

输电杆塔塔型智能识别与台账的智能提取研究

黄宇航,杜永永,熊杰,张博洲,李倩竹,刘锐
(国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041)

摘要:杆塔作为输电线路的主心骨,其运行安全重于泰山,因此利用智能化的方式获取高压杆塔的台账参数信息对快速掌握杆塔的运行状态具有重要的意义。首先,利用分类后的输电线路三维激光点云数据,研究了常规塔型的高精度智能识别算法;然后,提出了杆塔横担几何尺寸、杆塔塔高等台账信息的智能提取方法;最后,通过塔型的识别、杆塔台账信息提取以及线路拟合的案例验证了所提方法的应用价值。结果表明,所提方法可实现高精度的输电杆塔台账信息提取,进而快速确定杆塔的运行状态,提高运维质效。

关键词:输电杆塔;杆塔塔型智能识别;杆塔台账智能提取

中图分类号:TM 726.3 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)01-0084-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240113

Research on Intelligent Recognition of Transmission Tower Types and Intelligent Extraction of Its Account Information

HUANG Yuhang, DU Yongyong, XIONG Jie, ZHANG Bozhou, LI Qianzhu, LIU Rui
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: As the backbone of transmission lines, the operation safety of towers is much important. Therefore, it is of great significance to obtain the information of HV towers' account parameters by intelligent means to quickly grasp the running state of towers. Firstly, high-precision intelligent recognition algorithms for conventional tower types are studied by using the classified 3D laser point cloud data of transmission lines. Then the intelligent method for extracting the information of cross arm of towers is proposed. Finally, the application value of the proposed method is verified by the recognition of tower type, the extraction of tower account information and the line fitting case analysis. The results show that the proposed method can achieve high-precision information extraction of transmission tower account, so as to quickly determine the running state of lines and improve the quality and efficiency of operation and maintenance.

Key words: transmission towers; intelligent recognition of tower type; intelligent extraction of tower account information

0 引言

随着城市用电负荷需求的逐年增加,电网必须相应地提高自身的容量,随之而来的便是更多、更高电压等级的输电线路的建设。高压杆塔是构成输电线路的骨架,然而随着线路运行年限的增加,杆塔可能存在沉降、滑移等本体缺陷^[1-2]。倘若因为本体

缺陷导致杆塔杆材脱落、安全电气距离不足甚至倒塔,则会对电网系统带来不可估量的毁灭性后果^[3-5]。因此,良好地掌握杆塔运行状态同样关乎线路运行安全。然而,日益增加的线路运维体量、复杂的运行环境以及运维人员的老龄化等问题,给输电线路运维方式的高质效转变带来了更严峻的挑战^[6-9]。

目前,大部分运维人员仍然需要到达杆塔所在地,对杆塔进行近距离的人工体检方可获取杆塔的

运行状态。工程中普遍采用全站仪对杆塔的台账参数进行测量。然而采用全站仪测量流程较为繁琐,受地形制约较大且人工、时间成本较高,测量效率较低^[10-12],随着电力系统的体量日益增加,已无法满足智能化输电运维的要求。近年来,随着无人机激光雷达应用的普及^[13],激光雷达测量技术已广泛应用到输电线路勘测和巡检中^[14-16],其所获得的三维点云数据将极大程度上提高运维质效。在此基础上,有科研人员提出 PointNet++ 深度学习网络算法,直接从点云数据的原始特征入手,分析杆塔点云数据的全局特征与局部特征,进而根据点云分布特征或点云分布的疏密对其分类,实现杆塔点云数据的预处理^[17-19]。

智能高效的线路杆塔运维模式,要求运维人员能够利用智能化手段,快速、精确地识别杆塔类型并自动提取杆塔的台账参数,为进一步分析杆塔层面的缺陷与隐患奠定基础。下面基于输电线路三维点云数据,研究杆塔塔型的精确识别算法,并在此基础上计算杆塔横担几何尺寸、横担间距等参数信息,实现杆塔台账信息的智能提取,最后应用该算法于实际工程中来提高运维质效。

