

# 无人机航测技术在洞庭湖四口河道测量中的应用

刘瑞斌<sup>1</sup>, 郭亮<sup>1</sup>, 刘小杰<sup>1</sup>, 马旭<sup>2</sup>, 黄烈敏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长江水利委员会水文局荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州

<sup>2</sup>中国水利水电科学研究院, 北京

收稿日期: 2023年8月11日; 录用日期: 2023年9月15日; 发布日期: 2023年10月10日

## 摘要

无人机航测技术以高精度、高分辨率、高采集速度等明显优势被广泛应用在测绘领域的各个方面。本文结合洞庭湖四口河道测量项目, 对以耕地、密林、芦苇、草地等多层次、高密度植被覆盖为特征的陆域部分开展了相关技术的应用, 并对其观测精度进行了检测分析。结果表明, 精度符合相关规范要求, 以无人机航测技术获取高分辨率的DOM与高精度的DEM数据, 并对其进行融合生产DLG及其他一些产品, 为洞庭湖四口水系的陆上河道测量提供了技术支撑。

## 关键词

航摄技术, 机载激光雷达, 河道测量, 对比分析

# The Application of Unmanned Aerial Vehicle Survey Technology in the Measurement of the Four Inlets River Course in Dongting Lake

Ruibin Liu<sup>1</sup>, Liang Guo<sup>1</sup>, Xiaojie Liu<sup>1</sup>, Xu Ma<sup>2</sup>, Liemin Huang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jingjiang Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, The Hydrological Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Jingzhou Hubei

<sup>2</sup>China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing

Received: Aug. 11<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 15<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 10<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Unmanned aerial vehicle surveying technology is widely used in various aspects of surveying and mapping due to its obvious advantages such as high accuracy, high resolution, and high acquisition speed. In the measurement project of the four inlets channels in Dongting Lake, relevant technologies were applied to land areas characterized by multi-level and high-density vegetation coverage such as farmland, dense forests, reeds, and grasslands, and the observation accuracy was tested and analyzed. The results

作者简介: 刘瑞斌(1986.03-), 河南偃师人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为水文及河道勘测。Email: 120377654@qq.com

文章引用: 刘瑞斌, 郭亮, 刘小杰, 马旭, 黄烈敏. 无人机航测技术在洞庭湖四口河道测量中的应用[J]. 水资源研究, 2023, 12(5): 486-493. DOI: 10.12677/jwrr.2023.125053

indicate that the accuracy meets relevant specification requirements. This paper obtained high-resolution DOM and high-precision DEM data using drone aerial survey technology and produced DLG and other products, which provided technical support for the onshore river channel measurement of the four inlets systems in Dongting Lake.

## Keywords

Aerial Photography Technology, Airborne Laser Radar, Stream Gauging, Comparative Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

洞庭湖四口水系内河网交织, 错综复杂, 陆上部分主要以耕地、密林、芦苇、草地等多层次、高密度植被覆盖, 范围广, 地形地貌极为复杂。陆上部分采用传统 GNSS 手段观测存在以下缺点: 1) 测量工作量浩大, 整个四口水系长达 1000 余 km, 需耗费极大的人力物力才能完成; 2) 作业区域内有大量的耕地、密林、城镇建筑物等, 存在测点难以到达、测量设备信号差等问题, 观测精度与测量效率难以保证。

随着信息化、智能化的不断发展, 无人机航测技术以高精度、高分辨率、高测绘速度等明显优势被广泛应用在测绘领域的各个方面[1]。该技术可通过无人机搭载高清相机拍摄航片, 从而获取高分辨率的正射影像; 通过无人机搭载激光雷达, 可获取高精度的激光点云数据。本文研究了在洞庭湖四口水系陆域部分采用低空无人机航测技术获取高分辨率的正射影像与高精度的点云数据, 并对其进行融合生产地形图等产品, 为洞庭湖四口水系陆域测量的顺利开展提供了技术支撑。

## 2. 无人机航测技术

### 2.1. 航测设备选型

本文利用多平台低空无人机航测系统, 采用航空摄影测量与激光雷达技术获取测区正射影像和高程点云数据。该技术作业模式灵活, 以小型无人机飞行器为平台, 起降灵活, 不需要专门的起降场地; 操作简单, 运行成本低, 广泛的适合民用领域; 能够超低空飞行, 获得高分辨率的影像与激光点云数据。

