



图1 复杂井段条件下钻井液润滑性能提升的工程作用路径示意图

4.2 技术意义与工程推广价值

从技术意义层面看，复杂井段钻井液润滑性能提升的价值不止于“降低摩阻”这一单一目标，而在于其对钻井系统可靠性与全寿命成本的综合优化作用。第一，润滑性能提升通过稳定钻柱—井壁界面摩擦学行为，能够显著降低摩擦热与局部接触应力，减少钻具关键部位（如钻杆接头、随钻测量工具外壳、稳定器扶正面等）的磨损速率，从而延长钻具服役寿命并降低非计划更换与维修成本。第二，该技术路径体现出典型的“可调控—可验证—可复制”特征。润滑剂复配与加量策略可通过摩擦系数、极压润滑指标以及现场扭

矩摩阻曲线进行闭环校核；泥饼结构优化可通过滤失控制与泥饼致密化实现对界面粗糙度的工程化调节；动态调控则可基于实时监测参数实现工况匹配，从而避免润滑失效与润滑剂过量投加带来的流变性劣化风险。第三，从风险治理视角看，润滑性能提升提供了区别于“机械结构改造”与“单纯参数压制”的软控制手段，使井下摩擦风险由被动响应转向主动预防，特别适用于井段长、摩阻累积显著、井壁稳定性要求高的复杂井型。第四，从推广应用角度看，该技术对现场实施条件要求相对可控，既可嵌入现有水基钻井液体系，也可与井壁强化封堵、井眼清洁控制及定向钻进工艺协同部署，具有良好的工程兼容性与经济性。总体而言，复杂井段钻井液润滑性能提升技术通过界面摩擦学机制重构实现系统减摩增效，为复杂井段钻井的连续性、安全性与成本控制提供了可落地的技术支撑，具备进一步标准化与模块化推广的现实基础。

5 结语

复杂井段条件下钻柱—井壁摩阻的累积放大已成为制约钻井安全与效率的重要因素。钻井液润滑性能作为影响界面摩擦行为的关键可控参数，其系统性提升对于复杂井段钻井具有重要工程意义。本文从摩阻形成机理出发，阐明了钻井液润滑作用机制，并提出了基于润滑剂复配、体系协同优化及工况动态调控的润滑性能提升技术路径。研究表明，通过上述技术手段，可有效改善复杂井段钻井过程中的摩擦状态，为复杂井段钻井工程的安全高效实施提供技术支撑。

参考文献

- [1] 张晶华. 水基钻井液用润滑剂RHJ-1评价与实践[J]. 采油工程, 2025, (04): 57-62.
- [2] 贾国亮. 生物质合成基钻井液体系优选及应用[J]. 精细石油化工进展, 2025, 26(06): 1-6.
- [3] 孙金声, 徐贵勤, 丁扬, 等. 页岩油气钻井液技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(06): 1426-1437.
- [4] 许哲扬, 蔡东胜, 冀琳娜, 等. 页岩储层水基钻井液用高效润滑剂研究[J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(05): 32-34+56.
- [5] 李凯. 钻井液性能对钻井井身质量的影响[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(19): 40-42.

Reliability Verification and Error Control of Foundation Detection Results of Road and Bridge

Lang He

Chengdu Engineering Testing Co., Ltd., China Railway Second Survey and Design Institute, Chengdu, Sichuan, 610051, China

Abstract

The detection results of road and bridge foundations directly impact structural safety assessments and design decisions, with data reliability being critical to ensuring engineering quality and operational safety. Due to factors such as testing methods, equipment performance, environmental conditions, and operator skills, detection results may contain errors and uncertainties, necessitating the establishment of a scientific validation and control system. This paper constructs a multi-source data comparison, statistical regression, and error propagation analysis model based on data acquisition, result analysis, and error sources, enabling comprehensive evaluation and quantification of detection result reliability. The study demonstrates that standardized testing procedures, precision correction algorithms, and full-process quality control can effectively reduce errors, enhance consistency and traceability, and provide reliable technical support for the scientific and safe implementation of highway and bridge foundation detection.

