引文格式：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. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.05.024

顾及局部空间特征的电力线危险区域检测方法

李　强[1]，朱　厦[2]，李　录[2*]，赵建伟[2]，张春光[2]，倪少峰[2]
（1. 国网信息通信产业集团有限公司，北京 102200；2. 国网思极位置服务有限公司，北京 102200）

摘　要：树障隐患是导致输电线路安全问题的主要原因之一，人工巡检效率低下给电力线危险区域检测带来困难。提出了一种顾及局部空间特征的电力线危险区域识别方法。首先计算投影方程和获取地物，再构建KD-tree修正缺失部分，并计算法平面内的地物距离，最后构建局部空间特征的危险点区域生长。实验表明，该方法能提高电力线危险区域识别和建档效率，生成的危险点符合预期，具有较好空间分布特性，精度达到93.60%。

关键词：电力线巡检；LiDAR；局部空间特征；区域生长；危险点检测
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0109-04

Power Line Dangerous Area Detection Method Considering Local Spatial Features

LI Qiang[1], ZHU Xia[2], LI Lu[2], ZHAO Jianwei[2], ZHANG Chunguang[2], NI Shaofeng[2]
(1. State Grid Information & Telecommunication Group Co., Ltd., Beijing 102200, China;
2. State Grid Siji Location Based Service Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: The hidden danger of tree obstacles is one of the main reasons for safety problems of power transmission lines. The inefficient manual inspection presents difficulties of power line in dangerous areas. We proposed a power line dangerous area identification method considering local spatial features. We calculated the projection equations, and obtained terrain objects at first. Then, we constructed KD-tree to correct the missing parts, and calculated the terrain object distance in the normal plane. Finally, we constructed a dangerous point area growth with local spatial features. The experimental results show that this method can improve the efficiency of power line dangerous area identification and archiving. The generated dangerous points are in line with expectations, have good spatial distribution features, and the accuracy reaches 93.60%.

Key words: power line inspection, LiDAR, local spatial feature, region growth, dangerous point inspection

随着经济的迅猛发展，我国输电线路规模不断扩大。2023年7月中电联发布的《2023年上半年全国电力供需形势分析预测报告》[1]指出，太阳能发电、核电、风电、火电、水电投资同比分别增长113.6%、56.1%、34.3%、13.0%和10.6%。随着发电形式的多样化，输电能力不断提高，电网工程建设完成投资2 054亿元，同比增长7.8%。输电线路是日常生产、生活的重要电力运输设施，也是电网系统发挥电力调配的重要依托[2]。输电线路架设的位置往往地形复杂、自然环境恶劣，且经常受到冰雪、山火、台风、雷击、材料老化和人为因素的影响[3]，这些情况需通过相关部门或人员的线路巡检，掌握精准的隐患信息并及时进行修复或处理[4]。实际中电力塔和电力线附近树木接触电线引发火灾的事故经常发生[5]。复杂的环境隐患和潜在的安全风险给电力系统，尤其是给穿越森林区域的电力走廊系统造成了极大的影响。为做好电力系统预警和防护工作，电力行业每年需花费近千万元巡查和维护电力线路。因此，LiDAR技术的应用对于电力线巡检具有重要意义，能为电力行业带来显著的经济效益和技术进步。同样，自动、快速、完整的危险点提取在电力线巡检中具有广阔的应用前景。

1　LiDAR技术与危险区检测

传统输电线路巡检的工作环境艰苦、人身安全面临挑战，且需要携带沉重的检测设备，巡视效率低、工作强度大、不能准确发现树障隐患。电力线巡检还可采用遥感影像[6]、有人或无人直升机[7]、无人机图像[8-10]等视觉方法。通过LiDAR可全天候获取大量高精度的输电线路点云数据[11-12]。相较于二维遥感影

项目来源：国网信息通信产业集团有限公司两级协同研发资助项目（52680021N005）。
第一作者简介：李强（1966—），博士，教授，研究方向为新型电力系统、电力人工智能、源网荷储协同及多能耦合、移动互联、电网时空智能等，E-mail：liqiang@sgitg.sgcc.com.cn。
通信作者：李录（1993—），硕士，工程师，主要研究方向为卫星遥感智能解译，E-mail：1031178412@qq.com。

