

一种新型装配式桥梁人—车隔离防撞护栏研究

周劲宇¹, 唐俊义^{2*}, 黄靖云³

(1. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 广东 广州 510000; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074;
3. 重庆市璧山区青杠街道规划建设管理环保办公室, 重庆市 400074)

摘要:近年来,失控机动车爬越人行道台阶破栏坠桥事故频发,对人民生命财产安全带来了一系列重大损失。基于此,迫切需要采取可行的措施以提高桥梁防撞护栏的防护性能,从而有效控制该类事故的发生风险和降低其后果。该文在深入总结现有各类桥梁防撞措施的应用特点和不足的基础上,提出一种新型装配式桥梁人车隔离防撞护栏。该护栏主要由护栏主体和锚固座组成,锚固座和底板前分别设立竖直抗力钢板与水平抗力钢板并采用螺栓连接。针对该护栏的特点,研究中首先就其受力特征进行传力途径概念分析。其后,依据相关设计规范选取标准碰撞荷载,采用精细化有限元方法对该类新型护栏和传统护栏进行对比,综合考虑整体和各部件的细部力学行为。在此基础上,研究中依据标准碰撞荷载进行放大,对上述两类护栏在极限状态下的失效荷载和失效模式展开进一步的对比分析。结果表明:该文提出的新型护栏满足规范要求,且相比于传统护栏防撞性能具有较明显的提升。

关键词:防撞护栏;桥梁;标准碰撞荷载;有限元仿真

中图分类号: U417.1+2

文献标志码: A

防撞护栏作为公路交通安全设施中最常见的被动防护设施,可以一定程度上确保路侧行人和车上乘员的生命安全,同时兼有诱导驾驶员视线、增加行车安全感和美化公路环境的作用^[1-2]。但近年来,失控车辆冲破护栏坠落桥下的事故时有发生^[3],研究表明:发生坠桥事故的一大原因在于既有桥梁人行道与车行道的高差太小(一般为25 cm)导致失控车辆易爬上并越过人行道进而冲破护栏。为有效提升桥梁护栏的防撞性能,合理解决失控车辆冲破护栏发生坠桥事件,该文针对既有桥梁加固设计和新桥设计过程分别提出不同的解决方案。

1 现有解决方案研究

根据前文所述,合理有效解决失控车辆发生坠桥事件的思路在于合理设计车行道与人行道的相对高度或是根据需要在路侧边缘设立防撞护栏,以此防止失控车辆爬上人行道造成更大的人员伤亡与财产损失。

1.1 新桥设计

刚性护栏由于质量较大,受到碰撞后基本不产生变形,能抵抗强大横向水平冲击力^[4],因此在设计中通

常将这种护栏设置在人行道边缘以此来抵御失控车辆的碰撞;另外考虑到现有的人行道和行车道高差太小,也有在新桥设计时直接采用增高人行道的方案。这两类方案本质上都是采用以混凝土为主的刚性护栏,因此对于桥梁护栏的防撞性能有较大提升,但是车辆与该类护栏碰撞时,车辆将产生变形,给乘员生命带来一定安全风险^[5-7]。同时,刚性护栏的应用也将明显增加桥梁自重,造成后续桥梁的维修养护成本提高。

1.2 旧桥加固设计

既有桥梁的加固设计中由于恒载增加会导致桥梁的力学行为与设计出入较大,因此通常多采用在人行道路缘石上设置栏杆立柱锚固座,锚固座之间固定金属管的防撞方案^[8]。应用该类半刚性护栏的优点在于其栏杆多采用钢管等柔性构件,具有较好韧性和缓冲能力,能够起到保护乘车人员和减少车辆损失的目的;同时结构轻型、安装简便。但该类设施防车辆翻越效果较差,且在其受力后易出现金属管和锚栓损坏从而导致护栏直接失效^[9-11]。

可以看出,现有各类桥梁防撞护栏方案均存在各自的应用特点和不足之处。因此,迫切需要研发一种新型桥梁防撞护栏,在不明显增加桥梁自重、影响桥梁

收稿日期:2021-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778094);重庆交通大学研究生科研创新项目(编号:2021S0019)

