

团体标准

T/CI XXX-2024

无人机载单波段水深测量激光雷达 水下地形测量规范

Specification for unmanned aerial vehicle-borne single band bathymetry

LiDAR for underwater topographic survey

(征求意见稿)

2024-X-X 发布

2024-X-X 实施

中国国际科技促进会 发布

中国国际科技促进会 (CIAPST) 是 1988 年经中华人民共和国国务院科技领导小组批准而成立的全国性社会团体。制定团体标准、开展标准国际化和推动团体标准实施，是中国国际科技促进会的工作内容之一。任何团体和个人，均可提出制、修订中国国际科技促进会团体标准的建议并参与有关工作。

中国国际科技促进会标准按《中国国际科技促进会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国国际科技促进会征求意见稿经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 80% 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国国际科技促进会标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国国际科技促进会标准化工作委员会，以便修订时参考。

任何团体和个人，均可对本标准征求意见稿提出意见和建议，牵头起草单位联系方式：
823335649@qq.com

中国国际科技促进会

地址：北京市海淀区中关村东路 89 号恒兴大厦 13F

邮政编码：100190

电话：010-62652520 传真：010-62652520

网址：<http://www.ciapst.org>

目 次

前 言	III
无人机载单波段水深测量激光雷达水下地形测量规范	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	3
5 基本规定	3
6 技术准备	5
7 数据采集	7
9 成果制作	11
10 成果质量检查	11
11 资料整理与归档	12
附 录 A	14
附 录 B	15
附 录 C	16

前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由桂林理工大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：桂林理工大学、武汉大学、中国国土资源航空物探遥感中心、天津大学、南京大学、广西壮族自治区自然资源遥感院、广州南方测绘科技股份有限公司。

本文件主要起草人：周国清、宋波、金鼎坚、周祥、张磊、刘润东、徐嘉盛、闫利、程亮、赵毅强。

本文件为首次发布。

无人机载单波段水深测量激光雷达水下地形测量规范

1 范围

本文件规定了无人机载单波段水深测量激光雷达水下测量技术的基本规定、技术准备、系统要求、数据采集、数据处理、资料整理与归档等要求。

本文件适用于湖泊、河流、水库、近海岸等水深 20 米以内的水下地形测量技术生产作业。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注明日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注明日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12763.10	海洋调查规范 第 10 部分：海底地形地貌调查
GB/T 18316	数字测绘成果质量检查与验收
GB/T 28587	移动测量系统惯性测量单元
GB/T 36100	机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法
GB/T 42640	多波束水下地形测量技术规范
GB/T 39624	机载激光雷达水下地形测量技术规范
CH/T 1004	测绘技术设计规定
CH/T 8023	机载激光雷达数据处理技术规范
CH/T 8024	机载激光雷达数据获取技术规范

3 术语和定义

3.1

无人机载单波段水深测量激光雷达测量系统 UAV single-band bathymetry LiDAR system

以无人机为载体，将单波段水深测量激光雷达（激光波长一般为 532nm）、GNSS、IMU 等多种设备集成于一体进行水下地形地貌测量的系统。

3.2

惯性测量单元（IMU） inertial measuring unit

由 3 个正交安装的单轴陀螺仪或 2 个正交安装的双轴陀螺、3 个正交安装的加速度计、相关辅助电路及结构体等部分构成，用于测量运动载体的三维角速度和非引力加速度（比

力)的装置。

[来源: GB/T 28587-2012, 3.2]

3.3

水下地形测量 underwater topographic survey

采用水深测量方法对水下地貌以及地物(特指水底几何形态特指信息)直接与已知量或间接量进行比较的过程。

[来源: GB/T 39624-2020, 3.2]

3.4

波形数据 waveform data

激光接收系统按照预设采样率对信号的回波进行离散化采样,所得的回波强度时间序列。

[来源: CH/T 39624-2020, 3.9]

3.5

点云 point cloud

以离散、不规则方式分布在水底三维空间中的点的集合。

[来源: CH/T 8023-2011, 3.3]

3.6

点云密度 density of point cloud

单位面积上点的平均数量,一般用每平方米的点数表示。

[来源: CH/T 8024-2011, 3.7]

