

飞马无人机在全息数字电网建设中的应用与研究

王宁 李欣 高迎雁 陈正宇 张春涛 周伟
【中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司】

摘要：

本文主要以飞马 D300L 设备为例，探讨机载激光雷达技术在全息数字电网建设过程中的应用和相关研究。阐述了全线数字电网建设要求和实施方案，重点研究了在电力线点云数据缺失情况下，通过抛物线公式进行数学拟合，弥补缺失数据，真实数据表明，该方法精度可靠，操作简单。最后对项目进行了总结与展望。

关键词：

机载激光雷达；全息数字电网；飞马 D300L；点云拟合

1 项目概述

1.1 项目背景

2020 年 5 月，国网江苏电力公司启动全息数字电网建设，运用无人机机载激光雷达对全省 220kV 及以上输电线路通道开展三维激光扫描，实现变电站、杆塔和输电线路走廊内的地形、地貌的实景复制，将现有二维的电网地图升级为三维立体形态，构建一个全息数字电网，实现电网规划设计、建设施工、竣工验收、运维全过程的智能化管控，全面提升电网的智慧运维水平。

1.2 项目要求

在全息数字电网建设过程中，输电线路通道的高精度激光点云模型是最重要的基础，后续的分析与应用均在此基础之上，本项目质量指标验收标准如下：

(1) 点密度要求

点密度控制在 100-150 点/平方米之间。

(2) 导线点云数据质量要求

杆塔点云数据结构完整，输电导线点云不存在长距离断缺或明显疏漏，尤其在交跨上方时，导线点应完整、均匀采集。

(3) 点云精度要求

获取的点云平面和高程绝对精度不低于 $\pm 10\text{cm}$ ，平面和高程相对精度不低于 $\pm 5\text{cm}$ 。

2 实施方案

2.1 设备简介

飞马 D300L 集成度高，可分别搭载 SONY ILCE-6000 航测模块和禾赛 Pandar40P 激光雷达模块，激光测距长到 200m，测距精度为 $\pm 2\text{cm}$ 。飞机拥有主视角摄影头，在航线作业时具备实时视频监控能力。飞马 D300L 具备自主航线飞行及手动控制能力，并可自由切换，支持仿地飞行和变高飞行，满足更多复杂场景应用。



