

# 山区高速公路窄路肩路段 SB 级护栏立柱承载力分析与研究

朱欢, 李振华, 黄志勇, 郑锐, 陈禹戈

(贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 早期建设的山区高速公路受地形条件、用地指标等多方面因素限制, 大量路基断面采用最小宽度, 形成窄路肩, 造成护栏防护性能不足、端头外展斜率大等情况, 存在较大安全隐患。文中通过多条运营期高速公路护栏端头现状调查, 综合考虑施工可行性和经济性, 基于 JTG D81—2017《公路交通安全设施设计规范》推荐的波形护栏结构形式对立柱承载力进行有限元模拟分析, 结合实际情况提出挖方路段护栏加固和端头外展改造方案, 供类似工程参考。

**关键词:** 交通工程; 安全设施; 波形护栏; 立柱承载力; 窄路肩; 山区高速公路

**中图分类号:** U491.59

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)06-0032-05

近年来, 高速公路交通量持续增大, 车速提升, 对高速公路安全防护能力和安全设施提出了更高的要求。因高速公路建设年代和标准不同, 桥梁及路基迎交通流向的护栏端头种类和形式多样, 防护能力和效果不一。山区高速公路大量挖方路段未设置护栏, 桥梁及路基护栏在填挖处多直接采用外展端头进行过渡, 外展斜率过大形成突出的迎撞面, 且由于外展端头未延伸至挖方土体内, 增加了事故严重程度, 甚至造成车辆冲出路外坠桥等事故。因此, 有必要在挖方路段设置护栏, 并采取改造措施提升迎交通流路段的安全防护能力, 降低行车风险。

## 1 现状调查及分析

早期建设的高速公路护栏采用 JTG/T D81—2006《公路交通安全设施设计技术细则》设计, 按照该规范, 行车方向的上游端头宜设置为外展地锚式或圆头式, 但对端头外展的斜率未作要求, 且由于多数挖方路段设置有水沟, 端部立柱按规范间距难以施工, 导致现场实际端头形式不一, 多数已无法满足 JTG D81—2017《公路交通安全设施设计规范》的要求, 存在较大安全隐患。主要问题见图 1。



(a) 端头外展斜率不足 (b) 未设置刚柔过渡 (c) 护栏与边坡存在间隙

图 1 迎交通流向护栏端头设置情况

根据调查结果, 早期建设的高速公路外展端头防护等级采用 A 级二波形梁板, 护栏在路面以上高度为 750 mm, 外展斜率为  $1/3 \sim 1/2$ , 形成明显的迎撞面, 车辆失控冲撞护栏后容易跨越护栏驶出路外, 造成更严重的二次事故。

根据实车碰撞试验经验, 护栏所受汽车碰撞荷载将由立柱的背面土反作用力来承担。由于外展护栏紧邻边沟(见图 2), 立柱背面边沟沟壁采用浆砌片石砌筑, 护栏受碰撞后, 浆砌片石侧壁抗弯拉性能差, 容易崩解, 支撑能力不足, 难以达到预期的防撞效果。总体而言, 采用 JTG/T D81—2006 设计的护栏, 对护栏端头外展斜率、碰撞角度、立柱与土建支持条件等考虑不够严密, 加之实际施工不符合设计要求, 导致这类迎交通流向的护栏端头不能适应目前公路交通条件的需求, 局部路段甚至成为较大安全隐患点, 对其进行提升改造必不可少。

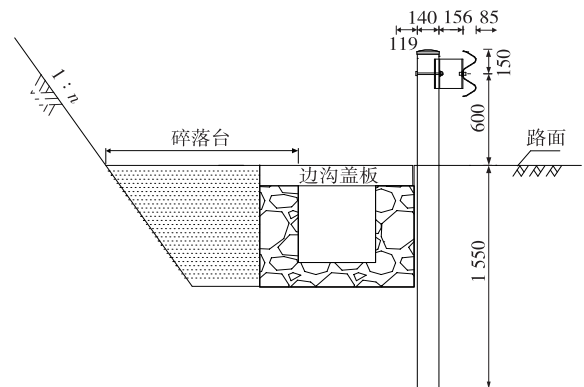


图 2 部分护栏端头立柱设置情况(单位: cm)

