

# Research on Efficient Production Application of Three-dimensional Geographic Information Products for Power Engineering Based on Distributed Parallel Computing Architecture

Xiaoxiang Chen

China Power Construction Group Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810008, China

## Abstract

To address the computational bottleneck in the production of three-dimensional geographic information products for power engineering surveying, this study explores the application efficiency of distributed parallel computing architecture. Using four practical projects such as Hainan photovoltaic transmission lines as case studies, and selecting 75–104 GB of drone imagery and laser point clouds as samples, a “single-machine benchmark + cluster comparison” approach was adopted to analyze the differences between a 5-node cluster and single-machine processing in terms of processing time, resource utilization rate, and output accuracy. The results demonstrate that under the cluster mode, orthophoto processing efficiency improves by 247%–263% while Air Triangulation (AT) processing time is reduced by 72%–74%. Oblique photography modeling efficiency increases by 250%, and multi-view AT solution time is compressed by 74%. Point cloud classification and Digital Terrain Model (DTM) generation efficiency rise by 255%, with classification time reduced by 72%. CPU utilization across nodes remains stable at 70%–90%, exhibiting superior load balancing performance compared to single-machine operation (maintaining over 95% full load capacity). The output accuracy (point cloud classification accuracy of 92%, model geometric mean error within  $\pm 2\text{--}3\text{ cm}$ ) is fully consistent with single-machine configurations. **Conclusion:** The distributed parallel computing architecture can compress production cycles to less than one-third of the traditional model while maintaining accuracy, effectively alleviating computational capacity bottlenecks and providing technical references for the digital transformation of power industry surveying and mapping.

## Keywords

distributed computing; 3D geographic information; production efficiency

# 基于分布式并行计算架构的电力工程三维地理信息产品高效生产应用研究

陈小祥

中国电建集团青海省电力设计院有限公司，中国·青海 西宁 810008

## 摘要

针对电力工程测量领域三维地理信息产品生产的算力瓶颈，探究分布式并行计算架构的应用效能。以海南光伏送出线路等四项实际工程为载体，选取75–104 GB的无人机影像与激光点云为样本，采用“单机基准+集群对比”方案，从处理耗时、资源利用率及成果精度三方面，对比分析5节点集群与单机处理的差异。结果表明：集群模式下，正射影像处理效率提升247%–263%，空三耗时缩短72%–74%；倾斜摄影建模效率提升250%，多视角空三解算时间压缩74%；点云分类与DTM生成效率提升255%，分类耗时缩短72%。各节点CPU占用率稳定在70%–90%，负载均衡性优于单机（持续95%以上满载）。成果精度（点云分类准确率92%、模型几何中误差 $\pm 2\text{--}3\text{ cm}$ ）与单机完全一致。结论：分布式并行计算架构可在保障精度的前提下，将生产周期压缩至传统模式的1/3以下，有效化解算力瓶颈，为电力行业测绘数字化转型提供技术参考。

## 关键词

分布式计算；三维地理信息；生产效率

## 1 引言

随着无人机倾斜摄影等技术在电力工程普及，三维地理信息产品成为核心数据底座，但数据量剧增使单机工作站

模式暴露算力不足等问题，制约工程数字化交付。为破解算力瓶颈，分布式并行计算技术被引入，但现有研究缺乏对电力测绘典型任务的量化效能评估。本文以三项实际电力工程为试验载体，采用“单机基准+集群对比”方案，探究该技术架构在三类核心任务中的应用效能，为构建高效生产技术体系、推动行业测绘数字化转型提供参考。