图1 飞马 D300L

2.2 技术路线

在外业踏勘后，先搭载航测模块进行输电线路通道正射影像数据采集，获取准确线路路径后，再进行激光雷达数据采集及后续程序，具体工作方案技术路线如下：

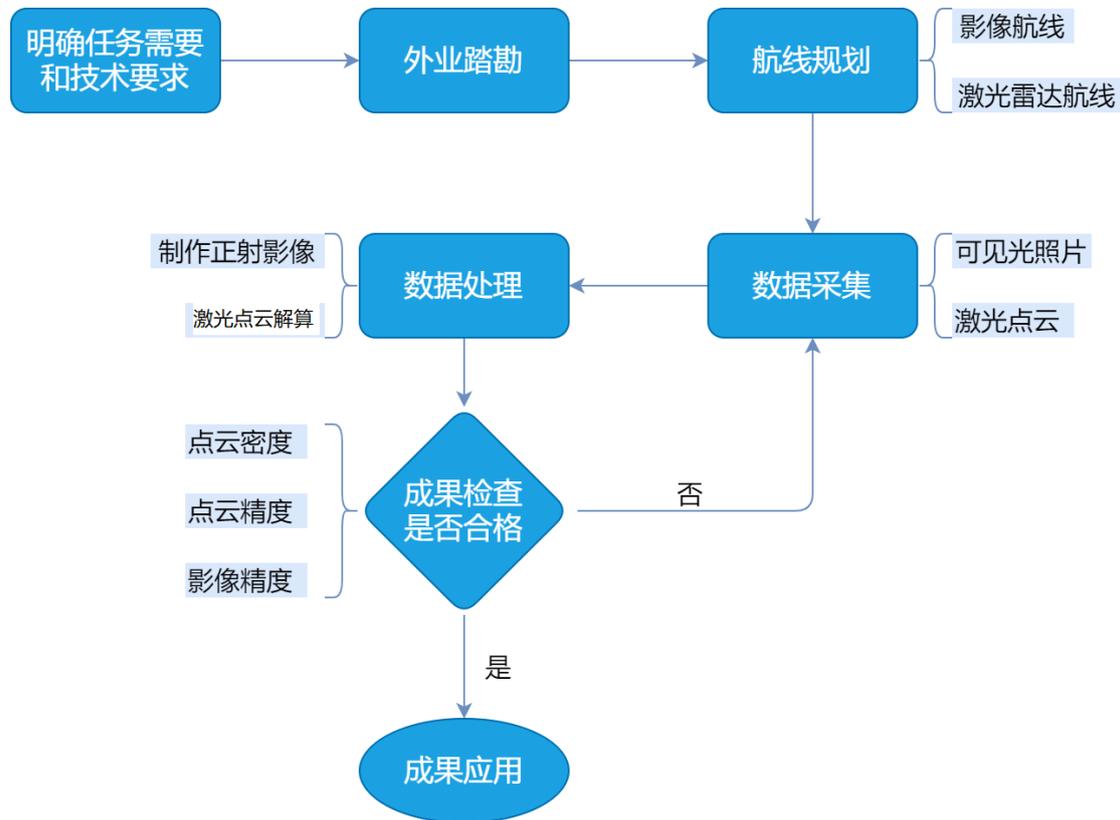


图2 技术路线图

2.3 实施过程

(1) 信息收集，首先与项目主管单位收集线路的台账清单，获取基础信息，包含杆塔坐标和杆塔全高。

(2) 实地勘察，弄清楚线路与铁路、高速交跨，多线并行、交叉跨域等区域的详细高

度状况，填写现场勘察记录表。

(3) 正射影像数据采集，根据实地勘察详情，进行正射影像数据采集。

(4) 激光雷达航线规划，根据正射影像获取的准确路径，收集到的塔高信息及勘查记录，按照安全规程要求进行航线规划，设计飞行航线参数及激光雷达工作参数。依据杆塔坐标，确保航线在杆塔左右两侧各 20 米，飞行轨迹平行于线路走向，设计环飞航线。