2 挖方段立柱承载力分析

波形护栏的强度主要取决于立柱刚度、土的承载力和梁的抗拉强度,其中立柱的水平承载力与位移是影响立柱强度的重要因素。根据 JTG D81—2017《公路交通安全设施设计规范》的要求,结合项目实际路侧危险程度,采取拆除原护栏、新建 SB 级波形护栏的方式进行提升改造,SB 级护栏采用规范推荐的结构尺寸(见图 3)。

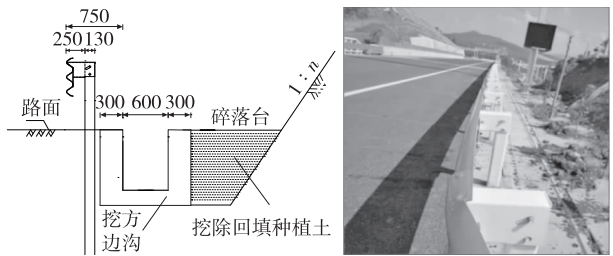


图 3 JTG D81—2017 中 SB 级波形护栏挖方路段设置示意图(单位:cm)

护栏的安全性评价一般采用实车碰撞试验和数值模拟的方法,相关文献也对护栏碰撞力计算公式进行了研究。但车辆碰撞护栏的过程时间很短,属

于复杂动力学物理过程,构建仿真模型存在很大难度,也难以完全真实地反映立柱碰撞后的情况。

波形护栏依靠受碰撞后的变形来吸收能量,降低事故严重程度。JTG B05—01—2013《公路护栏安全性能评价标准》对护栏防护等级均以防护能量为设计指标。为简化立柱碰撞受力模型,基于能量吸收理论,采用立柱单元静载试验构建分析模型。通过静力试验,检验在挖方段立柱受力变形的情况下立柱是否会由于后背支撑不足而整体失效及立柱变形后边沟的破坏状况。

2.1 有限元模型构建

根据 SB 级护栏结构尺寸及布设图,结合设计资料,构建简化立柱单元静载有限元分析模型(见图 4),模型主要材料参数及网格划分见表 1。

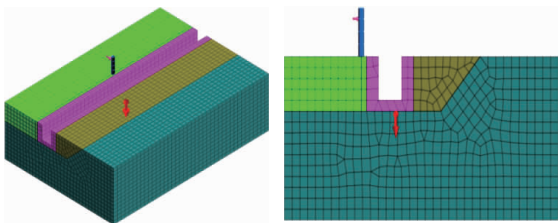


图 4 立柱单元三维模型示意图

表 1 材料参数及网格划分

类型	材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	材料模型
边沟	C20 混凝土	2 500	25 500	0.2	弹性模型
土基	黏土	2 000	10	0.4	Mohr-Coulomb
护栏立柱	Q235 钢	7 850	200 000	0.3	弹性模型

2.2 静力荷载确定

进行单元静载试验的关键是确定静载作用位置和大小。根据 JTG D81—2017 中护栏结构设计尺寸,选择静载作用位置为波形护栏中心梁板高度(路面以上 697 mm),与理想状态下车辆碰撞位置保持一致。护栏单元静载大小取决于车辆与护栏之间的碰撞力,目前规范以防护能量作为护栏防护等级评价指标,没有明确波形护栏碰撞力计算方法,可基于能量吸收理论构建碰撞力分析方法,以设计防护能力为指标反演护栏碰撞力,将动力荷载等效转换为静力荷载。车辆碰撞初始状态时的动能为:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

