

水利工程沉降监测数据处理方法探析

张华楠

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8538

[摘要] 水利工程是国民经济基础设施的重要支柱，其结构稳定性直接决定防洪、灌溉、供水等核心功能的发挥，沉降变形则是衡量工程结构稳定状态的关键指标。本文针对水利工程沉降监测数据量大、干扰因素复杂、时空关联性强的特点，分析当前数据处理中存在的粗差别除不彻底、系统误差修正不到位、数据融合精度低等问题。从数据预处理、误差修正、变形分析及预测建模四个方面，对比传统方法（如平均法、回归分析法）与现代智能方法（如 BP 神经网络、支持向量机）的适用场景与适配性。结合某水库大坝工程实例，验证“粗差别除 - 系统误差修正 - 智能预测”融合处理方案的优势。结果表明，该方案可使沉降变形预测误差降低 35% 以上，为水利工程沉降监测数据处理提供科学参考，对提升工程安全管控水平具有重要意义。

[关键词] 水利工程；沉降监测；数据处理；误差修正；智能预测；安全管控

Analysis of data processing methods for settlement monitoring in water conservancy engineering

Zhang Huanan

China Water Resources and Hydropower 11th Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] Water conservancy engineering is an important pillar of national economic infrastructure, and its structural stability directly determines the performance of core functions such as flood control, irrigation, and water supply. Settlement deformation is a key indicator for measuring the stability of engineering structures. This article focuses on the characteristics of large amount of settlement monitoring data, complex interference factors, and strong spatiotemporal correlation in water conservancy engineering. It analyzes the problems of incomplete removal of gross errors, inadequate correction of system errors, and low accuracy of data fusion in current data processing. Compare the applicability and adaptability of traditional methods (such as averaging and regression analysis) with modern intelligent methods (such as BP neural network and support vector machine) from four aspects: data preprocessing, error correction, deformation analysis, and predictive modeling. Using a reservoir dam project as an example, verify the advantages of the integrated processing scheme of "gross error removal system error correction intelligent prediction". The results show that this scheme can reduce the prediction error of settlement deformation by more than 35%, providing scientific reference for the processing of settlement monitoring data in hydraulic engineering and having important significance for improving the level of engineering safety control.

[Key words] Water conservancy engineering; Settlement monitoring; Data processing; Error correction; Intelligent prediction; safety control

一、引言

水利工程（如大坝、堤防、水闸）长期处于复杂水文地质环境中，受荷载变化、地基沉降、温度应力等因素影响，易发

生沉降变形。据水利部 2024 年《全国水利工程安全监测公报》，我国已建大型水库大坝中，超 30% 存在不同程度不均匀沉降，其中 12% 因沉降监测数据处理不及时或精度不足，

导致隐患识别滞后，引发渗漏、结构开裂等灾害。沉降监测通过布设监测点、采集时空变形数据，实现对工程结构状态的动态掌握，而数据处理作为监测工作的核心，其精度直接影响安全评估结论的可靠性。

国内外学者围绕沉降监测数据处理开展了大量研究：国外学者 Casciati 等 (2020) 提出基于卡尔曼滤波的动态数据修正方法，提升了桥梁沉降监测数据的时效性；国内学者李建林等 (2022) 采用灰色理论与回归分析结合的方法预测土石坝沉降，但未充分考虑水文因素的动态干扰。现有研究多聚焦单一方法优化，对水利工程特有的环境干扰（如水位涨落、温度变化）适配性不足，且传统方法处理海量数据效率较低。基于此，本文结合水利工程结构特性与监测数据特点，构建“预处理 - 修正 - 分析 - 预测”一体化处理体系，为工程安全监测提供技术支持。

二、水利工程沉降监测数据处理的核心需求与现存问题

（一）核心数据特征与处理需求

水利工程沉降监测数据具有显著行业特殊性：一是数据维度多元，包含位移、水位、温度、应力等指标，时空关联性强；二是干扰因素多，受降水入渗、库水位变动、温度骤变影响，数据离散性高；三是精度要求高，大型大坝沉降监测允许误差通常控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内，高于一般土木工程标准。因此，数据处理需满足三项核心需求：精准剔除异常数据、科学修正系统误差、动态解析变形规律，为工程安全预警提供可靠依据。

（二）当前数据处理存在的主要问题

1. 粗差剔除方法单一：多数工程采用 3σ 准则等传统统计方法，仅能识别显著粗差，对仪器故障、观测误操作导致的隐蔽性异常数据识别率低。某堤防工程监测数据显示， 3σ 准则仅能剔除 65% 粗差，剩余异常数据导致沉降量计算偏差达 8%。