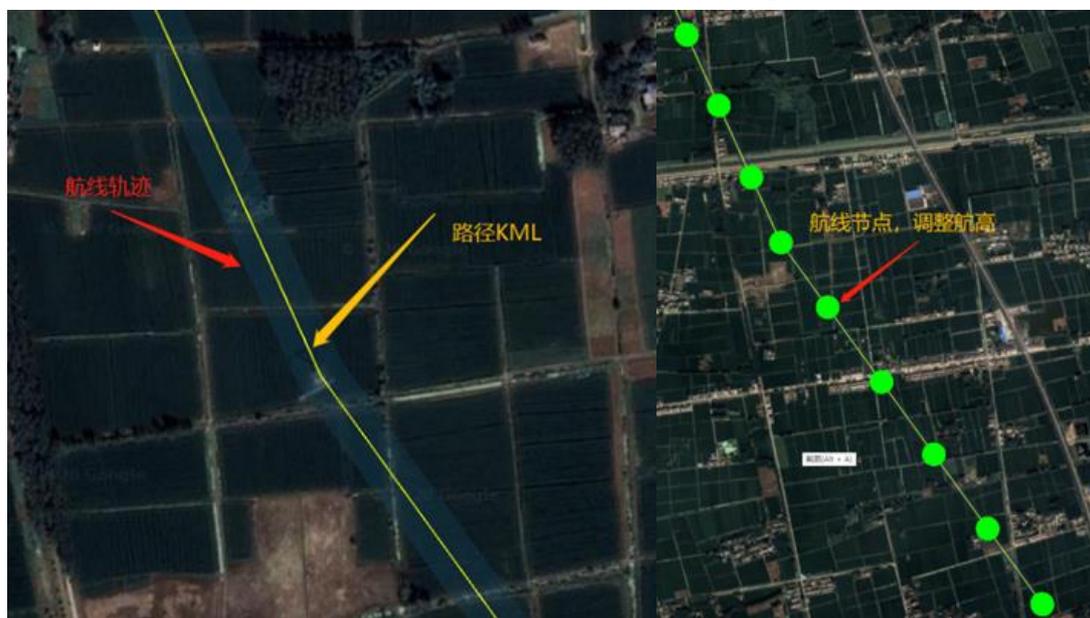


图 3 规划路径

图 4 调节航高

采用变航高飞行模式，高度高于塔顶 15-20 米，采用自动飞行模式，定速以 5-6m/s 的速度匀速飞行，确保点云密度满足项目需求。



图 5 点云航线规划参数指标

(5) 激光点云数据采集，飞机起飞前，检查航线规划结果是否发生变化，对于重大交叉区域，飞机起降点应选择该区域附近，确保飞机在视距范围内采集数据。

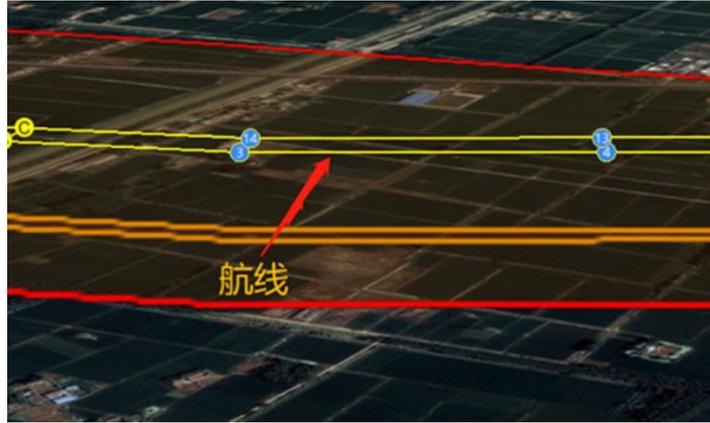


图 6 航线检查

3 质量检查

飞马 D300L 支持“RTK+PPK”模式，具有免相控技术，在本项目中，仅用检查点进行精度验证。具体验证方案如下，每个架次，4 公里范围内，采用 20 个以上平高点或者高程点进行点云精度检核。高程检查点选择在硬质路面，平高点一般选择输电杆塔横担、塔基础边缘、房角点等易于识别的角点。针对正射影像，采用地面标志点或明显底物交叉点进行平面精度检核，如图 7 所示，整个项目质量如表 1 所示，具体某条线路的精度检查报告如 8 所示。由此可知，飞马 D300L 完全能够胜任该项工作。



图 7 外业检查点测量

表 1 项目精度指标

产品类别	公里数	线路条数	检查点（个/每 3 公里）	平面精度	高程精度
激光点云	4200	93	15-20	5.9-9.1cm	6.1-8.9cm
正射影像			4-6	3.2-6.4cm	/

