

ICS 93.020

CCS P 11

团 体 标 准

T/JSJTQX 41—2023

河塘清淤回填工程量激光点云测量 技术规程

Technical regulations for laser point cloud measurement of river pond
dredging and backfilling quantities

2023-06-20 发布

2023-07-01 实施

江苏省交通企业协会

发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	2
5 基本要求	2
6 测量实施	3
6.1 测量流程	3
6.2 测量准备	3
6.3 数据采集	4
6.4 数据处理	6
7 清淤回填工程量计算	8
7.1 一般规定	8
7.2 三角网生成	9
7.3 构建土方单元	9
7.4 清淤回填量计算	9
8 误差与精度	10
8.1 测量误差	10
8.2 点云成果精度检查方法	10
8.3 点云数据精度保证	11
8.4 清淤回填量计算精度	11
附 录 A（资料性） 激光雷达扫描仪	13
A.1 激光雷达扫描仪分类	13
A.2 激光雷达扫描仪测距方法	13
A.3 激光三角测距法	14
附 录 B（资料性） 航线间重叠区域平差处理方法	17
B.1 优化基站布设的方法	17
B.2 技术设计的方法	17
附 录 C（资料性） 三角网法土方计算	18
C.1 适用范围	18

T/JSJTQX 41—2023

C.2 基本步骤.....	18
参 考 文 献.....	20

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

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专利的责任。

本文件由江苏省交通企业协会提出并归口。

本文件起草单位：江苏省交通工程建设局、中交路桥建设有限公司、常州交通建设管理有限公司、南京张力信息技术有限公司、江苏华通工程技术有限公司、镇江市综合交通事业发展中心、中国地质大学（北京）、阜新高等专科学校、江苏省交通技师学院、江苏森淼工程质量检测有限公司、中交隧道工程局有限公司、苏交科集团检测认证有限公司、扬州华建交通工程咨询监理有限公司、华设检测科技有限公司、江苏路通项目管理有限公司。

本文件主要起草人：李兴华、宋刚、严峻、盛雅楠、夏鹏飞、顾江鸣、张贻能、薛华、黄建科、陈光林、陈云平、束国强、张明清、吕泰达、李志博、郦辉忠、王盛模、屠金松、姜超、俞科峰、雷松、汤勤、张海生、来历、吕建强、同伟军、段振钿、谢呈岭、欧定福、王鹏泽、李玲、王勇衡、祁敏、王媛婕、郭永涛、李静、郑午、汪军伟、陆云涛、王扣芹、张杰、殷双、高静、荣会兰、朱优、谢国春、曲洪亮、张胡贵、路星、胡腾、姜云、章荣福、曹妍、王芮文。

本文件由江苏省交通技师学院正高级讲师曹妍、研究员级高级工程师王芮文、镇江市综合交通事业发展中心研究员级高级工程师章荣福、苏交科集团研究员级高级工程师姜云、南京张力信息技术有限公司总经理张明清、高级软件工程师吕泰达主审。

河塘清淤回填工程量激光点云测量技术规程

1 范围

本文件规定了河塘清淤回填工程量激光点云测量基本要求、测量实施、清淤回填量计算、误差与精度。

本文件适用于河塘清淤回填工程量激光点云测量工作。

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，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 36100 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法

GB 50026 工程测量标准

CH/Z 3005 低空数字航空摄影规范

CH/Z 3017 地面三维激光扫描作业技术规程

CH/T 6003 车载移动测量数据规范

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

CH/T 9008.2 基础地理信息数字成果1:500、1:1000、1:2000数字高程模型

CH/T 9009.2 基础地理信息数字成果1:5000、1:10000、1:25000、1:50000、1:100000数字高程模型

SJ 21226 电子装备逆向工程三维建模技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

点云 point clouds

同一坐标系下表达目标空间分布和目标表面特性的海量点集合。

[来源：SJ 21226-2016，3.5]

3.2

激光点云 LIDAR point clouds

通过激光测量方式获取三维空间中目标表面特征的海量点集合。

[来源：GB 50026-2020，2.1.13]

3.3

实时动态测量 real-time kinematic, RTK

利用全球定位系统进行的实时动态位置信息测量。

注：RTK又名实时动态差分定位。采用差分GNSS三类（位置差分、伪距差分和相位差分）中的相位差分技术，在野外实时得到厘米级定位精度的测量方法。GNSS-RTK系统基准站由基准站GNSS接收机及卫星接收天线、天线电数据链电台

及发射天线、直流电源等组成。

3.4

边界采样间距 boundary sampling interval

激光点云计算时，在计算范围线上的高程点间距。

注：当高程点间距过大时，根据设置间距，由计算软件自动内插高程点。边界采样间距可以根据所测地形情况进行自定义输入至计算软件。

4 符号和缩略语

4.1 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

GNSS-RTK：全球卫星导航系统实时动态测量（Global Navigation Satellite System—Real time kinematic）

IMU：惯性测量单元（Inertial Measurement Unit）

CCD：电荷耦合器件（Charge Coupled Device）

DTM：高精度数字地面模型（Digital Terrain Model）

DSM：数字表面模型（Digital Surface Model）

DEM：数字高程模型（Digital Elevation Model）

MU：多用户共享（Multi-User）

CORS：连续运行参考站（Continuously Operating Reference Stations）

TIN：三角剖分（Triangulated Irregular Network）

PPK：动态后处理技术（Post Processed Kinematic）

4.2 符号

下列符号适用于本文件。

H：机载式测量时相对航高，m

f_c ：焦距，mm

μ ：扫描仪镜头尺寸，mm

GR：地面分辨率，m/像素

σ ：高程中误差，mm

C_o ：真空中光速，m/s

Δt_i ：激光脉冲往返时间差，s

e：弦高差

[ϵ]：给定的弦高差允差

n_g ：光在大气中传输折射率

ψ ：激光往返相位差，弧度

5 基本要求

5.1 当施工单位河塘清淤回填工程量自检采用激光扫描技术时，监理单位和建设单位应采用相同的技术进行抽检和核查。

5.2 激光扫描系统包括激光雷达扫描仪和配套软件。

5.3 激光雷达扫描仪分为架站式、机载式、移动背包式和车载式，分类及产品特性见附录 A。用于河塘回填工程量检测时，各种型式仪器施测扫描范围和点云精度要求应满足以下要求：

a) 采用架站方案时，扫描范围应超过河塘边界不少于 5m，点云精度应满足 CH/Z 3017 中四等配准精度要求；

b) 采用机载方案时，扫描范围应超过河塘外边界不少于 10m，点云密度不少于 16 点/m²，高程中误差不大于 0.15m，航带间点云数据同名点的平面位置中误差应不大于平均点云间距，平均点云间距的计算方法按 CH/T 8024 和 GB/T 36100 执行；

c) 采用移动背包及车载方案时，扫描范围应超过河塘外边界不少于 3m，激光点云数据平面位置精度不低于 0.05m，高程精度不低于 0.02m。并满足 CH/T 6003 的要求。

5.4 点云数据软件应与仪器采集点云数据格式匹配，具有点云数据管理、面向 DEM 生产的滤波、三维建筑物提取及重建、森林垂直结构参数提取等功能。支持基于插件扩展机制，可拔插操作，可二次开发与源程序互不影响。

