引文格式：李子新,李冶,刘国辉. 利用空间最短距离拟合模型重建点云缺失电力线[J]. 地理空间信息, 2026, 24(7): 22-25. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.07.005

利用空间最短距离拟合模型重建点云缺失电力线

李子新，李　冶，刘国辉
（广东电网有限责任公司 江门供电局，广东 江门 529000）

摘　要：针对LiDAR在电力巡检中电力线缺失导致难以有效实现安全检测等问题，开展输电廊道缺失电力线重建研究。首先通过目标分类对电力线进行提取；再采用电塔拟合平面分割单档电力线，并提出了一种空间最短距离电力线拟合聚类算法，改善了传统聚类方法不适用于部分电力线数据缺失的情况；最后基于悬链线模型拟合重建电力线。在200 kV和500 kV输电廊道上开展缺失电力线重建实验，结果表明该方法可有效重构缺失电力线，对于缺失80%以上的500 kV电力线仅重建失败一根。研究结果可为电压输电线路中电力线的缺失重建提供技术支撑和参考。

关键词：LiDAR；电力巡检；电力线缺失；电力线重建
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）07-0022-04

Reconstruction of Power Line with Point Cloud Missing Using the Spatial Shortest Distance Fitting Model

LI Zixin, LI Ye, LIU Guohui
(Guangdong Power Grid Company Limited Jiangmen Power Supply Bureau, Jiangmen 529000, China)

Abstract: In response to the problems such as the difficulty in effectively achieving safety detection due to missing power lines in power inspection by LiDAR, we carried out research on the reconstruction of missing power lines in transmission corridors. Firstly, we extracted power lines through target classification. Then, we adopted the power tower fitting plane to segment single-stage power lines, and proposed a spatial shortest distance power line fitting clustering algorithm, which could improve the performance of traditional clustering method for the applicable to the missing data of some power lines. Finally, we fitted and reconstructed the power lines based on the funicular curve model. We carried out the reconstruction of missing power lines on the transmission corridors of 200 kV and 500 kV respectively. The results show that the proposed method can effectively reconstruct the missing power lines, and it only fails to reconstruct one 500 kV power line with more than 80% missing. This study can provide the technical support and reference for the reconstruction of missing power lines.

Key words: LiDAR, power inspection, power line missing, power line reconstruction

电力系统是国家能源系统的重要组成部分，也是现代社会活动不可或缺的重要基础。电力能源的合理调配和高效稳定输送不仅保障了人民群众的日常生活需求，而且为社会发展、经济建设和国防安全提供了必要支撑。根据初步统计，截至2022年底全国电网220 kV及以上输电线路回路长度为88万km且大部分位于复杂林区，因此传统人工电力巡检技术已无法适应行业要求。激光雷达（LiDAR）系统作为一种可获取目标精细三维结构特征的主动遥感技术，具有空间定位精度高、大规模大范围数据获取迅速、全天时工作、能穿透植被等优势，能高效生成高精度的三维数据[1]，已被广泛应用于基础测绘[2]、林业调查[3]、电力巡检[4]、数字城市[5]等领域。LiDAR点云可提供大范围、高精度、多维度的电力线路信息，极大地提高了电力线路巡检的效率和准确性[6]。电力线三维重建是电力巡检中不可或缺的环节，为后续应用提供了基础。电力线三维重建包括电力线单档分割、单根电力线聚类和单根电力线重建等步骤。众多学者分别针对电力线单档分割[7-9]、电力线单根聚类[10-12]、单根电力线重建[13-18]开展了研究，结果表明在电力线重建过程中，需要考虑地形的复杂性和电力线的真实情况，并选择合适的电力线重建模型。然而，现有无人机LiDAR在数据获取过程中，受系统稳定性和地形复杂性的影响，存在部分电力线获取效果不佳甚至获取不到的情况，从而导致无法进行后续处理。针对复杂山区不同电压输电廊道电力线缺失的情况，电力线分档并重建还有待进一步研究。因此，针对220 kV和500 kV输电廊道采集的原始数据中存在的电力线断裂缺失问

项目来源：广东电网有限责任公司基建技术创新专题计划资助项目（20241160150）。
第一作者简介：李子新（1984—），硕士，高级工程师，主要研究方向为输电线路智能化检测，E-mail：2641676100@qq.com。

题，本文提出了一种基于空间最短距离聚类的电力线重建模型，可对电力线缺失情况下聚类效果较差的电力线簇进行重新聚类，得到更好地单根电力线聚类效果；并对其进行重建，从而为输电廊道电力线缺失重建提供技术支撑。