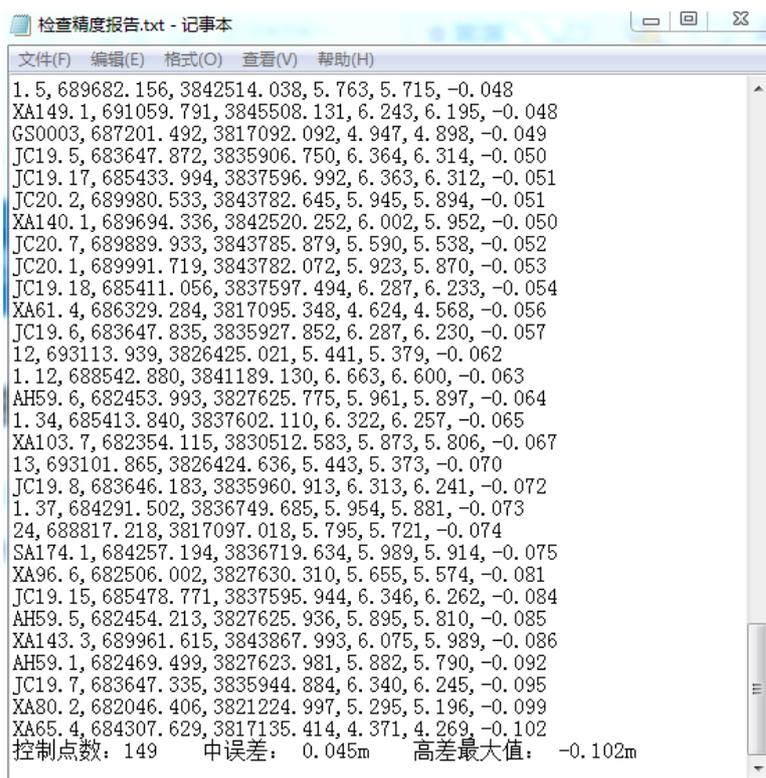


图 8 某线路精度检查报告

4 优化创新与研究

4.1 生产痛点

根据项目经验，在输电线路交叉跨越情景下，出于安全起见，无人机应跨过最高的线进行作业，但当无人机荷载与导线之间的高差超过 70m 时，无法采集完整的线路点云数据，会出现导线点云不连续现象（图 9），这种情况无法满足后续分析应用。

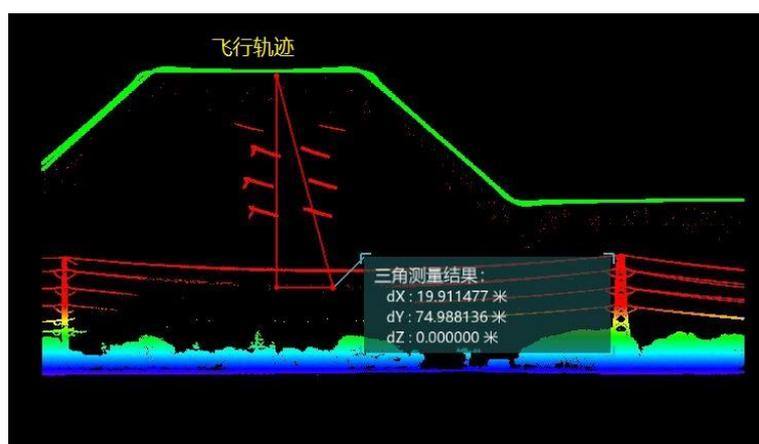


图 9 导线缺失现象

完整的点云才能够进行树障检测、工况模拟等，所以出现线路不连续或者杆塔缺少情况，须采取其他技术手段进行弥补，主要技术手段有以下两种。

降低无人机飞行高度，在空中两条线交跨之间进行作业，该方法操作空间较小，且电磁影响较大，容易造成无人机传感器故障，如磁力计和 GPS 等，风险较高。

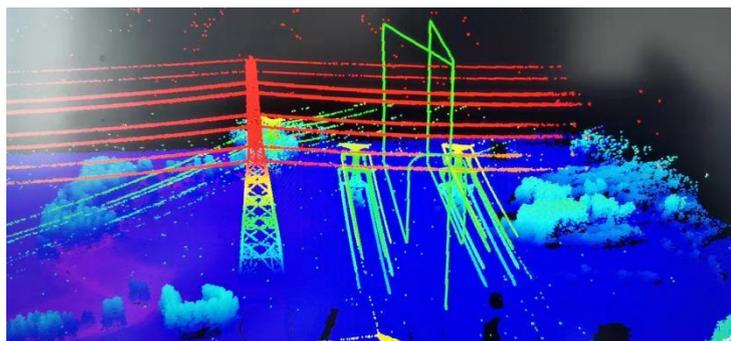


图 10 交叉跨越处高风险作业轨迹

采用地面激光扫描进行补扫描,该方法一般需采用长测程脉冲式激光扫描仪进行数据采集,成本较高。所以电力线点云缺失成为本项目最大的痛点。

4.2 优化创新

面对这种情况,作者提出“数值拟合”方法进行修补,即根据已有点云数据,进行自动拟合,模拟出缺失的点云数据。

根据规范可知,架空线的悬挂曲线方程是悬链线方程,该方程有双曲函数,计算比较繁琐,为避开繁琐的计算,工程计算中常使用抛物线公式进行计算,公式如下

$$y = x \tan \beta - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos \beta} \quad (1)$$

