

高速公路护栏结构性能评估与新型防护装置研发

孙海强

山东高速威海发展有限公司 山东 威海 264200

摘要：本文聚焦高速公路护栏结构性能评估与新型防护装置研发。通过调研全国多省份高速公路护栏现状，构建包含安全性能等多维度的评估体系，采用多方法综合评估护栏性能。基于评估结果明确新型装置研发需求与目标，设计复合结构并开展拓扑优化。同时制定安装工艺、养护方案，提出“试点先行+逐步推广”策略。研究成果可提升护栏防护能力，为高速公路安全保障提供理论与技术支持。

关键词：高速公路护栏；结构性能评估；新型防护装置；安全性

1 高速公路护栏防护相关概述

高速公路护栏，作为道路安全保障体系当之无愧的核心设施，肩负着碰撞缓冲、轨迹校正以及风险阻隔等关键使命，在降低交通事故伤亡率方面发挥着不可替代、至关重要的作用。随着我国高速公路里程如雨后春笋般持续增长，交通流量与日俱增，车辆类型也日益多元化，这使得护栏防护面临着前所未有的严苛考验。早期，护栏大多以刚性结构为主，这种结构虽具备较强的抗冲击能力，然而在碰撞发生时，却容易对车辆和人员造成刚性伤害，后果不堪设想。后来，护栏逐渐发展出半刚性、柔性等多种类型，能够根据不同路段的风险等级进行适配，为道路安全提供了更精准的防护^[1]。护栏防护并非易事，需要综合考虑安全性、经济性与环境适应性等多方面因素。尤其是在曲线段、坡道、桥梁衔接处等特殊路段，必须针对地形特点量身定制优化防护方案。当前，高速公路护栏防护研究正聚焦于提升极端工况适应性、延长使用寿命以及降低维护成本等关键问题，通过材料创新、结构优化以及智能监测技术的深度融合，推动防护体系从传统的被动防御向主动预警华丽升级，为道路交通安全构筑起全流程的坚实保障。

2 高速公路护栏结构性能现状调研与评估体系构建

2.1 高速公路护栏现状调研

本次调研覆盖全国东中西部12个省份，选取平原、山区、沿海等不同地形条件下的20条典型高速公路，涉及波形梁、混凝土、缆索等主流护栏类型，调研样本量达5000米。通过现场勘查发现，平原地区高速公路以波形梁护栏为主，占比达78%，但使用超8年的路段中，32%出现护栏板锈蚀、螺栓松动等问题；山区高速公路混凝土护栏占比55%，受地形限制，26%的曲线段护栏存在防护角度不合理情况，易导致车辆侧翻风险。调研还收集近5年护栏相关事故数据，共统计120起碰撞事故，其

中刚性护栏碰撞导致的重度伤亡率比半刚性护栏高40%。同时，通过访谈养护人员了解到，现有护栏维护多依赖定期巡检，缺乏实时监测手段，故障响应平均耗时达2.5小时。沿海地区护栏受盐雾腐蚀影响，使用寿命较内陆地区缩短30%，这些调研结果为后续评估体系构建提供数据支撑。

2.2 护栏结构性能评估指标体系构建

基于现状调研结果，构建包含安全性能、结构稳定性、环境适应性和经济性四大维度的评估指标体系。安全性能维度涵盖碰撞吸能、轨迹恢复、乘员保护三个子指标，其中碰撞吸能采用落锤冲击试验测定，标准值不低于150kJ；轨迹恢复以碰撞后车辆偏离原车道距离为依据，要求不超过1.5米。结构稳定性维度包括护栏板强度、立柱抗拔力、连接节点刚度，护栏板强度通过拉伸试验检测，屈服强度需达到345MPa以上，立柱抗拔力在不同地质条件下设定差异化标准，粘性土地区不低于50kN。环境适应性维度针对不同气候区域设置腐蚀抗性、温度适应性指标，沿海地区护栏年锈蚀量需控制在0.05mm以内，寒区护栏需承受-30℃至60℃温度循环无开裂。经济性维度包含初始建设成本、年维护费用和使用寿命，采用成本效益比量化评估，要求数值不低于1:8。各指标通过层次分析法确定权重，安全性能权重占比45%，确保评估核心聚焦安全保障^[2]。

2.3 基于多方法的护栏性能综合评估

采用试验检测、数值模拟与现场实测相结合的多方法综合评估模式，提升评估结果准确性。试验检测方面，搭建全尺寸碰撞试验平台，选取1.5吨小型轿车和10吨货车两种典型车型，以60km/h、80km/h、100km/h三种速度进行碰撞试验，采集护栏吸能曲线、车辆加速度等数据，对比分析不同护栏类型的防护效果。数值模拟采用有限元分析软件，建立护栏-车辆碰撞模型，模拟不同

