

数据特性的权重分配机制，以实现多源数据的优化整合。融合算法以加权平差为基础，结合两类数据的观测方差、历史稳定性和当前环境条件设定差异性权重，通过卡尔曼滤波、贝叶斯融合或最小二乘动态调整方法对融合结果进行优化。GNSS 数据在动态响应方面具有时效优势，但在垂直方向上误差较大，水准数据在高程方向精度高但更新频率低，需合理平衡其权重比例。算法设计中还需考虑数据冗余控制、误差传播路径及参数稳定性，以保证融合结果的可靠性与稳定性。通过差异敏感调整和反馈迭代机制，可实现对突变数据的抑制和异常值的剔除，进一步提升融合系统的鲁棒性和适应能力，为复杂工程环境下的实时变形监测提供技术支撑。

#### 4.3 多源测量数据的实时采集与融合建模流程

融合监测系统的数据采集与建模流程需在硬件接入、数据流转与模型计算之间实现高效协同。GNSS 模块通过接收天线和数据采集终端进行持续坐标解算，水准测量则以定期巡测方式补充高程数据，二者通过无线通信或局域网络统一上传至监测平台。在数据采集阶段需进行格式标准化、时间戳匹配与空间坐标同步，确保数据在同一时空基准下参与建模。融合建模依托三维形变模型或时间序列模型，以连续数据拟合变形趋势，并引入环境因子修正模型对气候、地质等外界影响进行调节。系统还需具备实时分析、趋势预测与预警功能，通过模型输出结果驱动监测响应机制。整个流程强调自动化运行、容错能力与数据闭环管理，在保障数据连续性的基础上实现融合分析的高效执行。

### 5 融合技术在变形监测中的应用效能分析

#### 5.1 变形信息提取精度的提升效果

GNSS 与水准测量技术的融合显著提升了变形监测结果的精度水平，尤其在高程变化识别方面效果更为突出。GNSS 技术在水平方向具备较高的解析能力，但垂直方向受电离层延迟、多路径效应等干扰影响较大，而水准测量能够在短距离内实现毫米级高程控制。通过融合处理，系统可对 GNSS 获取的垂向数据进行修正补偿，消除系统偏差与随机误差，提高整体数据精度。在空间监测网络中布设多个 GNSS 基站与水准测点形成互为校验的冗余结构，有助于异常点识别与误差溯源分析。融合后变形信息的提取可在毫米级别内实现动态变化捕捉，有效支撑工程早期微小变形识别与临界状态判定，满足高标准水利工程对监测精度的严苛要求。

#### 5.2 数据冗余提升监测系统可靠性的表现

融合技术构建了多路径、多传感器互为补充的数据结构，为监测系统带来显著的数据冗余优势。GNSS 连续观测提供实时三维定位，水准测量周期性复测为系统提供基准校核数据，两者在数据流中相互印证，形成双重验证机制。该

结构可在设备故障、信号丢失、天气干扰等情况下提供备用数据来源，增强系统抗风险能力。通过冗余数据对比分析，还可发现系统运行中潜在的误差趋势与传感器漂移情况，便于运维人员提前介入调整。在监测数据采集频率提高的同时，融合机制提升了容错阈值，有效减少误判与信息遗漏现象。监测系统在面对环境变化或工程干扰时仍能保持稳定运行状态，提升了关键期变形识别的准确性与工程安全保障水平。

#### 5.3 动态与静态信息融合对监测周期优化的推动

动态信息以 GNSS 等连续测量数据为主，能实时反映工程结构运行状态，静态信息则以水准测量等定期数据为核心，强调高精度基准控制。二者融合为监测周期的优化提供了新的技术基础。在非关键变形期可依赖 GNSS 持续监控，减少人工干预与测量成本，在结构状态突变或检测预警时再辅以高精度水准测量验证，提升监测系统的响应效率与资源配置合理性。通过融合建模分析可提取结构变形的周期性规律与阶段特征，为制定监测频率与测点布设策略提供依据。周期优化不仅提升了数据采集效率，也增强了对突发性结构风险的识别能力，保障了水利工程运行期间的预警能力和响应速度。在资源有限的条件下实现了监测效率与精度的协调发展，是融合技术在实际工程应用中的重要价值体现。

### 6 结语

GNSS 与水准测量的融合应用，为水利工程变形监测提供了更为高效、精准和稳定的技术支撑。该技术路径不仅弥补了单一测量方法在空间精度和环境适应性方面的不足，也推动了监测系统向实时化、自动化与智能化方向转型。在工程运行过程中，通过融合算法实现多源数据协调，提升了变形信息提取的准确性与监测响应的及时性，有效保障了工程结构的长期安全稳定。未来应进一步完善融合机制与数据管理体系，拓展其在更复杂工况下的适用范围，为水利工程安全管理提供更有力的技术保障与决策支撑。

#### 参考文献

- [1] 赵军平,杨昆仑,魏亚龙.高精度GNSS变形监测网在水库工程的应用[J].陕西水利,2025,(09):103-105.
- [2] 范志峰.水利工程中引水隧洞施工控制测量的技术要点[J].全面腐蚀控制,2025,39(07):71-73.
- [3] 刘玉中.基于GNSS技术的水利工程高精度地形测量方法研究[A].智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集（二）[C].重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会:2025:794-796.
- [4] 姜卫平,谢秉辰,陈渠森,陈华,陈剡,赵小阳,韩荣荣.融合GNSS与RTS观测值的紧组合变形监测方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(05):823-835.