作者简介:周劲宇,男,高级工程师。E-mail: 461222122@qq.com

* 通信作者:唐俊义,男,硕士研究生。E-mail: j. y. Tang@mails. cqjtu. edu. cn

受力行为的基础上,提高护栏韧性和抗冲击能力,实现有效可靠的车辆防撞和对车内成员的保护。

2 新型装配式桥梁人车隔离防撞护栏概念设计

2.1 设计思路

前文所述的两类护栏虽然在防止汽车坠落、确保乘车人员安全与减小车辆损失方面具有各自的应用优势,但是均存在明显的不足之处。因此,该文在现有阻挡车辆坠桥措施基础上提出一种针对桥梁既有人行道

高度不足阻挡失控汽车爬越破栏坠桥问题的第三类桥梁栏杆,即新型装配式桥梁人车隔离防撞护栏(以下简称新型隔离护栏,如图1所示)。其设计思路主要体现在以下3个方面:

(1) 竖立面栏杆从构造形式上对既有人行道有效增高,阻止车辆爬越,同时采用倒U形截面设计以增大其横向刚度。

(2) 栏杆通过锚固座与混凝土路缘石连接成为整体,充分发挥路缘石的圬工自重对车辆冲击的抑制作用。

(3) 锚固座同时采用水平螺栓和竖直螺栓与路缘石连接,充分发挥锚固螺栓的抗剪性能。

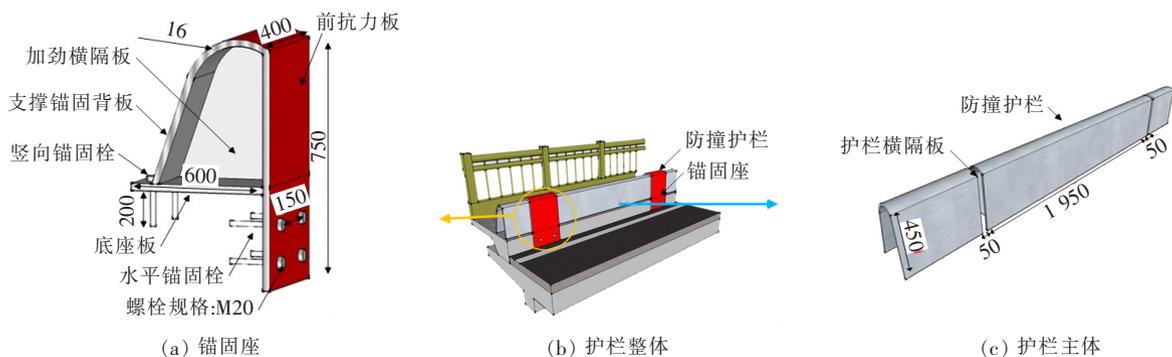


图1 新型隔离护栏(单位:mm)

2.2 传力路径概念分析

基于上述设计,研究中对新型隔离护栏和既有隔离护栏(以下简称常规护栏)进行了碰撞荷载下的传力路径概念分析,如图2所示。

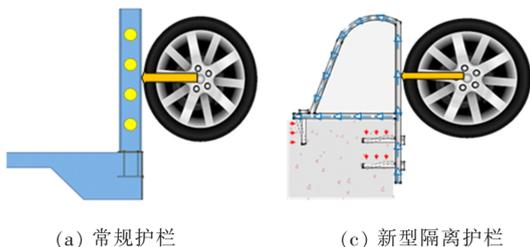


图2 传力途径对比图

从图2可以看出:发生碰撞时,相较于常规护栏仅依靠立柱和底部钢板的焊接效果来抵御护栏内部产生的拉应力,新型隔离护栏传力方式更为科学、可靠。当荷载作用到前抗力板上时,一部分荷载直接通过底座钢板往锚固座后方传递。这部分荷载主要对竖直螺栓形成剪力作用,而通过螺栓的抗剪传递到混凝土中;此外,由于荷载会对锚固座产生弯矩作用,在锚固座内部同时会形成沿着由前抗力板到背板的剪力流,这部分作用主要由水平螺栓承担,通过其抗剪传递到混凝土中。

3 基于精细化有限元的对比分析

为进一步分析验证新型隔离护栏的防撞性能,研究中选取上述既有隔离防撞护栏进行对比分析,其具体结构尺寸如图3所示。

3.1 车辆横向碰撞荷载标准值确定

在进行桥梁护栏设计时,通常需要首先确定护栏的设计防护等级^[12-14],其后依据 JTG/T D81—2017《公路交通安全设施设计细则》^[15]确定车辆碰撞荷载标准值 F_v ,如表1所示。该文所提出的新型隔离护栏属于柔性护栏结构,因此分析中选取该类护栏设计中较常用的SA级,同时相应地选取了该等级下最大的345 kN作为标准碰撞荷载。

