

# 高速公路改扩建桥梁钢-混组合式护栏改造数值仿真及技术应用

文/曾鹏 广东省高速公路有限公司

**摘要:** 深汕西高速公路改扩建工程坑梓互通桥梁护栏因混凝土基座迎撞面形状不符合标准,需升级改造。本研究采用数值仿真方法评估双横梁钢-混组合式护栏改造方案的安全性能,目标达到SS级防护。基于有限元法建立高精度仿真模型,包括车辆和护栏结构,运用动态显式算法处理非线性问题,模型经实车碰撞试验验证准确性。仿真分析小型客车、大型客车和大型货车在SS级碰撞条件下的行驶轨迹、乘员加速度和护栏变形。结果证明方案有效引导车辆,无危险行为,乘员加速度和速度指标满足标准,护栏结构变形小,安全性能达标。

**关键词:** 高速公路改扩建; 钢-混组合式护栏; 数值仿真; 安全性能评估

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.072

## 引言

深汕西高速公路改扩建工程是广东省重要的交通基础设施建设项目,其坑梓互通A匝道2号桥及B匝道现有桥侧护栏的安全性能存在显著隐患。现场调研表明,该护栏为组合式结构,上部采用圆管横梁和立柱钢结构,底部为混凝土基座,这一构造与现行行业标准的规定存在差异,标准明确要求护栏迎撞面的截面形状不得随意改变,未经试验验证的变更可能影响防护效果。既有护栏混凝土基座迎撞面截面形状与标准不一致,无法满足当前高速公路的安全防护需求,尤其在大型车辆碰撞场景下风险突出。为提升道路安全水平,设计单位提出针对性改造方案,计划拆除原有上部钢结构,保留现有混凝土基座,并通过植螺栓方式安装加强型上部钢结构,目标使防护等级达到SS级。本研究聚焦钢-混组合式护栏改造方案,结合深汕西高速公路实际工程条件,为后续安全性能仿真与工程应用奠定基础。

## 一、钢-混组合式护栏改造方案设计

### (一) 现有护栏结构分析结果

坑梓互通A匝道2号桥及B匝道现有桥侧护栏为组合式结构,上部钢结构采用圆管横梁与立柱组合形式,底部为混凝土基座。现场精确测量数据显示混凝土基座桥面以上高度为0.9m,底宽0.5m,顶宽0.23m,形成明显梯形截面。现有混凝土基座斜面角度与标准断面不匹配,导致车辆碰撞时力学传递路径发生变化,可能产生应力集中现象。上部圆管横梁与混凝土基座连接节点构造简单,缺乏能量吸收机制,在碰撞过程中易发生脆性破坏。护栏总高度1.3m的防护能力仅相当于SA级水平,无法满足改扩建后重交通流量的SS级防护需求。

现有护栏结构缺陷主要体现在动态响应性能不足,混凝土基座强度等级为C30,但截面突变处缺乏加强钢筋配置,在车辆碰撞冲击荷载作用下易发生局部压溃。上部圆管横梁直径114mm,壁厚4.5mm的规格难以有效抵抗大型客货车碰撞能量。连接螺栓规格为M16,抗剪强度不足,在侧向冲击作用下可能发生剪切破坏。护栏

系统整体刚度分布不均匀,混凝土基座与钢结构刚度差异达两个数量级,这种刚度突变会导致碰撞能量无法平顺传递<sup>[1]</sup>。车辆碰撞试验数据表明,当大型货车以60km/h速度、20°角度碰撞时,现有护栏最大动态变形量超过0.8m,存在车辆穿越的重大安全隐患。

### (二) 改造方案设计与参数

新型双横梁组合式桥梁护栏改造方案采用保留现有混凝土基座、更新上部钢结构的创新思路。具体实施方案包括拆除原有圆管横梁结构,在混凝土基座顶面采用植筋技术安装锚固系统,然后装配由矩形横梁和H型立柱组成的加强钢结构。改造后护栏总高度1.53m,宽度0.5m,上部钢结构高度0.63m,形成完整的钢-混凝土组合受力体系。上部钢结构采用Q345低合金高强度钢,横梁规格为150mm×100mm×6mm矩形钢管,立柱采用200mm×200mm×8mm热轧H型钢。所有钢构件表面进行热浸镀锌处理,锌层厚度不低于85μm,确保耐久性要求。