根据能量守恒原理,当车辆碰撞护栏后减速至停止时,碰撞能量与波形护栏变形  $\Delta x$  吸收的能量相等,可假定车辆作用于护栏的有效动能全部转化

为碰撞力所做静力功,即将动力荷载等效转换为静力荷载  $F$ ,公式如下:

$$E = \int_0^x f(x) \cdot dx = \frac{1}{2}mv^2 = F \cdot \Delta x$$

上述公式未考虑车辆撞击时部分动能转换为系统内能,而全部将动能转换为静力荷载做功,故实际防护能力较计算结果更保守。

综上,以 SB 级波形护栏设计防护能力 280 kJ 为目标值,通过分别设置多组静力荷载,试算不同单元静载下立柱变形情况。各组单元静力荷载一位移组合情况见图 5。由图 5 可知:单元试验静载达到 610 kN 时,立柱沿受力方向横向位移量为 0.463 m,此时静力荷载做功值为 282.43 kJ,与设计防护能量基本一致。因此,可将 610 kN 作为等效单元静载对立柱承载能力和立柱后背支撑状况进行检验。该试验静载作用下立柱及支撑系统变形情况见图 6。

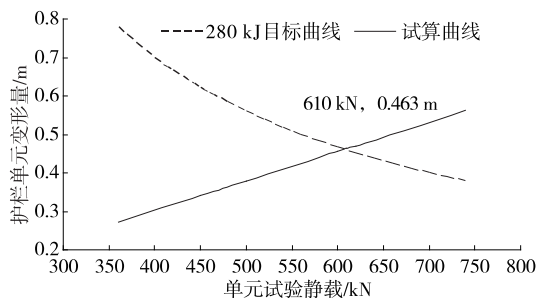


图5 SB级波形护栏单元静载—位移曲线

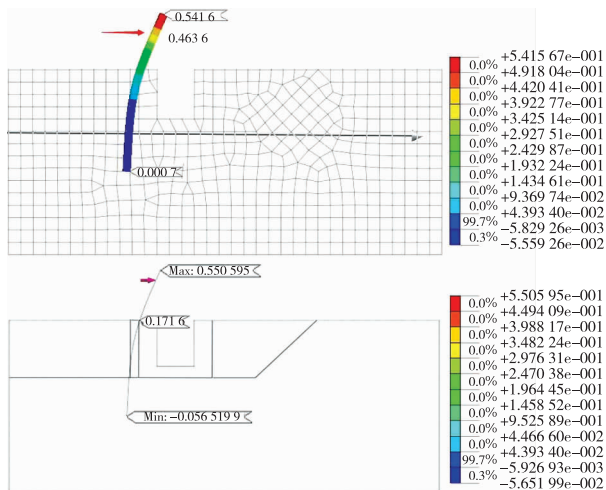


图6 等效单元静载作用下波形梁立柱受力状况(单位: m)

根据图6分析在等效单元静载作用下立柱沿受力方向产生的横向变形,立柱在路面高度为零的位置时横向位移为0.176 m,远超过立柱后土体宽度(0.07 m),对后背混凝土边沟产生明显挤压,挤压区范围为路面以下0~0.2 m,深度超过0.2 m后横向变形量逐渐减少,产生的应力逐渐消散,可由立柱自身和土体进行抵抗。可见,挖方路段波形护栏立柱的承载力受后背支撑系统影响大,在路表一定深度内需要边沟提供足够的支撑。立柱在路面1.43 m深度以下至立柱端部段基本无变形,表明静载对立柱的影响沿深度范围有限,采取加深或加长立柱的方法对提高立柱承载能力无明显效果。

图7为静载作用下立柱周边土体的应力分布,右侧柱状图中,下部深色为应力小的可忽略区域,浅色为应力大的不可忽略区域。由图7可知:以护栏为中心0.5 m范围内土体产生明显应力,土体应力最大处出现在路表靠边沟沟壁侧,最大值为5.766 MPa,此处土体位于护栏,受护栏传递的压力大,土体将被压缩破坏。

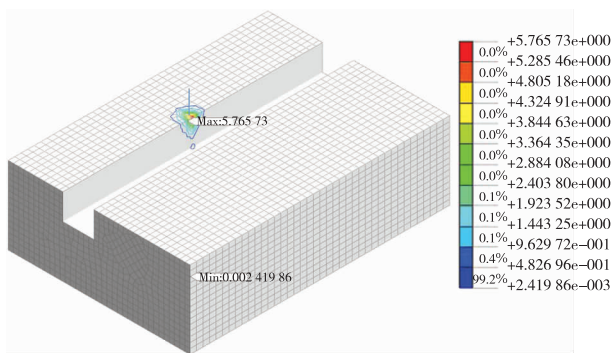


图7 等效单元静载作用下周边土体受力状况(单位: MPa)