其中, γ 为线路比载,其他参数的数学意义如图 11 所示,本函数中有 5 个参数,可令

$k_1 = h; k_2 = \gamma; k_3 = \sigma_0; k_4 = l; k_5 = l_{AB}$, 则公式可变为

$$y = x \frac{k_1}{k_4} - \frac{k_2 g k_5 g x (k_4 - x)}{2 g k_3 g k_4} \quad (2)$$

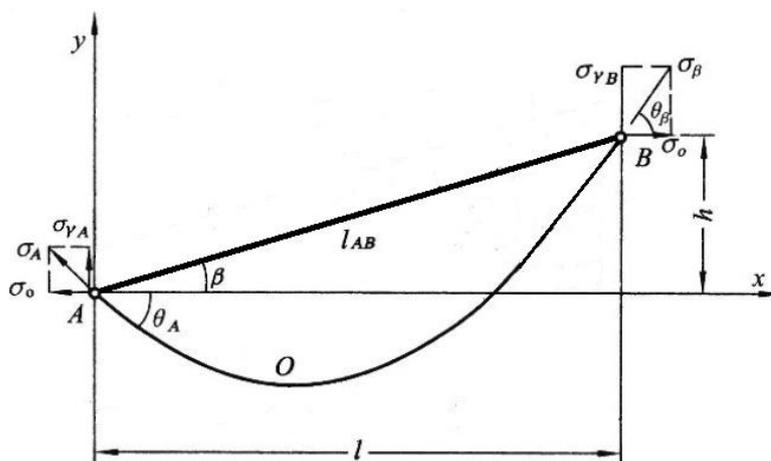


图 11 输电线路悬挂曲线

为了求出公式 (2) 中 5 个参数的最小二乘解,至少需要 6 组以上的 (x, y) 函数值以保证有多余观测值。求出参数后,便可以在起止区间进行插值,拟合坐标。

为了验证用公式 (1) 拟合的点云精度, 作了如下测试, 在同一作业时间范围内, 采用 RTK+全站仪进行实测某档线路 58 个点, 并且同步采用飞马 D300L 进行激光雷达数据采集, 以全站仪测得数据作为“真值”, 则计算出激光点云数据精度高达 5cm, 如图 12 所示。

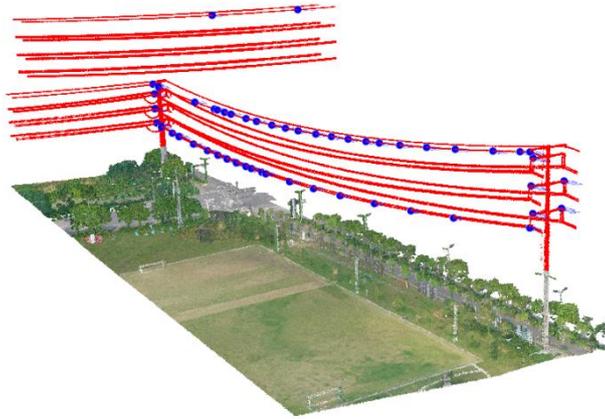
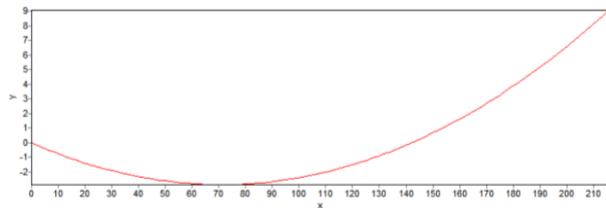