像，点云数据包含测区地物精准的三维信息，提供了从空间分布特性上分离地物的可能性[13]。获取的电力线点云密度高、不受光照影响且包含周边地物空间特征，通过分析和处理可及时、准确检测树木与电力线之间的安全距离。利用点云处理算法（计算走向、弧度等特征[14]）能迅速提取电力线，同时构建电力线、电力塔模型[15]，达到对电力线周边空间地物识别和危险区域高效分析的目的。

安全距离检测是根据特定标准确定目标物体与电力线之间的安全运维距离[16]。首先检测不符合安全距离标准的目标物体，再结合多源数据找出潜在的危险点[17]，然后为安全人员提供准确的危险点信息，最后及时清理危险点，确保输电线路的安全运行。众多学者[18-22]利用电力线点云特征进行电力线巡检研究，但在处理时往往存在环境复杂特征提取难和计算量大等问题，效率下降明显，也未充分考虑电力线周围的空间地物情况。基于此，本文提出了一种顾及局部空间特征的电力线危险区域检测算法。

2 电力线周边点云的空间特征与技术路线

2.1 数据来源与预处理

本文采用两个数据集，数据集中的点云均由配备激光扫描仪的HawkScan X3无人机采集。由于该项目的保密性，收集地点不能公开。无人机以24 km/h的速度在150 m的高度飞行，在700 kHz的频率下实现了70°的最大扫描角。数据集I和II中的点云总长度分别约为13 km和9 km，将数据集I的点云划分为30个片段，数据集II划分为20个片段，每个片段的长度均约为400 m。由于仪器或环境问题，三维激光扫描仪获取的地物点云数据可能包含异常点，这类点往往与地物本身存在差距，与观测结果明显不同（图1右侧虚线框）。在进一步处理前，需剔除离群值数据，为地物、电力线和电塔赋予相应的标签，得到清晰准确的地物分类点云数据[23]。

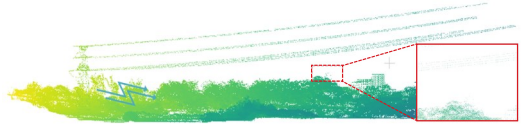


图1 研究区初始点云数据的异常点

2.2 电力线周边空间点云特征分析

地物类型和地形情况不同，对电力线危险区域的判定也存在不同，地形起伏较大且布满高大树木区域的危险系数往往大于地形平缓区域。由于树木的生长性，其危险系数也大于相对稳定的建筑物。通过分析不同地物和地形区域的特点，构建电力线指定范围内不同的局部空间特征，以满足危险区域的精细化划分。将电力线投影至地面，提取单股电力线的同时对投影区域附近的空间地物进行点云分割，得到大致的周边地物特征。本文主要考虑地物和地形类型，地物类主要分为低矮植被、建筑物和高大植被（图2），分别记为 I_1 、 I_2 和 I_3 ；地形类主要分为平坦地形和起伏地形（图3），分别记为 F_1 和 F_2 。

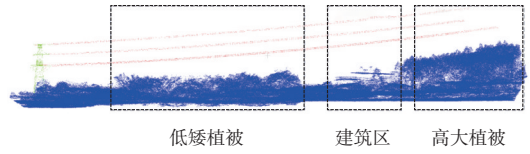


图2 研究区一地物类型划分示意图

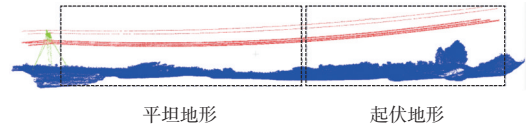


图3 研究区二地形情况划分示意

在地物和地形提取过程中，采用滤波算法[24]将植被、建筑等地物与地面区分开，确定正确的高程，避免后续不同高程对树障分析带来影响。同时，将电力线点云新增一列周边地物属性标签，将对应范围的空间特征 I、F 标签赋值给电力线点云，此时电力线点云具有局部空间属性，非地物、地形范围点云该列属性为空。