图8为等效单元静载作用下立柱后C20混凝土边沟受力状况。由图8可知:混凝土边沟沟壁受立柱侧向挤压,沟壁内侧受压、外侧受拉,最外侧应力为10.14 MPa,在以立柱为中心4 m范围内的应力均超过普通C20混凝土的抗拉强度设计值(1.1~1.3 MPa),在护栏受车辆撞击后边沟侧壁存在整段垮塌的风险。

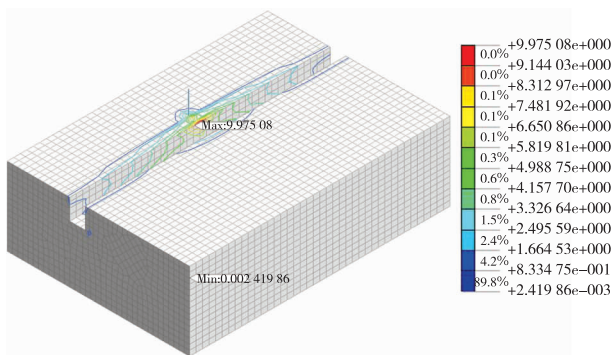


图8 等效单元静载作用下立柱后C20混凝土边沟受力状况(单位: MPa)

### 3 护栏加固与改造方案设计

为保证护栏具备足够的防护能力,减少迎撞面形成的风险,同时降低车辆撞击护栏后对挖方边沟的破坏,结合不同桥梁及路基迎交通流向护栏端头的实际情况,针对不同情况分别采取不同提升方案。

(1) 对于挖方处开口较小的路段,采取护栏连续布设的方法,通过连接上、下游护栏使该段护栏形成整体,从而避免端头的设置。由于部分挖方路段立柱后背支撑系统不足,需对挖方段边沟进行加固。可采取提高边沟抗拉强度或组合式基础的方法(见图9)。