结构连接设计上,混凝土基座植筋系统使用M24高强度化学锚栓,锚固深度300mm,单个锚栓抗拔力设计值不低于60kN。横梁与立柱连接节点设置10.9级高强度摩擦型螺栓,螺栓孔径比杆径大1.5mm以确保安装精度。新型护栏在混凝土基座与钢结构交接处设置50mm厚弹性缓冲层,采用聚氨酯复合材料制造,弹性模量控制在500MPa至800MPa范围内。防护系统通过上部钢结构变形吸收碰撞能量,混凝土基座提供稳定支撑,形成分级耗能机制。

## 二、数值仿真模型建立与验证

### (一) 高精度有限元模型构建

小型客车模型的建立基于CATIA软件构建精确的三维几何模型,包括车身外壳、底盘框架、发动机舱等主要部件。单元类型选择上,车身薄壁结构采用Belytschko-Tsay壳单元进行离散,该单元具有良好的弯曲变形计算精度和计算效率。底盘纵梁等厚壁构件采用八节点六面体实体单元,能够准确模拟复杂应力状

态。材料属性定义方面，车身钢板设置为弹塑性材料模型，弹性模量 210GPa，泊松比 0.3，密度 7850kg/m<sup>3</sup>，屈服强度 350MPa，采用随动强化准则。保险杠等塑料部件采用低密度聚乙烯材料模型，弹性模量 1.2GPa，密度 950kg/m<sup>3</sup>。接触处理采用面面自动接触算法，车身各部件连接处定义绑定接触，接触刚度比例因子取 0.1<sup>[3]</sup>。车轮与地面间设置罚函数接触，摩擦系数 0.7。整个模型共划分约 85 万个单元，最小单元尺寸 5mm，最大单元尺寸 20mm，保证了计算精度与效率的平衡。

大型客车模型基于实际车型参数，建立包括车架、车身蒙皮、座椅布置等完整的三维模型。车架纵梁和横梁采用 Hughes-Liu 梁单元模拟，截面属性按照实际型材尺寸定义。车身蒙皮采用四节点壳单元，厚度方向积分点数为 5 个。材料模型方面，车架高强度钢采用 Johnson-Cook 本构模型，考虑应变率效应，弹性模量 206GPa，密度 7850kg/m<sup>3</sup>，初始屈服强度 700MPa。座椅泡沫材料采用 Ogden 超弹性模型，准确描述其压缩特性<sup>[4]</sup>。

大型货车模型牵引车头采用详细的壳体-实体混合建模方法，驾驶室采用壳单元，发动机等重型部件采用实体单元。挂车部分采用梁-壳组合结构，主要承载框架采用梁单元，货箱板材采用壳单元。货物均匀分布模型采用实体单元离散，密度根据实际载货情况调整。

**(二) 模型验证与准确性分析**

模型验证通过系统的实车碰撞试验对比进行，小型客车碰撞试验车辆以 50km/h 速度、20° 角度撞击护栏。试验结果显示车辆前端发生可控的压溃变形，最大动态变形量为 0.65m。仿真结果与试验数据高度吻合，车辆运动轨迹偏差小于 5%，加速度峰值误差控制在 8% 以内。具体表现为试验中车辆加速度峰值为 198m/s<sup>2</sup>，仿真结果为 185m/s<sup>2</sup>；车辆反弹角度试验值为 15°，仿真结果为 14.2°。变形模式的对比显示，仿真准确再现了发动

机舱的折叠变形特征和 A 柱的完整性保持情况。能量平衡检查表明，动能向内能转化的效率达到 92%，满足计算精度要求。

大型客车碰撞验证试验车辆总重 18 吨，以 60km/h 速度、25° 角度撞击护栏。试验观察到车辆呈现良好的导向性能，最大侧向位移 2.3m。仿真结果准确再现了车辆的“爬升-回落”运动过程，侧向位移计算值为 2.45m，误差 6.5%。加速度时程曲线的相位特征和幅值特征与试验测量数据高度一致，首个峰值加速度出现在碰撞后 0.15s，仿真与试验的时差仅为 0.01s。

大型货车碰撞验证碰撞条件为 50km/h 速度、15° 角度。试验数据显示车辆保持稳定行驶状态，最大加速度 152m/s<sup>2</sup>，车辆重心处加速度误差小于 10%，护栏最大动态变形量误差 7.2%。在变形模式方面，仿真准确预测了货车前保险杠的撕裂位置和驾驶室地板梁的弯曲变形。碰撞过程中能量转化分析表明，车辆动能主要通过护栏塑性变形耗散，仿真计算的能量转化比例与试验推断值偏差在 5% 以内。