1 基于杆塔几何特征的塔型智能识别

所提出的塔型识别方法流程如图 1 所示。

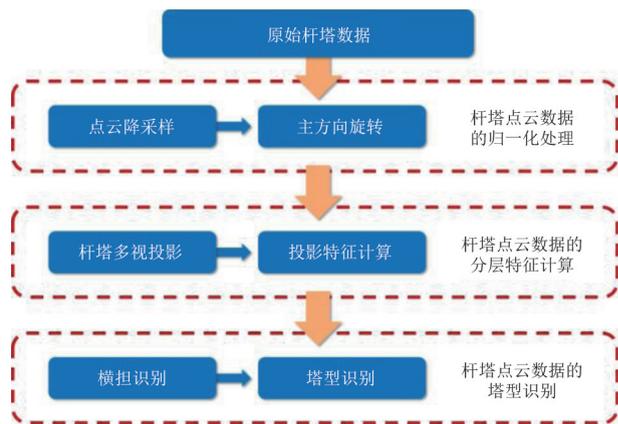


图 1 输电杆塔识别流程

由图 1 可见,该方法主要包含以下几个步骤:

- 1) 点云归一化:通过降采样以及多视旋转实现点云归一化处理。
- 2) 杆塔特征计算:在完成归一化后,对杆塔进行降维投影,再对投影点云进行体素化分割,以便于后续特征计算。

3) 塔型识别:获取每个网格内点云的几何特征,分析相邻体素的特征变化以及关联,结合多塔型样本数据几何特征,实现杆塔塔型的准确识别。需要特别注意的是,由于实际工程中的塔型异变种类过多但比例并不多,因此所提出的塔型识别算法仅针对猫头塔、酒杯塔、门型塔、干字塔、羊角塔 5 种常规塔型。

1.1 点云归一化

激光雷达系统获取的点云密度受多方面影响,不同型号扫描仪获取的点云密度存在差异,同款设备获取的点云密度也会受无人机飞行速度、飞行高度等因素影响。为了消除不同密度特征对塔型识别的干扰,在不破坏杆塔自身几何结构特征前提下,通过体素采样算法对点云进行降采样。

受输电线路设计影响,输电杆塔在实际建设过程中往往具备不同的朝向,使得杆塔点云在 XOY 面上呈现不同方向排布。为了利用杆塔在结构上的对称性,以获取不同方向上杆塔特征,需要将杆塔进行旋转处理。

利用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 获取旋转角度 θ 用于点云旋转。将杆塔点云质心作为点云旋转原点坐标,投影点云质心作为投影后的原点坐标,旋转后点坐标计算如式 (1) 所示,旋转效果如图 2 所示。

$$\begin{cases} x'_i = x_i \cos \theta - y_i \sin \theta - C_x \\ y'_i = x_i \sin \theta + y_i \cos \theta - C_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_i, y_i 分别为单独聚类体杆塔点云中第 i 个点的横、纵坐标值; x'_i, y'_i 分别为第 i 个点旋转后的点云横、纵坐标值; C_x, C_y 为投影点云质心坐标。

经过上述计算后,便可将 3 个方向不对称的三维点云数据旋转为以 Z 轴对称的点云数据,方便后续的计算。

1.2 杆塔塔头点云数据分割

不同类型的输电杆塔具备各自的几何结构特征。在完成点云旋转后,首先对点云进行降采样投影,以获取杆塔的正视投影图,如图 2 所示。常见的输电杆塔塔型可通过塔身、塔头以及横担的几何特征加以识别。常见杆塔塔身结构有 V 型塔身、门型塔身、梯型塔身,如图 3 所示。