图 12 测试数据场景 (蓝色点为真值, 红色为激光点云实测值)

在下导线实测数据中选取 6 组数据, 采用非线性最小二乘算法-麦夸特算法进行参数估计, 求解出公式 (2) 中 k_1 - k_5 这 5 个参数, 最后用其他实测数据验证精度, 结果如表 2 所示:

表 2 抛物线公式拟合精度分析

No	x	实测值 y1	计算值 y	y1-y	备注	参数估计与拟合	
1	11.243	-0.838	-0.835	0.003		殊差平方和(SSE) 000047704	
2	44.522	-2.454	-2.466	-0.012		相关系数(R) 0.99999994	
3	75.754	-2.836	-2.852	-0.016	参与 参数 拟合	相关系数之平方(R ²) 0.999987867	
4	120.73	-1.451	-1.460	-0.009		决定系数(DC) 0.999987861	
5	152.966	0.948	0.952	0.004		卡方系数(Chi-Square) -9.30E+09	
6	186.427	4.706	4.705	-0.001		统计(F-Statistic) 3.29684E+14	
7	17.989	-1.267	-1.268	-0.001		参数	最佳估算
8	31.859	-1.99	-1.994	-0.004		k1	9.200673
9	53.497	-2.664	-2.691	-0.027	k2	0.004161	
10	61.045	-2.783	-2.809	-0.026	k3	3.414996	
11	68.489	-2.847	-2.861	-0.014	k4	216.722858	
12	79.777	-2.798	-2.821	-0.023	利用 参数 自主 拟合	k5	202.155136
13	87.417	-2.679	-2.712	-0.033			
14	90.299	-2.635	-2.654	-0.019			
15	106.246	-2.152	-2.159	-0.007			
16	135.622	-0.495	-0.493	0.002			
17	169.409	2.625	2.637	0.012			
18	212.072	8.464	8.443	-0.021			



从表 2 可知，利用抛物线公式（1）拟合输电线路的悬挂曲线精度完全可以满足要求。

目前，飞马无人机管家，已具备拟合补点功能图 13-14 所示，利用上述数据进行精度验证，将激光雷达采集完整的数据进行数据抽稀，模拟点云缺失现象，采用拟合补点功能进行补点，精度指标如表 3 所示。