2.3 技术路线

计算电力线与地物之间的交跨距离是判断输电线路风险的主要手段，根据安全规范，将电力线距离地物的最大安全距离记为危险距离阈值，电压不同阈值也不同。技术路线见图4。

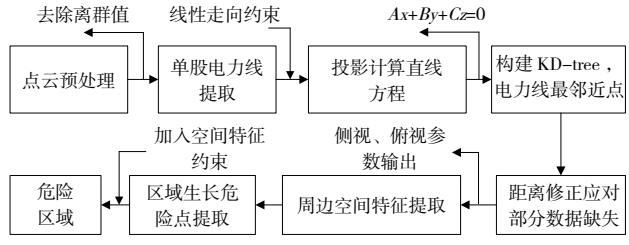


图4 危险区域计算技术路线

电力线点云可能存在部分缺失和干扰点，直接计算电力线点至目标点的距离可能导致风险识别不全，因此在已识别的单股电力线的基础上，本文设计了一种稳健的电力线数据修复计算方法（图5）。在最近点距离的基础上，采用一种基于两点连线与电力线夹角的近似距离修正方法，能在数据缺失时近似推测缺失位置对应的最近距离。

计算电力线上每个点 P_i 沿电力线走向的方向向量 $\boldsymbol{I}_i$ ，再计算该点的法平面 n_i ，最后在法平面内计算电

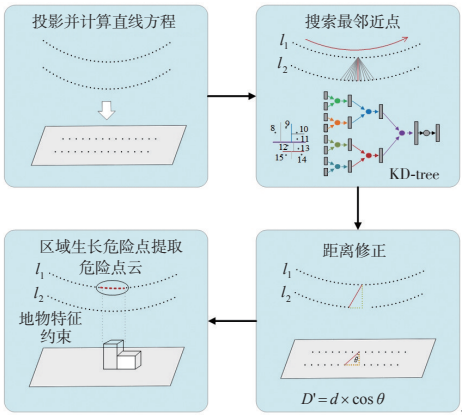


图 5　部分关键步骤示意图

力线点与地物点之间的距离。

$$D_{ij}=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+(z_i-z_j)^2} \tag{1}$$

将 D_{ij} 与阈值 T_U 进行对比，得到初始危险点；再结合局部空间特征和区域生长算法，考虑局部地物、地形影响因素，确定连续的危险点云簇和潜在的危险点；并需将离散的危险点区分开，仅对满足要求的点云簇进行危险预警，避免干扰点导致的误预警。区域生长算法[25]是将特征相似的点云划分为一类，在每个区域筛选出种子点 P_0 作为生长的起点，再以 P_0 为中心，在附近邻域中寻找与其类似的数据点 P_m 生长为种子点云所在区域中的点集 P_{m+1}, P_{m+2}, …, P_{m+k}，新的数据点成为下一轮生长的种子，不断迭代，直至没有满足条件的点可以生长。本文将影响因素 I、F 作为权重信息，生成 $P_i(x_i, y_i, z_i, I_i, F_i)$，若危险点地物属性为建筑物或平坦地形，则限制危险点的生成；若为树木或起伏地形，则增加区域生长的范围。

TP 为算法正确将其识别为危险点的数量，FP 为算法误将其识别为危险点的数量，TN 为算法正确将其识别为非危险点的数量，FN 为算法误将其识别为非危险点的数量，则算法检测的危险点准确率为：

$$\text{Accuracy}=(TP+TN)/(TP+FP+TN+FN) \tag{2}$$

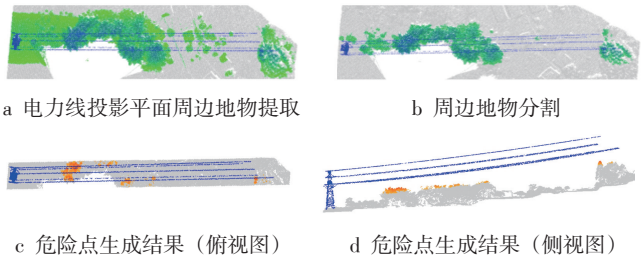
3　实验结果

本文从 LiDAR 获取的电力线周边点云数据空间特征着手，选定具有典型地物和潜在风险的电力走廊区域进行实验。研究区一中存在 I_1、I_2 和 I_3 等地物；研究区二中地形存在 F_1 和 F_2，二者特征相对丰富，生成的不同空间特征参数可用于后续的危险区域生长。

