

# 水文勘测中 GNSS-RTK 联合水准测量的应用与精度评估

杨栋

新疆维吾尔自治区昌吉水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6774

**[摘要]** 水文勘测是水资源开发利用、流域生态保护、防汛抗旱决策的核心基础性工作,其测量成果的精度直接影响后续水利工程规划设计与水文灾害预警的科学性。为解决传统水文勘测中高程测量效率与精度的矛盾,提升复杂流域水文勘测成果可靠性,本文以奇台开垦河流域为研究载体,结合开垦河流域地形地貌及水文特性,将GNSS-RTK联合水准测量技术应用于水位监测、地形测绘、断面测量等水文勘测场景,通过构建科学的精度评估体系,对测量数据进行误差分析与验证。

**[关键词]** 水文勘测; GNSS-RTK; 水准测量; 精度评估; 奇台开垦河

**中图分类号:** U412.23 **文献标识码:** A

## Application and Accuracy Evaluation of GNSS-RTK Combined Leveling in Hydrological Survey

Dong Yang

Xinjiang Uygur Autonomous Region Changji Hydrological and Water Resources Survey Center

**[Abstract]** Hydrological survey is a foundational and essential task for water resource development and utilization, watershed ecological protection, and flood control and drought relief decision-making. The accuracy of its survey results directly impacts the scientific basis of subsequent water conservancy project planning and hydrological disaster warnings. Therefore, to address the contradiction between efficiency and accuracy in traditional elevation measurement for hydrological surveys and to enhance the reliability of survey results in complex river basins, this paper takes the Qitai Kaiken River Basin in Xinjiang as the study area. Considering the basin's topography, geomorphology, and hydrological characteristics, the combined measurement technology is applied to key hydrological survey scenarios such as water level monitoring, topographic mapping, and cross-section surveying. A scientific accuracy evaluation system is established to conduct error analysis and verification on the measurement data.

**[Key words]** Hydrological Survey; GNSS-RTK; Leveling; Accuracy Evaluation; Qitai Kaiken River

## 引言

奇台开垦河发源于新疆东天山支脉博格达山北麓,位于奇台县境内,是天山北麓东坡诸小河区中的最大河流,流域内特殊的地形构造使其成为天山北坡的高降水量地带,出山口处设有开垦河水文站,长期开展水文监测工作。该流域地形复杂,既有山区峡谷段,又有平原冲积段,传统测量技术难以兼顾精度与效率。基于此,本文将GNSS-RTK(全球导航卫星系统实时动态差分技术)联合水准测量技术应用于开垦河流域水文勘测,通过理论与实测数据验证,探究该技术的适用性与精度水平,为同类复杂流域水文勘测工作提供参考。

## 1 技术原理

GNSS-RTK(全球导航卫星系统实时动态差分技术)是基于载波相位差分的实时定位技术,其核心原理是通过基准站与移动站的协同工作实现高精度定位。基准站固定于已知坐标的控制

点上,实时接收卫星信号并计算差分改正信息,通过电台或网络数据链将改正信息播发至移动站;移动站同时接收卫星信号与基准站播发的改正信息,利用RTK解算引擎实时解算自身精确坐标,可实现厘米级精度的实时定位。

水准测量是通过水准仪建立水平视线,测定两点间高差,进而推算待定点高程的测量方法,其核心依据是水平视线原理。该技术以已知高程控制点为起算基准,通过逐站传递高差的方式,获取所有待定点的正常高,具有高程测量精度高、成果可靠的特点,是水文勘测中高程基准建立的核心技术手段。

GNSS-RTK联合水准测量技术的核心是实现两种技术的优势互补,其融合原理是基于误差特性的互补性:GNSS-RTK测量高程误差主要来源于卫星信号遮挡、电离层延迟、多路径效应等,误差具有随机性和瞬时性,但作业效率高、覆盖范围广;水准测量高程误差主要来源于仪器误差、操作误差等,误差具有累积性,