5.5 河塘清淤回填工程量测量包括点云数据处理和土方计算2部分。

6 测量实施

6.1 测量流程

测量流程包括测量准备、点云数据采集和点云数据处理。点云数据处理和土方计算程序见图1。

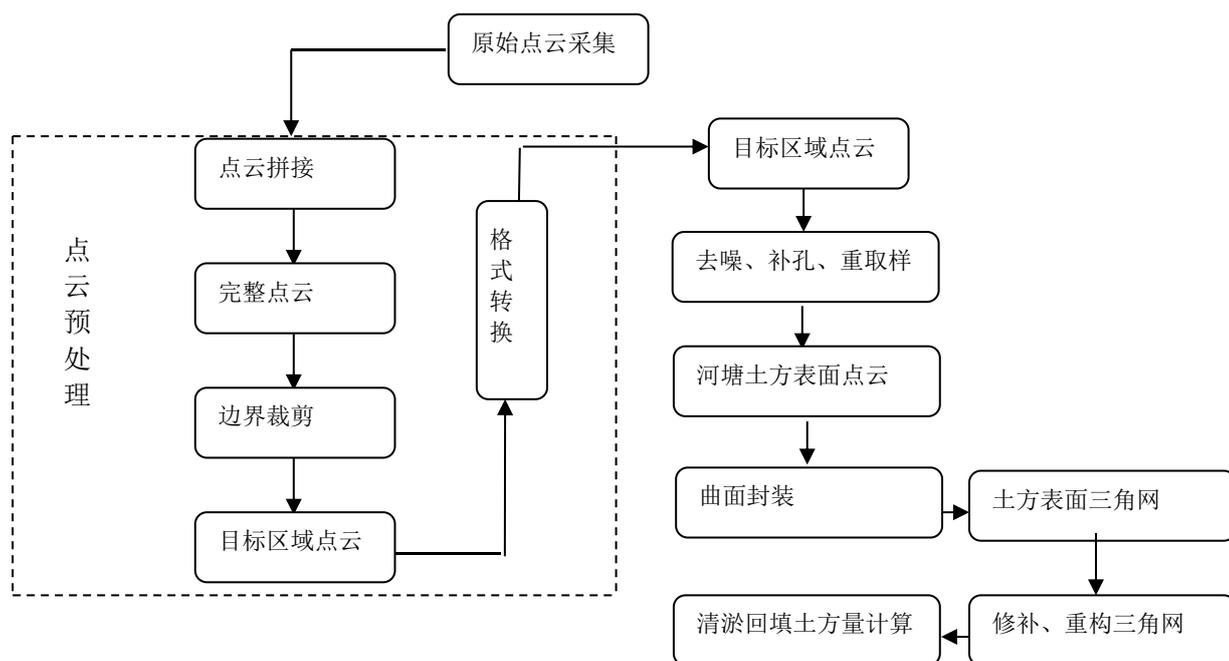


图1 点云数据处理与土方计算程序

6.2 测量准备

6.2.1 应对河塘进行探勘，了解河塘所在地形地貌情况、河塘深度、河塘设计清淤回填量、周围建筑物以及植被覆盖遮挡情况，确定扫描方案。扫描方案宜满足以下要求：

a) 对于面积不大于400m²、通视良好的河塘，优先选用架站方案，也可采用移动背包方案；

b) 对于面积大于400m²、或者通视不良、地貌复杂，或者面积在400m²以内但无法架站或人员到达有困难的河塘，选用机载方案；

c) 合理规划和选择扫描点位置，保证扫描数据质量。站点选择优先考虑开阔视角，增大目标区域有效扫描范围。相互站点间保持一定扫描公共区域以保证后续点云数据处理效率和质量，每站点扫描完

成后，利用GNSS-RTK测量出地面站点三维坐标，以获取扫描仪中心点大地坐标，减小点云拼接误差累积，保证扫描成果精度；

d) 站点的选择考虑仪器有效扫描距离，相邻站点间扫描对象既不发生漏测也不过度重叠，重叠率宜在30%~60%之间，机载式宜选择低限，架站式宜选择高限。

e) 根据河塘所在地形和地貌情况以及所用仪器功能情况，确定是否设置基站、标靶和地面控制点。

6.2.3 应准备相关技术文件、资料。

6.2.4 应配备至少2名经培训合格的测量技术人员。

6.2.5 在仪器使用前1天应进行充电，并配备备用电池。

6.3 数据采集

6.3.1 点云数据采集程序如图2所示。

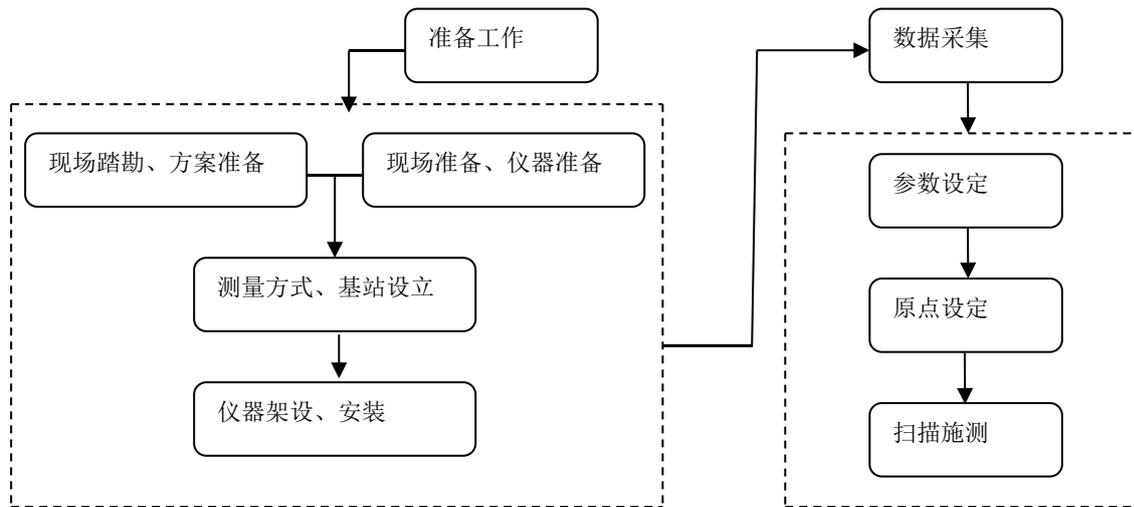


图2 点云数据采集流程

6.3.2 使用架站式激光雷达扫描仪采集点云数据，应满足以下要求：

a) 按照独立设站方式架设激光雷达扫描仪，架站数量根据现场实际情况确定。扫描站设置在地面稳定的安全区域并对三脚架进行加固处理。

注：一般情况下，采用架站式扫描方案时，河塘较小，通视良好，可能只需1次~2次架站，但当多个河塘同时检测，或河塘不通视时，可能需要多次架站。

b) 按照单机操作扫描方式对河塘进行扫描。扫描范围为仪器架设点全景扫描，扫描分辨率设置为基本分辨率（10cm×10cm），对于细部特征要求高的区域可人工调整扫描分辨率。；

c) 将激光雷达扫描仪的入射角控制在 55° 以内，确保扫描点云数据配准精度。同时还应保证测站之间重叠率大于 60%，对于扫描困难区域，要求测站之间重叠率不能小于 30%。当扫描的河塘形状复杂时，应适当增加扫描密度，即在单元面积内增加点云数量；

d) 设置标靶时，如果标靶距离扫描站较远进行标靶识别与精确扫描。当采用标靶进行不同站点点云数据配准时，使用高分辨率扫描标靶，以确保标靶中心坐标提取精度。标靶应设在相邻站点扫描重叠区域内，标靶数量不少于 3 个，避免靶标在一条直线上，标靶间夹角控制在 15° ~165° 。

e) 拍摄扫描区域照片，作为数据拼接合成时的参考依据；

f) 借助扫描仪自带的误差消除功能，保证测站之间测量误差小于 5mm。

6.3.3 使用机载式激光雷达扫描仪采集点云数据，应满足以下要求：

a) 按探勘情况和预设方案进行航线设定，确定航线间距和重叠度、相对航高、航线数量等。航带重叠度宜在 30%左右，不宜过度重叠航带。相对航高H按公式（1）确定。

$$H = f_c \cdot \frac{GR}{\mu} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

