度一般值为2~3 m。对于内设置桥墩的中央分隔带护栏,由于与桥墩之间空隙较小,波形梁板和立柱的变形幅度受到限制。因此,需限制护栏的最大横向位移,以免车辆在动能尚未较大消耗前撞击桥墩。

(2) 护栏缓冲功能良好。由于护栏允许变形小,要求护栏系统总体上能在较小的横向位移下消耗更多撞击能量。但单纯增大护栏系统刚度,会导致失控车辆碰撞护栏时产生过大加速度而威胁乘员生命安全。根据JTG B05—01—2013《公路护栏安全性能评价标准》,乘员碰撞后加速度的纵向与横向分量均应小于 200 m/s^2 。

(3) 护栏阻挡、导向功能良好。为防止失控车辆穿越、翻越、冲出护栏后撞击中间带内桥墩,要求护栏具有良好的阻挡功能,能引导失控车辆在撞击护栏后回到行车道内,且不发生漂移、翻转现象。根据JTG B05—01—2013,车辆驶出驶离点后的轮迹经过图1所示导向框时不得越出直线F。碰撞车型为小轿车时,导向驶出框的A、B参数分别见式(1)、式(2)。

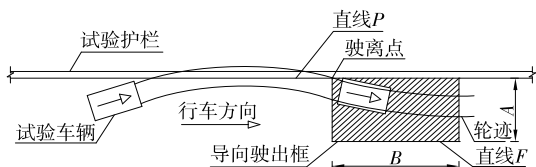


图1 护栏标准段的车辆轮迹导向驶出框

$$A = 2.2 + V_w + 0.16 V_L = 4.6 \text{ m} \quad (1)$$

$$B = 10 \text{ m} \quad (2)$$

式中: V_w 为车辆总宽,取1.7 m; V_L 为车辆总长,取4.4 m。

(4) 护栏耗能大。当失控车辆撞击中央分隔带内桥墩时,要求中墩防护栏具有耗能大的特点,能最大程度吸收车辆的动能,防止车辆剩余动能过大,撞击桥墩时对桥梁结构造成破坏。

3 优化方案及仿真分析模型

3.1 3种波形梁护栏改进优化方案

针对内设跨线桥中墩的中央分隔带防护栏,为达到上述防护目的,以JTG/T D81—2017《公路交

通安全设施设计细则》中A级波形护栏为基础,提出3种改进优化方案(见图2)开展数值模拟分析。

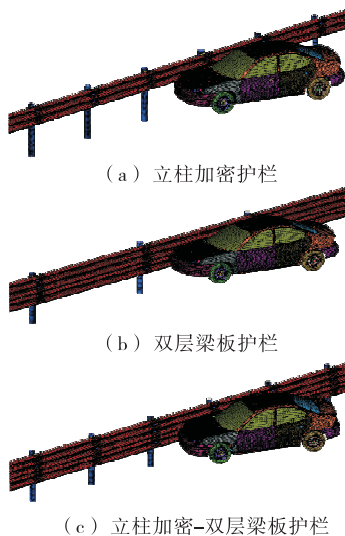


图2 护栏改进方案

方案一:立柱加密护栏。在护栏其他尺寸参数不变的情况下增大立柱密度,从立柱间距4 m加密为立柱间距2 m。

方案二:双层梁板护栏。在护栏其他尺寸参数不变的情况下,在原有三波形梁板下增加一层两波形梁板,从而加大波形梁板高度。

方案三:立柱加密-双层梁板护栏。在护栏其他尺寸参数不变的情况下,增大立柱密度的同时,在原有三波形梁板下增加一条两波形梁板,即上述两方案的叠加。

3.2 仿真模型建立

根据JTG B05—01—2013《公路护栏安全性能评价标准》对半刚性护栏实车碰撞条件的规定,设置初始碰撞条件如下:碰撞车辆选取1.5 t小轿车,车辆初始速度100 km/h,碰撞角度(车辆行驶方向与护栏的夹角)为 20° 。根据文献[10],护栏跨数达到7跨(每跨4 m)时,护栏系统有足够精度来模拟不间断连续护栏系统。建立9跨护栏模型,每跨4 m,全长36 m;同时建立18跨立柱加密护栏模型,每跨2 m,全长36 m。三波形梁护栏参照A级带防阻块护栏建模,梁板尺寸为 $506 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$,壁厚3 mm;两波形梁板尺寸为 $310 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$,壁厚3 mm;圆管立柱外径140 mm,壁厚4.5 mm,立柱地上高度950 mm,地下埋深1 400 mm;防阻块尺寸为 $196 \text{ mm} \times 178 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,壁厚4.5 mm。

