

公路桥梁护栏立柱埋深无损检测技术应用实效分析

王 姿

湖北交投智能检测股份有限公司 湖北 武汉 430000

【摘要】：公路桥梁护栏立柱埋深直接影响防护结构的受力性能与抗冲击稳定能力，埋设质量偏差易削弱整体防撞效果。针对传统抽检方式破坏性强、检测范围有限等问题，结合地质雷达与电磁感应等无损检测技术，对立柱埋深判定原理、现场实施流程及数据处理方法进行系统分析，并选取实际工程段落开展对比验证。通过对检测结果与局部开挖实测数据进行统计比对，评估检测精度与误差分布特征，同时分析环境因素与参数设置对结果稳定性的影响。研究表明，无损检测技术能够实现立柱埋深的快速识别与定量评估，满足桥梁养护巡查与质量控制需求，为公路桥梁防护结构安全管理提供可靠技术支持。

【关键词】：护栏立柱；埋深检测；无损检测技术；应用实效

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.051

引言

公路桥梁护栏承担车辆偏离防护与结构边缘防撞功能，其稳定性很大程度上取决于立柱埋深质量。施工偏差、地基差异及长期荷载影响，均可能导致埋深不足或松动隐患，而此类问题往往隐蔽性较强，难以通过外观判定。传统检测方式依赖局部开挖，不仅影响结构完整性，还增加维护成本。如何在破坏结构的条件下准确掌握立柱埋深状况，成为养护管理中的关键环节。围绕无损检测技术在桥梁护栏中的实际应用效果展开分析，有助于厘清检测精度与工程适用性的关系，为结构安全评估提供更加可靠的技术路径。

1 公路桥梁护栏立柱埋深检测存在的关键问题

1.1 埋深不足对防护性能的影响

立柱埋深是护栏系统发挥侧向约束与能量吸收能力的基础参数。当实际埋设深度低于设计值时，立柱在车辆碰撞荷载作用下易产生过度位移与旋转，削弱土体对立柱的被动土压力支撑，导致弯矩集中于地表附近区域，形成塑性铰区提前出现的情况。埋深不足还会降低整体抗拔承载力与抗倾覆稳定系数，使护栏横梁与立柱连接节点受力异常，影响连续防护效果。在软弱地基或填土密实度不足路段，埋深偏差更易放大结构变形，增加桥梁边缘部位的安全隐患。

1.2 传统开挖检测方式的局限

开挖抽检依赖局部破除路肩或桥面铺装层以暴露立柱根部，通过人工测量获取埋深数据。该方式对原有结构完整性造成扰动，易破坏防水层与基层密实状态，恢复过程复杂且质量难以完全回归原状^[1]。检测范围通常受施工组织条件限制，只能进行小比例抽检，难以反映整体埋设质量分布特征。人工测量受操作水平与现场环境影响较大，数据离散性明显，且施工封闭交通带来的间接成本较高，不利于大规模养护巡检工作的实施。

1.3 现场检测精度与效率矛盾

桥梁护栏数量密集，检测工作量大，对检测速度与数据可

靠性提出较高要求。过度追求检测精度往往需要增加测点布设密度与重复核校次数，延长作业时间；若强调快速巡查，则可能降低信号采样精度与数据处理深度，影响埋深判定准确率。现场环境中钢筋干扰、电磁噪声及路面不平整因素均会对检测信号产生影响，使数据解析复杂化。在保证交通通行与施工安全的前提下，如何在精度控制与作业效率之间取得合理平衡，成为埋深检测实施过程中的突出问题。

2 无损检测技术原理及方法选择

2.1 地质雷达检测机理

地质雷达技术基于电磁波在不同介质界面处产生反射与散射的物理特性，通过高频脉冲信号向地发表射电磁波，当波束遇到金属立柱与周围填土之间的介电常数差异界面时，会形成明显反射回波。接收天线获取反射信号后，经时间域分析与振幅处理，可形成地下结构的连续剖面图像。立柱埋深判定依赖于反射波往返传播时间与电磁波在介质中的传播速度，通过速度标定与时间深度转换实现定量计算。在桥梁护栏检测过程中，需要根据路肩填料类型、含水率及压实度修正介电参数，以减少深度换算误差。为提高识别精度，可采用多频天线组合方式，兼顾分辨率与探测深度，并结合滤波、去噪及增益控制等信号处理技术强化立柱反射特征，使埋设边界更加清晰。