H ——机载式测量时相对航高，m；

f_c ——焦距，mm；

μ ——扫描仪镜头尺寸，mm；

GR ——地面分辨率，m/像素。

b) 无人机飞行校正方案应满足 CH/T 8024 的要求。施测之前应对姿态角和航偏角进行改正以提高精度。姿态角改正方法为：在两条对向飞行航线点云上，选择一处“人”字形房顶，方向垂直于飞行方向。通过测量两条“人”字形房顶的点云，获取其夹角 θ ，其改正角度为 $\theta/2$ ；航偏角的改正方法为：检校场范围内同向飞行的两条航线间公共重叠区域内，选择“人”字形房屋，并且其屋脊平行于飞行方向。两条屋脊点云线的夹角为 θ ，其改正角度为 $\theta/2$ ；

注：此方法用于减小侧滚角偏移。

c) 数据采集时，点云数据密度应能满足内插数字高程模型数据要求，设定激光扫描密度为 5 点/ m^2 ~6 点/ m^2 ，且应满足 CH/T 8024 和 GB/T 36100 的要求；

d) 数据采集时选择晴朗和风小天气，确保模型清晰度和精确度；

e) 合理布设地面基准站以有效减少大气误差、电离层延迟误差、对流层延迟误差等。流动站安置在无人机上，将基准站和流动站采样间隔均调设为 1"，待扫描作业正常完成后，下载基站数据、流动站数据及 MU 数据，并进行联合解算，计算每个扫描点外方位元素及其航迹线；

f) 对机搭载系统要求、测量过程中对无人机的要求满足 CH/Z 3005 的相关规定；

g) 在河塘附近选择明显特征点作为像控点，保证像控点能被机载系统捕获，并利用 RTK 测量出像控点坐标；

h) 在航线间公共重叠区域进行数据平差处理，具体处理方法见附录 B。

6.3.4 使用移动背包式激光雷达扫描仪器采集点云数据，应满足以下要求：

a) 在控制点上架设基准站并进行静态观测，基站距离测区不超过 5km。条件不具备时通过增设基站数量的方法进行优化；

b) 基站为多星座系统，使基站和测区整体走向相对垂直，保持几何图形结构。基站采集时间应完全覆盖背包任务采集时间，且架设在已知准确坐标控制点上；

c) GNSS 接收机采样间隔应为 1s；

d) 选择采集区域内对空条件良好位置进行设备静态和动态初始化。将背包放置在平地上，设备主机和控制平板开机，打开平板中远程桌面软件进行传感器及系统激活。检查控制软件参数设置及参数变化情况至完成初始化与系统调试；

e) 移动背包方案数据获取主要包括静态校准、动态校准、获取数据与下载，工作流程为静态校准、动态校准、获取数据、动态校准、静态校准、数据整理下载等。

6.3.5 使用车载式激光雷达扫描仪器采集点云数据，应满足以下要求：

a) 在外业数据采集之前，结合测区的实际情况设计移动测量车的行驶路线、速度以及数据采样的频率等，制定完整的外业实施方案；

b) 将仪器设为外脉冲触发模式，并根据实际的天气情况和湿度调整相机曝光参数，激光雷达扫描仪设置线扫描模式、扫描角度、扫描密度等。惯导系统启动实时状态监测。

c) 如果在已通车路段进行扫描要避开车辆和人流高峰期，以保证测量数据的完整性和准确性；

d) 移动测量车的行驶速度不宜过快，且尽量以固定速度行驶，新建公路行驶速度不大于 30km/h，通车路段行驶速度不超过车辆正常行驶限速；

e) 测量的同时记录下车辆行驶的轨迹，对比设计的行驶路线，检查车辆是否按设计测量路线覆盖

到整个测区。

6.3.6 采集数据宜设置检核点。检核点可采用靶标、靶球、棱镜或扫描区域内特征明显的地物等形式。检核点选用时，应注意以下事项：

a) 检核点选用靶标、靶球形式时，在扫描作业前将靶标、靶球、棱镜布设到目标区域内，先对目标区域进行整体扫描，然后再对靶标、靶球、棱镜进行精细扫描，以确保靶标、靶球、棱镜有足够点云密度，进而通过拟合计算等方法得到靶标、靶球、棱镜精确坐标。

b) 检核点选用特征地物形式时，则需要先对目标区域进行整体扫描，然后通过预览扫描后点云信息，进而选定目标区域内适合作为检核点特征地物（主要用来检查高程精度）。

注：检核点测量主要是利用CORS技术、GNSS-RTK或者全站仪人工采集得到，以得到高精度三维坐标，并用来检核点云最终拼接以及平差成果的外符合精度。

6.4 数据处理

6.4.1 外业采集的原始点云数据应经处理后应用，点云数据处理包括点云数据预处理和点云数据优化建模2个步骤。

6.4.2 点云数据预处理应满足 CH/T 8023 的要求。

6.4.3 点云数据预处理一般包括点云拼接及坐标转换、点云数据分析、噪点分离和植被剔除、点云数据重新采样、点云数据过滤并导出等。

6.4.4 点云数据预处理注意以下几点：

a) 当采集的单幅点云图像无法完全覆盖测量范围时，进行点云拼接及坐标转换；

b) 当对以仪器为原点组成的坐标空间扫描时，宜采用全局方式进行拼接，整个方法基于扫描的站点，通过与该站点同名的相应参考位置数据执行强制拼接，从而使点云坐标数据统一进行转换拼接到该站相应的基准点坐标系；当以大地绝对坐标进行扫描拼接时，应利用 GNSS（或全站仪）测量出各扫描站点的绝对坐标和仪器高，拼接时直接把各站点的扫描数据转换到同一绝对坐标系下。拼接误差应控制在 20mm 以内；

注1：点云拼接有两种方式：一种是选定某一测站扫描数据作为基准，其他测站数据依据重叠区域同名特征点转换到该站统一坐标系下。该方法无需控制，只需要测站间保留一定扫描重叠区域，操作简单方便。但因测站拼接误差传递影响，精度不高且整体精度不均匀。第二种方式是基于扫描站点的绝对坐标完成。利用GNSS（或全站仪）测量出各扫描站点绝对坐标和仪器高，拼接时直接把各站点的扫描数据转换到同一绝对坐标系下。这种方式可以避免多测站是点云拼接误差累计，有效保障了整体点云数据精度。