采用联合建模求解技术,利用UG绘制波形梁

护栏几何模型,导入 Hypermesh 进行网格划分和材料属性定义,然后交由 LS-DYNA 进行计算,计算结果采用 Hyperview 进行处理。波形梁板、防阻块和立柱均选用弹塑性材料 * MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY(24 号),材料密度 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 206 GPa,屈服应力 235 MPa,泊松比 0.3。护栏各部件属性均选用 * SECTION_SHELL 壳单元,有限元求解积分采用 Belytschko-Tsay 壳单元算法,面内单点积分,剪切因素取 5/6。

3.3 仿真模型简化

车辆撞击波形梁护栏是一个非常复杂的过程,通过有限元仿真实现完全精确模拟受到很多因素和条件的限制。因此,在尽可能反映碰撞特性和达到精度要求的前提下作适当简化。

鉴于波形梁板在防阻块位置处通过高强螺栓拼接,且实际碰撞变形中一般不会出现连接螺栓断裂的情况,波形梁板采用一体式建模,并对 320 mm 长连接段作加厚处理,以模拟实际连接段梁板重叠引起的梁板加厚。为避免建立螺栓复杂实体单元导致计算时长大幅增加,在波形梁板预留螺栓孔位置建立 rigid 刚性连接,并在 2 个螺栓孔之间建立 Beam 单元,按高强螺栓赋予材料属性。

立柱与土基的相互作用较复杂,根据文献[12],碰撞过程中立柱的最大弯矩发生在地表以下约 400 mm 处,且弯曲位置与柱径、埋深无关。因此,建模时在地表以下约 400 mm 处给立柱施加全约束,以简化立柱与土基的相互作用。

4 轿车撞击护栏数值模拟结果分析

通过建立 1.5 t 小轿车以初始速度 100 km/h、角度 20° 撞击标准 A 级护栏及上述 3 种优化方案的护栏数值模型,开展撞击模拟分析,从护栏横向变形、车辆碰撞后最大加速度、护栏阻挡、导向功能及能耗等方面进行对比分析。

4.1 护栏变形对比分析

小轿车撞击护栏主要分为 5 个阶段(见图 3),以小轿车撞击标准护栏为例,分别为车头角位撞击护栏($0 \sim 0.10 \text{ s}$)、一侧车身擦过护栏($0.10 \sim 0.16 \text{ s}$)、车尾撞击护栏($0.16 \sim 0.21 \text{ s}$)、车头远离护栏($0.21 \sim 0.33 \text{ s}$)、车辆驶回行车道($0.33 \sim 0.4 \text{ s}$)。

数值模型以车辆初速度方向为 x 轴,垂直于车辆初速度方向并朝向道路侧为 y 轴,通过提取护栏在 x 和 y 轴方向的位移,按 $s = x \sin 20^\circ - y \cos 20^\circ$ 计