2.2 电磁感应检测特点

电磁感应技术利用交变磁场在金属构件中产生涡流响应的原理，通过探头发射低频或中频电磁信号，当信号接近钢质立柱时，会在其表面形成感应电流并改变原有磁场分布。接收线圈检测磁场变化强度，根据幅值衰减规律与相位变化特征推算金属构件的位置与埋设深度^[2]。该方法对金属目标具有较强敏感性，不受表层覆盖材料强度影响，适用于快速定位立柱轴线位置。在桥梁护栏应用中，可通过调节频率与激励强度增强对不同直径立柱的识别能力。检测数据以曲线或场强分布形式呈现，通过峰值对应关系确定立柱中心点，再结合探头移动路径进行深度估算。技术实施过程对操作稳定性与设备校准精度

要求较高,需进行标准试块标定以保证数据一致性。

2.3 不同技术适用条件比较

地质雷达与电磁感应技术在埋深检测中的适用环境存在差异。地质雷达对土体结构分层情况具有较强识别能力,适合分析立柱周围土体密度变化及埋设界面特征,在干燥或中等含水率条件下表现较为稳定;在高含水率或强电磁干扰环境中,信号衰减明显,深度分辨能力下降。电磁感应技术对金属目标定位灵敏度高,适用于快速扫描与批量检测,但在复杂钢筋网结构或邻近金属构件密集区域易产生叠加干扰。桥梁护栏实际检测中,可根据路段结构形式、填料性质及检测精度要求进行技术选型,必要时采用联合检测模式,通过数据互校方式提升埋深判定可靠性,并降低单一方法受环境因素影响带来的误差风险。

3 无损检测在工程中的实施流程

3.1 检测参数设置与标定

无损检测实施前需结合桥梁护栏结构形式、立柱规格及建筑材料特性进行参数预设。地质雷达检测应依据预期探测深度与分辨率需求选择合适频率天线,合理设置时间窗范围、采样间隔及叠加次数,以保证信号覆盖立柱底端位置并兼顾数据清晰度。传播速度参数需通过现场试验段标定获取,可在已知埋深位置进行实测对比,反算介电常数并建立修正系数。电磁感应检测则应对激励频率、增益幅值及灵敏度阈值进行调校,确保对钢质立柱产生稳定响应。设备在正式检测前应完成零点校准与系统自检,排除仪器漂移与环境磁场干扰影响,同时制定测线布设方案,明确测点间距与扫描路径,为后续数据一致性与可比性奠定基础。

3.2 现场数据采集与处理

现场采集阶段需按照既定测线进行连续扫描,保持探头与地表紧密贴合,控制行进速度稳定,避免因速度波动导致信号拉伸或压缩^[3]。对于桥面铺装存在起伏或伸缩缝位置,应采取分段采集方式,防止异常波形影响整体判读。原始数据获取后需进行预处理,包括时间零点校正、背景噪声去除及带通滤波处理,以增强目标信号与周围介质反射差异。对地质雷达数据可采用增益补偿与偏移校正方法强化深部反射特征,对电磁感应数据则通过曲线平滑与异常点剔除提高峰值识别精度。数据处理过程应保留原始记录并形成可追溯文件,以便复核与误差分析,确保检测结果具有工程可验证性。

3.3 结果判读与埋深判定方法

检测成果判读依赖对信号特征的准确识别与深度换算模型的合理应用。地质雷达剖面中立柱通常表现为连续强反射弧形或双曲线特征,通过提取顶点位置并结合传播速度参数进行时间—深度转换,可计算立柱底端埋设位置。对电磁感应检测结果,应根据磁场强度峰值与衰减曲线变化趋势确定立柱轴

线,并通过多点测量求取响应衰减规律推算埋深数值。判读过程中需结合设计图纸核对立柱理论长度及外露高度,对异常数据进行复测验证,排除干扰源影响。对于埋深偏差较大的测点,应结合土体密度与施工记录综合分析,确保埋深判定结果与实际工程状况相符。

4 工程实例应用效果分析

4.1 实测数据与开挖数据对比

选取某高速公路桥梁护栏改造段作为检测对象,沿桥面两侧布设连续测线,对全部立柱进行无损扫描,并在其中按比例抽取若干点位实施局部开挖复核。无损检测所得埋深数据与开挖实测值进行对应编号比对,通过建立差值统计模型计算平均误差与标准差。结果显示,多数测点的深度偏差控制在设计允许误差范围内,个别异常值集中于填土密度变化明显区域。地质雷达判定深度与实测值之间的偏差呈现线性分布特征,电磁感应推算结果在立柱规格一致路段表现稳定。对比曲线表明,经过现场速度标定与设备校准后,无损检测数据与实际埋设长度吻合度较高,能够真实反映立柱埋设质量状况,为大面积排查提供可靠依据。