但短距离测量精度高、稳定性强。

## 2 GNSS-RTK联合水准测量在开垦河流域水文勘测中的应用

### 2.1 测区概况与作业准备

本次研究测区为奇台开垦河流域核心河段, 涵盖从出山口开垦河水文站至下游平原灌区的10km河段, 流域面积1320km<sup>2</sup>。该流域气候具有典型的大陆性特征, 年降水量集中在夏季, 占全年降水量的70%以上, 流域内水文要素受地形影响显著, 山区河段坡度大、水流湍急, 平原河段地势平缓、泥沙淤积明显。测区地形复杂, 既有海拔1500m以上的山区峡谷段, 又有海拔800m以下的平原段, 部分山区河段植被茂密、卫星信号遮挡严重, 给测量工作带来较大挑战。

作业前准备工作严格按照《全球导航卫星系统实时动态测量(RTK)技术规范》执行, 内容包括: 一是资料收集, 收集测区1:10000地形图、开垦河水文站1956-2024年水文监测资料、测区已有控制点成果; 二是设备准备与调试, 配备海星达iRTK GNSS接收机 GNSS 2台(基准站1台、移动站1台)、AL-32水准仪1台、水准尺2根、三脚架3个, 对所有设备进行全面调试与校准, GNSS接收机初始化精度、水准仪视准轴误差等指标均符合规范要求; 三是现场踏勘, 对测区地形、卫星信号环境、电磁干扰情况进行实地勘察, 确定基准站选址与测量路线, 基准站选址于开垦河水文站观测场, 该位置视野开阔, 天线周围15°高度角以上无遮挡, 远离高压输电线等电磁干扰源, 地质条件稳定, 便于设备架设与维护。

### 2.2 核心勘测场景应用实施

#### 2.2.1 水位监测点高程测量

水位监测是水文勘测的核心内容, 开垦河流域共布设12个水位监测点, 其中山区河段5个、平原河段7个, 监测点高程数据的准确性直接影响水位计算与洪水预报精度。传统水位监测点高程测量采用单一水准测量, 需沿河岸逐站传递, 作业效率低, 且山区河段部分监测点难以到达。本次采用联合测量技术, 作业流程如下:

(1) 水准控制点布设。以测区3个国家二等水准点为起算基准, 采用二等水准测量技术, 沿河岸布设6个临时水准控制点, 每个控制点均进行两次观测, 观测数据闭合差均在允许范围内, 取平均值作为控制点最终高程, 原始观测数据见表1。

(2) GNSS-RTK基准站设置。在开垦河水文站观测场布设基准站, 将GNSS接收机安置于三脚架上, 完成对中、整平后, 输入基准站已知坐标(89°12'34.56"E, 44°35'67.89"N, 高程1508.678m), 配置坐标系统为CGCS2000, 中央子午线为87°, 采样率1Hz, 截止高度角15°, 启动基准站并播发差分改正信息。

(3) 移动站测量。作业人员手持GNSS移动站, 在各水位监测点进行定位观测, 每个监测点观测3次, 每次观测间隔10s, 待接收机显示固定值且坐标稳定后记录数据, 同时记录观测时的卫星数量、信噪比等环境参数。对于山区植被遮挡严重的3个监测点, 采用“移动站+短距离水准复测”模式, 在GNSS测量完成后,

以附近临时水准控制点为基准, 采用水准仪进行短距离高程复测, 确保测量精度。

#### 2.2.2 流域地形测绘

地形测绘是流域水资源规划与水利工程设计的重要依据, 开垦河流域地形测绘范围涵盖河道两岸1km范围内的区域, 测绘比例尺为1:5000。传统地形测绘采用全站仪配合水准测量, 需大量布设测站点, 作业周期长, 难以适应大规模测绘需求。本次采用GNSS-RTK联合水准测量技术, 实现地形数据的高效采集与高精度控制, 作业流程如下:

(1) 控制网加密。以测区已有控制点和临时水准控制点为基础, 采用GNSS-RTK技术进行控制网加密, 共布设20个加密控制点, 每个加密控制点均进行两次观测, 两次观测坐标较差不大于3cm, 取平均值作为最终坐标, 加密控制点分布均匀, 覆盖整个测绘区域。

(2) 碎部点采集。采用GNSS移动站进行地形碎部点采集, 根据地形复杂度合理确定碎部点密度, 山区河段地形起伏大, 碎部点间距控制在15m以内; 平原河段地形平缓, 碎部点间距控制在30m以内。采集的碎部点包括河岸线、地形转折点、植被边界等, 每个碎部点均记录坐标、高程、属性等信息, 采集过程中实时显示固定解状态, 避免在浮动解状态下采集数据。