识别塔身类型能够辅助确认杆塔类型。如 V 型塔身往往只有 V 型塔才具备,而门型塔身同样是门型塔独有的点云特征。为了识别塔身的点云结构

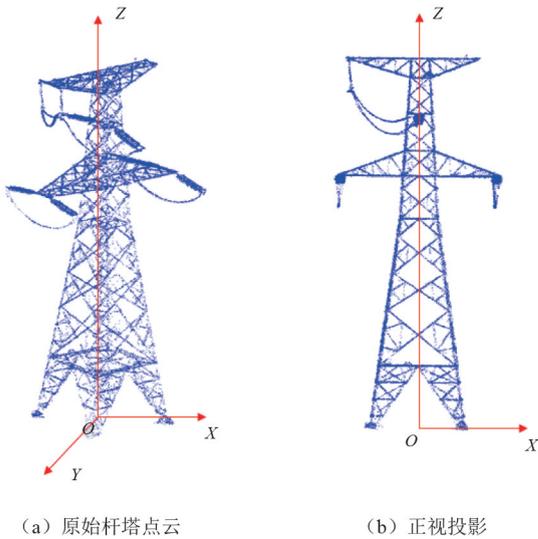


图 2 干字塔旋转归一化效果

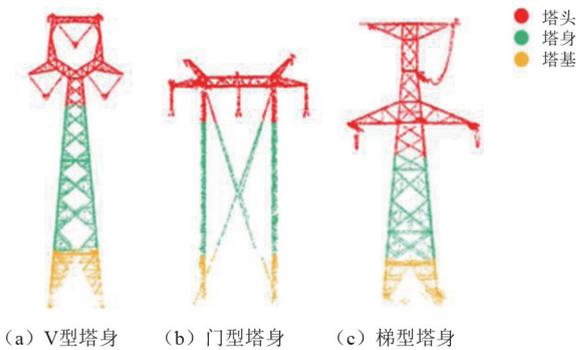


图 3 常见杆塔结构

数据,通过统计所构建的杆塔点云高程直方图,对主视投影图与侧视投影图进行特征分析。通过对杆塔自下而上分层,根据电压等级调整分层间距;分层后点云会有明显的疏密段,定义云分布较密的层为一段,分段统计投影点云的几何特征,将塔身与塔头分割开来分别进行识别。点云对应的层数位置如式(2)所示。

$$L_n = \text{ceil}[(Z_n - Z_{\min})/2] \quad (2)$$

式中: L_n 为第 n 个点云数据点所在层数; Z_n 为第 n 个点云数据点的高程值; Z_{\min} 为点云数据集中最低点的高程值;ceil为向上取整函数。

各层杆塔点云数据的长宽具备线性规律,因此可通过几何特征区分塔身塔头,进而计算各层点云几何特征以及点云分布特征。图4展示了两层横担干字塔的 XOZ 面投影特征,红色代表塔头在主方向 X 轴的投影长统计,蓝色代表塔身在 X 轴的投影长统计。可以看出梯型塔身部分几何尺寸在 X 轴上投影由下往上呈现递减分布规律,在到达塔头位置时,其投影几何尺寸产生了长度突变。长度突变率

增大,以此区分塔身塔头点云数据。式(3)为投影主方向长度突变率。

$$R_n = \frac{l_{x_n}}{l_{x_{n-1}}} \quad (n > 1) \quad (3)$$

式中: l_{x_n} 为第 n 层点云数据的投影长; $l_{x_{n-1}}$ 为第 $n-1$ 层点云数据的投影长; R_n 为投影主方向长度突变率。

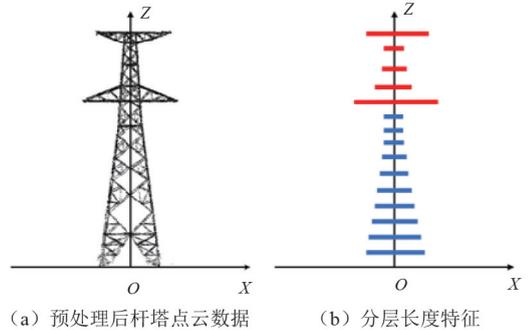


图 4 两层干字塔分层投影特征

由图4(c)可见,由下而上 R_n 的大小不等,分析 R_n 的分布规律便可识别杆塔塔头的数据特征,进而快速确定该杆塔所对应的杆塔塔型。

1.3 杆塔塔型识别

不同塔型的杆塔横担具备不同的结构特征,这些结构特征会体现在点云分布中。由于塔型结构复杂,横担层往往是局部范围内的极大值,因此,依据主方向投影长很难准确识别横担位置及层数。为了研究杆塔点云分布特征,在杆塔分层基础上对各层横担进行体素化,以 1 m^3 的体素格网为单位进行点云划分,分别统计各体素格网中的点云分布规律。遍历点云数据分别获取每个体素格网的最小 X 坐标 x_{\min} 、最小 Y 坐标 y_{\min} 及最小 Z 坐标 z_{\min} ,逐点划分其所属三维格网。具体计算如式(4)所示。

$$\begin{cases} G_x = \text{ceil}[(x - x_{\min})/l] \\ G_y = \text{ceil}[(y - y_{\min})/l] \\ G_z = \text{ceil}[(z - z_{\min})/h] \end{cases} \quad (4)$$