3.2 有限元模型建立

3.2.1 建模与网格划分

研究采用 Ansys—APDL 通用有限元软件对两类护栏建立了精细化有限元分析模型,如图4所示。模型主要包括桥梁和人行道结构、护栏、锚固座和锚固螺栓。其中,护栏和锚固座采用由三维弹塑性壳单元 Shell181 进行模拟,单元尺寸为 100 mm。桥梁和人

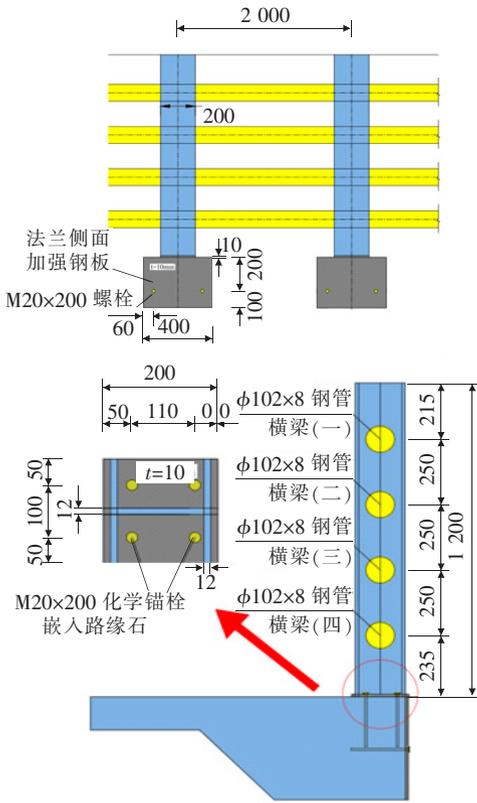


图 3 既有隔离护栏尺寸图(单位: mm)

表 1 汽车横向碰撞荷载标准值

防护等级	代码	标准值 F_t /kN		分布长度/m
		$D=0$ m	$D=0.3\sim 0.6$ m	
一	C	70	55~45	1.2
二	B	95	75~60	1.2
三	A	170	140~120	1.2
四	SB	350	285~240	2.4
五	SA	410	345~295	2.4
六	SS	520	435~375	2.4
七	HB	650	550~500	2.4
八	HA	720	620~550	2.4

注: D 为桥梁护栏的最大横向动态变形值。

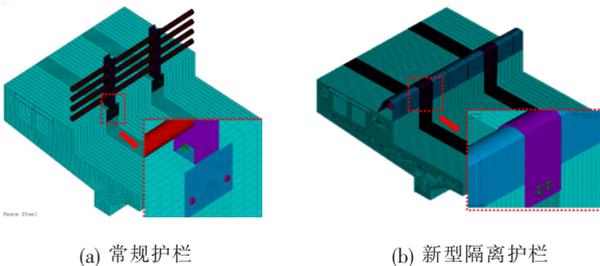


图 4 护栏的有限元模型

行道结构采用三维实体单元 Solid65 模拟,全局尺寸为 20 mm,在锚固座处局部精细化为 5 mm。螺栓采

用三维实体单元 Solid185 模拟,尺寸为 5 mm。

3.2.2 边界条件与构造连接模拟

由于该文主要研究对象为护栏,因此仅对桥梁和人行道结构建立了局部模型进行模拟。分析中对有限元模型的左、右、前、后端和底面进行 3 个方向自由度的约束。同时,模型中存在螺栓与锚固座、螺栓与混凝土、锚固座与混凝土以及栏杆与锚固座的多个接触关系。其中,螺栓与混凝土的接触界面上采用位移插值耦合的方式进行连接。其余均采用面-面接触单元建立模型。

3.2.3 材料本构模型选取

为统一起见,研究中针对两类护栏均采用桥梁用结构钢 Q345 作为护栏钢板,而螺栓的性能等级取为 10.9 级。相应地,分析中采用双线性模型对钢材的弹塑性本构进行模拟。