1　实验数据与研究方法

1.1　实验数据

HLM可有效分析具有多层次性的数据，通过差异分解区分组内差异和组间差异，从而揭示群体变量与个体变量之间的关系，主要分为零模型、随机效应回归模型和完整模型3类[12]。本文从村、镇尺度构建农户搬迁意愿HLM，并利用HLM 6.08软件进行分析。实验数据为无人机搭载大疆禅思L1获取的广东省某山林地区电力廊道220 kV和500 kV的机载LiDAR数据。设置无人机飞行高度为120 m，航速为8 m/s，旁向重叠率为30%。实验数据的点云属性包括三维空间坐标XYZ和RGB信息，为大疆禅思L1的实时点云真彩上色。获得的点云数据平均密度为180点/m^2。电力廊道部分实验区域的真彩色展示见图1。

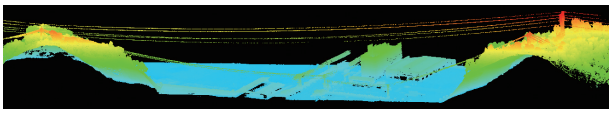


图1　输电廊道机载LiDAR扫描示例数据

1.2　电力线点云拟合

电力线的点云数据投影在水平和竖直面上，分别拟合得到二维数学模型。在水平面上，电力线投影为一条直线，可用一次方程模型表示；在竖直面上，电力线呈悬链线形状，可通过双曲余弦方程表示。悬链线模型的理想状态是物体悬挂于两端受重力作用悬垂，质量分布均匀且没有刚性。电力线的金属材质不会完全没有刚性，但现在生产厂家对电力线柔性有很高的要求，因此其刚性对模型的影响很小[13]。本文采用悬链线模型对电力线进行拟合，其拟合方程为：

$$y=\mathrm{k}x+\mathrm{b}$$

$$\begin{cases} z=\mathrm{a}\cos\dfrac{x+\mathrm{C}_1}{\mathrm{a}}+\mathrm{C}_2, x_{\mathrm{range}}\geqslant y_{\mathrm{range}} \\ z=\mathrm{a}\cos\dfrac{y+\mathrm{C}_1}{\mathrm{a}}+\mathrm{C}_2, x_{\mathrm{range}}<y_{\mathrm{range}} \end{cases}$$

式中，k、b、a、C_1、C_2均为常数。

采用最小二乘法求解模型参数易受噪声影响，拟合误差较大，因此本文采用随机采样一致性（RANSAC）算法求解拟合模型的最优参数，可消除噪声点的影响。RANSAC算法流程见图2。

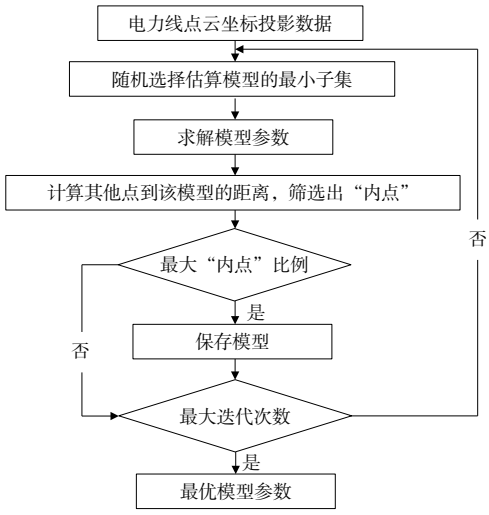


图2　RANSAC算法流程图

1.3　基于空间最短距离聚类的电力线重建

由于点云缺失，电力线可能被分割为几段，因此本文提出了一种基于空间最短距离聚类的电力线重建方法。具体流程包括：①分别对N_1个不完整电力线簇进行拟合，得到悬链线模型；②针对某一簇n，计算它与其他投影轴坐标不相交簇的空间最短距离，首先求取这两个点云簇在投影轴的最大和最小坐标值（若$x_{\mathrm{range}}\geqslant y_{\mathrm{range}}$则$X$轴为投影轴，计算$x_{\min}$和$x_{\max}$），再将模型区间扩展到坐标最值，计算两个模型在此区间的最短距离；③根据输电线的不同电压等级，设置距离阈值D，若模型最短距离小于D，则判定为同一条电力线，将该簇归入n并从集合中移除，依次处理每个簇，完成后电力线簇的数量变为N_2（$N_1\geqslant N_2$），即为不同电压电力线的空间根数，从而明确电力线的空间拓扑关系。