式中: x, y, z 分别为点云数据在三维空间里面的 X, Y, Z 方向坐标; l 为体素边长; h 为体素高度; G_x, G_y, G_z 分别为点云在各体素的相对坐标点云所属体素的行、列、层。

图 5 展示了酒杯塔与猫头塔的横担层体素化后的点云分布特征,最上层横担承担地线固定,该层点云在几何尺寸上具备局部极大值。其余横担则作为输电线的固定支撑,在几何特征中具备分布连续性,即各体素区间内都存在点云分布。因此,通过统计相邻层点云的几何特征变化规律,可进行杆塔横担位置及层数的确定。

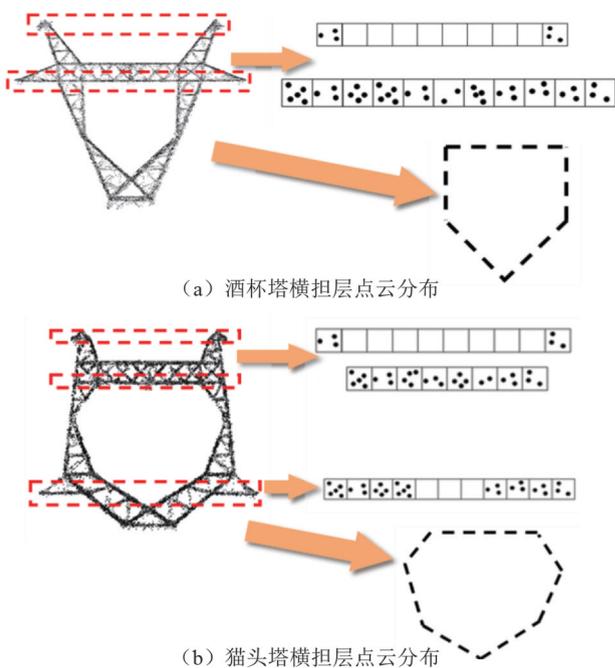


图 5 酒杯塔与猫头塔的横担层点云分布

猫头塔与酒杯塔由于塔头设计构造不同,中间存在镂空结构设计,体现在体素化格网中的中间塔头区域存在较多的空格网。此外,通过统计非空体素格网在该层点云中的比例,可以区分横担所在位置。首先,最上层均为连接地线的横担层,酒杯塔和猫头塔在中心区域均存在较多空体素格网,但酒杯塔最下层横担点云具备强连续性,体现在该层点云均为非空体素格网,而猫头塔下层横担中心区域存在明显的空体素格网。此外,酒杯塔只有两层横担,而猫头塔则具有三层横担,因此可通过横担层数进行识别。

图 6 展示了干字塔和羊角塔的横担层体素化后的点云分布特征。干字塔和羊角塔同样具备多

层横担,且各层横担体素格网均具有较强的连续性及明显的主方向长度突变率。通过各层主方向突变特征,可以确定横担层数。塔头结构设计的差异性决定了塔顶层横担分布于两侧“羊角”位置,其剩余体素网格中不存在或仅存在少量点云。相较于干字塔的顶层横担各体素格网中均存在点云分布,两者存在明显特征差异,可利用此差异识别羊角塔及干字塔。