3.2.4 荷载作用模拟

根据 JTG/T D81—2017《公路交通安全设施设计细则》中关于车辆横向荷载标准值的选取规则并考虑到碰撞过程中荷载实际作用范围,该文选取了防护等级五(SA)对应下的标准荷载及分布长度,即 345 kN 荷载和 2.4 m 作用长度的组合。

3.3 标准和极限碰撞荷载下护栏详细应力与变形

3.3.1 护栏变形

图 5 为两类护栏在标准荷载下的变形分析(图 5 中,左为常规护栏,右为新型隔离护栏)。

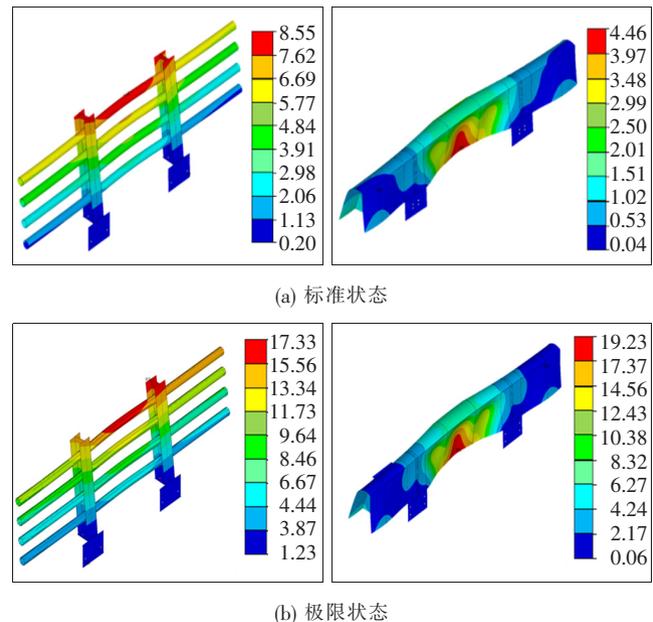


图 5 护栏变形对比(单位: mm)

总体来看,在标准荷载下,常规护栏变形有明显的倾倒趋势,其最上端变形达到 8.55 mm。相反,新型

隔离护栏主要呈现凹陷变形,仍能保持与水平面相对垂直,其最大变形值仅为常规护栏的52%(4.46 mm)。此外,新型隔离护栏中,远离荷载作用范围的变形明显减小。而极限碰撞荷载作用下,常规护栏出现显著的倾侧变形,可能导致车辆在其达到极限状态之前即已翻越护栏坠桥。相应地,新型隔离护栏仍然主要呈现出凹陷变形的趋势,从而保证在其极限状态达到之前都能够为碰撞车辆提供有效的保护。

3.3.2 护栏应力

图6为两类护栏在标准荷载下的等效力(即冯米塞斯应力)。

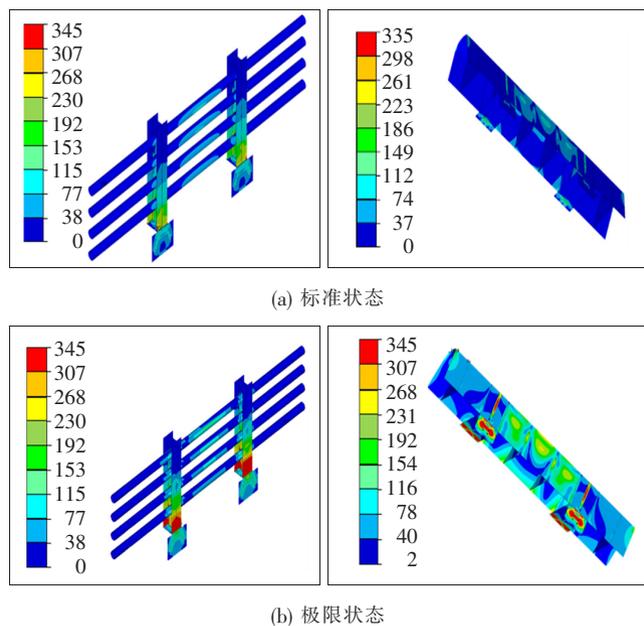


图6 护栏应力对比(单位:MPa)