电力线重建的具体流程包括：①对分割后的单档电力线点云进行第一次聚类，采用欧氏距离聚类将一定距离范围内的点划分到同一簇中，再判定每一簇的长度，若小于阈值则归入离散簇，将两端点接近电塔分割面的簇归入电力线完整簇不再进行聚类操作，最终得到M个离散簇和N_1个不完整簇；②对N_1个不完整簇分别拟合悬链线模型，在竖直面上若$x_{\mathrm{range}}\geqslant y_{\mathrm{range}}$则投影到XOZ平面，反之投影到YOZ平面；③计算$M$个离散簇到$N_1$个不完整簇的悬链线模型距离，将每个离散簇归入距离最近的电力线簇；④将N_1个不完整簇中拟合方程高度近似的簇归为同一个聚类，得到N_2个电力线簇；⑤重新拟合N_2个簇并插值重建，通过欧式距离聚类得到N_3个簇，将两端点接近电塔分割面的簇加入电力线完整簇不再进行聚类操作，剩

下 N_4 个电力线簇；⑥采用基于空间最短距离的聚类方法对 N_4 个电力线簇再次聚类，得到 N_5 个电力线簇，并全部加入电力线完整簇；⑦重新对所有电力线完整簇进行拟合与重建，得到完整的电力线重建结果。上述步骤中 $N_1 \geqslant N_2 \geqslant N_3 \geqslant N_4 \geqslant N_5$，通过该流程能有效聚类断裂的电力线段，得到更完整的电力线重建效果。

2 实验结果与讨论

2.1 电力线单档分割

由于整个电力巡线的数据量太大，为提升处理效率和速度，通常需要根据电力线进行单档分割。传统电力线单档分割基于局部最高点[7]或通过已知的电塔坐标进行电力线分档[8]。局部最高点方法在陡峭的山区适用性较差，而根据电塔坐标分档通常在电力线两端不能精细分割。因此，根据已有的电力塔分类结果，本文采用基于电力塔拟合平面的电力线单档分割方法，首先将电力塔点云通过欧氏聚类得到每个电力塔簇；然后采用RANSAC方法拟合得到电力塔的近似平面，该平面为两档电力线的分割面；最后按照电力塔平面分割电力线点云，得到每一档电力线点云簇。分割结果俯视图见图3。为验证本文方法在电力线缺失情况下的聚类拟合与重建效果，选取了220 kV和500 kV电力线廊道的点云数据进行实验验证。

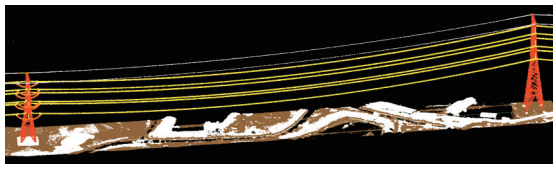


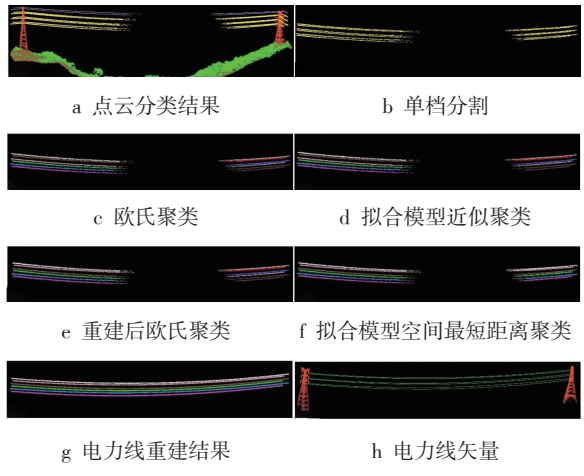
图3 电力线单档分割

2.2 220 kV电力线重建

针对220 kV的电力线数据，本文选取一段中间部分电力线缺失且较稀疏的电力线点云数据。首先按照电塔平面分割单档内的电力线数据（图4b）；再利用欧氏聚类进行第一次点云聚类，产生了14个簇（图4c），根据离散簇到其他簇拟合模型的距离对其进行重新聚类，并合并拟合模型高度近似的簇，通过模型拟合与聚类优化得到12个簇（图4d）；然后分别拟合每个簇并插值重建，并再次通过欧氏聚类保持12个簇（图4e）；最后利用拟合模型空间最短距离聚类方法将电力线中的点云归为6个簇（图4f），并分别进行拟合重建（图4g）。结果表明，220 kV数据的电力线重建效果良好，拟合得到的矢量数据与电力塔具有较高的匹配度。

