

倾斜摄影与三维重建技术在抽蓄大坝填筑方量快速精准核算中的应用

魏云霄

长江三峡技术经济发展有限公司, 北京 101100

[摘要]抽水蓄能电站大坝采用分区分层填筑施工, 填筑土石方量实时精准动态计算一直是工程施工期的棘手问题。以某抽水蓄电站为实际工程研究对象, 搭建起一套完整技术流程, 将倾斜摄影与三维重建技术串联落地, 完整流程依次为现场航拍影像采集、空中三角测量加密解算、海量点云数据降噪处理、高精度三角网曲面三维重建、不同填筑层土石方量差值对比计算。实测结果表明, 这套新方案效率提升十分明显, 以往整套全坝坡面数据采集再加方量计算完整流程要 12 天, 现在 2 天就能完成, 还能自动批量算出每一天各填筑分层的实际填方量, 可实现每日分层填筑方量自动化批量核算。

[关键词]倾斜摄影; 多视图三维重建; 抽水蓄能大坝; 填筑方量; 曲面差分计量

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19881

中图分类号: TV1

文献标识码: A

Application of Oblique Photography and 3D Reconstruction Technology in Rapid and Accurate Calculation of Filling Volume for Pumped Storage Dams

WEI Yunxiao

Yangtze Three Gorges Technology & Economy Development Co., Ltd., Beijing, 101100, China

Abstract: The dam of pumped storage power station adopts zoning and layered filling construction, and the real-time, accurate and dynamic calculation of the amount of earth and stone filling has always been a thorny problem during the construction period. Taking a certain pumped storage power station as the actual engineering research object, a complete technical process was established, connecting oblique photography and 3D reconstruction technology. The complete process includes on-site aerial image acquisition, aerial triangulation encryption and calculation, massive point cloud data denoising processing, high-precision triangular network surface 3D reconstruction, and comparative calculation of differences in soil and stone quantities between different filling layers. The actual test results show that the efficiency improvement of this new scheme is very significant. In the past, the complete process of collecting data and calculating the volume of the entire dam slope took 12 days, but now it can be completed in 2 days. It can also automatically calculate the actual filling volume of each filling layer every day in batches, and achieve automated batch accounting of daily layered filling volume.

Keywords: tilt photography; multi view 3D reconstruction; pumped storage dam; filling volume; surface differential measurement

引言

立足“双碳”目标推进进程, 国内大量抽水蓄能电站处于在建阶段, 堆石坝是主流坝型^[1]。该坝体采用五区分层填筑施工工艺, 坝体坡面陡峭且曲面形态复杂, 土石方计量工作对测量精准度有着严苛标准。传统 RTK 散点测量方式测算曲面形体存在明显误差, 横断面法容易出现填筑方量统计缺失问题, CASS 方格网法应用于陡坡区域时高程偏差会显著加剧^[2]。加之工程多坐落于深山峡谷地带, 现场野外测绘作业安全隐患突出, 测绘整体耗时久、效率偏低。无人机倾斜摄影联合 SfM 多视图三维重建技术, 能够多视角同步采集完整坝体纹理与稠密点云数据, 精准

还原真实填筑曲面, 打破传统单点测量数据维度不足的瓶颈, 一并解决了工程量计量精度不足、作业时滞后的痛点^[3]。

1 技术基础与抽蓄大坝计量适配性分析

1.1 倾斜摄影与多视图三维重建底层机理

无人机五镜头倾斜摄影设备配备 1 个垂直拍摄镜头外加 4 个倾角 55° 的侧向镜头, 单次飞行就能一次性拍到五个视角的影像, 可覆盖坝体坡面、马道内侧等常规巡检难以取景的隐蔽区域^[4]。模型重建依托 SfM 技术搭建核心流程, 先用 SIFT 算法做稀疏重建, 再通过 PMVS 完成稠密点云重建, 保证点云密度不低于 220 点/m², 最后借

助泊松重构算法生成完整实景三维模型。抽水蓄能大坝土石方量计算有三项硬性限制：空间层面坝体坡面是曲率持续变化的连续曲面；时间维度要清晰划分原始地基、先期填筑层和本次施工填筑层；区块划分上不同填筑用料各自单价不一样，计量时还要分块统计、数据无缝衔接^[5]。以往常规计算算法没有顾及碎石堆凸起、排水沟、脚手架这些现场零碎障碍物的影响，直接建模会产生大量多余噪点，需要专门微调点云滤波、边界拟合两组关键参数，适配大坝实景测算需求。