针对洞庭湖四口水系作业范围广、地形地貌复杂的特点, 需要选用续航能力较强、稳定性好的无人机系统。为提高航测作业效率, 本次正射影像采集平台选用了飞马复合翼 V100 型无人机系统, 搭载 V-CAM100 高清相机。V100 型无人机为垂直起降固定翼飞行平台, 可搭载航测模块、倾斜摄影模块、热红外遥感模块、多光谱模块、可见光视频模块、热红外视频模块、双光视频模块, 续航时间可达 90 min。激光点云获取平台选用了飞马多旋翼 D2000 无人机系统, 搭载 D-LiDAR2000 激光雷达采集设备。D2000 无人机配备了不同的传感器(加速计、陀螺仪、磁强计等), 并配有 4 个独立的无刷电机, 可搭载正射模块、倾斜摄影模块、LiDAR 模块、农业遥感模块等多种数据采集设备, 满载飞行持续时间可达 48 min [1], 具体参数见表 1。

**Table 1.** Aerial survey drone equipment parameters

**表 1.** 航测无人机设备参数

| 无人机型号    | 类型  | 满载续航   | 起飞重量   | 巡航速度   | 机身长度               | 抗风能力 | 测控半径  | 本次作业内容 |
|----------|-----|--------|--------|--------|--------------------|------|-------|--------|
| 飞马 V100  | 复合翼 | 90 min | 8.5 kg | 18 m/s | 1680 mm            | 6 级  | 20 km | 正射影像   |
| 飞马 D2000 | 多旋翼 | 48 min | 2.8 kg | 15 m/s | 495 × 442 × 279 mm | 6 级  | 5 km  | 点云     |

正射影像数据采集设备选用 V-CAM100，其参数如表 2 所示。

Table 2. V-CAM100 equipment parameters  
表 2. V-CAM100 设备参数

| 载荷型号     | 相机型号         | 传感器尺寸        | 有效像素                | 镜头参数     | 分辨率        | 飞行高度       |
|----------|--------------|--------------|---------------------|----------|------------|------------|
| V-CAM100 | SONY RX1R II | 35.9 × 24 mm | 4200 万(7952 × 5304) | 35 mm 定焦 | 2 cm@150 m | 150~1500 m |

D2000 无人机激光模块选用 D-LiDAR2000 轻型机载激光雷达系统。该模块激光点频为每秒 24 万，对于植被覆盖的测区，三次回波技术可以使激光有更多次的穿透机会，从而得到较多的地面点。其参数如表 3 所示。

Table 3. D-LiDAR2000 system parameters  
表 3. D-LiDAR2000 系统参数

| 载荷型号        | 精度/cm | 波长/nm | 水平视场角/° | 垂直视场角/°  | 点频/kpts/s | 回波数 | 测距精度/cm | 重量/g |
|-------------|-------|-------|---------|----------|-----------|-----|---------|------|
| D-LiDAR2000 | 5     | 905   | 70.4    | 4.5/77.2 | 240       | 3   | ±2      | 680  |

2.2. 航测技术流程

无人机航测系统测量工作主要包括[2] [3]：航摄分区和航线设计、基站架设、像控点布设与测量、检校、数据采集、采集数据质量现场检查等。航测分区应结合测区实际情况，综合考虑精度要求、点云密度等各方面要求，根据技术要求，设定重叠率，选择合适的作业时间，确保外业采集精度。采用飞马 V100 系统采集正射影像数据时，需架设地面基站，同步观测并记录静态数据。进行数据采集时，需要注意航线的航高保持、飞行姿态控制与飞行速度。外业数据采集后，需要及时处理，检查是否需要补飞或重飞。

采集数据质量现场检查。使用相应软件对每天航飞数据进行数据质量检查，确保航飞的点云数据和影像数据能有效覆盖测区及确保数据质量。同时对其它相关原始数据例如 POS 数据等进行相关检查，确保航飞数据的有效性及其完整性。

3. 洞庭湖四口河道测量中的应用

3.1. 项目概况

荆江四口水系(松滋口、虎渡口、藕池口、调弦口，其中调弦口于 1958 年堵口建闸)位于长江中游干流荆江



Figure 1. The complex terrain of the four inlets systems in Dongting Lake  
图 1. 洞庭湖四口水系复杂地形