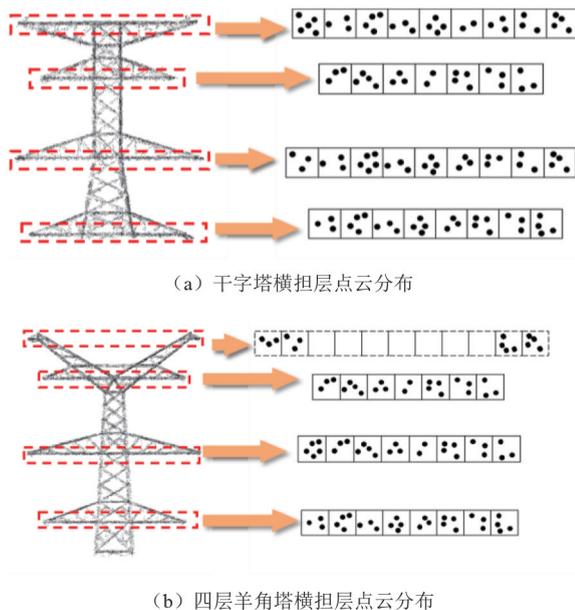


图 6 干字塔和羊角塔的横担层点云分布

通过上述方法,即可利用杆塔的三维点云数据,结合不同塔型的特征分布,识别出点云所对应的杆塔塔型。由于门型塔的点云数据结构较上述塔型来说较为简单,更容易识别,因此其识别方法无庸赘述,点云分布如图 7 所示。

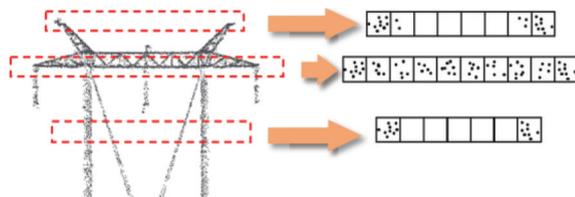


图 7 门型塔的横担层点云分布

进一步,可利用上述方法提取杆塔以及线路的台账信息,快速确定杆塔的运行状态。

2 输电杆塔台账参数的智能提取

杆塔的台账参数主要包括杆塔横担几何尺寸、

呼称高、横担间距、塔倾角等,这里主要介绍杆塔中心点的提取以及杆塔横担参数的提取。

2.1 杆塔中心坐标的计算

由于杆塔塔身结构分明,且其点云存在较少遮挡所引起的缺失情况,而杆塔的塔头点云数据,则有更为明显固定的几何特征。因此通过塔身的点云数据进行杆塔中心点坐标的计算。

在第 1.2 节中获取杆塔塔身点云后,通过质心量算方法获取杆塔塔身质心坐标,即杆塔中心坐标。质心量算是描述地理空间分布最可用的单一量算之一,通过质心量算可有效减少因噪点引起的杆塔中心点计算位置偏移。对杆塔塔身点云数据进行加权平均运算可实现杆塔中心点获取,如式(5)所示。

$$\begin{cases} X_G = \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i} \\ Y_G = \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i} \end{cases} \quad (5)$$

式中: X_G 、 Y_G 为目标的质心坐标; i 为杆塔塔身点云序号; w_i 为杆塔点云离散权重; x_i 、 y_i 为点云坐标。

通过上述方法,即可确定杆塔的质心坐标,由此确定杆塔的标准位置,进而提取其他的杆塔参数。

2.2 杆塔横担参数计算

为降低噪点对杆塔横担参数识别造成的影响,基于第 1.3 节中识别的杆塔横担区间数据,首先通过离群点滤波进行噪点剔除;进一步再通过构建各层横担点云数据的最小包围盒拟合横担的尺寸,其构建流程如下:

1) 利用 PCA 方法获得点云的 3 个主方向,获取质心。协方差特征计算方法为:将点云存储于 $k-d$ 树中,通过 k 近邻搜索邻域点进行协方差矩阵计算,通过构建协方差矩阵,计算出特征值 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$) 以及与其对应的特征向量 v_1 、 v_2 、 v_3 。

2) 利用第 1.3 节和第 2.1 节中所获得的横担主方向和质心坐标,计算出点云旋转角度 θ ,计算方法如式(6)所示。将输入点云转换至原点,且主方向与坐标系方向保持一致,建立变换到原点的点云的包围盒。

$$\theta = \arccos \frac{v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \quad (6)$$