从图6可以看出:常规护栏的峰值应力出现在柱座底部,而新型隔离护栏的峰值应力仅出现在锚固节点板螺栓孔附近。特别地,常规护栏底部已出现了较为明显的塑性屈服。因此在极限应力状态下,其塑性屈服进一步发展,将导致护栏整体刚度下降从而无法继续承载。相应地,新型隔离护栏的锚固座峰值应力尚低于屈服应力,具有较好的进一步承载能力,且在极限应力状态下护栏在锚固座节点板孔壁和横隔板处出现塑性屈服,且屈服区域分布较为广泛,充分发挥了各个部件的材料性能。因此也证明在传力路径上较常规护栏更为科学合理。

3.3.3 螺栓应力

两类护栏螺栓在标准荷载下的等效力见图7。

相较于常规护栏中的锚固螺栓,新型隔离护栏的锚固中水平螺栓应力峰值降低约55%,竖直螺栓应力

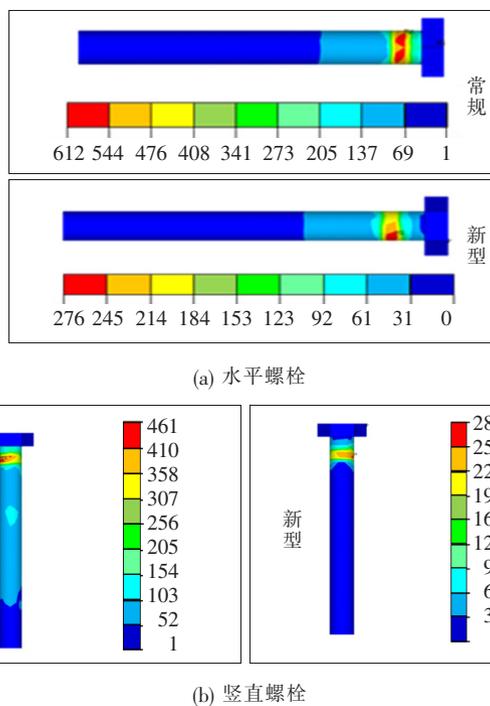


图7 两类护栏锚固螺栓应力对比(单位:MPa)

峰值降低约38%。对比结果表明:相较于常规护栏,新型隔离护栏的连接构造在标准荷载作用下尚存在较为可观的承载力储备。此外,虽然两种护栏的锚固螺栓应力均在弹性范围内,但常规护栏的水平螺栓最大应力已经达到了612 MPa,非常接近屈服应力900 MPa,表明其剩余承载能力有限。达到极限应力状态时,两种护栏中水平螺栓的峰值等效力较为接近,均在700 MPa左右,未达到塑性屈服状态。同时,两种护栏中竖直螺栓均达到了900 MPa的屈服应力。值得注意的是,新型隔离护栏中锚固螺栓已出现大范围的塑性屈服,表明其最终失效是由于螺栓无法继续承载导致。相反地,常规护栏的锚固螺栓仅出现极为局部的塑性屈服,结合在标准工况下的应力情况可以表明其最终失效是由柱座的塑性失效引起,而螺栓尚有一定承载能力。

3.3.4 混凝土的破坏形式

两种护栏的混凝土开裂失效区域(灰色部分)如图8所示。

由图8可以看出:两种护栏中,竖直螺栓和水平螺栓处混凝土均存在不同程度的失效。此外,在常规护栏的水平螺栓附近,已出现较大范围的混凝土失效,而新型隔离护栏仅在锚固螺栓附近出现了较为有限的混凝土失效。在极限状态下采用常规护栏时混凝土桥面开裂区域仅局限在角点附近,而采用新型隔离护栏时,

这一开裂区域出现了较为可观的开裂失效,可以充分发挥主梁圬工结构在防撞中的效率。

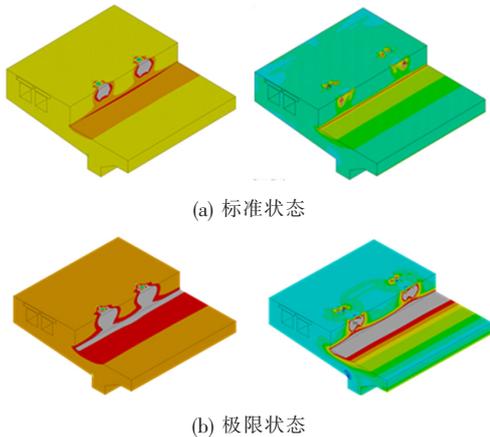


图 8 混凝土失效区域

4 新型隔离护栏的构造完善

从前文的有限元分析中可以看出:在标准碰撞荷载作用下常规护栏已有明显的倾倒趋势,可能导致车辆在其达到极限状态之前即已翻越护栏坠桥。造成这一现象的原因在于此类护栏在设计时除了需要达到汽车碰撞荷载要求还需要起到隔离行人的目的。因此解决这一问题,该设计护栏在已有的汽车防撞设计基础上,仅需在顶部安装一栏杆便可以达到隔离行人的目的,同时也发挥了材料的最大性能。