【作者简介】陈小祥（1989—），男，中国江苏泰州人，本科，高级工程师，从事工程测量研究。

## 2 分布式并行计算的技术原理与电力测绘适配性

### 2.1 集群计算的核心技术架构

分布式并行计算系统通常由“分布式存储-并行计算框架-资源调度器”三层核心组件构成：

(1) 分布式存储层采用 HDFS 或 Ceph 等架构实现数据分布式存储。关键技术在于针对地理空间数据的局部性特征，按 UTM 分带或航带进行数据分片，并将相邻区域的数据存储至同机架节点，利用数据亲和性调度降低跨节点访问延迟，提升影像特征匹配与点云邻域查询的效率。(2) 并行计算框架根据计算任务的耦合度采用混合架构设计：空三加密等涉及全局约束解算的环节，采用 MPI 实现节点间高频数据交换与协同优化；密集匹配等数据并行型环节，则基于 Spark 的弹性分布式数据集 (RDD) 进行调度，以应对长周期任务中的节点故障，实现“全局协同+局部并行”的算力配置。

### 2.2 电力测绘数据的特征与集群适配策略

#### (1) 空间局部性与条带并行策略

针对输电线路狭长带状（长数百公里、宽不足 2 公里）且影像高重叠的特点，采用“航带分区+重叠缓冲区”的切分策略——沿线路方向划分连续区块，区块间设置 20% 影像宽度的重叠区，确保平差解算的连续性与拼接处的无缝衔接。

#### (2) 精度敏感性与全局平差策略

针对电力工程厘米级几何精度要求（如变电站设备建模  $\pm 2\text{cm}$ ），采用“局部平差—全局融合”两阶段策略：各节点先对分片数据进行局部解算，提取边界公共连接点后提交主节点，由主节点构建全局误差方程进行整体优化，在提升效率的同时确保几何精度不损失。

#### (3) 多源异构性与时空基准统一策略

针对卫星影像（米级）、倾斜影像（厘米级）、激光点云（毫米级）等多源数据融合需求，集群系统在预处理阶段建立统一的时空基准转换管道与多分辨率金字塔索引，支持异构数据的联动调度与融合建模。

### 2.3 电力工程三维地理信息产品生产流程

以输电线路工程为例，三维地理信息产品的典型生产流程包括：

(1) 航飞规划与数据采集：根据线路走向划定测区，采用飞马 V500/V10/D200 等无人机平台，设置航向重叠 80%、旁向重叠 70%，地面分辨率 (GSD) 根据工程需求设定为 2.5-8cm。获取数据包括原始影像（含 POS 信息）及激光点云。

(2) 影像数据处理：涵盖影像畸变校正、匀色处理、空三加密（特征提取+相对定向+绝对定向）、密集匹配生成 DSM/点云、正射影像纠正与拼接。空三加密是计算最密集的环节，单节点处理时间占比通常超过 50%。

(3) 点云数据处理：包括点云去噪（统计滤波、半径滤波）、坐标配准、地物分类（地面点、植被点、建筑点、电力设施点）、DEM/DTM 生成、等高线提取。点云分类依赖多维度特征（高程、强度、回波次数、几何形态），计算复杂度较高。

(4) 三维建模与成果输出：基于密集点云构建 TIN 网格，生成三维实景模型，进行纹理映射与模型轻量化。最终成果包括 DOM、DEM、三维模型、分类点云等，服务于线路选线、塔基定位、土方计算、数字孪生等应用。

## 3 数据采集与分析

### 3.1 正射影像处理效率对比

海南切吉光伏送出线路工程线路长度约为 122km，利用飞马无人机管家进行测区划分及飞行航线规划，沿线海拔在 2950-3300 米之间。

单机模式下，75GB 航测数据全流程处理耗时 35 小时 24 分钟。各环节耗时分布如下：影像导入与质量检查 2 小时 32 分钟，空三加密 18 小时 12 分钟（占比 51.4%），DSM 生成 10 小时 8 分钟（占比 28.6%），DOM 生成 6 小时 32 分钟（占比 18.5%）。处理过程中，CPU 占用率长期维持在 95% 以上，GPU 利用率波动于 30%-80% 之间，存在明显的资源调度不连贯现象。