3.7

水底点 water bottom point

点云中反应真实水底地貌形态的点。

3.8

水底数字地形模型 underwater digital terrain model

以水底离散点为基础建立规则格网或三角网的数字地形模型。

3.9

数字水深模型 digital bathymetric model

以离散水深点数据建立的规则格网或三角网等空间模型。

[来源: CH/T 39624-2020, 3.11]

3.10

航带宽度 strip width

无人机载单波段水深测量激光雷达作业时垂直于飞行航线的测量宽度。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

LiDAR——激光雷达 (Light Detection And Ranging)

UAV——无人机 (Unmanned Aerial Vehicle)

CGCS2000——2000国家大地坐标系 (China Geodetic Coordinate System 2000)

GNSS——全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System)

CORS——连续运行基准站 (Continuously Operating Reference Station)

POS——定位定向系统 (Position and Orientation System)

5 基本规定

5.1 作业流程

无人机载单波段水深测量激光雷达水下地形测量作业流程如图1所示，主要包括技术准备、数据获取、数据处理、产品制作与整理归档。

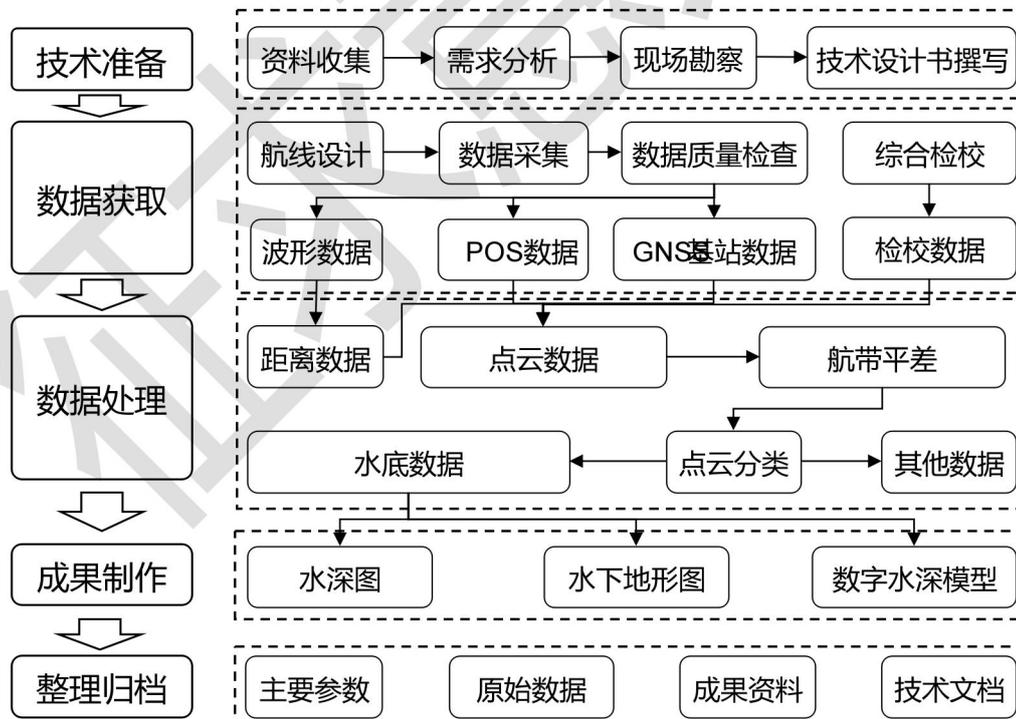


图1 无人机载单波段水深测量激光雷达水下地形测量作业流程

5.2 空间基准

5.2.1 平面坐标系

平面坐标系采用CGCS2000，采用其他坐标系时，应与CGCS2000建立转换关系。

5.2.2 高程基准

高程基准采用1985国家高程基准。采用其他独立的高程基准时，应与1985国家高程基准建立转换关系。

5.2.3 投影方式

应符合现行标准GB/T 13989的规定，采用3°或6°分带高斯-克吕格投影。根据实际工程要求，可自定义更小分带的投影。

5.2.4 时间系统

时间采用北京时间，日期采用公元纪年。

5.3 成果质量

a) 无人机载单波段水深测量激光雷达系统获取点云密度应满足表1要求。

表1 点云密度

比例尺	DEM 格网间距 (m)	点云密度 (点/m ²)
1:500	0.5	≥16.00
1:1000	1.0	≥4.00
1:2000	2.0	≥1.00
1:5000	2.5	≥1.00
1:10000	5.0	≥0.25

b) 点云平面位置允许中误差应满足表2要求。

表2 点云平面位置允许中误差 (m)