(2) 挖方路段长、无外展条件。挖方路段较长时护栏连贯设置不经济,为使外展斜率和护栏防护性能满足要求,且不对边沟排水产生影响,护栏外展



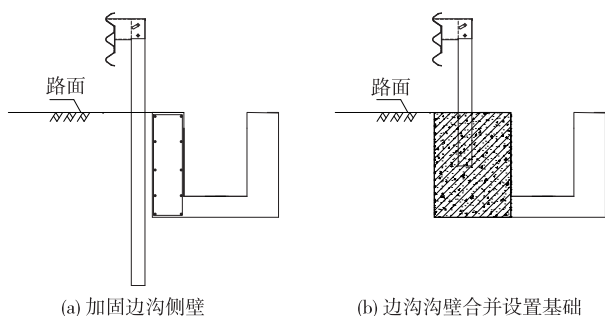


图9 挖方段护栏立柱承载力提升方案示意图

段在边沟范围内时,采取立柱上跨和回填边沟下穿排水管的方式(见图10、图11)。

以上两种方案采用规范推荐的独立基础形式,外展段护栏防护性能满足要求且兼顾了边沟排水需求,施工工艺简单、经济,能有效解决外展端头斜率不足等问题,降低安全风险。

## 4 结论

(1) 对高速公路桥梁及路基填挖交界处迎交通

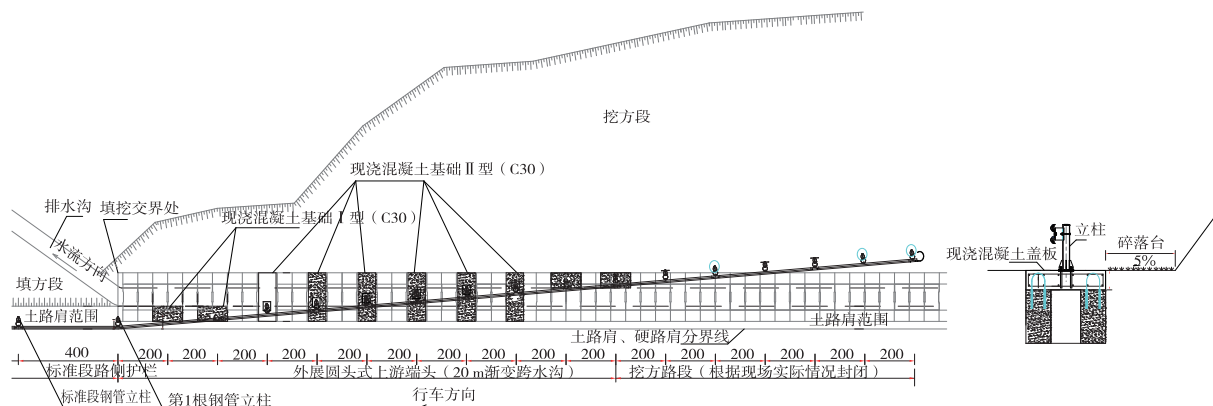


图10 现浇盖板基础上跨边沟(单位:cm)

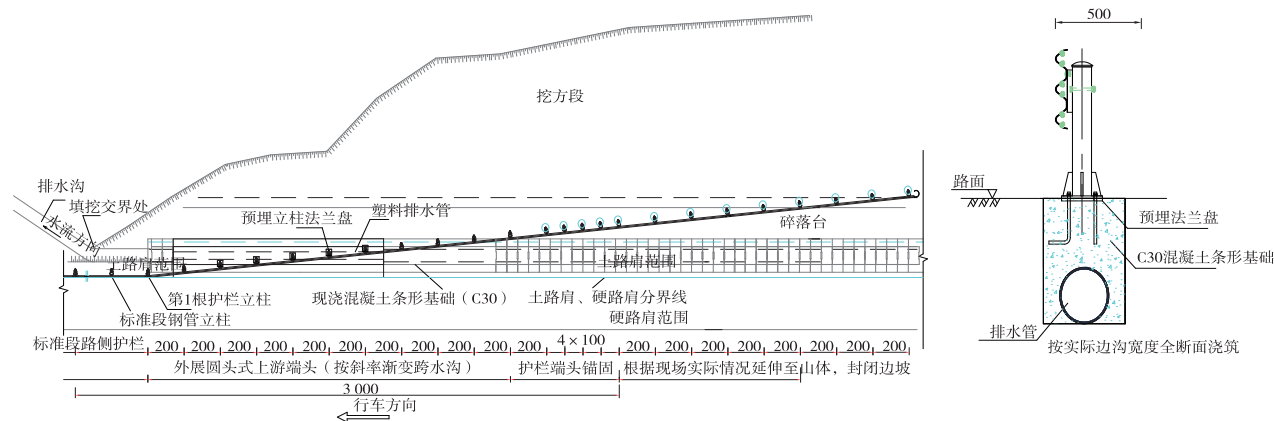


图11 局部边沟回填并设置下穿排水管(单位:cm)

流向护栏端头设置情况进行调查,分析得当前高速公路外展端头防护性能和外展斜率均难以满足JTG D81—2017《公路交通安全设施设计规范》的要求,存在较大安全隐患。

(2) 基于能量吸收理论,以护栏防护设计能量为指标建立护栏碰撞力等效静载分析方法,并利用有限元方法对JTG D81—2017推荐的SB级波形护栏立柱在挖方路段的防护性能进行研究,结果表明立柱受力后对混凝土边沟产生明显挤压,挤压区垂直范围为路面以下0~0.2 m,且在以立柱为中心4

m范围内产生的应力超过普通混凝土边沟的抗压强度,存在整段垮塌风险。

(3) 综合考虑经济性和施工便利性,提出挖方路段护栏加固和端头外展改造方案,该方案施工方法简单,既能保证护栏的防护性能,又兼顾了边沟的排水需求,可供同类工程参考。