5 结论

从当前桥梁防撞护栏普遍存在的车辆破栏坠桥事故风险出发,深入剖析当前桥梁防撞护栏研究现状,结合各类护栏的应用优势,提出了一种新型装配式桥梁人车隔离防撞护栏,采用概念分析、精细化有限元对比分析等手段,对其防撞性能进行了深入阐释,得到以下结论:

(1) 提出了一种针对桥梁既有人行道高度不足阻挡失控汽车爬越破栏坠桥问题的第三类桥梁栏杆,即新型装配式桥梁人车隔离防撞护栏。该类护栏在实现装配式施工的基础上,利用锚固座与路缘石连接形成整体,从而充分发挥路缘石的圬工自重对车辆冲击的抑制作用。

(2) 在标准碰撞荷载作用下,两类护栏均满足规范要求且存在一定的承载力储备。其中,常规护栏变形有明显的倾倒趋势而新型隔离护栏主要呈现凹陷变

形,仍能保持与水平面相对垂直。此外,新型隔离护栏最大变形值仅为常规护栏的 52%。

(3) 常规护栏在标准荷载作用下已在其柱座底面出现了局部塑性变形,表明其承载能力增加有限。相反地,新型隔离护栏在标准荷载下锚固座峰值应力尚低于屈服应力。此外,标准荷载下新型隔离护栏的锚固螺栓应力较常规护栏显著降低,其中水平螺栓峰值应力降低约 55%,竖直螺栓峰值应力降低约 38%。此外,在标准荷载作用下常规护栏的水平螺栓附近已出现较大范围的混凝土失效,而新型隔离护栏仅在锚固螺栓附近出现了较为有限的混凝土失效。

(4) 新型隔离护栏的极限承载能力为 934 kN,达到常规护栏的极限承载力(592 kN)的 1.5 倍。同时,极限承载能力分析表明,常规护栏首先在其柱座底部出现较大的屈服区域,导致碰撞荷载无法进一步传递至人行道路缘石,从而引起护栏整体失效。相反地,新型隔离护栏中锚固螺栓已出现大范围塑性屈服,表明其最终失效是由于螺栓无法继续承载导致。此外,采用新型隔离护栏时,极限状态下混凝土桥面板开裂范围明显较常规护栏增加,表明其充分发挥了路缘石的材料性能,从而达到承受更大碰撞荷载的目的。

(5) 该文提出的护栏在已有的构造基础上仅需在上部添加行人隔离栏杆便可以起到隔离行人的目的,发挥了材料的最大效益。

参考文献:

- [1] 王英,杜明峰,张大伟. 基于屈服线理论的组合式防撞护栏设计方法[J]. 城市道桥与防洪, 2020(3): 98-99, 16.
- [2] KLASZTORNY M, NYCZ D B, DZIEWULSKI P, et al. Numerical Modelling of Post-Ground Subsystem in Road Safety Barrier Crash Tests[J]. Engineering Transactions, 2019, 67(4): 513-534.
- [3] 10·28 重庆公交坠江事故! [EB/OL]. (2018-11-06) [2020-09-27]. <https://new.qq.com/omn/20181106/20181106B0N4W7.html>, 2018-11-06.
- [4] 巩妮娜. 浅谈金属梁柱式桥梁护栏[J]. 交通标准化, 2007(12): 165-166.
- [5] 裴玉龙, 曹弋, 付川云. 基于动量定理的汽车单次三维碰撞运动状态参数计算模型[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3): 80-85.
- [6] REZAPOUR M, KSAIBATI K. Application of Machine Learning Technique for Optimizing Roadside Design to Decrease Barrier Crash Costs, A Quantile Regression Model Approach[J]. Journal of Safety Research, 2021, 78: 19-27.