右岸，是分流荆江进入洞庭湖的通道。多年以来，荆江三口分流对于调节荆江洪水，确保荆江地区防洪安全起到了重要作用。开展荆江四口水系河道测量，可以为长江中游区防洪减灾、江湖关系研究及水库优化调度、四口水系综合整治等方案编制、洞庭湖区生态保护和修复等提供重要数据支撑。

洞庭湖四口水系内河网交织，错综复杂，陆上部分主要以耕地、密林、芦苇、草地等多层次、高密度植被覆盖，范围广，地形地貌极为复杂。如图 1 所示。

## 3.2. 项目实施

### 3.2.1. 航摄作业实施

航摄作业过程中，作业组严格按照专业技术设计书的要求，提前布设好像控点，并采用 RTK 图根控制测量方式测量。航线规划综合考虑精度要求、河流走向等，航向重叠度和旁向重叠度均超过 50%，正射影像地面分辨率优于 0.2 m。每天选择太阳高度角大于 45°，阴影倍数小于 2 的时间段进行航空摄影测量。外业实施如图 2 所示。

航摄数据采集、内业数据处理及成果输出均采用飞马无人机管家。该软件是无人机数据获取、处理、显示管理以及无人机维护的一站式智能 GIS 系统。支持真三维地形数据的精准三维航线规划、三维实时飞行监控、快速飞行质检，具有丰富的数据预处理工具箱，支持稳健的精度控制和自动成图、丰富的 4D 和三维成果生产。

### 3.2.2. 机载激光雷达作业实施

本次航测选择在冬季，植被的落叶期开展。机载激光雷达测量主要作业方法与技术指标控制如下[4]：

1) 航摄设计综合考虑精度、点云密度等要求，控制点云高程中误差在 0.25 m 以内，点云密度不少于 1 点每平方米的要求，同时满足点云获取对旁向重叠度的要求。

2) POS 数据解算利用 IE (Inertial Explore) 软件进行，解算完成后，查看处理精度报告，包括姿态、位置精度、IMU 处理状态、姿态、位置分离等，确认无误后输出航迹文件。

3) 点云原始数据与 POS 数据进行融合处理，生成带坐标的 .las 格式点云文件。加载激光原始数据、航迹文件，设置系统检校参数、坐标系投影参数。

4) 点云数据进行质量检查。施测过程中同步进行了测区检测点测量，利用检测点检校处理后的点云数据，保证点云数据质量。

5) 点云分类采用 LiDAR 360 软件进行，提取原地面点云。保证原地面点云密度满足 1:5000 水道地形测图需求。



Figure 2. Route planning and implementation of aerial photography field work

图 2. 航线规划及航摄外业实施

航测数据采集时，采用常规全站仪、GNSS RTK 等以碎部点形式进行同精度检测工作。检测点选取堤线、坎线、滩地、水边线等有代表性的区域进行观测，且均匀分布于每个架次(图 3 中红色点为布设的检测点)。