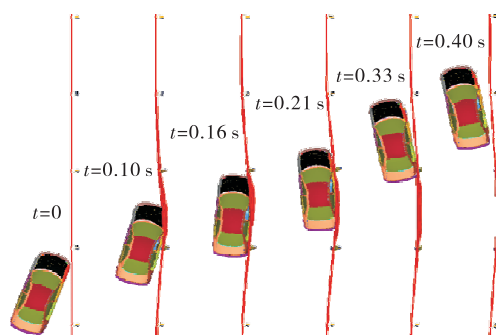
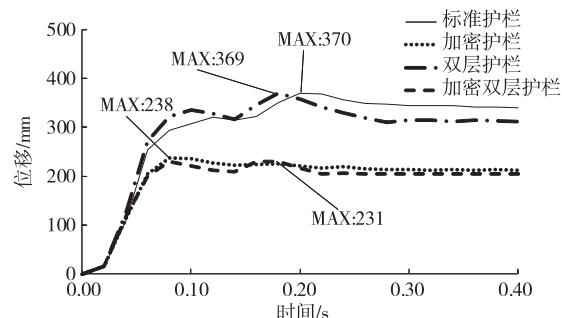
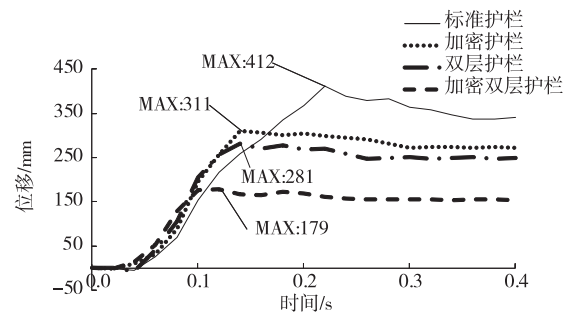


图3 小轿车撞击标准护栏的全过程

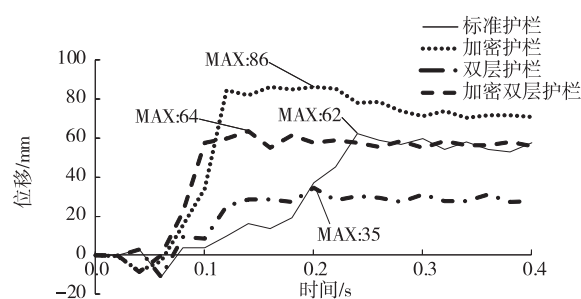
算,得到护栏垂直于行车道路方向的横向位移 s 。各种防护栏在轿车撞击下立柱顶部最大横向位移节点的位移时程曲线对比见图 4。



(a) 靠近撞击点第1根立柱顶部位移



(b) 靠近撞击点第2根立柱顶部位移



(c) 靠近撞击点第3根立柱顶部位移

图4 各方案立柱最大横向位移时程曲线对比

受立柱加密的影响,各方案靠近撞击点第 2、3 根立柱顶部处的最大横向位移发生点距离撞击点的纵向距离(见表 1)不同。立柱和栏板上最大横向位移见表 2。

表1 立柱顶部最大位移点距撞击点的纵向距离 m

护栏形式	距离撞击点的纵向距离		
	第1根	第2根	第3根
	立柱	立柱	立柱
标准护栏	0.87	4.87	8.87
双层梁板护栏	0.87	4.87	8.87
立柱加密护栏	0.87	2.87	4.87
立柱加密— 双层梁板护栏	0.87	2.87	4.87

表2 护栏最大位移 mm

护栏形式	梁板位移	立柱位移
标准护栏	554	412
立柱加密护栏	415	311
双层梁板护栏	445	369
立柱加密—双层梁板护栏	308	231

由图4和表1、表2可知:1) 在小轿车撞击下,与标准护栏相比,增设梁板护栏后立柱最大位移减小10%,梁板最大位移减小20%;立柱加密后立柱和梁板最大位移均减少25%;同时采用立柱加密和增设梁板,立柱和梁板的最大位移减少45%。从护栏的最大横向位移来看,加密立柱和增设栏板均有较佳的效果。2) 在小轿车撞击下,护栏立柱较大横向位移一般出现于第1、2根立柱,第3根立柱横向位移相对较小,故轿车撞击下护栏变形较大区域基本为第1~3根立柱之间,即对于立柱未加密护栏,影响较大区域为至撞击点0~9 m区域,而立柱加密护栏基本在0~5 m区域。3) 标准护栏被撞击后,由于车头撞击,第1根立柱率先出现较大位移(0.1 s时),待车尾撞击时(0.2 s前后)第2根立柱也出现较大位移,且第1根立柱同时出现二次峰值,故标准护栏变形从车头撞击到车尾撞击持续增大。4) 增设护栏梁板对于第1根立柱横向位移的影响不大,仅第二次峰值略有提前(提前到0.18 s左右)。但第2根立柱的横向位移大幅度减小,最大值出现于0.13 s左右,其原因在于车尾的二次撞击没有导致第2根立柱变形增大。可见,增设护栏梁板可使车辆撞击后能量更快消耗。5) 加密立柱可同时减小第1、2根立柱的横向位移,撞击后第1根立柱最大位移出现时间提前,位移大幅减小,其原因在于立柱加密后护栏整体刚度得到大幅提高。6) 同时采取立柱加密和增设梁板措施后,护栏变形大幅减小,护栏变形区域也大幅缩小,基本不出现二次峰值,即护栏变形主要由车头撞击引起,车尾撞击不再导致护栏变形增大。