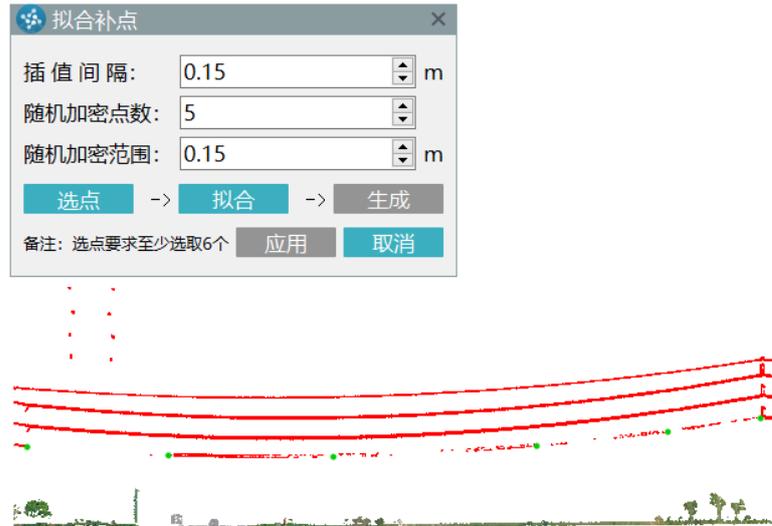


图 13 无人机管家拟合补点功能

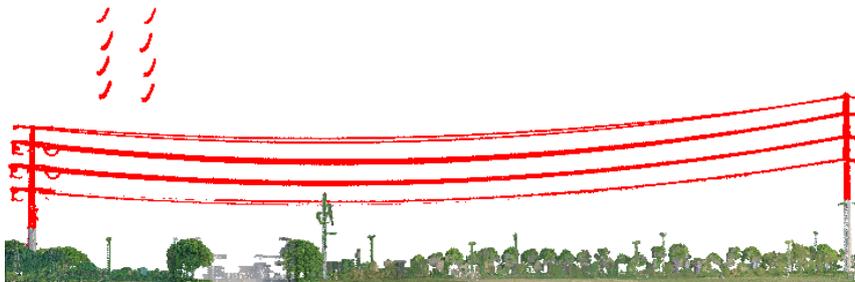


图 14 自动拟合补点后情况

表 3 无人机管家拟合补点精度分析

点名	北坐标(m)	东坐标(m)	全站仪 实测(m)	实测点云-全 站仪(m)	拟合点云-全 站仪(m)
X1	***710.063	***0461.439	41.034	-0.013	0.150
X2	***918.057	***0502.821	49.498	0.004	0.076
X3	***892.915	***0497.767	45.739	0.019	0.059
X4	***876.227	***0494.429	43.659	0.031	-0.004
X5	***860.101	***0491.216	41.982	0.037	0.125
X6	***843.091	***0487.833	40.539	0.054	0.059
X7	***828.485	***0484.925	39.583	0.057	-0.004

X8	***814.291	***0482.038	38.881	0.050	-0.073
X9	***798.647	***0478.951	38.398	0.009	-0.100
X10	***777.250	***0474.731	38.187	0.013	-0.044
X12	***788.316	***0476.956	38.236	0.014	-0.269
X13	***795.806	***0478.463	38.355	0.016	-0.024
X14	***784.365	***0476.199	38.198	-0.002	-0.221
X15	***769.943	***0473.309	38.251	-0.021	-0.081
X16	***762.540	***0471.841	38.370	-0.030	-0.084
X17	***753.739	***0470.072	38.580	-0.024	-0.081
X18	***741.314	***0467.629	39.043	-0.058	0.010
X19	***727.709	***0464.935	39.767	-0.047	-0.028
X20	***721.090	***0463.632	40.195	-0.023	0.071

中误差：0.03 中误差：0.10

从表 3 中可知，采用飞马无人机管家的拟合补点功能可以满足本项目对点云数据的精度要求。

4.3 解决痛点

利用抛物线公式进行拟合补点，高效解决了电力线数据缺失这一生产痛点，一段数据不完整就需要多补飞一个架次，所以利用这个功能，就可以在内业进行数据处理，无需外业操作，大大降低了成本且将作业风险降低为零。

在本项目中，利用“数值拟合”进行补点，解决了 56 处交跨处电力线点云缺失现象。为项目顺利完成提供了科学保障。

5 总结与期望

在江苏全息数字电网建设过程中，江苏院顺利完成 4200 公里数据（其中 500kV 及以上 1900 公里，220kV1300 公里），这充分体现了飞马 D300L 在该项目中的稳定可靠，能够满足电力工程全生命周期的各类应用。通过该项目，我们得出总结与期望如下：

（1）机载激光雷达技术在电力项目中应用，最重要的是安全，除了防止外物影响无人机作业，更要防止无人机撞线，撞塔影响输电线路安全运行，所以作业前应充分了解线路通道情况包括线路路径，交叉跨越，危险点等信息，确保无人机作业安全，输电线路运行安全。

（2）针对电力线缺少情况，拟合补点功能精度较高，效率高，能够满足精度要求。在电力线存在部分缺失的情况下，可以采用该功能，能够提高工作效率。同时期望能够在拟合后给予补点处的精度指标。

（3）随着后续全息电网建设和应用不断深入，通过对点云数据直接处理生成各种实体模型数据的需要会愈加强烈，因为实体模型与点云模型相比，实体模型可以更加有效和直观得再现输电线路走廊内高精度的地形、地貌、地物，实现输电线路信息和地理信息完美结合，构建完整的全息数字电网。因此通过点云数据直接生产结构化的模型数据是值得思考和探索。