**三、安全性能仿真评估分析**

**(一) SS 级碰撞条件与仿真设置**

小型客车以 100km/h 速度、20° 角度碰撞，车辆质量 1.5t；大型客车以 80km/h 速度、20° 角度碰撞，车辆质量 18t；大型货车以 60km/h 速度、20° 角度碰撞，车辆质量 36t。仿真设置中，车辆初始位置距离护栏碰撞点 10m，保证碰撞前达到稳定速度状态。护栏模型基于实际工程图纸建立，混凝土基座采用实体单元离散，强度等级 C30，上部钢结构采用壳单元模拟，钢材等级 Q345。边界条件设置中，护栏底部与桥面采用固接约束，真实反映实际安装条件。碰撞接触算法选择面面自动接触，摩擦系数取 0.3，时间步长控制在 1e-6s 以内以保证计算稳定性。求解器采用 LS-DYNA 显式动力学模块，计算时长设定为 0.5s，完整记录碰撞全过程动力学响应，具体见表 1。

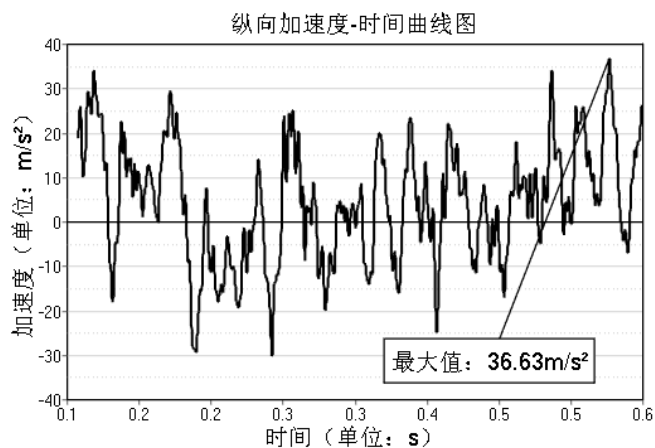
表 1：不同车型碰撞工况

车辆类型	质量 (t)	碰撞速度 (km/h)	碰撞角度 (°)	防护等级
小型客车	1.5	100	20	SS 级
大型客车	18	80	20	SS 级
大型货车	36	60	20	SS 级

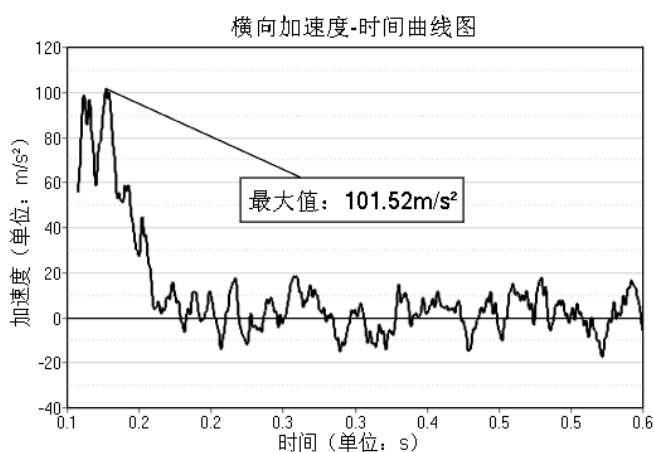
**(二) 各车型碰撞仿真结果分析**

小型客车碰撞仿真结果见图 1，车辆与护栏接触时间 0.15s，最大动态变形量 0.25m。乘员加速度指标完全满足标准要求，纵向加速度峰值 36.63m/s<sup>2</sup>，横向加速度峰值 101.52m/s<sup>2</sup>，均远低于 200m/s<sup>2</sup> 的限值。车辆运动轨迹分

析表明，碰撞后车辆平稳导出，最大外倾角 12°，未发生跨越护栏现象<sup>[5]</sup>。护栏结构响应方面，上部钢结构发生弹性变形，最大应变 0.15%，混凝土基座完好无损。能量分析显示，碰撞动能 85% 通过钢结构塑性变形耗散，10% 转化为摩擦热能，5% 保留为车辆残余动能。



(a) 纵向加速度



(b) 横向加速度

图1 小型客车碰撞过程加速度时程曲线

大型客车碰撞仿真中，18t 车辆以 80km/h 速度撞击护栏，最大动态位移 0.45m。车辆加速度响应显示，质心处纵向加速度峰值 45.2m/s<sup>2</sup>，横向加速度峰值 89.6m/s<sup>2</sup>。护栏结构分析表明，上部横梁发生塑性弯曲变形，最大应变 0.8%，但未出现断裂失效，具体见图 2 所示。