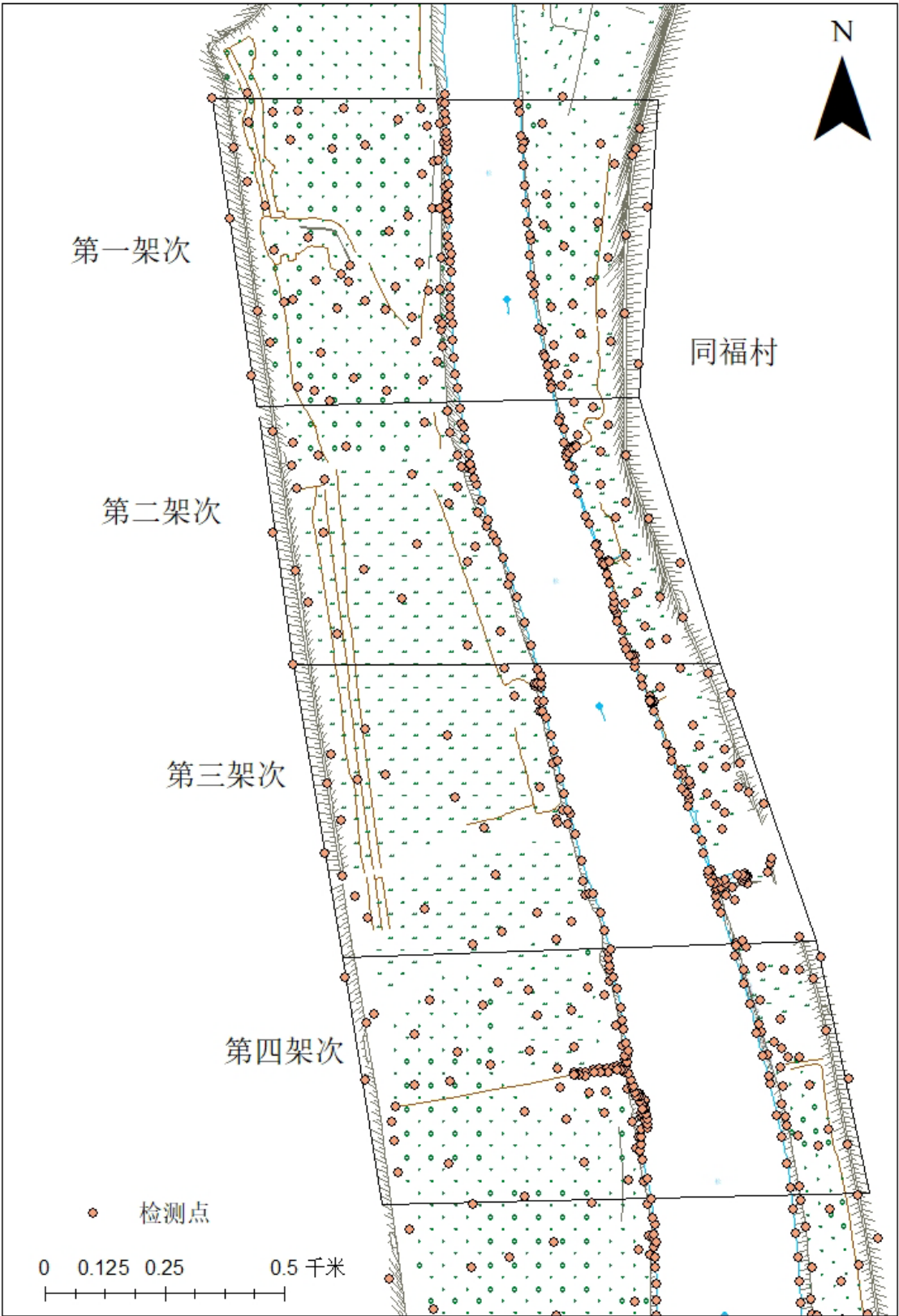


Figure 3. Checkpoint deployment  
图 3. 检查点布设

3.3. 精度统计分析

采用航空摄影和机载 LIDAR 开展地形观测时，采用全站仪、RTK 以碎部点形式同步观测检测点，将正射影像与检测点比较分析，评定其平面精度；将点云数据与检测点比较分析，评定其高程精度。表 4 与图 4 为两者平面位置对比统计情况。

Table 4. DOM and detection point plane position accuracy statistics (Unit: m)

表 4. DOM 与检测点平面位置精度统计 单位：m

|    | 范围  | ≤0.5  | (0.5~1.0] | >1.0  | max   | 检校中误差  |
|----|-----|-------|-----------|-------|-------|--------|
| 平面 | 点数  | 1387  | 355       | 218   | 1.506 | ±0.381 |
|    | 百分比 | 70.8% | 18.1%     | 11.1% |       |        |