## 参考文献:

- [1] 交通部公路科学研究院.公路交通安全设施设计技术细则:JTG/T D81—2006[S].北京:人民交通出版

- 社,2006.
- [2] 交通运输部公路科学研究院.公路交通安全设施设计规范:JTG D81—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [3] 北京深华达交通工程检测有限公司.公路护栏安全性能评价标准:JTG B05—01—2013[S].北京:人民交通出版社,2013.
- [4] 周翔海,陈卫霞,邓宝,等.波形梁护栏立柱承载能力研究[J].中外公路,2021,41(2):356—360.
- [5] 黄义飞.桥梁船撞响应及船撞力简化计算方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
- [6] 李江海,石红星.车辆与护栏的碰撞力计算方法[J].道路交通与安全,2014,14(2):49—52.
- [7] 闫书明.有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J].振动与冲击,2011,30(1):152—156.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张维刚,胡高贤.土基中波形梁护栏立柱的有限元模型研究[J].公路交通科技,2007,24(7):143—146.
- [11] 高玉恒,陈慧,李志强,等.高速公路波形梁护栏损坏等级划分[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(6):1181—1184.
- [12] 张立状.高速公路中央分隔带组合式护栏的碰撞安全性能研究[D].天津:河北工业大学,2015.
- [13] 闫书明.公路 SB 级三波形梁钢护栏安全应用技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [14] 陈玲.基于车辆碰撞试验的波形梁钢护栏改造方案研究[D].广州:华南理工大学,2007.
- [15] 李明哲.高速公路中央分隔带波形梁护栏改造方案研究[J].交通世界(上旬刊),2022(4):14—16+25.
- [16] 朱志勤,贾宁,王和林.高速公路中央分隔带波形梁护栏改造技术研究[J].特种结构,2016,33(3):80—85.

收稿日期:2022—03—10

\*\*\*\*\*

(上接第 5 页)

- [5] GHAYEBLOO A, RANDAN A. Superiority of dual-mechanical-port-machine-based structure for series-parallel hybrid electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 589—602.
- [6] PEI H X, HU X S, YANG Y L, et al. Configuration optimization for improving fuel efficiency of power split hybrid powertrains with a single planetary gear[J]. Applied Energy, 2018, 214: 103—116.
- [7] 宫唤春.并联插电式混合动力汽车建模与仿真分析[J].汽车工程师,2021(9):18—21.
- [8] QIN Z B, LUO Y G, ZHUANG W C, et al. Simultaneous optimization of topology, control and size for multi-mode hybrid tracked vehicles[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1627—1641.
- [9] 黄炫方,胡振球,彭再武,等.电动客车能耗仿真建模与分析[J].客车技术与研究,2019,41(5):15—17.
- [10] 王圣海.纯电动城市客车驾驶行为与能耗关系的统计分析[J].客车技术与研究,2020,42(1):60—62.
- [11] 刘建辉.串并联混合动力节能减排性能研究[J].电信快报(网络与通信),2015(9):42—46.
- [12] 余借光.并联式混合动力汽车节能减排性能提升的控制策略研究[D].大连:大连理工大学,2016.

收稿日期:2022—05—05

\*\*\*\*\*

(上接第 25 页)

- [12] 冯学慧.基于熵权法与正态云模型的大坝安全综合评价[J].水电能源科学,2015,33(11):57—60.
- [13] ZHANG Lei, JING Yachao. Research on comprehensive evaluation of military aircrafts' overhaul performance based on entropy weight and cloud model[C]//E3S Web of Conferences, 5th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering (AESEE 2021), 2021, 02065—02068.
- [14] 张建伟,廖小平,魏土荣.高速公路运营期高边坡安全风险评估体系研究[J].路基工程,2015(6):197—203.
- [15] 杨丰羽,赵艳,张燕飞.高速公路互通式立交路段交通事故特性分析[J].交通科技,2019(2):107—110.
- [16] 孙明玲,赵妮娜,刘莎.高速公路连续长大下坡交通事故与线形特征分析[J].道路交通与安全,2016,16(4):61—64.
- [17] 钟鼎文.高速公路隧道交通事故特征分析研究[J].科技创新与应用,2017(22):183—185.
- [18] ABDEL-ATY M, EKRAM A A, HUANG H L, et al. A study on crashes related to visibility obstruction due to fog and smoke[J]. Accident Analysis & Prevention, 2011, 43(5):1730—1737.
- [19] 张运福,林毅,李倩,等.气象条件对高速公路交通影响研究进展[J].黑龙江交通科技,2016(5):168—169.

收稿日期:2022—04—11