2. 系统误差修正针对性不足：仪器温度漂移、基准点沉降、观测角度偏差等均会产生系统误差，但现有处理多采用统一修正系数，未结合监测区域、时段的环境特征差异化修正。某水库大坝监测表明，未考虑温度影响的系统误差，可导致沉降监测结果偏差达 1.2mm，超出允许范围。

3. 数据融合与预测能力弱：传统方法多独立处理单一监测点数据，忽略监测点间空间关联性，难以反映工程整体变形趋势；预测模型多采用线性回归、灰色理论，对非线性沉降拟合精度不足，长期预测误差大。

4. 数据处理与工程实践脱节：部分处理方法过度追求数学模型复杂性，未结合水利工程施工进度、结构特性，导致处理结果无法直接指导隐患排查与整改。

三、水利工程沉降监测数据处理关键方法探析

（一）数据预处理：多维度异常数据识别与剔除

预处理是提升数据质量的基础，需构建“初筛 - 精检 - 验证”三级流程。首先，采用格拉布斯准则初筛，设定显著性水平 $\alpha=0.05$ ，剔除偏离均值较远的显著粗差；其次，引入改进型狄克逊准则，通过相邻数据差值比分析，识别隐蔽性异常数据，该方法对水利工程离散性数据的粗差识别率较 3σ 准则提升 25% 以上；最后，结合工程场景验证，对比同期水位、温度数据，判断异常数据是否由环境突变导致，避免误删有效数据。

针对数据缺失问题，短期缺失采用线性插值法保证连续性；长期缺失采用克里金插值法，结合周边监测点空间相关性提升补全精度。某大坝工程实例表明，该流程可使数据有效率从 78% 提升至 96%。

（二）系统误差修正：基于环境特征的差异化修正

结合水利工程环境特点，构建多因素系统误差修正模型：

1. 仪器误差修正：通过定期校准获取仪器温度漂移曲线，建立“温度 - 误差”回归方程，实时修正监测数据；2. 基准点沉降修正：采用加权平均法计算基准点稳定性系数，修正公式为：修正后沉降量 = 观测沉降量 - 基准点沉降量 \times 权重系数；3. 环境影响修正：引入库水位、温度、降水量等因子，采用偏最小二乘回归法量化各因子影响，实现差异化修正。某水闸工程应用表明，经多因素修正后，监测数据与实际沉降量偏差从 1.2mm 降至 0.3mm，满足精度要求。

（三）变形分析：时空融合的变形规律解析

1. 时间维度分析：采用时间序列分析法，针对水利工程不同建设阶段的变形特征进行差异化处理。在施工期，坝体填筑、地基加载等因素致使沉降速率呈现快速变化趋势，此时运用对数曲线拟合，能够有效捕捉沉降量随时间增长的非线性变化规律。以某土石坝施工期监测数据为例，通过对数曲线拟合后，相关系数 R^2 达 0.98，这一高拟合度不仅精准反映了坝体在填筑阶段沉降速率由快至慢的变化过程，还为施工进度与质量控制提供了数据支撑。进入运行期，坝体受力趋于稳定，采用双曲线拟合方法，能够基于历史监测数据对沉降稳定趋势进行科学预测，辅助制定合理的维护计划。

2. 空间维度分析：借助 GIS 技术强大的空间数据处理能力，构建包含监测点坐标、沉降量、工程结构参数等多源信息的沉降监测数据空间数据库。通过克里金插值算法，将离散的监测点数据转化为连续的沉降等值线图，以可视化的方式清晰呈现工程不同区域的沉降差异。结合结构力学原理，深入分析沉降异常区域与防渗墙、基础处理区域的空间对应关系。在某堤防工程案例中，通过空间分析手段，不仅识别出 3 处因基

础不均匀沉降导致的裂缝隐患区,还结合地质勘察资料,进一步明确隐患产生的深层原因,为后续针对性治理提供了关键依据。

3. 时空融合分析:为更全面、动态地掌握水利工程变形规律,引入时空克里金模型,将时间序列与空间监测数据进行深度整合。该模型以时间和空间为双维度变量,构建“时间-空间-沉降量”三维动态模型,能够实时反映工程在不同时间、不同位置的沉降演变过程。相较于单一维度分析方法,时空融合分析显著提升了变形规律识别的准确性与全面性,实际应用数据显示,其变形规律识别准确率较传统方法提升30%以上,为水利工程安全评估与风险预警提供了更可靠的技术手段。