Keywords

Road and bridge; foundation; Test results; Reliability verification; Error control

道路桥梁地基基础检测结果的可靠性验证与误差控制

何浪

中铁二院成都工程检测有限责任公司, 中国 · 四川 成都 610051

摘要

道路桥梁地基基础检测结果直接影响结构安全评估与设计决策, 其数据可靠性是保障工程质量与运行安全的关键。受检测方法、设备性能、环境条件及人员操作等多重因素影响, 检测结果存在误差与不确定性, 需建立科学的验证与控制体系。本文从数据采集、结果分析与误差来源出发, 构建多源数据比对、统计回归与误差传播分析模型, 实现检测结果的综合评估与可信度量化。研究表明, 标准化检测流程、精度修正算法与全过程质量控制可有效降低误差、提高一致性与可追溯性, 为公路与桥梁地基检测的科学化与安全化提供可靠技术支持。

关键词

道路桥梁; 地基基础; 检测结果; 可靠性验证; 误差控制

1 引言

道路与桥梁工程的地基基础检测是确保结构安全与耐久性的关键环节。随着交通建设规模的扩大和结构复杂度的提高, 地基检测已从单一的承载力试验扩展到变形监测、动静载响应分析与沉降预测等多维度内容。检测数据不仅是施工质量评估的依据, 也是设计参数校核与后期养护决策的重要输入。然而, 地基基础检测结果受检测设备精度、环境扰动、土体非均质性及人为操作误差等因素影响, 其可靠性验证成为工程检测质量控制的核心问题。本文立足道路与桥梁地基检测实践, 分析影响检测结果可靠性的关键因素, 构建基于统计学与多源验证的可靠性评估模型, 并提出针对

性误差控制与校正策略, 以期提升地基检测的科学性与实证价值。

2 地基基础检测的理论依据与工程特征

2.1 地基检测的力学基础与作用机理

道路桥梁地基承载结构的检测主要基于土力学与结构力学原理。地基的承载力、变形模量与沉降性能决定了上部结构的稳定性与使用寿命。检测方法包括静载荷试验、动力触探、波速法及孔压响应法等, 其目的在于获取地基的变形响应与极限承载状态。力学上, 地基变形遵循应力-应变关系与地基反力分布规律, 检测过程实际上是外荷载作用下的地基反应测量。不同地层条件下, 土体的非线性与各向异性会导致测试结果存在差异, 这也是可靠性分析与误差评估的理论基础。

【作者简介】何浪 (1992—), 男, 中国四川阆中人, 本科, 工程师, 从事道路与桥梁方向研究。

2.2 检测内容与主要技术方法

地基检测内容涵盖承载力检测、桩基完整性检测、沉降变形监测与动测分析等多个方面。承载力检测通常采用静载试验、平板载荷法及静力触探法等；桩基检测多利用超声透射法、低应变反射波法及钻芯法评估桩身完整性；而动态检测方法如波速测试、地震响应分析可实现无损检测与快速评估。现代检测已向综合化与信息化方向发展，通过多传感器集成与数据融合技术实现对地基性能的多维度识别。然而，不同方法在精度、适用深度与边界条件假设上存在差异，若不进行多源验证与统一修正，检测结果可能产生偏差。

2.3 地基检测结果可靠性的影响因素

地基基础检测结果的可靠性受多维因素共同作用。设备性能是最直接的影响源，传感器的灵敏度、采样频率及校准精度决定了原始信号的准确性与稳定性。环境条件对测值亦具有显著干扰作用，温度、湿度、地下水位变化及电磁噪声均可能导致信号漂移和数据偏移。施工扰动与操作规范性是影响结果重现性的关键，加载速率不稳、测点布设不均或数据读取误差都会引起系统偏差。不同地质结构的非均质性也会放大误差传播效应。通过对设备、环境与人为因素的系统识别，结合统计分析误差传递模型，可实现多源误差的定量评估与分类修正，为地基基础检测结果的可靠性验证提供科学依据，并为后续工程评价与安全决策奠定精确的数据基础。