集群模式下，5 节点并行处理将总耗时压缩至 10 小时 16 分钟，整体加速比达 3.47 倍。其中，空三加密环节由 5 节点同步处理，耗时 4 小时 36 分钟（较单机缩短 74%）；DSM 生成通过任务拆分，耗时 2 小时 48 分钟（缩短 72%）；DOM 生成采用分块拼接策略，耗时 1 小时 55 分钟（缩短 71%）。集群各节点 CPU 占用率稳定在 70%-80%，GPU 利用率保持在 85% 以上，负载均衡性显著改善。整体处理效率较单机提升约 247%，耗时缩短近 2/3。

### 3.2 倾斜摄影三维建模效率对比

变电站位于海东市循化县察汗都斯乡红光村。鉴于测区林木繁茂、建筑物密集的特点，为切实提高测图精度，有效规避地形地物制约，本次采用飞马 D200 无人机实施倾斜航测。通过航线重叠度（航向重叠 80%、旁向重叠 70%）控制，最终获取有效影像 6492 张，为后续精细化三维建模及工程方案设计的高精度数据需求提供了基础数据保障。

测区采用五镜头倾斜摄影技术，数据量达 104GB（含 6492 张影像）。单机处理全流程耗时 63 小时 28 分钟（约 2.6 天），其中多视角空三加密耗时 27 小时 15 分钟，占比 43%；三维模型构建耗时 31 小时 8 分钟，占比 49%；纹理映射与成果输出耗时 5 小时 5 分钟。处理过程中，CPU 占用率持续维持在 95% 以上的满载状态，GPU 负载频繁达到 100%，系统响应存在明显延迟。

集群模式下，全流程耗时压缩至 18 小时 11 分钟，加速比为 3.49 倍。空三加密环节针对倾斜摄影主流的“1 个垂

直镜头+4组倾斜镜头”硬件配置分类分配任务，通过5节点同步处理，耗时7小时5分钟，缩短幅度74%；三维模型构建通过节点间数据协同（网格生成与纹理贴图并行），耗时9小时38分钟，缩短幅度69%；纹理映射采用基于视点优先级的资源分配策略，耗时1小时28分钟，缩短幅度71%。集群各节点CPU占用率保持在80%-90%，GPU利用率达85%以上，未出现单点过载现象。

成果质量对比显示：单机处理因长时间高负载运行，在植被密集区域出现少量纹理错位，约占模型总面积的3%；集群处理通过合理的任务拆分，纹理贴合度明显优化，错位区域降至0.5%以下，减少了后期人工修模的工作量。

### 3.3 机载激光雷达数据处理效率对比

测区位于贵州省遵义市正安县。测区面积达160km<sup>2</sup>，涵盖点云数据93GB、影像数据53GB。本新能源风电项目航测核心数据成果为精细化处理后的激光点云数据，该数据基于160平方公里测区的全范围激光扫描采集。

集群模式下，全流程耗时压缩至10小时45分钟，加速比为3.55倍。点云分类按“地面点、植被点、建筑设施点、噪声点、冗余点”五类任务并行处理，通过5节点同步执行，耗时6小时10分钟，缩短幅度72%；DTM生成与影像融合通过节点协同，耗时3小时52分钟，缩短幅度73%。集群各节点CPU占用率维持在75%-85%，GPU利用率达86%以上。

精度验证显示：集群处理的点云分类总体准确率为92.3%（其中地面点93.1%、植被点91.5%、建筑点94.2%），与单机处理结果（92.1%）基本一致；DTM高程中误差经30个外业检查点验证，集群模式为±2.8cm，单机模式为±2.7cm，均满足1:1000测图规范要求（中误差≤±10cm）。

### 3.4 试验结果综合分析

将三项试验的关键数据汇总于表2，可得出以下结论：

表2 集群与单机处理效能对比汇总

指标	正射影像	倾斜模型	激光点云
单机总耗时	35小时24分钟	63小时28分钟	38小时12分钟
集群总耗时	10小时16分钟	18小时11分钟	10小时45分钟
加速比	3.47倍	3.49倍	3.55倍
关键环节耗时缩短	空三-74%	空三-74%	分类-72%
集群CPU利用率	70%—80%	80%—90%	75%—85%
单机CPU利用率	95%以上	95%以上	98%以上
成果精度符合性	合格	合格	合格