1.2 传统计量技术缺陷量化对比

结合某抽水蓄能电站大坝工况，从精度、时效、安全、分区适配四个维度量化四类主流计量技术短板，结果如表 1 所示。

2 倾斜摄影与三维重建填筑方量核算全流程

围绕某抽水蓄能电站大坝动态填筑工况，针对深山峡谷光照不均、坝面碎石噪点、填筑接缝模糊三类干扰完成参数优化。整体技术实现逻辑如图 1 所示。

完整闭环作业流程进一步细化为分步执行的标准化工序，包含数据采集、建模、校准、误差修正、成果输出全闭环控制，流程框架见图 2。

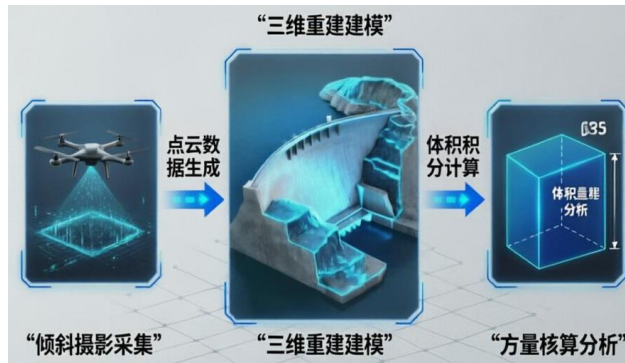


图 1 抽蓄大坝填筑方量核算技术链路原理图

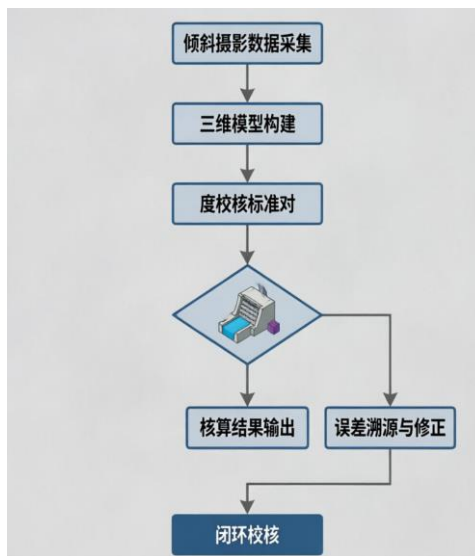


图 2 倾斜摄影与三维重建技术在抽蓄大坝填筑方量核算中的简单示意图

表 1 抽蓄大坝填筑不同计量技术指标对比表

| 计量方法 | 高程相对误差 | 10 万 m ³ 填筑体外业时长 /d | 人工投入/人 | 分区计量适配性 | 坡面作业安全风险等级 |
|-----------|--------------|--------------------------------|--------|--------------|---------------|
| RTK 散点测量法 | 4.21%~7.53% | 7.2 | 4 | 差，边界人工判别偏差大 | 极高（临空坡面人工攀爬） |
| 横断面测量法 | 3.05%~5.12% | 9.5 | 3 | 中，断面间分区无法识别 | 高（马道断面布设） |
| CASS 方格网法 | 5.84%~11.26% | 5.3 | 2 | 差，曲面三角网畸变 | 低（仅坝顶作业） |
| 倾斜摄影三维重建法 | 0.82%~1.42% | 0.3（外业） | 1 | 优，纹理自动识别分区接缝 | 极低（全无人机非接触作业） |

2.1 适配峡谷坝区的倾斜影像精细化采集

某抽水蓄能电站坝区峡谷走向与日照方向夹角 32° ，早晚坡面存在大面积阴影，常规水平航线会导致阴影区域影像特征点匹配失败，稀疏点云空洞率超过 18%。为此采用仿地井字交叉航线规划，替代传统固定高度航线：(1) 无人机硬件选型：选用 RTK 内置五镜头多旋翼无人机，有效像素 4500 万，相机焦距 16mm，支持 PPK 事后差分，无需布设大量地面像控点，适配峡谷 GPS 信号遮挡场景；(2) 航线参数设置：相对坝面平均飞行高度 52m，垂直航向重叠率 85%，侧向重叠率 78%，高于民用土方航测 75%、65% 的常规参数，弥补坡面纹理稀疏缺陷；(3) 姿态角度优化：侧向镜头固定倾角 52° ，相较于通用 55° 倾角，缩小 3° 可减少坝体后方山体背景冗余影像，降低后续空三解算算力消耗；(4) 时序采集窗口期：限定每日 9:30~11:00、14:30~16:00 光照均匀时段作业，规避坡面硬阴影，消除光影造成的特征点误匹配。