注2：有文献指出，现场扫描获得的数据是相互独立但又具有同名特征的，为了能够实现扫描数据坐标真实化处理，需要将3组数据进行拼接，任意两组数据置于同一视图空间，任意选择重合的3个位置即可完成彼此间位置的转化，得到完整激光扫描点云模型。

c) 应结合现场信息对点云数据进行分析判断，初步确认需要进行处理的点云数据范围；

d) 将点云数据导入点云处理软件后，先对点云数据进行肉眼观察，框选出河塘处杂草、树根、凸起物、明显高处表面的其它物体等比较明显数据噪点。再利用点云处理软件中弦高差法进行精准定位，不断调整参数进行效果预览，直至到达较为完美的去噪效果。见图3。



图3 去噪方法

注：弦高差法原理。连接要检查的前后两个点，计算P到弦的距离，若点P的 $|e| \geq [\epsilon]$ ，其中 $[\epsilon]$ 为给定允差，则认为P是坏点，应该去除。这种方法适合于点云均衡分布但是分布比较密集情况，特别是在点云曲率明显较大情况。点

云噪声主要来源有扫描仪器系统噪声、因被测河塘表面不平整度、不均匀度以及反射程度差异产生的误差、人为干扰等。点云噪声类型有漂浮点、多余点、孤点、混杂点等4种，见图4。

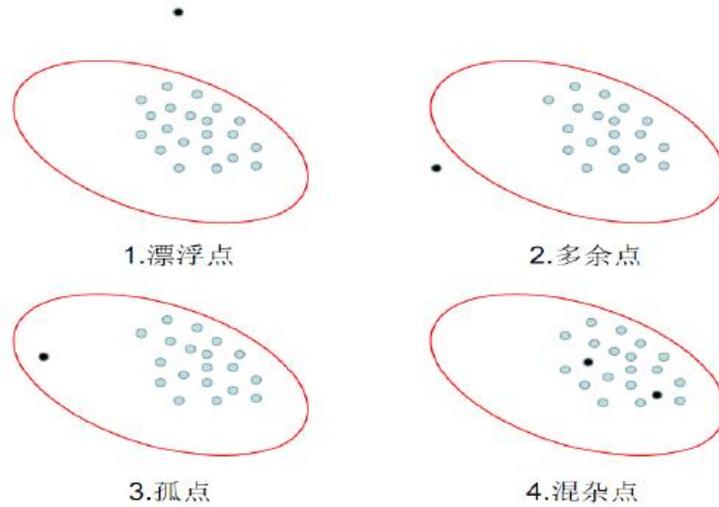


图4 点云噪声类型

e) 对于降噪后缺失点无法通过修补优化时，应进行点云数据重新采样；

f) 当仪器存储的数据点数量过于庞大时，应对去噪后的点云数据进行过滤精简后再导出，以减小后期数据处理难度和工作量。

6.4.5 使用统计滤波算法去除噪音时，首先对原始点云中每个点进行近邻搜索，统计每个点到其邻域所有点的平均距离，认为统计结果符合高斯分布后，通过均值与标准差制定一个标准区间，将平均距离在标准区间外的点判定为离群点并从原始点云中剔除。点云滤波见图5。

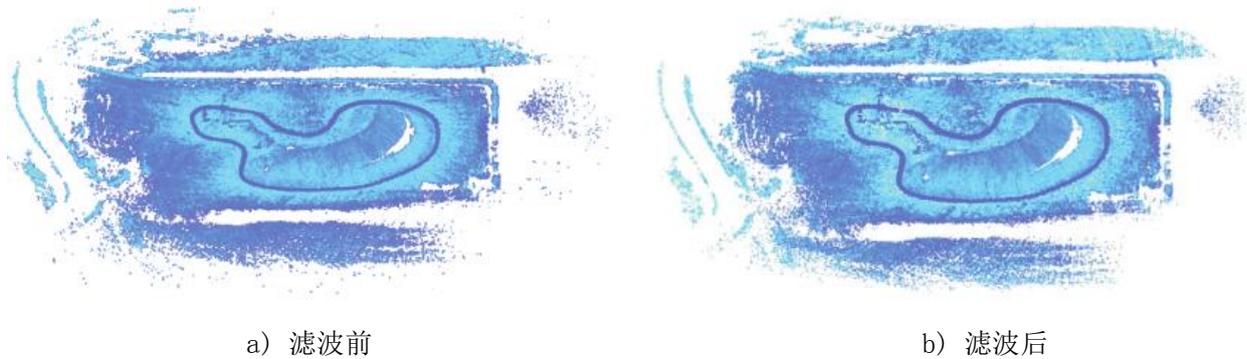


图5 点云滤波

注：统计滤波算法的数学模型为假定点云p中有n个点，任何一点 p_i 的k邻域点集为 $N(p_i)$ ，通过公式(2)计算任一点 p_i 到 $N(p_i)$ 内所有邻域点的平均距离 d_i ；然后计算点云p中所有点局部邻域距离的平均距离 d_0 和标准差 σ ，由公式(3)和公式(4)得到，设置距离阈值 $D=d_0+\lambda \cdot \sigma$ 。当某点 p_i 与其邻域中各点的平均距离 d_i 大于距离阈值D，则该点 p_i 为离群点并去除，反之保留。

$$d_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k |p_j - p_i|, \quad p_j \in N(p_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

d_i ——任一点 p_i 到 $N(p_i)$ 内所有邻域点的平均距离；

p_j ——点云中的任意点；

p_i ——点云中的任意点。

$$d_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N d_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中（需要补充）：

- d_i ——点 p_i 与其邻域中各点的平均距离；
- d_0 ——点云 p 中所有点局部邻域距离的平均距离；
- n ——点云数量。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_0)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中（需要补充）：

- d_i ——点 p_i 与其邻域中各点的平均距离；
- σ ——高程中误差, mm；

注2：统计滤波去噪算法的具体流程为：

- 输入原始点云，并对其建立八叉树空间索引；
- 对点云中每个点 p_i 进行 k 近邻搜索，然后统计点 p_i 到所有邻域点的距离，并计算邻域平均距离 μ 和标准差 σ ；
- 当邻域某一点距离点 p_i 超过 n 倍标准差以上时，将该点视为离群点并移除；
- 将保留的点输出。

统计滤波算法对整个输入进行两次迭代：在第一次迭代期间，它将计算每个点到其最近的 k 个邻近点的平均距离。在计算机中使用setMeanK（）设置 k 的值并计算这些距离的平均值和标准偏差，以便确定距离阈值，距离阈值=平均值+stddev_mult*stddev。setStddevMulThresh（）为设置标准偏差的乘数。在第二次迭代期间，如果点的平均邻近距离分别低于或高于此阈值，则将其分类为非离群或离群。

6.4.6 点云数据优化建模应满足 SJ 21226 的要求。

6.4.7 应通过深化处理对点云数据进行反向构建河塘清淤回填形状。分为点云数据二次去噪和滤波、点云网格化、重构河塘特征线以及生成清淤回填土方表面三角网。

6.4.8 如果由于扫描时受到干扰物遮挡、架设站点角度和高度问题、点云精简等问题，点云数据网格化有缺失，即点云数据转化为三角网时存在空洞，则应考虑到河塘具有一定曲率，应遵循曲率优先原则对缺失的部分进行填补，使三角网接近河塘形状。见图 6。