## 4 集群算力在电力工程中的综合效益分析

### 4.1 生产效率的跨越式提升

单机受限于单一节点的硬件资源，难以应对海量数据的并行处理需求。以遵义风电项目为例，93GB点云数据单机处理需38小时，外业采集完成后需等待近2天才能获取分类点云；而集群模式将周期压缩至10小时，实现“当日采集、次日设计”的无缝衔接。

### 4.2 经济成本的优化机制

人力成本节约集群模式显著压缩内业处理周期，有效化解外业人员窝工问题。以3名内业、2名外业辅助人员构成的项目组为例，单项目处理周期从35小时压缩至10小时，可释放25小时人力资源。按行业综合人工成本800元/人·天测算，单项目节约人力成本超4000元，年度20个项目累计节约8万元以上。

### 4.3 工程应用的拓展价值

(1) 输电线路数字化选线集群系统生成的高精度三维模型支撑线路路径多方案智能化比选。在330kV公官I线改造工程中，设计人员基于三维场景模拟三个比选方案，精准测算塔基数、跨越次数与拆迁量。最终选定方案较初设路径缩短3.2公里，节约投资380万元。

(2) 变电站数字孪生集群处理将750kV变电站精细化建模周期从3天压缩至1天。

(3) 新能源场站智能运维风电项目投产后，借助集群系统对多台风机点云数据并行处理，可将全场巡检数据处理周期从7天压缩至2天。

## 5 结论与展望

### 5.1 研究结论

本文以四项实际电力工程为案例，系统开展了分布式并行计算与单机处理的对比试验，得出以下结论：

(1) 分布式计算可显著提升电力测绘生产效率。(2) 集群处理可在保障精度前提下实现效率跃升。(3) 集群算力带来显著的经济效益。(4) 集群算力可深度赋能电力工程全业务链。

### 5.2 研究展望

结合近三年电力工程测量研究热点，建议：

(1) 构建云—边—端协同计算体系，采用“本地边缘节点+中心云平台”混合架构，以智能调度算法实现任务动态分流，提升资源利用灵活性。

(2) 推进AI驱动智能化处理，把深度学习模型集成到集群流程，利用GPU集群提升复杂场景处理水平，关注

新技术在三维重建中的应用。

(3) 实现电力全业务链数据贯通, 对接三维地理信息产品与多系统, 建立共享机制, 打造电力行业空间信息产业。

### 参考文献

- [1] 国网电力空间技术有限公司. 电网空间数据云上处理平台建设与应用[R]. 北京: 国家电网有限公司, 2025.
- [2] 金坚, 陈成, 冯雷, 等. 面向输电线路建设规划的三维可视化交互系统研究[J]. 东北电力技术, 2026, 47(2): 34-41.
- [3] 王海波, 张立明, 赵建辉. 基于云边协同的输变电工程建设调度平台设计与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2025, 23(4): 56-63.
- [4] Chang A, Jung J, Landivar J, et al. Performance evaluation of parallel structure from motion processing with public cloud computing and on-premise cluster system for UAV images in agriculture[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(10): 677.
- [5] 郭建平, 饶晨, 陈永红. 基于云计算的电网三维点云数据分析技术研究与应用[C]//中国智能电网学术研讨会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2023: 95-103.
- [6] 李德仁, 王密, 沈欣. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 1-12.
- [7] 龚健雅, 季顺平. 摄影测量与深度学习[J]. 测绘学报, 2024, 53(2): 203-218.
- [8] 杨必胜, 董震. 点云智能处理及其在电力巡检中的应用[J]. 测绘地理信息, 2025, 50(3): 1-10.
- [9] 张祖勋, 陶鹏杰. 谈大数据时代的“云控制”摄影测量[J]. 测绘学报, 2024, 53(5): 801-812.