4.2 最大加速度对比分析

分别提取车辆上乘员位置附近的最大加速度在 x 、 y 方向的分量,通过换算得到沿行车道纵、横向的最大加速度,结果见表3。

表3 车辆最大加速度 m/s^2

护栏形式	横向加速度	纵向加速度
标准护栏	98	89
立柱加密护栏	177	311
双层梁板护栏	62	103
立柱加密—双层梁板护栏	146	71

由表3可知:立柱加密护栏的纵向最大加速度为 $311 m/s^2$,大于规范限值 $200 m/s^2$ 。可见,立柱加密提高了护栏系统的整体刚度,在车辆撞击护栏时使车辆产生较大的加速度,会威胁乘员的安全,故单纯依靠增加立柱密度来提高护栏防护性能不合理。而增设护栏梁板是有效的改进措施,乘员纵、横向最大加速度均减小,可起到非常好的缓冲效果。

4.3 护栏阻挡功能评价

图5为标准护栏和双层梁板护栏在撞击后的位移云图。

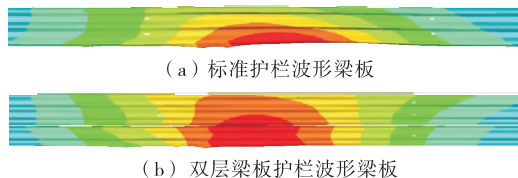


图5 标准护栏和双层梁板护栏在撞击后的位移云图

由图5可知:标准护栏梁板的最大位移发生在波形梁板下缘,双层梁板护栏梁板的最大位移发生在下层两波形梁板上。小轿车碰撞标准三波形梁护栏时,仅有波形梁板下缘两波与小轿车车头上半部分发生碰撞,说明标准护栏对于小轿车碰撞发挥的防护能力有限,仅有一半梁板参与发挥阻挡功能。原梁板下方增设一层梁板,一方面护栏抗侧弯刚度增大,减小了护栏变形;另一方面梁板与车头接触面增大,使车头撞击梁板区域扩大,梁板与车头和车身接触摩擦面积增大,从而增大撞击后的能量损耗。

在小轿车分别与3种改进护栏碰撞过程中,均未出现车辆翻越、骑跨、下钻等护栏防护失效的现象,护栏及其脱离构件也没有侵入车辆乘员舱对乘员安全造成威胁,说明3种改进护栏的阻挡功能满足规范要求。