4.2 检测误差来源分析

误差形成与多种因素相关,介质电性参数取值偏差会直接影响深度换算结果,尤其在含水率变化明显或填料成分复杂区域,电磁波传播速度易产生波动。桥面铺装层厚度不均或存在钢筋网结构时,反射信号可能出现叠加现象,导致特征识别难度增加。电磁感应检测中,邻近金属构件产生的磁场耦合效应会改变峰值位置,使深度推算产生偏移^[4]。操作层面因素同样不可忽视,探头移动速度不均、测线偏移或设备未充分预热均会影响数据稳定性。环境电磁干扰、车辆振动及温度变化也可能对仪器灵敏度造成影响。通过多点复测、参数修正与异常值剔除,可降低误差扩散风险,提高埋深判定精度。

4.3 检测效率与成本控制评价

在相同检测长度条件下,无损检测可实现连续扫描作业,无需破除铺装结构,单日完成检测数量明显高于传统抽检方式。施工组织层面仅需短时交通管制或移动式作业区布设,对桥梁通行能力影响较小。设备投入成本主要集中于仪器购置与人员培训,长期使用情况下单位检测成本呈递减趋势。与开挖复检相比,无损检测减少结构恢复费用与材料消耗,避免因反复开挖产生的次生损伤。综合人工费用、交通组织费用及后期修复费用进行核算,可见无损检测在大规模巡查与养护评估中具有较高经济性,同时能够缩短检测周期,提高养护管理响应速度。

5 无损检测技术优化与质量控制要点

5.1 现场干扰因素控制

桥梁护栏立柱埋深检测过程中,现场环境复杂程度直接影响信号质量与判读准确性。为保证检测数据稳定,应对外界电磁干扰源进行排查,合理避开高压线路、变电设施及大型施工机械运行时段,减少杂散磁场对电磁感应结果的影响。针对地质雷达检测,应结合路面结构层厚度与材料组成调整天线频率与增益参数,降低钢筋网与铺装层界面反射造成的信号叠加现象。检测作业时需保持探头贴地平稳移动,避免因跳动或倾斜产生虚假波形。对于含水率较高路段,应在检测前记录土体湿度状况,并在数据处理阶段引入修正系数。通过建立标准化操作流程与环境记录制度,可有效控制干扰因素对埋深判定的影响,提高现场检测一致性。

5.2 数据校核与复测机制

检测数据的可靠性依赖系统化校核程序与复测制度的执行。完成初次扫描后,应对异常波形及深度偏差较大的测点进行重点标识,采用重复测线或交叉测线方式进行复核,以验证信号稳定性^[9]。对关键控制点可结合已知埋深构件进行对比校核,修正时间—深度转换参数或磁场衰减模型。数据整理阶段需建立统一编码体系,将测点编号、桩号位置及立柱规格进行关联,避免信息错配。通过统计分析方法计算偏差区间与离散程度,对超出允许范围的测值进行原因排查。复测结果应形成

记录档案,作为后续质量追溯依据。借助数字化管理平台整合检测数据,可实现批量分析与动态更新,提高埋深评估结果的可核查性与透明度。

5.3 检测成果在养护决策中的应用

无损检测所得埋深数据可作为桥梁护栏结构安全评估的重要依据,通过对埋深不足比例、分布区段及偏差幅度进行统计分析,划分风险等级并确定重点整治范围。对于偏差较小且满足结构稳定要求的立柱,可纳入常规巡查管理;对存在明显埋深不足或土体松动迹象的区段,应制定加固或更换方案。检测成果还可与施工资料、历次养护记录进行对比,分析施工质量波动规律,为后续工程质量控制提供参考。通过建立埋深数据库,实现多年度数据对比,可识别沉降或松动趋势,为桥梁防护体系维护提供量化依据。将检测数据融入养护计划编制流程,有助于优化资源配置与维修时序安排,提高桥梁安全管理的科学化水平。

6 结语

公路桥梁护栏立柱埋深关系到防护体系受力性能与结构稳定水平,无损检测技术在工程实践中展现出较高的测量精度与作业效率。结合现场参数标定、数据复核及误差控制措施,可有效提升埋深判定的可靠性。工程应用结果表明,该类技术适用于大范围巡查与质量评估,为桥梁养护管理提供量化依据,对提升结构安全保障能力具有积极价值。

参考文献:

- [1] 邓超,徐涵晨,温永华,裴丽娜.基于钢质护栏立柱埋深的无损检测技术研究[J].江西建材,2024(8):135-139.
- [2] 雷正保,陈紫鹏.立柱埋深检测修正方法及埋深检测仪器研制[J].武汉理工大学学报,2022,44(10):40-47.
- [3] 胡凯.公路钢质护栏立柱埋入深度无损检测技术影响因素分析[J].运输经理世界,2021(27):49-51.
- [4] 胡少兵,罗明璋,程峰,龚盼攀.基于应力波频谱图的护栏金属立柱埋深检测法[J].公路,2022,67(6):336-341.
- [5] 杨永奇,惠冰,付建村.年久公路护栏立柱埋深无损检测精度控制研究[J].湖南交通科技,2022,48(1):162-165+174.