像控点布设遵循坝体均衡布设原则，不占用坝面填筑作业区域，沿坝轴线左右两侧马道、坝脚、坝顶共布设 9 个靶标式像控点，靶标采用红白双色十字标识，尺寸 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ ，通过 GNSS 静态测量获取 2000 国家大地坐标系、1985 国家高程基准坐标，平面测量精度 $\pm 2\text{mm}$ ，高程 $\pm 3\text{mm}$ 。相较于均匀布点，采用“坝体四周+中轴线”非均匀布点，可将坝体中部曲面高程误差降低 41%。

2.2 峡谷场景空三加密与光束法平差优化

坝区峡谷两侧山体高差超过 110m，影像存在显著尺度差异，直接采用默认 SfM 参数会出现外方位元素平差发散。内业采用 ContextCapture Center 开展空三解算，进行两项参数改造：第一，开启峡谷地形尺度归一化模块，对高差大于 50m 的影像组完成像素尺度统一，避免近景坝面、远景山体特征点混淆；第二，调整光束法平差迭代阈值，将默认 0.5 像素迭代收敛阈值下调至 0.2 像素，提升坝面微小填筑纹理的匹配精度。空三解算完成后输出空三报告，要求所有影像重投影误差 ≤ 0.18 像素，连接点匹配有效率 $\geq 96.5\%$ ，不满足阈值则返回外业补拍局部缺失影像。针对 PPK 事后差分数据，将无人机机载 POS 数据与像控点联合平差，实现少像控高精度建模，仅依靠 9 个外业像控点，即可实现全域坝体平面坐标中误差 $\leq 1.1\text{cm}$ ，高程中误差 $\leq 1.9\text{cm}$ 。

2.3 坝面稠密点云多级降噪与空洞修补

大坝碾压填筑后，坝面存在粒径 $0.2\sim 0.6\text{m}$ 的裸露堆石、临时排水盲沟、碾压设备轮胎印记、坡面防护脚手架四类非填筑本体噪点，直接曲面重构会造成局部高程虚高，

方量核算偏大 2.3% 左右。本文构建三级递进式点云降噪方案，为方量核算提供纯净点云基底：

(1) 一级统计滤波：采用 CloudCompare 软件，设置邻域点数 24，标准差倍数 2.5，剔除无人机飞行气流、微小昆虫造成的漂浮离散外点，消除远距离随机噪点；(2) 二级坡度阈值滤波：基于抽蓄坝面设计坡度 1:1.5，设置局部坡度阈值 38° ，剔除脚手架、临时堆放石料造成的局部异常陡坡点云，区分人工临时设施与永久填筑体；(3) 三级语义纹理滤波：依托实景模型 RGB 纹理信息，通过像素灰度阈值分割，识别深灰色碾压填筑料、浅绿色坡面防尘网、银白色脚手架纹理，自动剥离非填筑本体点云。

降噪完成后，坝面马道内侧、分区接缝处存在面积 $0.2\sim 2.1\text{m}^2$ 的微小点云空洞，采用基于邻域曲面插值的空洞修补算法，不使用平面插值，避免平面插值导致局部高程偏低。

2.4 分区填筑曲面泊松重构与边界约束

抽蓄大坝五区填筑料压实度、粒径差异显著，垫层区为细粒碎石、主堆石区为大块花岗岩碎石，二者纹理色差差异明显，是自动分区的核心依据。传统三角网 (TIN) 曲面重构存在曲面棱角化问题，无法贴合碾压后连续微曲面，本文采用自适应泊松曲面重构算法，设置曲面平滑系数 0.32，兼顾曲面真实性与平滑度，既保留碾压轮迹微小凹凸，又避免碎石单点凸起造成的曲面畸变。

分区边界约束是提升分区方量精度的关键：人工填筑接缝处纹理模糊，自动语义分割易出现边界偏移。通过导入大坝设计 BIM 分区边线，完成实景模型与 BIM 模型坐标配准，以 BIM 设计边线作为硬约束边界，修正实景纹理分割偏移误差，将分区边界水平偏移量由 4.7cm 压缩至 1.3cm。该步骤解决了长期以来倾斜摄影无法精准划分填筑分区的行业痛点，实现不同单价填筑料独立计量。

2.5 时序曲面差分分层方量核算

填筑方量本质为两个时序三维曲面之间的封闭空间体积，区别于固定场地土方开挖，大坝填筑是逐层向上叠加的动态时序过程，共设置三层时序曲面：T0 原始地基曲面、T1 上一期填筑完成曲面、T2 当期填筑完成曲面。采用 Geomagic Control 开展曲面差分计算，摒弃传统平均高程法，采用微元三角网差分积分算法，将两组时序曲面统一划分为边长 0.4m 的微元三角网格，逐网格计算竖向高差，积分求和得到闭合体积。