4.4 护栏导向功能评价

以小轿车碰撞立柱加密—双层梁板护栏为例,

如图6所示,车辆撞击护栏后,以车辆轮迹与护栏碰撞前迎面最内边缘的地面投影线的交点即驶离点为基点作一个长为10 m、宽为4.6 m的长方形,即为导向驶出框。

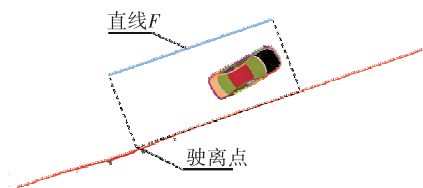


图6 立柱加密-双层梁板护栏的车辆导向驶出框

数值模拟结果显示:小轿车分别与3种改进护栏碰撞后驶出驶离点,轮迹经过导向驶出框,且均没有越过直线F,说明3种改进护栏的导向功能满足规范要求。

4.5 护栏耗能对比分析

在对3种改进优化护栏进行车辆碰撞数值模拟分析中发现,标准护栏与立柱加密护栏会出现不同程度的立柱阻绊车轮的现象(见图7)。

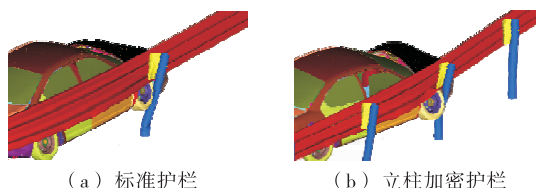


图7 立柱阻绊车轮示意图

由于立柱加密后护栏整体刚度有所提高,在车辆碰撞过程中立柱变形减小,立柱弯折角度小,使波形梁板下缘至地面的这段立柱几乎全部参与阻绊车轮。而标准护栏,因为立柱在车辆碰撞过程中变形较大,立柱弯折角度大,只有靠近地面部分的立柱对车轮产生阻绊作用。尽管立柱对车轮的阻绊作用能明显降低车辆动能,如图8所示,标准护栏、立柱加密护栏的动能曲线分别在0.2和0.13 s时发生陡降,但会使车辆失控出现漂移、翻车等现象,对乘员造成二次伤害。

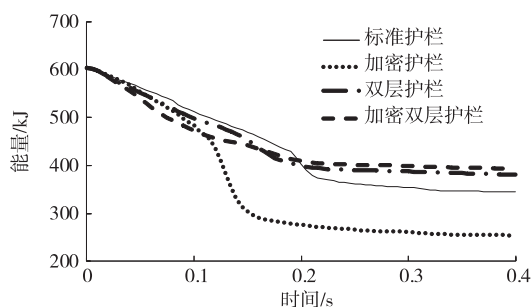


图8 各类护栏的动能曲线

由图8可知:双层梁板护栏与立柱加密-双层梁板对车辆动能的消耗能力较接近,前者的耗能能力略大于后者。立柱加密后护栏系统刚度增加,在车辆撞击护栏过程中护栏体系变形耗能略有下降,但降幅很小,说明在双层梁板护栏的基础上加密立柱并不能提高护栏系统的耗能能力。

5 结论与展望

针对现有跨线桥中墩防撞设施即高速公路常见A级波形护栏,提出3种改进加固方案,通过有限元数值模拟开展小轿车对护栏的碰撞分析,得到以下结论:1) 立柱加密后护栏刚度大幅提高,对车辆的抗撞击能力大幅提高,护栏变形明显减小。但在增加护栏系统耗能的同时,会加剧立柱对车轮的阻绊作用,撞击时乘员产生较大的加速度,增大对乘员的伤害。2) 增设护栏梁板既可提高护栏刚度、减小护栏变形,也可通过增大梁板与车头撞击和车身摩擦的接触面提高撞击过程中能量的持续损耗量,是较有效的改进措施。3) 将立柱加密和增设梁板相结合,可进一步增加护栏刚度,减小撞击后护栏变形,防止车辆撞击后碰撞到护栏后的桥墩,而且增设梁板可避免加密立柱对车辆的阻绊作用,防止车辆出现突然性的能量损耗。

综上,立柱加密-双层梁板护栏在满足护栏阻挡、缓冲、导向功能的前提下,不仅能避免立柱阻绊车轮现象的出现,显著减少护栏最大横向动态变形,且具有较好的耗能能力。从小轿车撞击的角度,立柱加密-双层梁板护栏是对跨线桥中墩防护的较优改进方案。

根据公路护栏安全性能评价标准,护栏试验碰撞需考虑小轿车和大货车两方面,该论文仅考虑了前者,后续将进一步开展货车或客车的碰撞分析,以全面完善跨线桥中墩防护波形梁护栏改进优化方案。

参考文献:

- [1] 操太林.高速公路上跨桥中墩撞击损伤检测与安全评估[J].工程与建设,2007(2):219-221.
- [2] 刘建勋,唐辉.高速公路双条半刚性护栏结构设计[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(1):68-71.
- [3] 田东翔.汽车与波形梁护栏碰撞仿真研究[D].西安:长安大学,2012.
- [4] BOROVINŠEK M, VESENJAK M, ULBIN M, et al. Simulation of crash tests for high containment levels of