比例尺	平面中误差 (m)
1:500	≤0.5+0.025 <i>d</i>
1:1000	≤1.0+0.025 <i>d</i>
1:2000	≤2.0+0.025 <i>d</i>
1:5000	≤2.5+0.025 <i>d</i>
1:10000	≤5.0+0.025 <i>d</i>

注：① *d* 为水深（单位是米）。

② 特殊水下地形测量工程的平面位置精度可依据实际情况而定。

③ 点云平面精度以点云平面位置允许中误差的 2 倍作为限差。

c) 点云高程允许中误差应满足表3要求。

表3 点云高程允许中误差 (m)

比例尺	平面中误差 (m)
1:500	$\leq \sqrt{0.05^2 + (0.005d)^2}$
1:1000	$\leq \sqrt{0.1^2 + (0.005d)^2}$
1:2000	$\leq \sqrt{0.15^2 + (0.005d)^2}$
1:5000	$\leq \sqrt{0.17^2 + (0.005d)^2}$
1:10000	$\leq \sqrt{0.3^2 + (0.005d)^2}$

注：① d 为水深（单位是米）。

② 特殊水下地形测量工程的高程精度可依据实际情况而定。

③ 点云高程精度以点云高程允许中误差的2倍作为限差。

6 技术准备

6.1 资料准备

对现场进行实地踏勘，收集的作业区域资料，应包括下列内容：

- a) 测区水文、气象、通信、交通、人文、底质、水体漫衰减系数等信息；
- b) 已有的控制点、似大地水准面精化、坐标转换参数等成果，连续运行参考站（CORS）等资料；
- c) 根据现场条件评估飞行环境，依据搭载的无人机平台按规定进行报备。
- d) 其他相关资料。

6.2 技术设计书

技术设计应包含下列内容：

- a) 任务来源、作业范围、工作内容、工作量以及要求完成的时间等；
- b) 测区水文条件，根据水文条件、任务情况合理规划飞行航线；
- c) 地形、气候特征、通信、交通等作业区自然地理概况；
- d) 已有资料的数量、形式、技术指标和可利用价值等情况；
- e) 引用的标准或其他技术文件；
- f) 成果的种类及形式、坐标系统、高程基准、比例尺、投影方法、分幅编号、数据基本内容、数据格式、数据精度以及其他指标等；
- g) 作业所需的仪器设备类型、数量和精度指标要求以及数据处理软件的数量及其功能等；

h) 技术方案，主要内容包括：航飞计划、航飞实施、地面基站设计、数据采集、数据处理等各工序的作业方法、技术指标和要求；

i) 作业过程中的质量控制和产品质量检查的主要要求；

j) 数据安全、备份等技术要求；

k) 成果提交和资料归档的内容和要求；

l) 设计附图、附表和其他有关内容；

m) 环境、职业健康安全的有关要求。

6.3 仪器设备要求

6.3.1 单波段水深测量激光雷达性能要求

单波段水深测量激光雷达的性能应满足以下要求：

a) 根据实际作业区域的水深概况、水底反射率、水漫衰减系数以及点云密度和精度要求选择合适的单波段水深测量激光雷达和飞行平台。

b) 单波段水深测量激光雷达应经过激光器发射中心与POS系统的中心偏差距离检校、激光器中心与POS系统的坐标系角度偏差检校以及其他必要的系统检校。

6.3.2 POS系统性能要求

POS系统的性能应满足以下要求：

a) 无人机载GNSS接收机应该采用高动态测量型双频GNSS接收机，具备高性能、高频率的数据接收性能，采样频率不低于1Hz。

b) IMU根据点云精度需求、测量距离等综合确定。IMU精度等级分类见表4。

表4 IMU精度等级

序号	项目	精度等级		
		I	II	III
1	航向角	≤ 0.01	$(0.01, 0.02]$	> 0.02
2	俯仰角	≤ 0.005	$(0.005, 0.01]$	> 0.01
3	侧滚角	≤ 0.005	$(0.005, 0.01]$	> 0.01