1）不同地物类型中轴线危险点生成结果。研究区一危险点的生成过程见图 6，可以看出，I_1 部分存在较多的危险点，I_3 从侧面来看虽离电力线较近，但并不在电力线的平面投影范围，因此产生的危险数据点较少。

2）不同地形类型中轴线危险点生成结果。研究区二危险点的生成过程见图 7，可以看出，F_1 处生成了部分危险点，但数量不多；F_2 处集中了大部分危险点，且分布较集中。

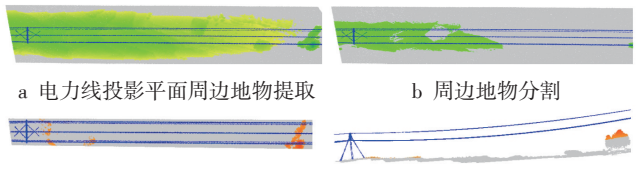
3）顾及局部空间特征的电力线危险区域精度和分维分析。上述两个结果符合方法预期，在局部空间地物特征约束下的危险点生成具有更强的电力线走向信息和空间集中程度。本文对研究区是否采用空间约束得到的结果进行了精度对比（表 1），研究区整体危险点检测的准确率为 93.60%；I_2 的提取精度无明显提高，可能是由于此处为建筑物，是否采用空间约束区别并不大，其他研究范围均有较明显的精度提升，说明在林木区域采用空间约束对精确提取危险点云具有促进作用。



a 电力线投影平面周边地物提取　　b 周边地物分割

c 危险点生成结果（俯视图）　　d 危险点生成结果（侧视图）

图 6　研究区一危险点生成过程



a 电力线投影平面周边地物提取　　b 周边地物分割

c 危险点生成结果（俯视图）　　d 危险点生成结果（侧视图）

图 7　研究区二危险点生成过程

表 1　研究区域检测结果精度分析/%

检测区域	子区域	无空间约束下提取结果准确率	有空间约束下提取结果准确率
研究区一	I_1	89.60	93.80
	I_2	92.50	92.70
	I_3	89.30	92.90
	平均	90.47	93.13
研究区二	F_1	89.20	94.10
	F_2	88.60	94.50
	平均	88.90	94.30
整体平均		89.84	93.60

从两个区域的提取结果来看，研究区二结果的提升幅度大于研究区一，可能的原因在于，研究区二的地物类型较少，相互之间的干扰较少；沿电力线的走向范围，地物影响大于地形影响。整体来看，对电力线之下地面和地物进行空间提取，并作为影响因素进

行约束，可将精度由89.84%提升至93.60%，说明考虑地物空间特征有助于危险点检测。

结合局部空间特征，可从两个维度对电力线巡检进行评估。当 $D_{ij} > T_U$ 且周围地形平坦或无显著高大地物时，认为此处电力线当前危险程度和潜在风险均较小；当 $D_{ij} > T_U$ 但周围地形起伏较大或有高大树障时，认为此处电力线当前危险程度较小、潜在风险较大；当 $D_{ij} < T_U$ 且地形起伏大或具有高大地物时，认为此处电力线当前危险程度和潜在风险均较大；当 $D_{ij} < T_U$ 但地形平坦或具有低矮树障时，认为此处电力线当前危险程度较大、潜在风险较小。