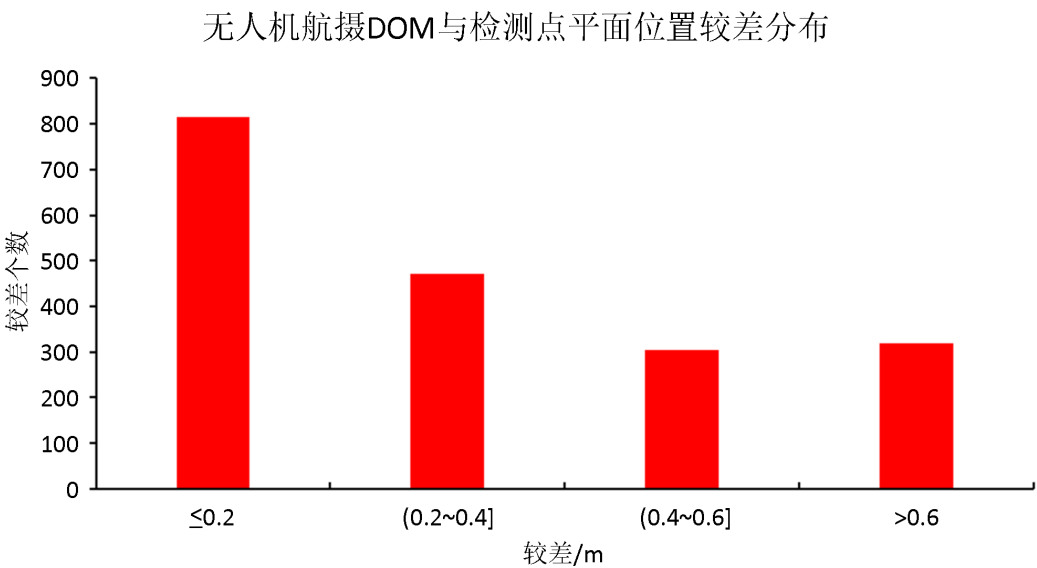


Figure 4. Distribution of poor plane position between DOM and detection points

图 4. DOM 与检测点平面位置较差分布

从图表可以看出：平面位置有超过 70%的检测点精度值在 0.5 m 以内，中误差为±0.381 m，基本满足了本项目生产的技术要求。其中极大值较差为 1.506 m，经分析，主要存在于边界线模糊的地物地貌(比如土坎、堤边、树木繁密的水边等)。

机载 LIDAR 地形观测时，以碎部点形式同步观测了检测点进行点云成果数据对比，质量统计情况见表统计情况见表 5 与图 5。

Table 5. Point cloud elevation accuracy distribution statistics (Unit: m)

表 5. 点云高程精度分布统计 单位：m

| 类型    | 范围  | ≤0.1   | (0.1~0.25] | (0.25~0.5] | >0.5 | 极大值    | 检校中误差  |
|-------|-----|--------|------------|------------|------|--------|--------|
| 低密度植被 | 点数  | 11,495 | 5164       | 941        | 29   | 0.757  | ±0.131 |
|       | 百分比 | 65.2%  | 29.3%      | 3.2%       | 5.3% |        |        |
| 高密度植被 | 点数  | 4255   | 3048       | 798        | 14   | -0.933 |        |
|       | 百分比 | 52.4%  | 37.6%      | 9.8%       | 0.2% |        |        |