c) IMU数据记录频率应不低于100Hz。

6.3.3 无人机性能要求

单波段水深测量激光雷达的载体（无人机）的性能应满足一下要求：

a) 无人机应易于传感器设备的安装，应配备所需电源，能在作业区具备稳定航行能力，在技术要求的不同航速下连续作业。

b) 飞行无人机的作业人员应具有相应职位的资质证书，熟悉本职业务，明确测量任务对无人机的作业要求，配合测量人员完成任务。

c) 无人机驾驶员在飞行前应该依据当地法律法规进行飞行报备以及飞行空域的申请。

d) 无人机需要购买第三方保险。

7 数据采集

7.1 系统检校

无人机载单波段水深测量激光雷达系统绝对精度测定应在动态测量的过程中完成。具体方法为：

a) 在平直的公路上规划AB、CD、EF和GH四条飞行航线，航线的旁向重叠度大于60%；

b) 在规划航线的公路上选择尖顶建筑物，利用不同航线中尖顶建筑物剖面点之间的距离进行仪器安置角的检校；

c) 可以依据测区实际情况，选择其他的飞行模式进行安置角的检校；

d) 检校报告内容符合GB/T39624-2020中7.1.5的要求。

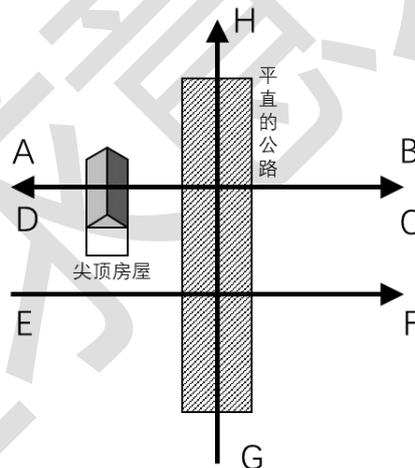


图2 安置角检校飞行航线规划示意图

7.2 航线设计

无人机航线应依据以下内容进行规划：

a) 无人机航线规划应该考虑岛屿、湖泊、水库等实际环境的特点，合理的进行航线的设计；

b) 无人机飞行高度应该考虑到单波段激光雷达的有效测程和水深、点云的密度、GNSS基站的位置等因素进行合理的设计；

c) 无人机飞行航线中必须有一条检校航线，该航线与数据采集航线垂直，且必须穿过数据采集航线。

7.3 数据获取要求

数据获取的要求包括一下几个方面：

a) 无人机飞行应选择最有利的的时间，选择水域无结冰、无雨雪的作业环境，应该符合CH/T 8024-2011中6.2相关规定；

b) 当采用差分GNSS定位技术时应该布设地面基站，无法布设基站时应该采用GNSS精密单点定位技术；

c) 无人机飞行过程中需要实时监控系统的各项工作状态，确保其稳定，根据实际情况及时处理出现的问题；当检测到不符合飞行数据获取要求时，或者系统发生故障，应立即停止作业。

d) 无人机获取数据完成后，应先停稳无人机，关闭激光雷达和POS系统电源，再关闭无人机电源。

e) 飞行结束后，应及时将所有获取到的数据导出备份于安全的存储介质中。

7.4 无人机操作

无人机飞行操作的要求包括一下几个方面：

a) 无人机飞行之前依法依规申请空域，聘请有执照的无人机操作员；

b) 选择合适的起飞点，将单波段水深测量激光雷达系统安装在无人机上，检查卡扣连接稳定；

c) 打开无人机遥控器与无人机地面站；

d) 打开无人机电源开关，等无人机自检完成和GPS信号稳定，利用无人机遥控器将飞行模式切换至地面站模式；

e) 在地面站软件中依据技术设计书的要求合理规划飞行航线，选择合理的飞行高度；

f) 利用地面站控制无人机起飞并发射飞行航线，在飞行航线发射后打开激光雷达开始作业；

g) 在飞行过程中，随时检查无人机状态，遇到紧急情况可随时终止作业；

h) 作业完成后，选择合适的降落点，利用地面站控制无人机下降。

7.5 单波段水深测量激光雷达操作

单波段水深测量激光雷达操作的要求包括一下几个方面：

a) 单波段水深测量激光雷达野外作业之前需要在室内进行仪器的检校；

- b) 将仪器安装在无人机上，检查连接卡扣是否稳定；
- c) 依据测量区域水深、水漫反射系数、作业环境设置仪器合理的参数；
- d) 初始化POS系统并等待POS系统各项参数稳定；
- e) 待无人机起飞依据设定的航线进行飞行后，远程控制单波段水深测量激光雷达的开启；
- f) 在飞行作业过程中随时检查单波段水深测量激光雷达的状态，遇到紧急情况可随时终止作业；
- g) 无人机航线飞行完成后，在空中远程关闭仪器。
- h) 待无人机下降后，拆卸仪器，并下载原始数据。

