

# 隧道围岩变形监测数据异常识别与复测机制研究

王 姿

湖北交投智能检测股份有限公司 湖北 武汉 430000

**【摘要】**：隧道施工过程中围岩变形监测数据直接影响支护参数调整与施工安全控制，数据异常将导致风险判断偏差。围绕围岩变形监测数据在采集、传输与处理环节可能出现的异常现象，构建多指标联合判别模型，对突变值、趋势偏移与系统误差进行分级识别；结合监测频率、围岩级别与施工工序特征，建立分级复测机制与响应流程，实现异常数据的快速核查与动态修正。通过现场案例对识别准确率与复测效率进行验证，结果表明，所构建机制能够显著提高异常数据识别精度，缩短复测响应时间，增强监测数据的连续性与可靠性，为隧道施工过程中的围岩稳定性判断提供有力支撑。

**【关键词】**：隧道围岩；变形监测；异常识别；复测机制

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.046

## 引言

隧道工程向深埋、大跨和复杂地质条件不断延伸，围岩变形控制已成为施工安全管理中的核心环节。现场监测数据承担着反映围岩响应状态的重要职责，一旦数据出现异常而未及时辨识，极易对支护参数调整与风险判断产生干扰。实际工程中，监测点布设密集、施工干扰频繁，加之仪器精度差异和环境变化影响，数据波动情况复杂多样。如何在海量数据中精准识别异常并形成高效复测流程，成为提升监测质量与风险管控能力的关键问题。围绕这一核心问题展开系统分析与机制构建，有助于提升围岩变形监测的科学化与规范化水平。

## 1 围岩变形监测数据异常现状与成因分析

### 1.1 监测数据波动特征

围岩变形监测数据在时间序列上通常呈现阶段性增长与缓慢收敛并存的变化规律，不同围岩级别及施工工序转换阶段，其变形速率和累计变形量差异明显。在开挖卸荷初期，拱顶下沉与周边收敛值往往表现为快速增长，随后进入相对平稳阶段。但在实际监测过程中，数据曲线可能出现局部突跳、短时剧烈震荡或长周期微幅漂移等非正常波动现象。部分测点还存在离散度增大、相邻断面变形趋势不一致等情况，破坏了原有的连续性与协调性。这类异常波动特征往往掩盖真实围岩响应状态，对支护参数优化与变形预警阈值判断产生干扰，增加施工风险辨识难度。

### 1.2 异常类型划分

围岩变形监测数据异常可依据数值特征与形成表现划分为突变型异常、趋势型异常与系统型异常<sup>[1]</sup>。突变型异常表现为单次观测值远超相邻时段变化幅度，常见于仪器读数失真或测点受扰动影响；趋势型异常则体现为变形曲线偏离原有发展轨迹，呈持续性增大或异常收敛，易与围岩失稳前兆混淆；系统型异常通常在多个测点同步出现相似偏差，可能与仪器标定误差、基准点位移或数据处理参数设置不当有关。不同类型异常在时空分布特征与影响范围上存在差异，需结合围岩等级、

支护结构形式与施工工况进行综合判别。

### 1.3 异常产生机理

监测数据异常的形成往往源于多种因素耦合作用。围岩在开挖扰动后发生应力重分布，若局部节理裂隙发育或地下水活动增强，可能引发瞬时变形集中，导致监测值突升。施工振动、爆破冲击及机械荷载传递亦可能对测点稳定性造成干扰，使测线基准发生微位移。仪器设备方面，传感器灵敏度衰减、测量标尺磨损或温度补偿不足均会带来系统误差。数据采集与传输过程中若存在人工记录偏差、数据录入失误或算法滤波不当，也会造成异常数值混入正常序列。多源因素交织，使围岩变形监测数据异常呈现复杂性与隐蔽性。

## 2 异常识别方法构建与判别模型设计

### 2.1 多指标判别体系建立

围岩变形监测数据的异常识别需突破单一指标判断的局限，构建涵盖变形速率、累计位移、加速度变化率及空间相关性的多指标判别体系。基于时间序列分析方法，对监测曲线进行滑动窗口分解，提取短期波动幅值与长期趋势斜率等特征参数；结合相邻测点间的差分值与断面收敛协调系数，评估空间一致性水平。在指标权重分配方面，可引入层次分析法或熵权法，对不同围岩级别与支护形式下的监测敏感因子进行动态赋权，使判别体系具备针对性与适应性。通过构建综合判别函数，实现多维特征参数的融合运算，提高异常识别的准确率与稳定性，避免单点异常误判对整体判断造成干扰。