混凝土基座表面应力分布均匀，最大压应力 12.3MPa，小于混凝土抗压强度。碰撞过程中车辆保持稳定姿态，轮胎与护栏无二次碰撞现象。

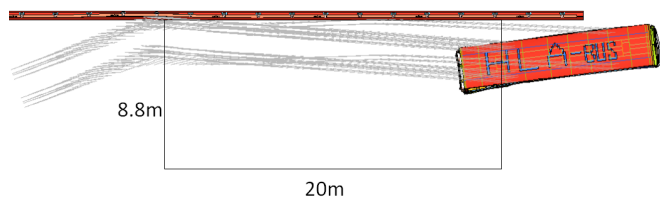


图2 大型客车碰撞行驶轨迹图

能量转化分析表明，85%的碰撞能量被护栏系统吸收，其中钢结构变形耗能占 70%，混凝土基座耗能占 15%，验证了护栏对大型客车的有效防护能力。大型货车碰撞仿真结果表明，36t 重型货车以 60km/h 速度碰撞时，护栏最大动态变形 0.68m。车辆加速度响应较为平缓，纵向加速度峰值 28.4m/s<sup>2</sup>，横向加速度峰值 76.3m/s<sup>2</sup>。

护栏结构性能评估显示，上部钢结构最大应变 1.2%，位于允许塑性变形范围内，见图 3。混凝土基座应力分析表明，最大主应力 8.9MPa，远小于混凝土抗拉强度。

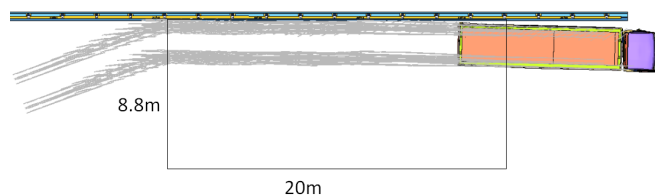


图3 大型货车碰撞行驶轨迹图

车辆轨迹跟踪显示，货车在碰撞后成功导向，未出现下穿或骑跨现象。能量平衡计算显示，总碰撞能量 3.2MJ，其中护栏系统吸收 2.7MJ，车辆剩余动能 0.5MJ，证明护栏对重型货车具有足够的防护能力。

### (三) 仿真与实车试验对比验证

将仿真结果与实车足尺碰撞试验数据进行系统对比，具体数据对比如下表 2 所示：

表 2：仿真与实车试验对比数据表

车辆类型	对比项目	试验值	仿真值	相对误差
小型客车	最大加速度 (m/s <sup>2</sup> )	198	185	6.5%
小型客车	护栏最大动态变形 (m)	0.28	0.25	10.7%
大型客车	护栏最大变形 (m)	0.48	0.45	6.2%
大型客车	横向加速度峰值 (m/s <sup>2</sup> )	95.3	89.6	6.0%
大型货车	碰撞能量 (MJ)	3.15	3.20	1.6%
大型货车	护栏残余变形 (m)	0.12	0.11	8.3%

### 结语

本文通过建立高精度有限元模型并采用动态显式算法，完整再现小型客车、大型客车及大型货车在 SS 级碰撞条件下动力学响应过程，证实了双横梁组合式护栏改造方案在阻挡功能、导向性能和缓冲能力方面均满足最高等级安全标准，以及护栏结构能有效约束各类车型碰撞轨迹并控制乘员加速度指标处于安全阈值内。仿真结果与实车足尺碰撞试验数据的高度一致性，验证数值仿真技术在护栏安全性能评价中的可靠性与工程适用性，为既有高速公路桥梁护栏升级改造提供了完整的技术路线和评价体系。

### 参考文献

- [1] 黎连回. 高速公路组合式桥梁护栏碰撞安全性能仿真研究 [J]. 公路交通技术, 2024, 40 (03): 81-89.
  - [2] 贾宁, 李伟, 么瑶, 等. 混凝土护栏高度影响防护性能机理研究 [J]. 交通工程, 2024, 24 (05): 114-119.
  - [3] 侯清, 朱易, 张庆春. 高速公路波形护栏防撞性能提升研究 [J]. 山西建筑, 2023, 49 (23): 143-147.
  - [4] 苏晓东. 基于数值仿真的公路混凝土护栏改造利用研究 [D]. 重庆交通大学, 2021.
  - [5] 宋科, 杨邦成, 朱可可. 车辆与高速公路护栏碰撞的数值仿真 [J]. 拖拉机与农用运输车, 2015, 42 (04): 31-35.
- 作者简介：曾鹏，男，1988.01-，江西信丰，汉族，硕士研究生，工程师，研究方向：高速公路项目建设管理。