3 检测结果可靠性验证体系的构建

3.1 多源数据比对与交叉验证方法

为提高检测结果的可靠性，应构建以多源数据为核心的交叉验证体系。通过不同检测技术的互补优势，可实现对测量误差的识别与系统偏差的修正。以桩基完整性检测为例，低应变反射波法在识别桩身缺陷位置上具有高效性，而超声透射法在判断缺陷性质与范围方面更具优势。将两种方法联合应用，通过声波时延与幅值变化特征进行对比分析，可提高缺陷识别的精确度。在地基承载力检测中，静载试验结果可与动力触探数据进行经验关联校验，通过修正系数调整两种方法的输出结果，使其在统计意义上趋于一致。多源交叉验证不仅能发现异常数据点，避免单一检测方法引起的偏差积累，还可评估各方法在不同地质条件下的适用性与敏感性，从而形成科学、可追溯的验证机制，为地基基础工程提供可靠的数据支持。

3.2 统计回归与误差传播分析模型

检测结果的可靠性验证应以定量化分析为基础，统计回归与误差传播模型是其中的关键方法。通过对检测数据进行回归分析，可拟合其误差分布规律，识别系统误差与随机误差的来源与权重比例。建立误差传播方程，可追踪原始测量误差在计算与转换过程中的累积效应，对传感器精度、数据采样及计算模型的敏感度进行分层分析。在地基检测中，

若测点位移或荷载误差存在随机波动，可通过加权最小二乘法修正趋势偏差，提高整体测值的稳定性。采用蒙特卡洛仿真可进一步模拟复杂地质条件下的误差传播路径，获得置信区间与概率分布，从而量化检测结果的可信度。通过这种方式，不确定性不再被模糊处理，而是以统计量形式表达，为检测数据的可靠性验证提供客观依据。

3.3 结果一致性与可信度评定

检测结果的可靠性不仅体现在单次测值的精度上，更取决于多次测量间结果的一致性与趋势稳定性。通过计算相关系数、标准差比值与相对偏差，可评估不同测试结果之间的匹配程度。当多次测量的离散度小于允许阈值，且信号形态、波幅变化及趋势特征保持稳定时，可判定其为高可信数据。对于大跨度桥梁群桩或道路连续段的检测，可采用区域对比法，将同一地质条件下的检测结果进行空间相关分析，以识别局部异常数据点并进行修正。结合时间序列一致性检验，可进一步评估监测结果的长期可靠性。可信度评定的最终目标在于形成量化指标体系，实现检测结果从“数据正确”到“数据可信”的转变，使地基基础检测结论具备可解释性与工程决策参考价值。

4 检测误差的主要来源与影响机理

4.1 仪器设备误差

检测设备的精度与稳定性是地基基础检测结果可靠性的首要保障。仪器设备的系统误差与随机误差会直接影响测值的真实性和重复性。传感器漂移、信号放大误差、采样频率不足及线性响应偏差均可能造成数据失真。例如，在超声检测中，换能器耦合状态不良、声速标定误差或信号衰减补偿不当，都会引起波速计算偏差；在静载试验中，荷载传感器的线性误差、零点漂移及温度补偿不足，会导致承载力和位移数据出现系统性偏移。设备的老化与维护不当亦会降低测量精度。为控制仪器设备误差，应定期进行标定与比对试验，采用自动温度补偿与零点修正系统，确保长期稳定运行。通过引入高精度数字化采集系统与智能校准模块，可实现实时监控与自动修正，从源头上提升检测数据的稳定性与可信度。

4.2 环境与地质条件误差

地基基础检测常处于复杂自然环境中，环境与地质条件的不均一性是导致误差的重要来源。土体密实度、含水量、地下水位及温湿度变化均会影响应力传递与信号传播特性，进而改变检测结果。交通振动、风载、降雨或相邻施工等外部干扰因素，会引起土体结构松动和孔隙水压力波动，使地基反应信号出现噪声或漂移。此外，不同地层界面的声波折射与能量损失会导致波速、反射强度等指标出现非线性偏差。为降低环境与地质误差，应选择环境稳定的检测时段，布设隔振屏障，采用多点同步测试和背景噪声滤除技术。对多层地基结构，可结合地质剖面数据建立修正模型，对