### 2.2 阈值分级与趋势分析方法

异常识别过程需建立分级阈值体系，以适应不同施工阶段及围岩类别的变形特征差异。依据历史监测数据统计分布特征，采用标准差控制法与置信区间分析法确定基础阈值区间，并结合围岩分级标准与支护承载能力参数，对阈值进行分级设定。针对变形发展趋势，利用回归分析与指数平滑模型对时间序列进行拟合，提取趋势偏离度与残差波动范围<sup>[2]</sup>。当监测值偏离拟合曲线超过设定区间时，触发异常判别信号。同时引入

变形速率突变系数与加速度判据,对潜在失稳征兆进行敏感识别,使阈值体系兼具静态控制与动态预警功能,实现对突发异常与渐进异常的差异化辨识。

### 2.3 识别流程与算法优化

异常识别流程应形成数据采集、预处理、特征提取、模型运算与结果反馈的闭环结构。原始监测数据进入系统后,通过异常值初筛与噪声滤波处理,剔除明显录入错误与随机干扰信号;经归一化与标准化处理后输入判别模型进行运算。针对大规模监测数据实时处理需求,可采用基于改进滑动窗口的在线检测算法,提高运算效率与响应速度。在模型迭代方面,通过引入历史识别结果进行参数自校正,使模型在不同地质条件与施工工况下保持较高适配度。识别结果同步反馈至监测管理平台,形成异常记录与处置建议,为后续复测与决策提供数据支撑。

## 3 分级复测机制与响应流程设计

### 3.1 复测触发条件设定

围岩变形监测数据在完成异常识别后,应依据异常等级与风险程度设定差异化复测触发条件。针对超过控制阈值上限的突变数据,可设定即时复测指令,由现场监测人员在限定时间内完成复核观测;对于趋势偏移型异常,则结合变形速率持续时间与累计位移增量,设定阶段性复测触发标准。当连续多个监测周期内速率增幅超出预警区间,或相邻断面出现不协调变形时,系统自动启动复测程序。触发条件还应纳入围岩类别、埋深参数及支护结构受力状态等因素,构建分级响应矩阵,将异常程度划分为一般异常、重点异常与紧急异常三个等级,并对应不同的复测时限与处置流程。通过量化指标与风险分级联动,实现复测决策的客观化与程序化,避免因人为判断偏差延误处置时机。

### 3.2 复测频率与责任分配

复测频率的确定应依据异常等级与施工阶段动态调整。在初期支护完成至二次衬砌施工阶段,围岩变形处于敏感时期,若监测数据被判定为重点异常,可将原有观测周期由每日一次调整为每班次一次,必要时实施连续观测;一般异常则在保持原有监测频率基础上增加临时复测点次。责任分配方面,应建立监测单位、施工单位与监理单位协同机制,明确数据核查、现场复测与技术复核的职责边界<sup>[3]</sup>。监测人员负责仪器校准与数据复采,施工技术人员负责核对施工工况及支护状态,监理人员对复测结果进行独立审查。通过制度化分工与信息共享平台,实现复测过程的可追溯管理,确保每一项异常数据均有对应责任主体与处理记录。

### 3.3 现场核查与数据修正流程

现场核查环节需围绕测点稳定性、仪器精度及周边施工扰动情况展开。复测前对基准点进行稳定性检测,检查是否存在

基准位移或固定装置松动;对全站仪、水准仪或自动化监测传感器进行精度校验,排除仪器系统误差。完成复测后,将新采集数据与原始异常值进行对比分析,通过差值检验与一致性评价方法判断异常来源。若确认属于观测误差,应在监测数据库中标注异常属性并进行数据修正,同时保留原始记录以备追溯;若复测结果验证围岩真实变形异常,则应将修正后的有效数据纳入风险评估模型,并同步调整支护参数或施工方案。核查与修正流程依托信息化管理系统形成闭环处理链条,实现异常数据从识别、复测到修正的全过程记录。

## 4 异常数据闭环管理与动态修正路径

### 4.1 数据反馈机制构建

围岩变形监测异常数据在完成识别与复测后,需要通过系统化的数据反馈机制实现全过程跟踪。监测平台应设置异常数据专用标识与分级编码,将识别结果、复测时间、处置措施及责任主体纳入数据库字段,实现信息结构化管理。异常数据一经确认,系统自动推送至施工技术、监理与项目管理模块,形成跨岗位的信息联动。反馈内容不仅包含数值本身,还应附带测点编号、围岩级别、施工里程、支护参数等关联信息,以便开展综合分析。通过建立异常数据处置状态更新功能,对未完成复核、已完成复测及已修正归档等不同阶段进行动态标注,确保异常处理过程可查询、可追溯。数据反馈机制的建立,有助于避免异常信息滞留于单一环节,提升监测成果在施工调控中的响应效率。