7.6 数据补测

出现以下情况需要进行数据补测：

- a) 由于激光雷达、POS系统、水域等原因导致无法获取该条航线内有效的点云数据或POS数据；
- b) 由于激光雷达激光重频、能量设置等原因导致得到的该条航线内点云数据无法达到密度或精度要求；
- c) GNSS系统短暂失锁引起航线内局部数据无法满足精度要求；
- d) 因无人机飞行姿态引起航线内点云数据出现局部缺失；
- e) 因水下环境复杂而引起不同航带点云数据拼接时出现局部数据缺失。

8 数据处理

8.1 数据完整性检查

数据获取完成之后，应对激光雷达、POS系统、飞行记录等数据进行整理并检查数据完整性，整理后数据应该包括：

- a) 激光雷达原始数据。
- b) POS数据。
- c) 基站GNSS观测数据。
- d) 测区水体漫反射系数、水体折射率、潮位及其他相关必要数据信息。

8.2 波形数据处理

对波形数据处理以得到高精度的测距数据，具体流程步骤如下：

- a) 依据激光发射时序、水深以及回波强度等统计信息，从波形数据中截取激光发射、水面反射和水底反射的有效信息部分。

b) 采用数字滤波等方法将系统硬件、传播介质以及外部因素导致的波形随机噪声消除，确保波形平滑。

c) 采用高斯分解法、最大期望法、Levenberg-Marquart方法等方法获取波形中水面反射和水底反射的精确位置。

d) 结合激光发射初始位置、水面反射和水底反射的精确位置计算激光传播距离得到测距数据。

8.3 POS数据处理

对IMU数据和GNSS基站数据进行后处理以获取高精度的位置和姿态数据，应包括以下内容：

a) 采用自架设GNSS基站或收集周围全球导航卫星系统连续运行基准站数据、精密星历和精密钟差等相关数据，联合无人机载IMU观测数据，采用单基站或采用多基站数据联合解算，按照后处理精密动态测量模式进行处理，获取作业过程中各时刻POS数据。

b) 剔除质量不佳的编号卫星数据，保证最终差分数据质量。

c) 基于差分GNSS结果与IMU数据进行POS数据联合处理，并顾及系统检校已量测的偏心分量值。

d) 若GNSS采用精密单点定位后处理模块进行处理，按照精密单点定位数据处理流程解算航行作业中各个时刻POS数据。

e) 解算完成后，导出航迹文件成果。

8.4 点云数据解算

依据激光雷达内部光学结构和POS系统的相对位置，利用激光雷达测量的测距数据、POS数据和水体折射率等进行点云数据解算，其内容应包括：

a) 按照CH/T 8023的要求，联合POS数据和激光雷达测量的测距数据，附加系统检校数据，进行点云数据解算，生成三维点云；

b) 可结合水面点云拟合水面波浪形态进行水底点云位置的改正；

c) 点云数据可采用LAS格式、ASCII码格式或其他格式存储；

d) 根据实际需要对点云数据进行分块。每一个数据块为软件处理的一个单元，一般按矩形切块。数据块的大小根据数据处理的软件、硬件性能综合考虑。

8.5 点云数据航带平差

对解算后不同航带的数据进行航带平差，以纠正因系统、环境等因素造成的不同航带间重叠区域内同名地物三维坐标值之间的偏移，其内容应包括：

a) 选择不同航带重叠区内特征明显的点云（如平坦区域）作为特征点；

b) 以检校航线获取的航带数据为基准，利用迭代最近点算法、最小二乘法等方法依次计算其他航带与该航带之间的变换矩阵，并利用变换矩阵纠正航带间的偏移。

8.6 点云分类

8.6.1 噪声点的去除

将明显低于水底的点或点群（低点）和明显高于目标的点或点群（空中点）定义为噪声点。在进行水底数据分类之前，应首先将这类点分离出来。

8.6.2 水底数据分类

利用分类算法、测区地形特征，设置合理的参数，提取水底点云。

8.6.3 精度检查

经过数据处理后的点云数据应符合表1、表2和表3中对应的精度要求。

9 成果制作

9.1 水深图

水深图是依据一定投影标准和比例尺编绘，以等深线表示测区水深变化和地理空间位置的地图产品。水深图的详细编绘要求可按照GB 12319和GB/T 32067中的相关要求。