- road safety barriers[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 14(8): 1711—1718.
- [5] 闫书明, 陈冠雄, 刘航. 几种改进的波形梁护栏的碰撞分析[J]. 公路工程, 2016, 41(1): 167—171+201.
- [6] FALLER R K, POLIVKA K A, KUIPERS B D, et al. Midwest guardrail system for standard and special applications[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1890(1): 19—33.
- [7] 交通部公路司, 中国工程建设标准化协会公路工程委员会. 公路工程技术标准: JTG B01—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [8] 北京深华达交通工程检测有限公司. 公路护栏安全性评价标准: JTG B05—01—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [9] 交通运输部公路科学研究院. 公路交通安全设施设计细则: JTG/T D81—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [10] 张晓晴, 黄小清, 汤立群. 高速公路护栏的冲击动力学分析有限元模型[J]. 计算机仿真, 2007(3): 266—269.
- [11] 肖盈, 邵永刚, 白书锋. 公路波形梁护栏建模技术的探讨和研究[J]. 特种结构, 2010, 27(5): 77—80+87.
- [12] 伊政. 高速公路波形梁护栏碰撞仿真研究及其优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [13] 於弈铮, 王银辉, 罗征. 冲击荷载下预制装配式护栏的防撞性能分析[J]. 公路与汽运, 2020(1): 40—45.
- [14] 赵庆云, 吴军鹏, 刘康, 等. 桥梁砼护栏直立式接高改造设计与碰撞分析[J]. 公路与汽运, 2020(1): 46—51.
- [15] 赵建, 雷正保, 王素娟. 高速公路跨线桥 SS 级防撞护栏优化设计[J]. 公路交通科技, 2011, 28(9): 142—146+158.
- [16] 李志锋, 邵永刚, 张颖, 等. 高速公路波形梁护栏改造方案研究[C]//中国汽车工程学会. 2006 中国汽车安全技术国际学术会议暨中国汽车工程学会第九届汽车安全技术年会论文集. 北京: 中国汽车工程学会, 2006: 335—339.
- [17] 莫劲翔. 汽车碰撞动力学响应分析及波形梁护栏防护性能的改进研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.

收稿日期: 2020—10—20

(上接第 28 页)

- [8] WANG Shuaian, QU Xiaobo. Rural bus route design problem: Model development and case studies[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(6): 1892—1896.
- [9] 姚志刚, 翟奎, 刘松. 基于熵值加权逼近理想排序技术的城乡公交线网结构比较研究[J]. 交通运输研究, 2017, 3(4): 30—34.
- [10] BOARD T. Transit capacity and quality of service manual[M]. 2nd ed. Orlando: Kittelson and Associates Inc, 2013: 12—28.
- [11] 胡超芳. 基于决策者满意度的多目标模糊优化算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [12] 徐茜, 俞礼军. 基于“多站点”的城市常规公交线网优化设计[J]. 公路与汽运, 2016(4): 32—35.
- [13] 杨凯华. 城乡三级公交网络中镇村级线网布设方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.

收稿日期: 2020—08—09

(上接第 36 页)

- [5] FITZPATRICK K, BLASCHKE J D, Shamburger C B, et al. Compatibility of design speed, operating speed, and posted speed[R]. Texas Transportation Institute, College Station, Texas, 1995: 55—61.
- [6] Gibreel G M, Easa S M, El-Dimeery A L. Prediction of operation speed on three-dimensional highway alignment[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(1): 21—3010.
- [7] 杨俊, 孙静怡. 分车道限速相关问题研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(15): 3780—3782.
- [8] 陆建, 孙祥龙, 戴越. 普通公路车速分布特性的回归分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(2): 374—377.
- [9] 程国柱. 高速道路车速限制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] 郭英. 公路车辆行驶速度与事故关系模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [11] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 道路交通标志和标线 第 5 部分: 限制速度: GB 5768.5—2017[S]. 北京: 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会, 2017.
- [12] 马筱标, 樊博. 降雨对山区高速公路运行车速的影响研究[J]. 公路与汽运, 2020(5): 33—36.
- [13] 何磊, 邱建栋, 刘恒. 基于突变理论的交通速度预测方法研究[J]. 公路与汽运, 2018(4): 11—13.
- [14] 贺成林. 横向干扰对车速和行车轨迹影响研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [15] 傅岳隆. 考虑三维线形的双车道公路运行车速预测模型[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.

收稿日期: 2020—09—14