碰撞角度、荷载条件下的结构响应，弥补试验检测场景局限性，通过模拟发现护栏立柱根部转角超过15°时，失稳风险显著提升。现场实测选取10条试点路段，安装应力传感器和位移监测设备，连续6个月实时采集数据，分析护栏在长期交通荷载和环境作用下的性能衰减规律。最后，采用模糊综合评价法整合多源数据，将评估结果划分为优秀、良好、合格、不合格四个等级，其中优秀等级需满足安全性能指标全部达标且经济性指标排名前20%，为护栏性能优化提供精准方向。

3 新型护栏防护装置研发

3.1 防护装置研发需求与设计目标

基于现状调研和评估结果，明确新型护栏防护装置研发需求：一是提升极端碰撞工况适应性，应对12吨货车以100km/h速度的正面碰撞；二是增强环境适应性，适配沿海盐雾、寒区冻融等复杂环境；三是简化维护流程，降低故障响应时间；四是控制成本，初始建设成本较现有产品增幅不超过15%。据此设定设计目标：碰撞吸能提升至200kJ以上，较传统护栏提高33%；轨迹恢复距离控制在1米以内，乘员最大加速度不超过20g；采用耐腐蚀材料，沿海地区使用寿命延长至15年以上，寒区耐温度循环次数提升至500次；配备智能监测模块，故障响应时间缩短至30分钟以内；通过结构优化实现材料用量减少10%，平衡成本与性能。同时，设计需符合《公路交通安全设施设计规范》，确保与现有道路设施兼容，便于后续升级改造。

3.2 新型防护装置结构设计

新型护栏防护装置采用了独具匠心的“主护栏+缓冲吸能层+导向结构”复合结构设计，全方位提升安全性能。主护栏选用高强度耐候钢，运用波形优化设计，波高从传统的85mm提升至100mm，波距缩短至150mm，显著增强了结构的抗弯性能，能有效抵御车辆的强烈冲击。缓冲吸能层采用蜂窝铝与聚氨酯泡沫复合结构，蜂窝铝孔径精准设定为10mm，厚度50mm，聚氨酯泡沫密度调整至 0.3 g/cm^3 ，二者协同作用，高效吸收碰撞能量，减轻对车辆和人员的伤害。导向结构采用弧形导向板，曲率半径设计为1.2米，与主护栏弹性连接，碰撞时能随车辆运动轨迹自适应调整，避免刚性刮擦，引导车辆安全行驶。装置立柱采用变截面设计，根部直径150mm，顶部直径120mm，既提高了抗拔力，又减少了材料用量。连接节点采用高强度螺栓配合防松垫圈，螺栓预紧力达 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ ，确保结构稳固可靠。另外，在护栏板表面涂覆厚度 $80\mu\text{m}$ 的氟碳涂层，大幅提升耐腐蚀性能，延长使用寿命，降低维护成本。该新型护栏防护装置为道

路交通安全提供了坚实保障。

3.3 基于拓扑优化的防护装置结构优化

为提升新型防护装置核心结构的性能并实现轻量化目标，我们采用拓扑优化方法开展优化工作。以结构轻量化和性能最大化为核心目标，精心建立优化模型。其中，优化变量选定为缓冲吸能层和立柱的材料分布，同时设定了严格的约束条件，包括碰撞吸能不得低于200kJ、结构重量需减少10%以上、最大应力不能超过材料屈服强度。首先，借助有限元软件搭建初始结构模型，对模型进行细致的网格划分，网格数量高达100万个，确保模拟计算的精准性^[3]。设定碰撞荷载为12吨货车以100km/h的速度撞击，模拟真实碰撞场景。通过拓扑优化计算，得出材料最优分布方案：缓冲吸能层在碰撞接触区域增加蜂窝铝密度，增强吸能能力；非接触区域采用镂空设计，形成梯度吸能结构，在保证性能的同时减轻重量。立柱在高度1/3和2/3处设置加强筋，根部采用渐变过渡结构，有效减少应力集中。优化后开展验证试验，结果显示，碰撞吸能提升至220kJ，较初始设计提高10%；结构重量减少12%，材料用量进一步降低；最大应力控制在300MPa以内，低于材料屈服强度345MPa。而且，优化后的结构加工难度未显著增加，完全符合批量生产要求，成功实现了性能与经济性的完美平衡。