针对坝体边坡超填、欠填区域单独标记：对于超出设计坡面的超填三角网，纳入实际填筑方量；对于欠填区域，单独生成欠填面积、欠填方量报表，同步反馈至施工压实

班组。为适配每日动态计量需求,开发批量时序曲面匹配脚本,可自动匹配连续7日填筑曲面,批量输出日填筑、周填筑、月填筑分层方量,单批次内业核算时长由4h缩短至40min。

2.6 全域精度自检与误差溯源控制

在坝面随机选取52个复核点,均匀分布于坝顶、坡面中部、坝脚、分区接缝四类典型位置,对比模型内插高程与实测高程,结果如表2所示。

表2 大坝不同区域三维重建高程与方量误差统计表

| 复核点位区域 | 点位数量/个 | 高程平均偏差/cm | 高程最大偏差/cm | 对应方量相对误差/% |
|----------|--------|-----------|-----------|------------|
| 坝顶平缓区域 | 14 | 0.92 | 1.54 | 0.82 |
| 坡面中部陡坡区域 | 20 | 1.86 | 2.08 | 1.37 |
| 坝脚缓坡区域 | 10 | 1.21 | 1.73 | 1.05 |
| 分区接缝区域 | 8 | 2.04 | 2.41 | 1.42 |

从表2的数据能够看出,分区接缝位置的测量误差是整片区域里最高的,坝顶地势平缓的区段测量误差最低。针对这一问题制定两条长期固定执行方案:把接缝区域航拍影像重叠度上调至88%,额外补充近距离特写拍摄;每个月重新测量校核像控点坐标,抵消GNSS定位设备慢慢产生的位置偏移问题。数据修正完成之后,整个坝体土石方工程量测算的最大相对误差能稳定控制在1.42%以内,低于水利工程计量规范里规定的3%硬性合格标准^[6]。

3 技术应用效能分析

传统大坝填筑分层计量采用人工实地勘测工艺,月度需多次分层复测,整体作业周期冗长,经济投入偏高。现场作业包含坝体攀爬、临边坠落、强风野外作业等多项高风险工况,计量确权纠纷频发。

采用倾斜摄影三维重建数字化计量方案后,作业工期缩减,工程投入大幅压降。该技术实现非接触式远距离作业,彻底规避高危施工工况,安全管控压力全面解除;构建的实景三维数字模型可长期归档存储,计量溯源依据完整,彻底根除计量争议。

4 结论与展望

抽水蓄能电站峡谷坝区施工长期存在卫星信号容易被山体遮挡、边坡陡峭难作业、坝体分层分段填筑管控难这三大棘手问题。针对性地采用贴合地形的交叉航飞方案、少量控制点搭配PPK动态定位技术、三层分级点云去噪处理、BIM模型划定填筑边界四项技术改良手段,实测高程、土石方计量精度完全达标,缩短外业测算用时、现场作业人员数量明显缩减,从源头避开了陡坡人工实测带来的高空坠落等安全隐患。借助BIM分区边界约束手段,妥善解决了传统倾斜摄影技术无法匹配坝区分层填筑施工管控的固有缺陷。未来,计划融合激光雷达设备、深度学习地物智能识别技术以及数字孪生管控平台迭代升级,打造全天候无人值守的土石方计量全流程闭环管控体系。

[参考文献]

- [1]周永朋.倾斜摄影测量在历史建筑三维重建中的关键技术与应用[C].广西网络安全和信息化联合会.2026年第十一届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.2026:132-133.
- [2]赖献美.融合无人机倾斜摄影和地面LiDAR的建筑物三维重建技术研究[J].智能城市,2025,11(10):50-53.
- [3]张舒,徐云乾,黄文康,等.多源数据融合的大坝三维重建与隐患探测技术研究[J].广东水利水电,2025(9):49-53.
- [4]邱曦,王琨,王杨.无人机倾斜摄影和三维重建技术在桥梁养护管理中的探索与应用[C].中国公路学会养护与管理分会.中国公路学会养护与管理分会第十四届学术年会论文集.2025:191-196.
- [5]冯敏.基于无人机倾斜摄影的地质综合测绘技术[J].测绘与空间地理信息,2025,48(1):168-170.
- [6]满旺,李宗梅,聂芹,等.数字孪生技术在小型水库管理中的应用初探[J].测绘通报,2023(1):20-25.

作者简介:魏云霄(1994—),女,工程师,工程硕士学位,现就职于长江三峡技术经济发展有限公司,长期从事水利水电、抽水蓄能项目建设、监理管理工作。