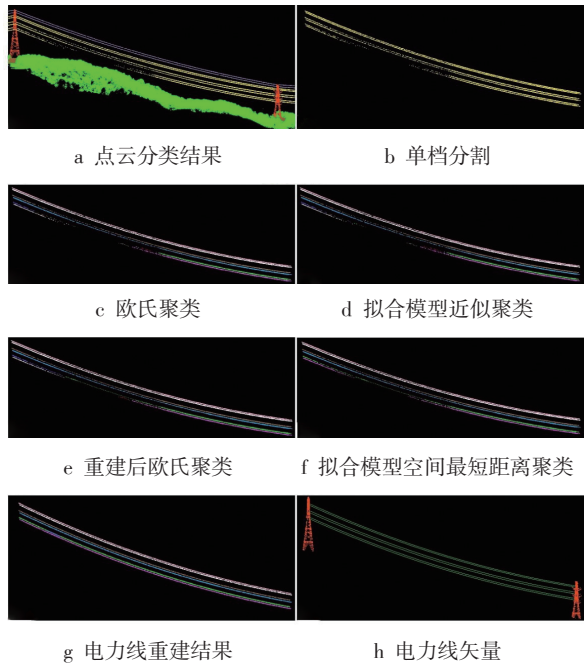
2.3 500 kV电力线重建

针对500 kV的电力线数据，本文同样选取一段存在电力线缺失且较稀疏的电力线点云数据。首先按照电塔平面分割单档内的电力线数据（图5b）；再利用欧氏聚类进行第一次点云聚类，产生了26个簇（图5c），合并离散簇并将拟合模型高度近似的簇归为一簇，通过模型拟合与聚类优化，得到14个簇（图5d）；然后分别拟合每个点云簇并插值重建，再次进行欧氏聚类，得到9个簇（图5e）；最后利用拟合模型空间最短距离聚类方法，将电力线中的点云基本归为一个簇（图5f）。完整的电力线重建结果见图5g，可以看出，500 kV数据的电力线重建效果同样出色，拟合得到的矢量数据与电力塔具有较高的匹配度。



a 点云分类结果　b 单档分割
c 欧氏聚类　d 拟合模型近似聚类
e 重建后欧氏聚类　f 拟合模型空间最短距离聚类
g 电力线重建结果　h 电力线矢量

图4 220 kV电力线拟合重建效果



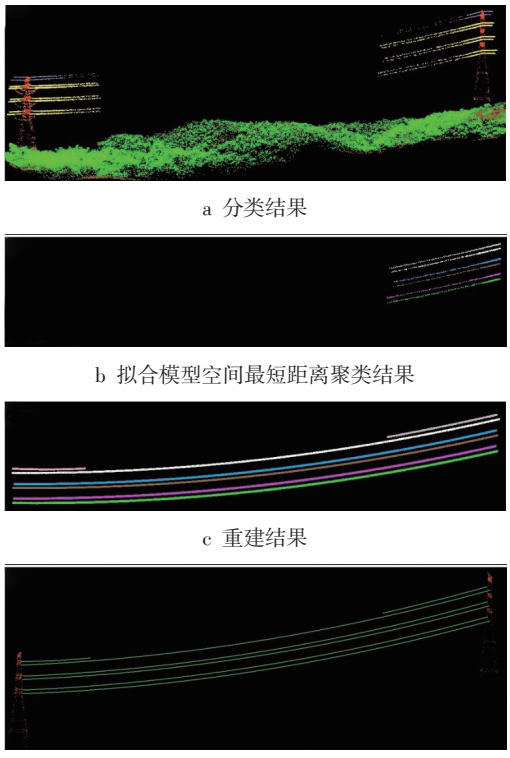
a 点云分类结果　b 单档分割
c 欧氏聚类　d 拟合模型近似聚类
e 重建后欧氏聚类　f 拟合模型空间最短距离聚类
g 电力线重建结果　h 电力线矢量

图5 500 kV电力线拟合重建效果

为进一步提升本文方法的有效性，将另一段存在更严重缺失（大于80%）的500 kV电力线数据进行电力线聚类重建。由图6可知，利用空间最短距离聚类的电力线拟合模型聚类得到7个簇，最上方内侧的