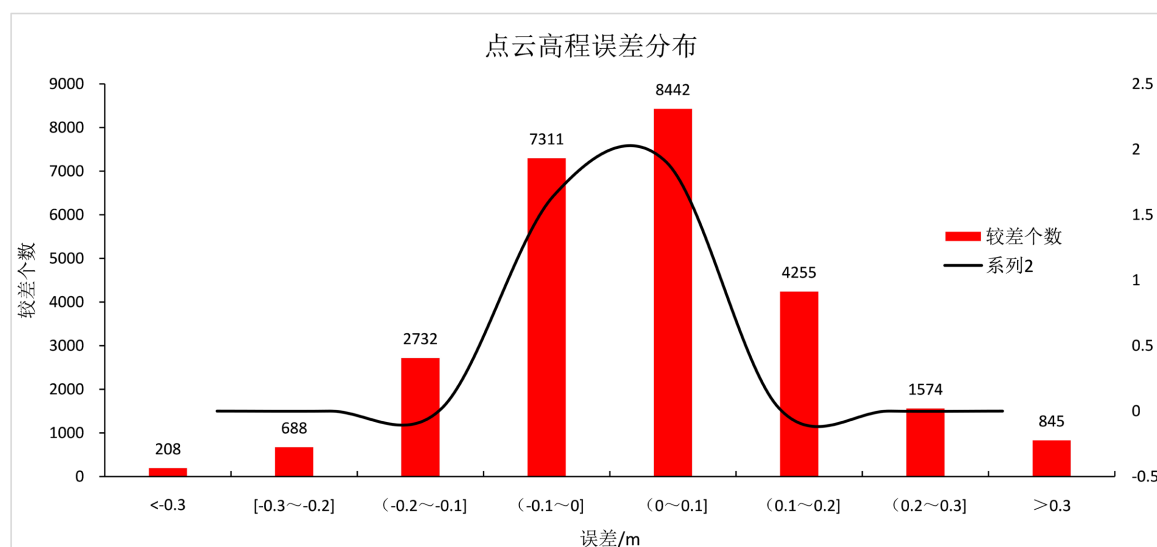


Figure 5. Distribution of point cloud elevation error

图 5. 点云高程误差分布

从统计中看出，点云数据中误差为 $\pm 0.131$  m，满足《CH/T 8024-2011 机载激光雷达数据获取技术规范》要求的 1:2000 平原地区点云高程中误差不超过 $\pm 0.25$  m 的要求。从高程误差分布图中看出，低密度植被覆盖的区域精度表现更优，误差小于 0.25 m 的点数远高于高密度植被覆盖的区域。

从统计中看出，仍然存在极个别粗差，高程误差极大值达到 $-0.933$  m，经分析，有以下几点原因：1) 处理时部分地面点被过滤掉。2) 部分检测点选取在沟渠底部，激光雷达无法穿透。3) 植被密度太大，激光无法穿透打到地面。

## 4. 结论

本文针对四口水系内河网交织，错综复杂，陆上部分耕地、密林、芦苇、草地等多层次、高密度植被覆盖，范围广等特点，利用无人机航测技术开展了正射影像与点云的采集与处理工作。可得到以下结论：

1) 无人机航测技术实现了陆地三维地形数据快速采集，利用 DOM 与 DEM 融合进行地形图绘制提高了工作效率和成果精度。

2) 航测时机的选择。正射影像的摄取受天气影响较大，需要选择在天气晴朗无风、太阳光照适宜的时间段开展；机载激光雷达需要直接打到地面上，才能得到真实的高程，因此应选择在冬季植被的落叶期开展。

3) 应根据河流流向、测区特点优化航线设计，选择合适的航高与重叠率，可以在满足技术设计要求的前提下，较好地提高作业效率。

4) 做好航测的数据管理。大面积的航测作业产生的成果数据量浩大，需要做好航测成果目录，便于快速准确地调用需要的数据。

在保障数据精度、提高外业作业效率、点云数据的后处理软件等方面还需继续进一步深化研究。主要表现在：① 进一步详细分析系统误差及其产生机制，全面系统地分析出各种误差的影响机理。建立误差估计模型，用于提高点云精度。② 进一步分析影响机载激光扫描点云精度的因素，研究如何消除这些误差，有效提高观测精度。③ 进一步研发数据库管理工作，便于对航测成果进行有效管理，快捷提取。

## 基金项目

国家重点研发计划：长江中游生态优先的水文连通优化调控及在典型区域的示范应用(2022YFC3201804)。

## 参考文献

- [1] 刘安兴, 李志军. 无人机机载 LiDAR 航测技术在地形地貌复杂区的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(5): 57-59.  
LIU Anxing, LI Zhijun. Research on the application of UAV airborne LiDAR aerial survey technology in the area with complex topography. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(5): 57-59. (in Chinese)
- [2] 郭文周, 邓宇, 何庐山, 郭亮, 等. 航摄与机载激光雷达技术在河道地形测量中的应用[J]. 水资源研究, 2017, 6(6): 642-648.  
GUO Wenzhou, DENG Yu, HE Lushan, GUO Liang, et al. Application of aerial photography and airborne lidar technology in river way topographic survey. Journal of Water Resources Research, 2017, 6(6): 642-648. (in Chinese)
- [3] 张效锋. 影响无人机航测高程精度因素的研究[J]. 现代测绘, 2021, 44(3): 31-33.  
ZHANG Xiaofeng. Research on the factors affecting the altitude accuracy of UAV aerial survey. Modern Surveying and Mapping, 2021, 44(3): 31-33. (in Chinese)
- [4] 机载激光雷达数据获取技术规范: CH/T 8024-2011 [S]. 北京: 测绘出版社, 2012.  
Technical specification for airborne LiDAR data acquisition: CH/T 8024-2011. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2012. (in Chinese)