### 4.2 监测信息协同管理

围岩变形监测涉及测量数据、施工进度记录、支护结构受力监测及地质编录等多源信息,异常数据管理需依托协同平台实现集成处理。通过构建统一的数据接口标准,将自动化监测系统与人工观测成果进行融合,保证数据格式与时间基准的一致性。施工日志与爆破记录可作为辅助判别依据,与异常监测时段进行对照分析,判断是否存在工序扰动因素<sup>[4]</sup>。协同管理平台应支持多权限分级访问,确保监测人员、技术负责人及管理能够在各自职责范围内获取所需数据。通过信息共享与实时更新,减少数据孤岛现象,使异常数据处理过程与施工组织管理形成联动关系,增强监测数据在风险控制体系中的协同效应。

### 4.3 动态更新与持续校核措施

异常数据处理完成后,相关模型参数与控制阈值需依据最新监测结果进行动态修正。通过对复测确认数据进行回归分析与统计检验,校核原有识别模型的适配程度,必要时调整权重系数或判别区间,以提高后续识别的敏感性与准确度。监测系统可设置周期性校核程序,对历史数据进行批量复检,识别潜在遗漏异常。针对长期运行的监测项目,还应开展仪器性能衰减评估与基准点稳定性复核,防止系统误差累积影响数据质

量。动态更新机制依托持续的数据积累与模型迭代,实现识别标准与实际工程状态之间的同步调整,保证围岩变形监测数据始终处于可控与可信状态。

## 5 机制实施效果与工程应用验证

### 5.1 典型工程应用分析

在某深埋隧道穿越破碎围岩地段施工过程中,引入异常识别与分级复测机制,对拱顶下沉与周边收敛监测数据进行全过程管控。施工进入台阶法开挖阶段后,部分测点出现非线性增长趋势,经判别模型分析认定为趋势偏移型异常,系统自动触发重点复测程序。现场复测结合支护钢拱架受力监测结果,确认围岩局部软化引起变形增幅,随即对初期支护厚度及锚杆间距进行调整。应用过程中,异常数据处置流程与施工组织保持同步,监测成果直接参与支护参数优化与施工节奏控制。通过对多个断面数据对比分析,机制运行稳定,异常识别与复测联动效果明显,工程实施过程未出现因数据误判导致的支护滞后情况。

### 5.2 识别精度与响应效率评估

结合工程实测数据,对异常识别模型的准确率与响应时效进行量化评估。通过对比人工经验判读结果与模型判别结果,统计异常识别正确率及误报率,结果显示多指标融合模型在突变型与趋势型异常识别中表现出较高一致性<sup>[5]</sup>。系统从异常信号生成至复测指令下达的平均耗时明显缩短,较传统人工筛查

方式提高响应效率。复测完成后,数据回传至管理平台的时间控制在限定周期内,实现异常处置闭环。统计分析还表明,模型对不同围岩等级与施工阶段具备较强适应性,识别精度未因地质条件变化出现明显波动,保障了监测数据在动态施工环境中的稳定应用。

### 5.3 安全决策支撑能力提升

异常识别与复测机制的实施,使围岩变形监测数据具备更高可信度,为施工安全决策提供可靠依据。在支护参数调整、开挖步距控制及二次衬砌时机确定等关键环节,监测成果通过信息平台直接参与技术论证过程。异常数据经复测确认后形成专项报告,提交至项目技术管理层进行风险评估,确保决策建立在真实有效的数据基础之上。通过持续运行与数据积累,监测系统逐步形成围岩变形响应数据库,为类似地质条件下的施工方案制定提供参考参数。机制的实施增强了监测结果与施工管理之间的联动程度,提高了风险预判的科学性与及时性。

## 6 结语

隧道围岩变形监测数据的真实性直接关系到施工风险判定与支护参数控制。构建异常识别与分级复测联动机制,有效提升数据判别精度与响应效率,使监测成果实现闭环管理与动态修正。机制在工程实践中运行稳定,增强了数据可靠性与决策支撑能力,为复杂地质条件下隧道施工安全管控提供了系统化技术路径。

## 参考文献:

- [1] 黄彤龙,赖剑崑,李帆,等.高速公路大断面隧道围岩变形监测分析[J].黑龙江交通科技,2026,49(01):53-57.
- [2] 马捷.复杂地质条件下公路隧道围岩变形动态监测[J].测绘与空间地理信息,2025,48(06):195-197.
- [3] 曹善凯.基于机器视觉的隧道围岩变形监测及预警研究[D].东北电力大学,2025.
- [4] 董山川.隧道围岩变形自动监测系统在施工中的应用[J].工程质量,2025,43(02):72-75.
- [5] 陈绍恺,蔡海兵,姚方兴,等.断层破碎带隧道围岩变形监测技术及应用[J].低温建筑技术,2025,47(01):105-109.