两段点云没有被聚类；重建结果中5根电力线被重建出来，1根未被重建，由此可知，当存在很长电力线缺失的数据时，本文方法也未能完整重建全部电力线；但对于电力线巡航检测而言，电力线主要关注树障危险等问题，而本文仅未对零线进行重建，并不影响火线，因此同样能为电力线树障监测提供有效的数据基础。

本文对220 kV和500 kV两种电压的电力线缺失情况进行了重建，并取得了较好的效果，能有效应用于电力线的巡航检测。在实际应用过程中，为提高算法的鲁棒性和有效性，还需进一步探讨不同研究区域、更多类型输电压线路以及不同点云质量等对算法效果的影响，从而实现对电力廊道输电线的有效提取重建，为电力行业的智能巡航检查提供有效的数据基础。



a 分类结果

b 拟合模型空间最短距离聚类结果

c 重建结果

d 电力线矢量

图6　严重缺失电力线拟合重建效果

3 结　语

针对输电廊道电力线巡航检测的树障预警需求，本文首先采用电塔拟合平面分割单档电力线；然后提出了一种基于空间最短距离的电力线拟合模型聚类方法，有效改善了传统聚类方法在电力线数据缺失情况下的适用性；最后基于悬链线模型实现了电力线的拟合重建。在220 kV和500 kV的输电廊道上开展的实验结果表明，本文算法能有效重建电力线，提升输电廊道点云数据处理效率，减少因数据采集不全造成的外业工作量，为电力巡航监测提供更有力的数据支撑。

参考文献

[1] 杨必胜,韩旭,董震. 点云深度学习基准数据集[J]. 遥感学报,2021,25(1):231-240

[2] 刘新跃,胡科,杨文. 机载激光雷达在地形测绘中的运用[J]. 科技视界,2025,15(2):6-8

[3] 蔡尚书,孔丹,斯林,等. 亚热带森林多平台激光雷达点云数据集:以广西高峰林场主要树种为例[J]. 遥感学报,2025,29(10):2905-2915

[4] 袁超,李元达,陈昌耀,等. 利用自适应邻域特征估算与优选提取电力线[J]. 地理空间信息,2025,23(3):58-60

[5] 沈冰舰,许元新. 激光雷达技术在智慧化城市全息测绘中的应用研究[J]. 中国高新科技,2025(6):25-27

[6] 李强,朱厦,李录,等. 顾及局部空间特征的电力线危险区域检测方法[J]. 地理空间信息,2025,23(5):109-112

[7] Zhang R, Yang B, Xiao W, et al. Automatic Extraction of High-voltage Power Transmission Objects from UAV LiDAR Point Clouds[J]. Remote Sensing,2019,11:1-33

[8] 林祥国,张继贤. 架空输电线路机载激光雷达点云电力线三维重建[J]. 测绘学报,2016,45(3): 347-353

[9] 吴绍华,赵健,杨洋. 基于输电线路点云空间分布特征的电力线提取算法研究[J]. 电力勘测设计,2020(增刊2):111-115

[10] 徐梁刚,虢韬,吴绍华,等. 基于点云数据特征的电力线快速提取和重建[J]. 激光技术,2020,44(2):244-249

[11] 温玉维,邓长勇,曾德培,等. 基于相对密度聚类的激光点云电力线提取方法[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(8):262-264

[12] 王果,王强,徐棒,等. 机载激光雷达电力线提取的布料模拟法[J]. 激光技术,2022,46(1):134-138

[13] 赖旭东,戴大昌,郑敏,等. LiDAR点云数据的电力线3维重建[J]. 遥感学报,2014,18(6):1223-1229

[14] Cheng L, Tong L, Wang Y, et al. Extraction of Urban Power Lines from Vehicle-borne LiDAR Data[J]. Remote Sensing, 2014,6:3302-3320

[15] Jwa Y, Sohn G. A Piecewise Catenary Curve Model Growing[J]. Photogrammetric Engineering Remote Sensing,2012, 78:1227-1240

[16] 吴建军,陈灵,李磊,等. 机载LiDAR点云中电力线的提取和重建研究[J]. 激光技术,2019,43(4):64-69

[17] Liang J, Zhang J, Deng K, et al. A New Power-line Extraction Method Based on Airborne LiDAR Point Cloud Data[C]// Proceedings of International Symposium on Image and Data Fusion,2011

[18] 林先堪,余江顺. 基于点云数据的电力线三维重建技术研究[J]. 机电信息,2021(3):1-3