进一步将生成的包围盒依照旋转角逆向旋转,与原始点云进行匹配。生成的包围盒效果如图 8 所示,通过计算包围盒尺寸以确定横担的长宽数据,如图中 l 和 w 所示。

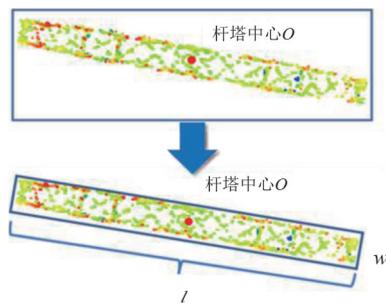


图 8 横担包围盒设计

完成各层横担包围盒设计后,即可通过包围盒边界求得横担长宽,通过相邻横担层的高程值可求得横担间距,如图 9 所示。

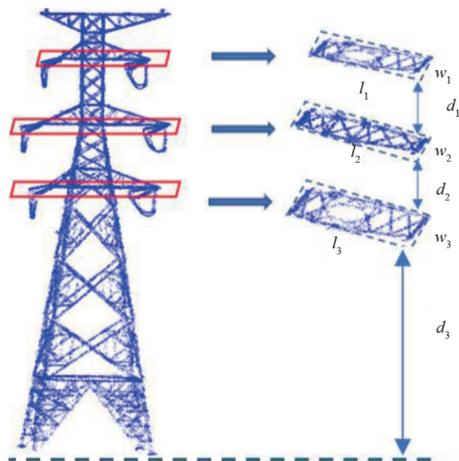


图 9 杆塔横担间距

在上述方法的基础上,利用杆塔塔头的几何特征,结合第 1 章所识别出的塔型信息,便可进一步计算塔全高、呼称高等杆塔台账信息。结合相邻杆塔的几何位置关系,利用第 2.1 节所计算的质心坐标,便可提取杆塔的转角、档距等参数信息,计算方法与第 2.1 节、第 2.2 节类似,在此不再赘述。

在利用智能化手段快速获取了杆塔的台账信息后,结合输电线路的点云信息,即可进一步进行线路通道的隐患分析,全方位快速高效地获取线路运行状态,及时发现线路异常,保障线路安全。

3 实际工程应用

3.1 杆塔的塔型识别及台账提取工程应用

为实现杆塔识别及参数提取,使用 Visual Studio 2019 C++ 11 在标准环境下开发算法。实验平台的 CPU 为 Intel(R) Core(TM) I7-9700K,运行内存为 16 GB,系统为 WIN10。为验证算法的有效性,选取了 220 kV 丹连一二线杆塔数据集作为实验数据。该线路长 11.5 km,具有 34 基杆塔。利用扫描范围最大可达 300 m,具备 360°全范围测量功能的 CBI-300P 激光雷达系统,搭配 MIRACLE 3 无人机系统采集得到杆塔点云数据。

对采集到的数据进行归一化处理。首先降低数据集杆塔点云密度,再根据式(1)将杆塔点云数据旋转至 XOZ 平面,使得杆塔主方向大致平行于 X 轴,以便于后续特征分析。根据第 1.3 节的方法,在通过构建分层几何特征对各层点云进行体素化后,确定横担位置及所在层数,以实现不同杆塔类型的准确识别。

在识别杆塔塔型后,结合已有杆塔台账信息,利用 Alundar Platform 点云处理软件量测杆塔横担长宽信息作为杆塔参数标准值。将参考值与通过所提的杆塔参数计算算法自动提取杆塔的台账参数进行对比,以检验算法的精度。结果表明,本次共成功识别 31 基杆塔,识别成功率为 91.12%。由于篇幅原因,表 1 仅展示 4 号、8 号及 28 号杆塔塔型识别结果以及参数提取结果,表 2 为这三基杆塔实际运行台账信息。图 10 为上述三基杆塔的分类后点云照片。

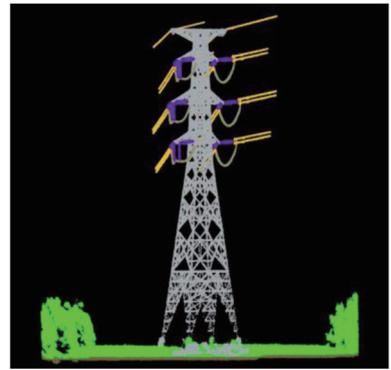
表 1 杆塔塔型识别与参数提取结果(部分)

杆塔号	杆塔类型	横担层数	用途	杆塔参数提取成果				
				杆塔高度/m	呼称高/m	转角/(°)	倾斜角/(°)	档距/m
4	干字	4	耐张塔	56.023	45.600	176.160	0	348.800
8	羊角	4	直线塔	58.959	48.495	177.377	0	400.925
28	羊角	4	直线塔	61.775	50.022	179.994	0	424.526