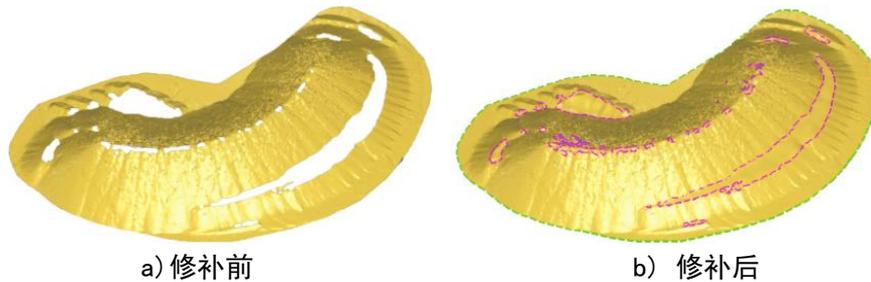


图 6 修补效果

7 清淤回填工程量计算

7.1 一般规定

7.1.1 河塘抽水后，对淤泥顶面进行第 1 次全面扫描，清淤完成后再进行第 2 次扫描。按两次扫描的顶面差值进行清淤工程量计算。

7.1.2 根据河塘深度情况以及监理工程师要求，进行河塘回填第 n 层顶面扫描，按第 n 层顶面扫描数据与清淤后扫描数据差值确定所填土方工程量。

7.1.3 宜按三角网法进行清淤回填工程量计算。

7.2 三角网生成

7.2.1 根据点云数据中点三维坐标建立不规则的三角网，将不规则 TIN 作为数字高程模型。

7.2.2 将三个最近的离散点连接成一个初始三角形。

7.2.3 在三角形每一边基础上连接相邻离散点，形成新的三个三角形，继续下去形成一个三角剖分。见图 7。

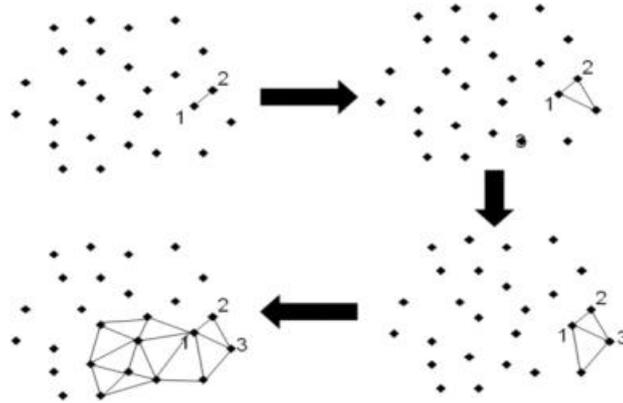


图 7 三角网构建过程

7.3 构建土方单元

7.3.1 按构建的三角网切线方向投影构建土方单元，土方单元为三角棱柱体。见图 8。

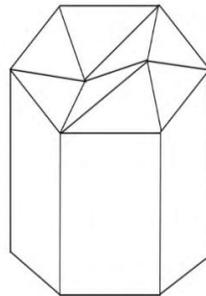


图 8 三棱体集合图

7.3.2 应按所有相邻三角形做投影，投影至切线基准面上，见图 9。

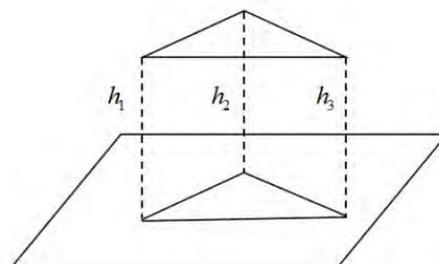


图 9 三角形投射到基准面

7.4 清淤回填量计算

7.4.1 土方量计算常用方法有DTM法、方形网格法、等高线法、剖面法等。宜使用DTM法计算土方量。计算方法宜按附录C执行。

7.4.5 应利用河塘清淤前淤顶测量数据作为基准生成基准面，再将仪器扫描后生成淤底模型作为完成面，经过差值计算后测得清除淤泥体积；将清淤后淤底测量数据作为基准生成基准面，将回填后任意层

次顶面扫描模型作为完成面，经过差值计算后测得回填土方体积。

7.4.6 土方计算宜采用地形图软件进行。土方计算前，应事先采用点云处理软件将数据格式转换成绘图软件能读取的格式。即在点云处理软件中将处理好工程区域内点云数据进行抽稀后输出，并转换成 dat 格式，再导入地形图软件中。在地形图软件中可依据坐标数据文件或高程点计算土方量。

7.4.7 利用封闭复合曲线圈定所测区域，确定土方计算基准面高程，即可计算出土方量。

7.4.8 基于仪器自带配套软件计算土方量时，利用扫描数据构建的 DEM，设置好土方计算基准面，直接计算土方量。

8 误差与精度

8.1 测量误差

8.1.1 激光扫描测量误差可分为系统误差和偶然误差。系统误差应通过系统修正、公式改正等方式减小或消除；偶然误差应通过改进仪器架设方法、消除噪声干扰等方式消除或减小。

8.1.2 系统误差主要来源于仪器误差、目标反射面引起的误差和外界条件影响等，来源及消除方法见表1。

表 1 激光扫描测量误差来源

误差类别	误差来源	误差表象	减小或消除方法
系统误差	仪器本身	测角过程中产生误差	①以激光雷达扫描仪自带的倾斜补偿器消除垂直度盘指标差。 ②调节视准轴。 ③尽可能使仪器第一旋转轴、第二旋转轴和视准轴交于激光雷达扫描仪中心。
		测距误差	①采用数字信号分析方法减小周期性误差。 ②减小仪器加常数（将激光束发射点及接收点共同形成的点称为扫描仪的测距零点，测距零点与仪器中心间的差值，称为加常数）。 ③幅相误差（由于物体表面变化引起的仪器幅相变化）。 ④测距仪精密程度及应对环境鲁棒性影响测距精度，通过使用高精度仪器和增加仪器鲁棒稳定性减小系统误差。
	目标反射面	黑洞现象	采用多方位扫描方法减小目标反射面的漫反射。
		彗尾现象	采用多方位扫描方法减小彗尾现象。
		反射面偏差	地球表面物理特性不同，对脉冲信号反射表现不同特点，最终点云数据会呈现不同类型噪点及空洞问题。此偏差不能消除。
	环境条件	温湿度、气压等	①加强仪器保管和保养工作。 ②大气对激光脉冲传播有微小影响，需数学模型进行纠正。
偶然误差	人员	人员操作	同一人员操作误差，可通过多次测量减小 不同人员操作误差，可通过不同人员之间比对，减小测量误差
	被测区域	被测区域干扰	①在扫描过程中对被测区域进行记录，内业分析时，通过比对现场情况剔除噪声，减少误差； ②通过增加测量次数减小误差。

8.2 点云成果精度检查方法

8.2.1 采用激光点云测量技术进行河塘清淤回填工程量测量时，应进行成果精度检查分析。成果精度检查分为内符合精度检查与外符合精度检查。

注：精度检查中，内符合精度检查主要是检查点云数据拼接质量，主要方法是对拼接后点云进行切片，查看不同测站点云之间是否存在分层以及分层绝对间距，内符合精度以测量标准差和测量误差予以规定。外符合精度检查主要是通