# Research on the Adaptive Optimization of River Topography Survey in Water Conservancy and Hydropower Projects

Huaping Chen

Guangdong Yue Hydropower Survey and Design Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528000, China

## Abstract

This paper focuses on the adaptive optimization of river topography survey in water conservancy and hydropower projects, systematically exploring the application paths of modern technologies such as 3S, GPS, GIS, and RS with traditional engineering geophysical exploration methods like gravity and magnetic exploration, seismic reflection, and electromagnetic exploration. It also analyzes the measurement advantages of new geophysical exploration methods, including the color television system for drilling and geophysical tomographic imaging technology. By analyzing the principles and key points of application of each technology, this paper aims to provide technical support to enhance the accuracy, efficiency, and adaptability of river topography survey. The rapid development of new surveying technologies has made it crucial to construct an adaptive optimization measurement system that integrates multi-source data, which is essential for improving the precision of river topography modeling and the scientific nature of engineering decision-making.

## Keywords

water conservancy and hydropower; topography survey; application

# 水利水电工程河道地形测量的适应性优化研究

陈华平

广东粤水电勘测设计有限公司，中国·广东佛山 528000

## 摘要

本文聚焦水利水电工程河道地形测量的适应性优化，系统探讨 3S、GPS、GIS、RS 等现代技术与重磁勘探、地震反射法、电磁勘探等传统工程物探技术的应用路径。同时分析钻孔彩色电视系统、地球物理层析成像技术等新型物探手段的测量优势，通过剖析各技术原理与应用要点，为提升河道地形测量的精准性、效率与适应性提供技术支撑。新型测绘技术的快速发展，如何构建多源数据融合的适应性优化测量体系，成为提升河道地形建模精度与工程决策科学性的关键课题。

## 关键词

水利水电；地形测量；应用

## 1 引言

水利水电工程作为水资源开发与防洪减灾的核心基础设施，其规划、设计及施工均需依赖高精度河道地形数据支撑。然而，复杂自然河道的动态演变特征（如冲淤变化、岸坡侵蚀）与传统测量技术的局限性（如效率低、成本高、难以覆盖复杂地形），导致现有测量方案在精度、时效性及适应性方面存在显著不足。

## 2 地形测量技术在水利水电工程中的意义

在水利水电工程全生命周期中，地形测量技术作为核心支撑，其意义贯穿工程规划、设计、施工与运维的各个环节，是保障工程安全、高效、可持续运行的关键基石。从宏

观层面看，精确的地形测量数据为工程选址提供了不可替代的科学依据。在坝址选择过程中，通过 3S 技术与传统物探技术结合，能够全面评估区域地形地貌、地质构造及水文条件。例如，利用 GIS 技术整合多源数据生成的高精度数字高程模型（DEM），可直观呈现河道的坡度、坡向及汇水区域，结合重磁勘探与地震反射法获取的地下地质结构信息，能有效规避断层、溶洞等不良地质区域，确保坝址具备良好的地基稳定性与防渗条件，避免因选址不当导致的工程风险与经济损失。

在工程设计阶段，地形测量技术为方案制定提供了详实的数据基础。基于 RS 技术获取的多时相遥感影像，设计人员可清晰掌握河道演变趋势，结合 GPS-RTK 技术提供的高精度地形坐标，能够精准规划河道整治、堤坝建设及输水线路走向。例如，通过无人机倾斜摄影生成的三维实景模型，不仅包含地形信息，还能真实还原河道周边的植被、建筑物

**【作者简介】**陈华平（1995-），男，瑶族，中国湖南永州人，本科，工程师，从事水利水电勘测研究。

等环境要素，使设计方案更贴合实际地形条件，减少施工过程中的设计变更。同时，地球物理层析成像技术揭示的地下地质体分布，为基础设计、防渗处理等关键环节提供精准数据，优化设计方案，提升工程的安全性与经济性。

进入施工阶段，地形测量技术是确保工程质量与进度的重要保障。施工前，利用 3S 技术实时传输的测量数据，可快速建立施工区域的三维坐标基准，指导施工机械精准作业；施工过程中，通过持续的地形监测，及时发现因开挖、填筑等施工活动引发的地形变化，利用钻孔彩色电视系统辅助判断地基处理效果，确保工程施工符合设计要求。此外，在高边坡、深基坑等危险作业区域，基于 GPS 与 GIS 的实时监测系统能够对地形变形进行动态预警，保障施工人员安全与工程顺利推进。