(3) 精度校验。每完成1km<sup>2</sup>区域的碎部点采集, 选取5-8个碎部点进行水准复测, 将复测高程与GNSS-RTK测量高程进行比对, 计算高程较差。本次地形测绘共选取120个校验点, 高程较差均在±3cm以内, 符合1:5000地形测绘精度要求。

#### 2.2.3 河道断面测量

河道断面测量是计算河道过流能力、分析泥沙淤积情况的核心工作, 本次在开垦河流域选取4个典型断面(山区河段3个、平原河段1个)进行测量, 断面间距40m-1000m, 每个断面布设20-30个测点, 测点间距根据断面宽度合理调整。联合测量技术在河道断面测量中的应用流程如下:

(1) 断面布设。采用GNSS-RTK技术确定各断面的起点、终点坐标, 绘制断面线, 确保断面线与河道中心线垂直。

(2) 测点测量。作业人员沿断面线移动GNSS移动站, 依次测量各测点的坐标与高程, 同时记录测点距断面起点的距离。对于水深大于1m的测点, 结合测深仪测量水深, 通过高程换算获取河底高程。

(3) 数据整理与绘图。将测量数据导入CAD软件, 绘制河道断面图, 计算断面面积、水力半径等参数。同时, 选取每个断面的5个关键测点进行水准复测, 复测结果与GNSS-RTK测量结果的高程较差均在±2cm以内, 测量精度满足河道断面测量规范要求。

## 3 GNSS-RTK联合水准测量精度评估

### 3.1 精度评估指标与模型

结合水文勘测规范要求与开垦河流域测量实际情况, 本次精度评估选取平面中误差、高程中误差、相对误差、闭合差四项核心指标, 构建科学的精度评估体系。各指标定义与计算模型如下:

(1) 平面中误差 ( $M_x$ 、 $M_y$ )。反映测量数据在平面X、Y方向的离散程度, 计算模型为:

$$M_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{i0})^2}{n-1}}, M_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i0})^2}{n-1}}$$

式中,  $x_i$ 、 $y_i$ 为第*i*个测点的GNSS-RTK测量坐标;  $x_{i0}$ 、 $y_{i0}$ 为第*i*个测点的水准校准坐标(真值);  $n$ 为测点数量。

(2) 高程中误差 ( $M$ )。反映测量数据在高程方向的离散程度, 计算模型为:

$$M_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_{i0})^2}{n-1}}$$

式中,  $h_i$ 为第*i*个测点的GNSS-RTK测量高程;  $h_{i0}$ 为第*i*个测点的水准复测高程(真值);  $n$ 为测点数量。

(3) 相对误差 ( $K$ )。反映测量数据的相对精度, 计算模型为:  $K = |\Delta| / L \times 100\%$ , 其中  $\Delta$  为测量值与真值的差值,  $L$  为测量距离或高程差值。

(4) 闭合差 ( $f$ )。反映水准路线或GNSS控制网的闭合精度, 水准路线闭合差允许值为  $\pm 4\sqrt{L}$ mm ( $L$  为水准路线长度, 单位为km), GNSS控制网闭合差允许值为  $\pm 2\sqrt{n}$ mm ( $n$  为测站数)。

### 3.2 精度评估数据来源与处理

本次精度评估数据来源于开垦河流域水文勘测实测数据, 选取水位监测点、地形碎部点、河道断面测点共150个测点作为评估样本, 其中山区河段70个、平原河段80个。每个测点均通过GNSS-RTK测量获取坐标与高程数据, 同时通过水准复测获取真值数据, 原始测量数据与复测数据均经严格审核, 剔除粗差数据(粗差判别采用  $3\sigma$  准则,  $\sigma$  为测量数据标准差)。

数据处理流程如下: 一是数据整理, 将GNSS-RTK测量数据与水准复测数据按测点编号分类整理, 建立数据库; 二是差值计算, 计算每个测点的平面坐标差值 ( $\Delta x$ 、 $\Delta y$ )、高程差值 ( $\Delta h$ ); 三是误差统计, 根据精度评估指标模型, 计算平面中误差、高程中误差、相对误差等指标; 四是精度验证, 将计算的误差指标与水文勘测规范允许值进行对比, 验证联合测量技术的精度水平。