过CORS技术、GNSS-RTK技术或者全站仪现场人工采集测区内的特征地物的特征点数据，然后将人工采集的数据导入点云数据处理软件，检查检核点与点云数据之间的误差大小，作为点云数据的外符合精度。若内、外符合精度超过限差，则需要查明原因，并重新对点云数据进行拼接、平差处理，直至内、外符合精度均满足要求。精度限值可根据使用要求自行限定。

8.2.2 当点云数据成果内符合精度、外符合精度通过质量检查之后，可根据土方精度要求，确定格网大小，提取目标区域点云数据，然后利用软件进行土方计算。

8.2.3 点云切片宜在俯视图下矩形框选点云，然后通过旋转工具，侧视或平视，以查看不同测站点云之间是否存在明显分层，并量取点云分层之间最短距离。当点云拼接效果较好，不存在明显分层，内符合精度良好时，可按式（5）进行高程中误差计算。

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{CORS} - h_{RS})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- σ —— 高程中误差，mm；
- h_{CORS} —— 基于CORS技术得到的特征点高程值，mm；
- h_{RS} —— 基于三维激光点云成果得到的特征点高程值，mm；
- n —— 点云数量。

8.3 点云数据精度保证

8.3.1 点云数据精度应符合 CH/T 9008.2、CH/T 9009.2 的要求。

8.3.2 应在充分分析数据获取过程中各种误差来源基础上，从 GNSS、惯性导航、测距仪设备、飞行质量和数据处理等方面对数据获取过程中误差因素进行分析。

8.3.3 可通过在测区内均匀建立基站进行激光数据采集，采用差分 GNSS 事后处理技术 PPK，即采用基站布设方式提高精度。

8.3.4 使用机载方案时，宜通过以下措施保证点云数据采集精度：

a) 应严格控制每条航线飞行时间，以减小 IMU 设备漂移累计误差。同时在进入测区和离开测区时，飞机要进行“8”字飞行，使飞机进入测区前做好 IMU 初始化工作，飞行姿态、偏航距离、飞行高度、飞行速度严格控制在规范范围内。

b) 应控制好无人机航行高度和最大扫描角度。

注：激光点位置误差也受航高、最大扫描角以及物体到飞机地底点距离影响。航高越高，最大扫描角越大，物体到飞机地底点距离越远，则相同偏移角所造成误差也就越大。因此航高和最大扫描角都需要作一些限制，以保证点位置精度。

8.3.5 采取措施提高坐标转换精度。

注：坐标转换精度分为相对精度和绝对精度。相对精度分析主要参照转换过程中形成的控制点残差报告来进行，针对不同地形等级，相应控制点残差要求。绝对精度分析主要是将转换后点云与外业实测点进行对比，排除点云分类错误、陡坎下和植被下缺少数据点等影响。

8.3.6 合理滤波和分类，避免发生 I 类错误、II 类错误和 III 类错误。

注：在对原始点云滤波和分类提取地面点过程中，因算法不够成熟原因，不可避免存在点云因错误分类导致点云精度下降问题。激光点云分类精度受主观因素影响较大，直接关系到 DEM、DOM (Digital Orthophoto Map, 数字正射影像图)、断面图、地形图等成果精度，因此激光点云分类作为重要基础工序应该给予足够重视，不仅作业人员要精细分类，检核人员也要严格检核，保证为后续处理工作提供精确数据源。在点云分类时，将非地面点化为地面点（称为 I 类错误）、将地面点错分为地物点（称为 II 类错误）、孤立点或低点（称为 III 类错误）以及其他错误（如点云丢失、数据冗余等），这些错误都会在一定程度上影响点云的精度。对于 I 类错误，应重点检查房屋、植被、桥梁等；对于 II 类错误，主要是容易将山区地表错分为非地面点，如植被，山区被分离出去，使点的密度下降甚至出现空白区；对于 III 类错误，主要是一些孤立点、奇异点。对于这些错误，可以利用外业提供的实测控制点和碎部点检查点云分类的绝对精度。

8.4 清淤回填量计算精度

T/JSJTQX 41—2023

8.4.1 为分析不同方法采集的数据清淤回填量精度准确性，应通过软件对多种模型进行DTM法与方格网法的多种边界采样间距土方量算。

8.4.2 应计算并比较最大清淤回填方量误差率以确定合理边界采样间距。

附录 A (资料性) 激光雷达扫描仪

A.1 激光雷达扫描仪分类

A.1.1 按搭载平台不同，激光雷达扫描仪分为机载式、车载式、架站式以及移动背包式。

A.1.2 机载式主要由激光雷达扫描仪、惯性导航系统、GNSS、CCD相机、计算机、处理软件及电源等部件组成。

注：GNSS系统负责扫描仪空间三维坐标，惯导系统负责空中姿态参数，激光雷达扫描仪负责激光源到地面点之间的精准测距，通过以上数据和几何原理计算出地面空间三维坐标。机载激光扫描系统能大范围快速地获取地面物体三维坐标，常用于提取DTM、DSM。

A.1.3 车载激光扫描系统主要包括车载激光雷达扫描仪、惯性测量单元/GNSS定位系统、CCD相机、数码相机、数据采集与记录等多个子系统。

注：车载激光扫描系统能直接获取目标三维点云数据，具有连续扫描、速度快、效率高的特点，但受限于激光雷达扫描仪的扫描角度限制，对低于路面的地形难于获取全部三维空间信息。

A.1.4 架站式激光扫描系统由激光雷达扫描仪、数码相机（内置/外置）和数据处理软件组成。

注：架站式激光扫描系统采用扫描仪坐标，以全景式或摄影式扫描为主，获取的三维点云坐标可直接应用于三维建模。架站式激光雷达扫描仪能采集视场内的、有效测程内的、基于一定采样间距的采样点三维坐标，具有较高的测量精度和极高的数据采集效率。

A.1.5 移动背包扫描系统包括激光雷达扫描仪、光线传感器、全景影像采集系统、惯性导航系统、控制系统、全球GNSS定位系统、电源供应系统以及远程平板控制系统等。

注：移动背包扫描系统可以在短时间内精确测出物体的长度、面积、体积等参数，具有操作灵活、方便自由的特点，适用于溶洞、隧道、河塘等扫描测量。移动背包扫描系统能完成精细的3D扫描任务并广泛用于检测评估、表面重构、三维建模、获取构件几何尺寸等领域。

A.2 激光雷达扫描仪测距方法

A.2.1 激光雷达扫描仪测距方法主要有相位测距法、激光三角法、脉冲测距法、脉冲—相位测距法四种。机载、车载以及移动背包扫描系统采用脉冲测距法，架站式扫描系统采用三角法和相位法测距。

A.2.2 脉冲测距法是通过激光二极管在脉冲发射器的触发下，周期性地对外发射激光脉冲，然后由探测器接收激光反射信号，并通过精密时钟获取发射和接收信号间的时间差，按式（A.1）计算距离D。

$$D = \frac{1}{2} \frac{C_0}{n_g} \Delta_t \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

D ——距离，mm；

C₀ ——真空中光速，m/s；

n_g ——光在大气中传输折射率；

Δ_t ——激光脉冲往返时间差，s。

注：脉冲测距利用被测物体对脉冲激光的漫反射获得反射信号，由于激光发射角小，激光脉冲持续时间极短且瞬时功率大，因此脉冲测距范围能达到较远的距离。

A.2.3 相位测距是通过测量相位变化间接计算激光从发射到接收之间的时间差，根据式（A.2）求出其测量距离。

$$D = \frac{C_0 \phi}{4\pi n_g f} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