4 新型防护装置安装工艺与推广建议

4.1 安装工艺设计

新型防护装置安装工艺采用“模块化预制+现场装配”模式，分为前期准备、基础施工、主体安装、调试验收四个阶段。前期准备阶段需对安装路段进行精准测量，采用全站仪定位立柱安装位置，误差控制在 $\pm 5\text{ mm}$ ；根据地形数据预制护栏模块，工厂内完成主护栏、缓冲吸能层的组装，减少现场作业时间。基础施工阶段采用钻孔灌注桩工艺，立柱孔径200mm，深度1.5米，灌注C30混凝土，插入立柱后采用临时固定架定位，确保垂直度偏差不超过1‰。主体安装阶段使用液压起吊设备吊装预制护栏模块，模块与立柱采用法兰连接，螺栓紧固分三次进行，依次施加 $50\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $80\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ 预紧力，确保连接牢固；缓冲吸能层与主护栏采用卡扣式连接，安装后检查贴合度，间隙不超过2mm。调试验收阶段安装智能监测设备，连接应力传感器与数据终端，测试通信稳定性；进行现场模拟碰撞试验，采用5吨小型货车以40km/h速度撞击，验证防护性能。整个工艺制定标准化作业指导书，明确各工序施工参数和质量要求，配备专职质量检查员，关键工序实行旁站监理，确保安装质量符合设计标准，单公里安装工期控制在3天以内。

4.2 养护与维护方案

为实现对新型防护装置全生命周期的精细管理，构建了“智能监测+分级养护”的创新维护方案。智能监测系统依托先进的物联网技术，在护栏的关键部位精准安装应力传感器、位移传感器以及腐蚀监测传感器。这些传感器如同装置的“神经末梢”，能够实时感知装置的状态变化。采集到的数据通过高速稳定的5G网络，迅速且准确地传输至养护管理平台。平台具备强大的数据分析能力，可自动识别异常数据，一旦发现潜在问题，立即发出预警，为养护工作提供及时指引。日常养护工作注重细节，每周都会进行一次全面的外观检查。工作人员重点查看涂层是否有破损、螺栓是否松动等情况。对于螺栓松动问题，采用扭矩扳手精确检测螺栓预紧力，一旦发现松动，立即进行紧固处理。每月，养护人员会对监测数据进行深入分析，通过专业的数据模型评估结构性能的衰减趋势，提前做好应对准备。定期养护每半年开展一次全面检测，涵盖腐蚀厚度测量、缓冲吸能层性能测试等多个方面。使用超声波测厚仪检测涂层厚度，当涂层厚度低于 $60\mu\text{m}$ 时，及时进行补涂作业；对于吸能性能下降超过20%的缓冲吸能层，迅速进行更换。应急养护建立了快速响应机制，接到故障预警后，工作人员能在30分钟内迅速到达现场。对于轻微损伤，2小时内完成修复；严重损伤则采用预制模块更换，确保4小时内恢复通行。同时建立完善的养护档案，详细记录每次养护数据，为后续维护优化提供有力依据，保障装置始终处于最佳工作状态。

4.3 推广应用建议

新型防护装置的推广应用遵循“试点先行+逐步推广”的科学策略，分三个阶段有序推进。第一阶段为试点探索期，选取沿海、寒区、山区各2条典型高速公路作为试点路段，安装长度共计10公里，为期1年。在此期间，重点监测不同环境下装置的性能和适应性，收集用户反馈，对产品进行针对性优化，确保其能更好地适应

各种复杂环境^[4]。第二阶段为扩大推广期，将推广范围扩大至东中西部10个省份的高风险路段，如急弯、长下坡、桥梁衔接处等，安装长度达到50公里。同时，同步开展技术培训工作，面向养护人员和施工单位举办专题培训班，通过理论讲解和实际操作演示，确保他们熟练掌握新型装置的安装和维护技能。第三阶段为全面推广期，将新型装置纳入高速公路新建和改造标准体系，与交通部门建立长期稳定的合作机制。在推广过程中，加强宣传推广力度，通过行业展会、技术研讨会等平台，全方位展示产品的卓越性能。发布试点路段事故率下降数据（预计下降40%），以直观的数据增强说服力。制定优惠政策，对批量采购的单位提供价格折扣和免费技术支持。同时，建立完善的售后服务体系，在全国设立5个区域服务中心，提供24小时技术咨询和故障维修服务，为推广工作提供坚实保障。

结束语

高速公路护栏对保障交通安全意义重大，本文通过全面调研评估现有护栏性能，发现诸多问题并明确改进方向。研发的新型防护装置在结构、性能和适应性上均有提升，经优化后实现性能与经济性平衡。安装工艺和养护方案保障了装置可靠运行，推广策略助力其广泛应用。未来将持续优化产品，加强技术交流，推动高速公路护栏防护水平迈向新高度，为道路交通安全筑牢坚实防线。

参考文献

- [1]王建虎.高速公路波形护栏碰撞性能优化研究[J].时代汽车, 2025(15): 169-171.
- [2]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(3): 81-89.
- [3]杨继.改扩建高速公路临时港湾停车带护栏改造防撞性能研究[J].工程技术研究, 2024, 9(10): 23-25.
- [4]丁志航.高速公路防护栏安全性能提升策略研究[J].工程技术研究, 2025, 7(4): 244-246.