4 结 语

本文基于LiDAR采集的电力线点云数据，在不同研究区进行了实验，提出的顾及局部空间特征的电力线危险区域检测方法实现了考虑电力线附近局部空间情况下的危险距离计算，具有很好的适用性。同时，面对电网巡检的精细化管理需求，该方法既能有效识别电力线的危险范围，又能从地物和地形角度对当前情况进行发展趋势建档，为后续电力线维护和风险评估提供了很好的依据。地物分割和地形提取的不准确是妨碍当前研究的两个问题，后续将考虑对植被进行更加细致的计算，如植被所在区域、植被生长模型和植被分类等，进而根据植被生长状态进行地物分割和地形提取。

参考文献

[1] 中电联统计与数据中心. 中电联发布《2023年上半年全国电力供需形势分析预测报告》[EB/OL]. (2023-07-25)[2023-11-15]. https://cec. org. cn/detail/index. html?3-323217

[2] 白娟. 基于激光扫描数据的架空输电线路周边物体对线路的安全影响研究[D]. 保定:华北电力大学,2015

[3] 胡湘,陆佳政,曾祥君,等. 输电线路山火跳闸原因分析及其防治措施探讨[J]. 电力科学与技术学报,2010,25(2):73-78

[4] Miller C,Plucinski M,Sullivan A,et al. Electrically Caused Wildfires in Victoria, Australia Are Over-represented When Fire Danger Is Elevated[J]. Landscape and Urban Planning,2017,167:267-274

[5] 陆佳政,刘毓,杨莉,等. 输电线路山火发生规律分析[J]. 消防科学与技术,2014,33(12):1 447-1 451

[6] 穆超. 基于多种遥感数据的电力线走廊特征物提取方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2010

[7] 彭向阳,钱金菊,麦晓明,等. 大型无人直升机电力线路全自动巡检技术及应用[J]. 南方电网技术,2016,10(2):24-31

[8] 张吴明,杨又华,阎广建,等. 机载多角度多光谱成像技术在电力系统中的应用[J]. 华中电力,2006,19(6):1-2

[9] 张勇. 架空输电线路障碍物巡检的无人机低空摄影测量方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2017

[10] 朱钱鑫,朱钱肖,张丙珍,等. 复杂地物背景下的无人机激光雷达电力线提取方法[J]. 电工技术,2022(9):54-56

[11] Mostafa A, Derek L. Automatic Object Extraction from Electrical Substation Point Clouds[J]. Remote Sensing, 2015,7(11):15 605-15 629

[12] 王维坤,张乐,张军,等. 基于三维激光点云的电力线巡检技术研究[J]. 科学技术创新,2023(26):80-83

[13] 张娟,张洁,燕正亮,等. 基于层次分布的机载激光点云导线提取方法[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(3):53-55

[14] 张昌赛. 机载LiDAR输电线走廊点云数据自动分类和树障预警分析方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016

[15] 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(22):26-34

[16] Zhu L,Hyyppä J. Fully-automated Power Line Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds in Forest Areas[J]. Remote Sensing,2014,6(11):67-74

[17] 张睿卓. 基于多源数据的林区电力走廊安全风险评估方法[D]. 武汉:武汉大学,2020

[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

[19] 俞科杰. 输电线路三维激光雷达测量技术的应用研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2015

[20] Shi Z, Lin Y, Li H. Extraction of Urban Power Lines and Potential Hazard Analysis from Mobile Laser Scanning Point Clouds[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020,41(9):3 411-3 428

[21] 李啸啸,范宝伟. 机载LiDAR点云电力线数据处理及安全检测[J]. 测绘地理信息,2020,45(1):110-113

[22] 徐博,刘正军,王坚. 基于激光点云数据电力线的提取及安全检测[J]. 激光杂志,2017,38(7):48-51

[23] Li W,Luo Z P,Xiao Z,et al. A GCN-based Method for Extracting Power Lines and Pylons from Airborne LiDAR Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021,60:1-14

[24] Cai S S, Zhang S H, Zhang W M, et al. A General and Effective Method for Wall and Protrusion Separation from Facade Point Clouds[J]. Journal of Remote Sensing,2023(69): 26-29

[25] Mehnert A, Paul J. An Improved Seeded Region Growing Algorithm[J]. Pattern Recognition Letters, 1997, 18(10): 1 065-1 071