D ——距离，mm；

ϕ ——相位差；

n_g ——光在大气中传输折射率；

f ——焦距，mm。

注：相位测距扫描范围在100m以内。其原理见图A.1。通过调制解调器调制后的载波光源随着调制信号变化，经过反射镜反射回接收器，将接收信号与参与信号进行相位对比，从而得到调制信号在往返过程中相位差距离。相位测距法的特点在于精度高，其精度可达到毫米级。

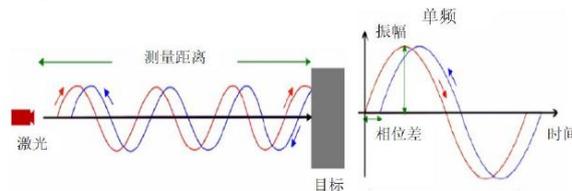


图 A.1 相位法测距

A.3 激光三角测距法

A.3.1 激光三角法是在已知激光光源与CCD之间基线长度基础上，通过CCD相机接收物体反射信号，得到入射光与反射光之间夹角，再通过三角几何关系计算扫描仪与物体间距离。

注1：激光三角测距法主要是通过一束激光以一定的入射角度照射被测目标，激光在目标表面发生反射和散射，在另一角度利用透镜对反射激光汇聚成像，光斑成像在CCD位置传感器上。当被测物体沿激光方向发生移动时，位置传感器上的光斑将产生移动，其位移大小对应被测物体移动距离，因此可通过算法设计，由光斑位移距离计算出被测物体与基线距离值。由于入射光和反射光构成一个三角形，对光斑位移计算运用了几何三角定理，故该测量法被称为激光三角测距法。

注2：由于基线长度较短，决定了激光三角法仅适用于近距离测量逆向工程和工业测量，扫描范围在10m~20m之间，精度为亚毫米级。

A.3.2 按入射光束与被测物体表面法线的角度关系，激光三角测距法可分为斜射式和直射式两种。

A.3.3 当激光光束垂直入射被测物体表面，即入射光线与被测物体表面法线共线时，为直射式激光三角法。见图A.2。

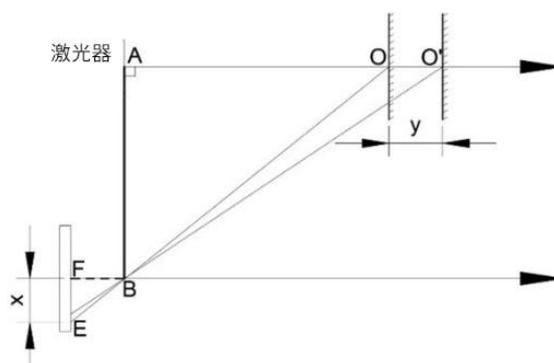


图 A.2 直射式激光三角法测距

A.3.4 当光路系统中激光入射光束与被测物体表面法线夹角小于 90° 时，该入射方式即为斜射式。见图A.3。

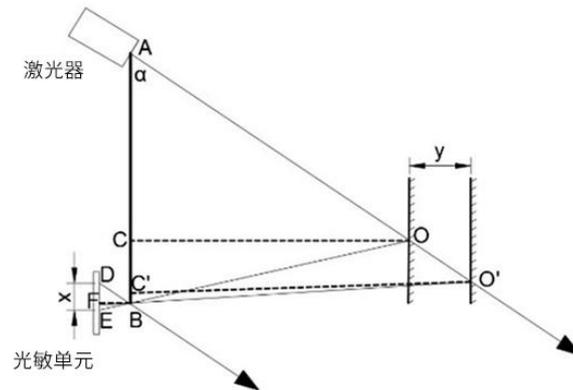


图 A.3 激光三角法斜射式光路图

A.3.5 由图 A.3 可知入射光 AO 与基线 AB 的夹角为 α ，AB 为激光器中心与 CCD 中心距离，BF 为透镜焦距 f_c ，D 为被测物体距离基线无穷远处时反射光线在光敏单元上成像极限位置。DE 为光斑在光敏单元上偏离极限位置位移，记为 x 。当系统光路确定后， α 、AB 与 f_c 均为已知参数。由光路图中几何关系可知 $\triangle ABO \sim \triangle DEB$ ，则边长关系如公式 (A.3)、(A.4) 和 (A.5)。

$$\frac{AB}{DE} = \frac{OC}{BF} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

AB——激光器中心与 CCD 中心距离；

BF——透镜焦距；

DE——光斑在光敏单元上偏离极限位置位移。

$$AO = \frac{OC}{\sin \alpha} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

AO——发射器至目标点的距离，mm；

OC——发生器中心垂直投影至目标点的距离，mm；

α ——角度。

$$AO = \frac{AB \cdot f}{x \cdot \sin \alpha} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

AO——发射器至目标点的距离，mm；

AB——激光器中心与 CCD 中心距离；

f——焦距，mm；

α ——角度。

A.3.6 在确定系统光路时，可将 CCD 位置传感器一个轴与基线 AB 平行（假设为 y 轴），则由通过算法得到的激光光点像素坐标为 (p_x, p_y) 可得到 x 的值，见式 (A.6)。

$$x = CellSize \cdot p_x + DeviationValue \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

T/JSJTQX 41—2023

式中:

- x ——光敏单元内部高差;
- px ——光敏单元长度;
- CellSize ——光敏单元上单个像素尺寸;
- DeviationValue ——通过像素点计算投影距离和实际投影距离 的偏差量;

A.3.7 当被测物体与基线 AB 产生相对位移时, x 改变为 x' , 由以上条件可得被测物体运动距离 y 见式 (A.7)。

$$y = \frac{AB \cdot f \cdot (x/x')}{x \cdot x'} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

- y——被测物体运动距离
- AB——激光器中心与 CCD 中心距离;
- x, x' ——光敏单元内部高差;
- f——焦距。

A.3.8 无论是直射式还是斜射式激光三角测距法, 均可实现对被测物体高精度、非接触测量, 但直射式分辨率没有斜射式高。

附 录 B
(资料性)
航线间重叠区域平差处理方法

B.1 优化基站布设的方法

- B.1.1 基站布设应合理，设置多个基站时，应均匀布设。
- B.1.2 作为基站点控制点平面和高程精度优于四等 GNSS 和四等水准。
- B.1.3 作为基站点控制点应选择在宽阔的区域，在视角 15° 范围内没有任何障碍物, 观测时不受到任何车辆或行人的影响。
- B.1.4 基站架设时，仪器高的量测精度要优于 $\pm 3\text{mm}$ ，对中误差不应超过 $\pm 5\text{mm}$ 。

B.2 技术设计的方法

- B.2.1 为提高点云获取精度，在进行技术设计时，尽量通过增大发射频率，减小飞行高度的方式提高高程精度。
- B.2.2 依据发射频率合理设置扫描频率，确保航向与旁向点间距为 1: 1，从而保证点密度最大。
- B.2.3 尽量减小扫描角，提高高程精度。
- B.2.4 为获取高点密度可降低飞机飞行速度。

附 录 C
(资料性)
三角网法土方计算

C.1 适用范围

C.1.1 土方计算是基于三角网法完成，三角网法是将测区的点建立三角网，取出每一个网上三角形向底面投影即可以创造一个三棱柱。底面积与三条棱高平均值的积即为三棱柱体积，累加所有三棱柱就是整个目标体积。