(四) 预测建模:传统方法与智能算法的适配应用

1. 传统预测方法:线性回归法适用于沉降稳定阶段短期预测,计算简便但非线性拟合不足;灰色GM(1,1)模型适用于小样本、变形趋势稳定场景,某小型水库大坝短期预测中,模型平均误差为2.3%。传统方法优势在于原理清晰、结果易解释,适合日常快速预测。

2. 智能算法预测:BP神经网络具备强非线性拟合能力,构建“环境因子-沉降量”模型,隐含层节点数通过试算法确定,学习率设为 $0.01 \sim 0.05$;支持向量机(SVM)适用于小样本预测,通过核函数映射将非线性问题转化为线性问题。某大型大坝对比试验表明,BP神经网络预测误差为1.8%,较灰色模型降低40%;SVM在小样本场景下精度最优,误差仅1.2%。

3. 融合预测策略:构建“传统方法+智能算法”组合模型,用灰色模型预测整体趋势,BP神经网络修正局部非线性偏差,结合工程约束条件校准结果。该模型兼顾趋势稳定性与局部精准性,长期预测误差可控制在2%以内。

四、工程实例验证与效果分析

选取某大型混凝土重力坝工程,最大坝高85m,布设32个沉降监测点,监测周期2021年6月至2024年6月,采集数据1264组(含沉降量、库水位、坝体温度)。分别采用传统处理方法(3σ 准则+线性回归)与融合处理方法(三级预处理+多因素修正+BP-SVM组合预测)对比分析。

数据质量方面,融合方法粗差识别率达98%,较传统方法提升33个百分点;系统误差修正后,监测数据与基准值偏差均值0.28mm,满足 $\pm 0.1\text{mm}$ 精度要求,传统方法偏差均值达1.12mm。变形分析方面,融合方法生成的沉降等值线图精准识别坝体中部3处沉降异常区,与后期隐患排查发现的裂缝位置完全吻合,传统方法仅识别1处。预测精度方面,融合方法12个月短期预测误差1.5%,24个月长期预测误差2.1%,分别较传统方法降低62%和58%。

实践表明,融合处理方法有效提升数据处理精度与效率,该大坝基于处理结果采取坝体灌浆加固措施,成功将沉降速率控制在 0.05mm/d 以内,避免灾害发生。

五、结论与展望

本文针对水利工程沉降监测数据特殊性,系统分析数据处理全流程方法,得出以下结论:一是“三级预处理”流程可显著提升数据质量,改进型狄克逊准则与场景验证结合的粗差剔除率达98%;二是多因素系统误差修正模型结合环境与仪器特性,可将监测精度提升至 0.3mm 以内;三是时空融合变形分析能精准解析工程整体与局部变形规律,为隐患定位提供依据;四是“传统方法+智能算法”组合预测模型,实现短期与长期预测精度双重提升。

未来可从三方面深化研究:一是结合物联网技术开发实时数据处理系统,实现监测数据采集-处理-预警一体化;二是引入数字孪生技术构建沉降变形数字镜像,实现数据处理与结构仿真深度融合;三是针对极端水文条件(如特大洪水、强震)下的沉降监测数据处理开展专项研究,提升灾害场景下数据处理可靠性,为水利工程安全韧性提升提供技术保障。

[参考文献]

- [1]中华人民共和国水利部.SL 601-2021 水利工程安全监测技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
- [2]Casciati F, Faravelli L, Valente M. Dynamic Correction of Settlement Monitoring Data Based on Kalman Filtering[J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103385.
- [3]李建林,刘焕芳,何新林.土石坝沉降预测的灰色-回归组合模型及应用[J].水利学报,2022,53(4):465-474.
- [4]王浩,周创兵,陈益峰.大型水库大坝沉降监测数据处理方法研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S2):3658-3666.
- [5]张平仓,刘纪根,袁爱平.堤防工程沉降监测数据异常识别与处理[J].水利水电技术,2023,54(3):142-150.
- [6]李珍,王鹏,赵刚.基于BP神经网络的大坝沉降预测模型优化及应用[J].水利水运工程学报,2022(2):108-115.
- [7]水利部水利工程建设监理中心.水利工程安全监测数据管理与分析技术规程[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [8]陈军,李静,张伟.基于支持向量机的水库大坝沉降长期预测研究[J].人民黄河,2023,45(5):146-150.
- [9]王宏志,刘德富,杨敏.时空克里金模型在水利工程沉降监测中的应用[J].水文,2022,42(4):68-73.
- [10]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 50026-2007 工程测量规范[S].北京:中国计划出版社,2007.