工程建成后的运维阶段，地形测量技术同样发挥着不可替代的作用。河道地形会因水流冲刷、泥沙淤积等自然因素发生变化，通过 RS 技术周期性获取的遥感影像，结合 GIS 的空间分析功能，可及时掌握河岸线迁移、河床演变等情况，为河道清淤、岸坡防护等维护工作提供决策依据。同时，利用电磁勘探与电法勘探技术对堤坝进行定期检测，能够及时发现渗漏通道、空洞等隐患，结合地球物理层析成像技术精准定位异常区域，为针对性的维护加固提供技术支撑，延长工程使用寿命，保障工程长期稳定运行。

### 3 3S 技术在河道地形测量中的应用

#### 3.1 3S 技术的测量数据传输优化

在河道地形测量作业中，3S 技术凭借其高速数据传输特性，彻底革新了传统数据传输模式。当野外测量人员使用全站仪对河道控制点进行测量，或是运用多波束测深仪开展水下地形探测时，通信网络如同一条无形的“数据高速公路”，能以每秒百兆级的传输速率，将地形坐标、高清影像等海量数据实时回传至数据中心。与传统的存储介质带回处理方式相比，不仅避免了因存储设备损坏导致的数据丢失风险，还消除了人工搬运数据过程中可能出现的延迟。此外，采用的通用数据传输协议具备极强的适配性，无论是老旧型号的测量设备，还是新型智能化仪器，都能实现无缝对接，极大地提升了测量数据的时效性与完整性。在水利水电工程建设中，通过 3S 技术构建的动态监测体系，工程师可实时掌握河道地形变化情况，为工程施工进度调整与安全管控提供有力保障。

#### 3.2 GPS 技术的高精度定位测量

GPS 技术依托全球卫星定位系统，为河道地形测量带来了前所未有的高精度定位能力。在河道控制点布设工作中，传统测量方式往往需要在通视条件良好的情况下，耗费大量时间与人力进行控制点的测量与标定，而 GPS-RTK（实时动态）技术打破了这一限制。测量人员只需将 GPS 接收设备安置在测量点，短短几分钟内，便可获取厘米级甚至

毫米级精度的三维坐标数据。在山区河道，由于地形复杂、植被茂密，传统测量方法难以实施，GPS 技术却能轻松应对，在无通视条件下快速完成测量任务，测量效率较传统方式提升数倍。其差分定位模式通过基准站与流动站之间的信号差分处理，有效消除了卫星信号传播误差、电离层延迟等干扰因素，即便在信号遮挡严重的峡谷河道区域，也能确保定位数据的可靠性，为河道地形测绘提供了精准的空间坐标基础。

#### 3.3 GIS 技术的地形数据管理与分析

GIS 技术构建的空间分析平台，为河道地形数据管理与分析提供了强大的技术支撑。当 GPS 测量获取的坐标数据与 RS 遥感影像数据导入 GIS 系统后，系统可通过先进的算法，自动生成高精度的数字高程模型（DEM）。在这个三维可视化的模型中，河道的每一处地形起伏、每一个弯道走向都清晰可见。利用 GIS 的空间分析功能，工程师可对河道地形进行深入研究，精确计算出坡度、坡向等地形参数，分析汇水区域的分布情况。在水利水电工程选址阶段，通过 GIS 技术对不同区域的地形条件、地质状况等因素进行综合评估，能够快速筛选出最优的坝址位置；在防洪设计中，借助其模拟洪水演进过程，可科学规划防洪堤的高度与走向；在河道整治方案制定时，通过对地形数据的分析，合理规划河道疏浚与拓宽工程，为水利水电工程建设提供全面、科学的决策依据。

#### 3.4 RS 技术的大范围地形信息获取

RS 技术借助航空、卫星遥感平台，实现了对河道地形的大面积、周期性监测。高分辨率卫星遥感影像，如同“天眼”般，能够捕捉到河道的细微变化，准确识别河岸线的迁移、水域面积的增减等信息。通过对不同时期遥感影像的对比分析，研究人员可以清晰掌握河道多年来的演变趋势，为预测河道未来发展变化提供数据支持。无人机遥感在局部河道测量中发挥着独特优势，其灵活的飞行特性使其能够贴近河道进行低空飞行，获取分辨率达厘米级的高精度地形影像。配合倾斜摄影技术，可生成逼真的三维实景模型，模型中不仅包含精确的地形信息，还完整保留了河道周边建筑物、植被等纹理细节，为工程设计人员提供了直观、详细的空间信息，使设计方案更加贴合实际地形情况。

### 4 河道地形测量中 GPS 地形图测量技术

在工程河道 GPS 地形图测量中，精度控制、变形监测和水域测量是关键环节，以下是相关介绍：

#### 4.1 精度控制

控制网优化是保障测量精度的核心环节，需结合项目精度需求、地形条件等综合规划，具体从布设、测量模式、数据处理三方面发力：

科学布设控制点：基于项目整体测量范围和精度标准，采用“分级布网、逐级控制”原则布设 GPS 控制点。在平