C.1.2 本方法既适用于传统全站仪或 RTK 数据，也适用于点云数据格式。

C.2 基本步骤

C.2.1 在软件中输入点坐标，为 n 行 3 列矩阵。如果要计算是点云数据，应先进行筛选。点云数据一般有 7 列数据，前 3 列表示三维坐标，4~6 列是表示颜色的 RGB 数据，第 7 列表示反射强度。只取前 3 列数据。

C.2.2 用 delaunay 函数把二维坐标变成一个三角网。

C.2.3 把表示三角网每个三角形顶点的信息存成另一个矩阵。

C.2.4 求一个三角形面积。从顶点信息矩阵中取第 1 行的 3 个数，按这 3 个数字指示从坐标矩阵里找出能表示一个三角形的 3 个顶点坐标数据。利用坐标数据运用公式计算一个三角形面积。

C.2.5 计算第 1 个三棱柱体积。求底面三角形与高平均值的积。

C.2.6 计算每一个三棱柱的体积。接连不断地从两个矩阵里取数据组成三角形，计算每一个三角形面积，加上纵坐标信息计算每一个三棱柱体积。直到顶点数据矩阵取完为止，就得到所有三棱柱体积。

C.2.7 求所有三棱柱体积的和即河塘清淤及回填体积。土方量计算程序流程如图 C.1 所示。

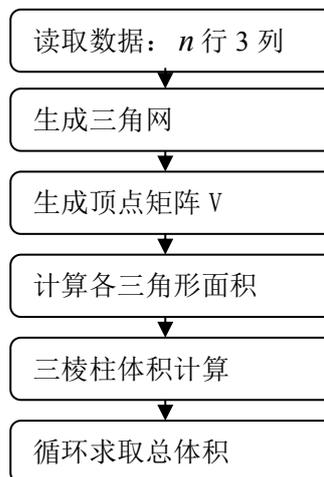


图 C.1 土方量计算程序

C.3 清淤回填量自编程序

宜满足以下要求：

- a) 采用 DTM 法与方格网法时，边界采样间距以 2.5m、5m、10m 和 20m 进行土方量算。见图 C.2；

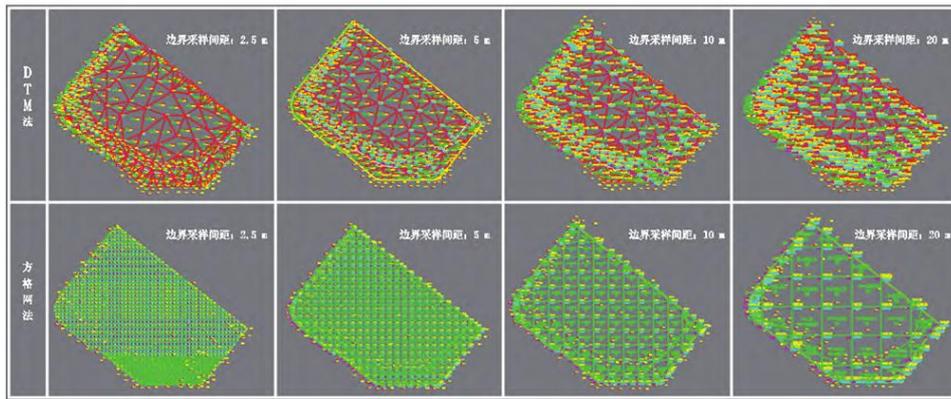


图 C.2 人工测绘土方内业数据处理图

注：DTM法是根据实地测定的地面点坐标和设计高程，通过生成三角网来计算每个三棱柱的填挖方量，最后累积得到指定土方量。其土方计算方法可按附录C的方法进行；方格网法多用于大面积土石方估算，适用于地形起伏较小、坡度变化平缓场地，当地面起伏较大、坡度变化较多时，也可采用等高线法估算土石方，在地形图精度较高时更为合适；在地形变化较大、场地狭窄的带状地区，可以用断面法计算土石方量。

b) 三角形三个顶点的二维平面坐标分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) ，则投影到切线平面上的面积 S 为式 (B. 1)；

$$S = \frac{1}{2} [(x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_2 - y_3)] \quad \dots\dots\dots (B. 1)$$

式中：

S ——投影到切线平面上的面积；
 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) ，——三角形三个顶点的二维平面坐标。

c) 三角形在基准面某一侧时，其体积近似等于水平投影面积与三角形三个顶点到基准面距离平均值的乘积， h_1, h_2, h_3 为三角形三个顶点到基准面的距离，土方量为式 (B. 2)；

$$V = \frac{1}{3} S(h_1 + h_2 + h_3) \quad \dots\dots\dots (B. 2)$$

式中：

V ——三角网法土方计算时三角形体积；
 h_1, h_2 ——基准面上侧顶点；
 h_3 ——为基准面下侧顶点
 S ——投影到切线平面上的面积。

d) 三角形在基准面法线方向上下重叠时，模型到基准面体积为上三角形体积减去下三角形体积，设 h_1, h_2 为基准面上侧顶点， h_3 为基准面下侧顶点，体积为式 (B. 3)。三角形垂直于基准面，体积为零；

$$V = \frac{1}{3} S(h_1 + h_2 - h_3) \quad \dots\dots\dots (B. 3)$$

式中：

V ——三角网法土方计算时三角形体积；
 h_1, h_2 ——基准面上侧顶点；
 h_3 ——为基准面下侧顶点
 S ——投影到切线平面上的面积。

e) 鉴于 TIN 法在表征地形特征方面能力比较强，在计算土方时直接利用实测数据作为网络结点，不改变原始数据和精度，还能够插入地形线以保存原有关键地形特征，计算得到土方数据精度较高。

参 考 文 献

- [1] 王臣. 土方工程中测量技术应用[J]. 工程技术与应用, 2017 (8) : 63+70.
 - [2] 戴海波. 网络 RTK 技术在土方测量中的应用[J]. 资源信息与工程, 2017, 32 (2) : 103-104.
 - [3] 向东, 汪志明, 赵建虎. RTK 和 TPS 在矿料堆体积测量中的对比分析[J]. 城市勘察, 2002 (4): 61-62.
 - [4] 刘强, 崔希民, 刘文龙, 等. 三维激光雷达扫描仪在煤矸石山复垦中的应用[J]. 测绘工程, 2015 (10) : 67-70.
 - [5] 欧斌, 黄承亮. 三维激光扫描技术在土方测量中的应用研究[J]. 城市勘察, 2012 (2) : 123-125.
 - [6] 苏春艳, 隋立春. 基于三维激光扫描技术的土方量快速测量[J]. 测绘技术装备, 2014, 16 (2) : 49-52.
 - [7] 胡奎. 三维激光扫描在土方计算中的应用 [J]. 矿山测量, 2013 (1) : 70-72.
 - [8] 张荣华, 李俊峰, 林昀. 三维激光扫描技术在土方量算中的应用研究[J]. 测绘地理信息, 2014, 39 (6) : 47-49.
 - [9] 刘博涛. 三维激光扫描技术在地面沉降监测中的应用研究[D]. 长安大学, 2014.
 - [10] 吴静, 靳奉祥, 王健. 基于三维激光扫描数据的建筑物三维建模[J]. 测绘工程, 2007, 16 (5) : 57-60.
-