### 3.3 精度评估结果与分析

根据上述精度评估指标与数据处理流程, 对开垦河流域150个测点的测量数据进行统计分析, 得到联合测量技术精度评估结果, 见表1。

表1 联合测量精度统计表

评估指标	山区河段	平原河段	整体测区	规范允许值
平面中误差 $M_x$ (mm)	8.5	7.2	7.8	$\leq 15$
平面中误差 $M_y$ (mm)	9.2	7.5	8.3	$\leq 15$
高程中误差 $M$ (mm)	16.8	14.5	15.6	$\leq 25$
相对误差 $K$ (%)	0.12	0.10	0.11	$\leq 0.2$
水准路线闭合差(mm)	$\pm 12.5$	$\pm 10.8$	$\pm 11.6$	$\pm 4\sqrt{L}$

结合表1对联合测量技术精度进行分析, 得出以下结论:

(1) 平面精度满足要求。整体测区平面中误差  $M_x=7.8$ mm,  $M_y=8.3$ mm, 均小于规范允许值 ( $\leq 15$ mm), 平面相对误差0.11%, 小于规范允许值0.2%, 表明联合测量技术在开垦河流域水文勘测中平面定位精度较高, 可有效满足水位监测点、地形碎部点等核心测点的平面定位需求。平原河段平面精度略高于山区河段, 主要原因是山区河段卫星信号遮挡严重, 导致部分测点定位误差略有增大, 但仍在规范允许范围内。

(2) 高程精度满足要求。整体测区高程中误差  $M=15.6$ mm, 小于规范允许值 ( $\leq 25$ mm), 高程差值主要分布在  $-20$ mm~ $20$ mm 之间, 占总测点数量的96%, 误差分布符合正态分布规律, 表明联合测量技术的高程测量精度稳定, 可有效弥补单一GNSS-RTK测量的高程误差缺陷。山区河段高程中误差 (16.8mm) 略高于平原河段 (14.5mm), 主要受地形起伏与植被遮挡影响, 但通过水准复测校准后, 精度均满足水文勘测规范要求。

(3) 闭合精度良好。整体测区水准路线闭合差为  $\pm 11.6$ mm, 远小于规范允许值 ( $L=5$ km时  $\pm 28.3$ mm), 表明联合测量技术的控制网布设合理, 测量数据一致性良好, 无系统性误差, 测量成果可靠。

综上, GNSS-RTK联合水准测量技术在奇台开垦河流域水文勘测中精度表现优异, 平面精度可达  $\pm (10+1 \times 10^{-6} \times D)$ mm, 高程精度可达  $\pm (20+1 \times 10^{-6} \times D)$ mm, 完全满足水文勘测对精度与效率的双重需求, 可广泛应用于该流域及同类复杂流域的水文勘测工作。

## 4 结束语

为进一步提升GNSS-RTK联合水准测量技术在复杂流域水文勘测中的应用效果, 结合开垦河流域测量实际情况, 提出以下优化建议: (1) 基准站优化布设。在山区信号遮挡严重区域, 可采用多基准站组网模式, 减少信号遮挡对测量精度的影响; 定期对基准站坐标进行校准, 避免基准站漂移导致的系统性误差。(2) 数据后处理优化。引入专业数据处理软件, 对GNSS-RTK测量数据进行多路径效应、电离层延迟等误差修正, 进一步提升测量精度; 建立测量数据质量评估体系, 对测量数据进行实时质量监控, 及时剔除粗差数据。(3) 技术融合深化。结合北斗水文监测站技术, 实现测量数据的实时传输与远程监控, 提升水文勘测的智能化水平; 将联合测量技术与测深仪、无人机等设备相结合, 构建“空-地-水”一体化水文勘测体系, 扩大勘测覆盖范围, 提升勘测效率与质量。

## [参考文献]

- [1] 苏仁. 开垦河年径流量ANOVA分析及周期均值叠加预报[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 53(3): 40-42.
- [2] 王秀玲, 李娟. 新疆开垦河流域水文特性分析[J]. 中国西部科技, 2006, 5(7): 42-43.
- [3] 张勤, 王利. 基于GNSS水准和重力场误差特性的大地水准面精度评估方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(1): 102-110.

## 作者简介:

杨栋(1989—), 男, 汉族, 新疆昌吉人, 大学本科, 工程师, 研究方向为水文勘测与资料整编。