9.2 水下地形图

水下地形图是依据一定投影标准和比例尺编绘，以等高线表示测区水下地形变化和地理空间位置的地图产品。水下地形图的详细编绘要求可按照GB/T 20257中的相关要求。

9.3 数字水深模型

数字水深模型采用格网或者三角网中交点的水深数据描述测区内水深变化及其空间分布。数字水深模型的制作要求可按照CH/Z 9026中的相关要求。

10 成果质量检查

10.1 成果质量检查与验收

成果质量检查验收应该符合GB/T 24356和GB/T 18316的相关要求，且满足技术设计书的要求。

作业成果应依次通过测绘单位作业部门的过程检查、测绘单位质量管理部门的最终检查和生产委托方的验收。各级检查工作应独立进行，不应省略或代替。

各级在检查、验收中，如发现成果不符合要求时，应退回有关单位或部门处理。

10.2 原始采集成果的检查

原始采集成果的检查应该包括：

- a) 激光雷达综合检校参数的正确性；
- b) 波形数据完整性；
- c) POS数据的完整性；
- d) 点云数据的密度、精度、重叠度。

10.3 水深图检查

水深图质量检查的内容应包括：

- a) 投影和基准转换关系的准确性；
- b) 水深图和水下地形图高程数据的符合性；
- c) 水深图地貌标注与位置的符合性；
- d) GB 12327规定的其他质量检查内容。

10.4 水下地形图检查

水下地形图质量检查的内容应包括：

- a) 水下地形图等高线、特征点与点云数据符合性；
- b) 水下地形图高程数据与点云数据符合性；
- c) 水下地形图与水下数字地形模型的套合精度；
- d) GB/T 17278规定的其他质量检查内容。

10.5 数字水深模型检查

数字水深模型质量检查的内容应包括：

- a) 数字水深模型格网或三角网与点云数据符合性；
- b) 数字水深模型覆盖范围与格网或三角网尺寸的正确性；
- c) CH/Z 9026规定的其他质量检查内容。

11 资料整理与归档

11.1 归档要求

资料整理与归档的一般要求如下：

- a) 上交的各种资料的内容必须真实、准确，装订整齐有序，标示清晰；
- b) 各级检查应形成相应的质量检查报告，与成果资料一并归档；
- c) 上交的纸质文档、图件应与电子成果一致；
- d) 各类数据应提供格式说明，并提交文本格式的数据文件。

11.2 归档内容

资料归档应包括以下内容：

- a) 技术设计书、实施方案、任务合同书以及质量检测报告等相关文件；
- b) 原始波形数据、整体检校参数、原始地面基站观测数据、水体漫反射系数等必要参数；
- c) 外业实施原始观测记录表，包括GNSS基站架设记录表、无人机载单波段水深测量激光雷达水下地形测量记录表等；
- d) 测线资料及无人机航线图；
- e) 水深图、水下地形图和数字水深模型数据；
- f) 技术总结报告；
- g) 其他相关资料。

附录 A

(资料性)

安置角计算记录

基本信息	检校场名称		无人机型号	
	单波段水深测量 激光雷达型号		IMU 型号	
	GNSS 型号			
	备注			
安置角	横滚角	俯仰角	偏航角	
单位 (rad)				

测量人员：

年 月 日

审核人员：

年 月 日

附录 B

(资料性)

偏心分量测量记录

基本信息	检校场名称		无人机型号	
	单波段水深测量 激光雷达型号		IMU 型号	
	GNSS 型号			
	备注			
安置角	横滚角	俯仰角	偏航角	
航向 (mm)				
旁向 (mm)				
垂直向 (mm)				
激光雷达、IMU、GNSS 天线安装示意图:				

测量人员:

年 月 日

审核人员:

年 月 日