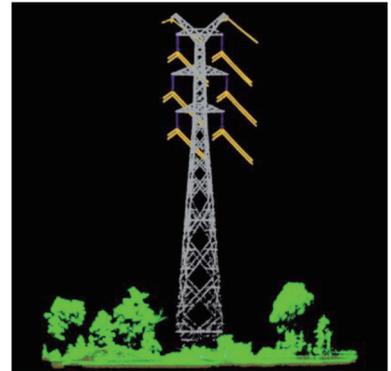
分析图 10 与表 2 的数据可知,所提出的方法可准确识别横担层数。对比表 1 和表 2 的参数信息可知,所提方法识别出的台账信息精度更高,误差小于 1.6%。所提的点云智能提取方法与目前工程常用的全站仪测量方法对比如表 3 所示。

表 2 220 kV 丹连一二线线路运行台账信息(部分)

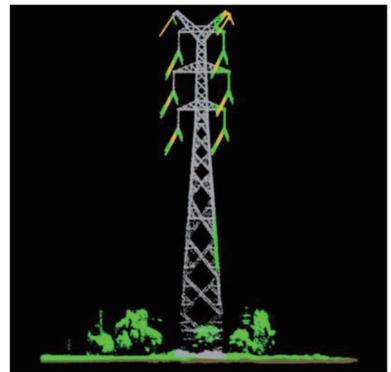
杆塔号	横担层数	杆塔高度/m	呼称高/m	转角/(°)	倾斜角/(°)	档距/m
4	4	57	46	176.135	0	348
8	4	59	48	177.389	0	401
28	4	62	51	179.994	0	424



(a) 4号杆塔



(b) 8号杆塔



(c) 28号杆塔

图 10 杆塔点云图片

通过表 3 对比分析可知,所提方法能够快速、动态地提取杆塔台账信息,相比传统的全站仪测量方法,极大地增加了运维人员的运维质效,更大程度上保障线路的杆塔运行安全。

基于此方法,在线路验收过程中,可采用无人机验收的方式,采集一次杆塔的点云数据提取杆塔的

台账信息,从而判定项目建设是否合格。

表 3 所提方法与全站仪测量方法对比

对比项	所提方法	全站仪测量
测量效率	电脑处理点云数据测量,效率较高	人工搭建平台测量记录,效率较低
测量成本	低	高
测量过程	仅需无人机采集点云数据	需人工到达现场测量,测量时间较长
精确性	电脑计算测量,精度较高	通过人工测量,受制因素较多,误差较大
是否受地形影响	否	是

3.2 线路拟合的工程应用

在实际线路中,杆塔横担起着电力线连接固定的作用。通过所识别到的杆塔横担位置,可以进行单根电力线聚类拟合,以便于输电线路的巡检分析应用。以相邻杆塔的同层横担为起始位置,与横担相连接的电力线点为聚类中心,进行单根电力线聚类工作,便可获得电力线路点云数据的聚类。具体聚类效果如图 11 所示。

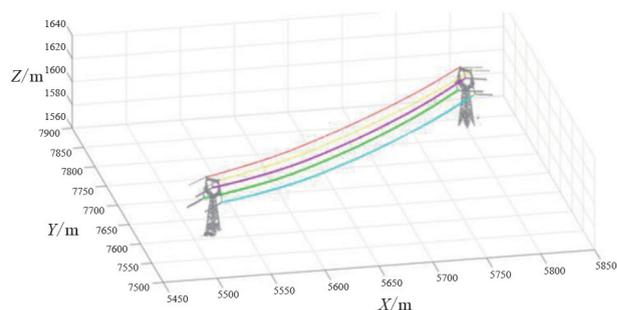


图 11 线路点云聚类

电力线三维模型可被分解为 XOY 平面、 XOZ 平面或 YOZ 平面两个模型。其中, XOY 平面的电力线分布可以用一元一次方程拟合表示。而 XOZ 平面模型则包含有悬链式、一元二次、二元二次方程等模型。

电力线路在 XOY 平面可被视为横截直线式方程,如式(7)所示,它是电力线在 XOY 平面的投影拟合而成。通过杆塔的横担坐标在 XOY 平面投影后能确定单档电力线的两个端点,再通过投影点云坐标最小二乘法拟合生成直线模型,两个横担坐标的投影点则确定了拟合直线的范围区域。

$$L_1(a, b) : y = ax + b \quad (7)$$

式中: a 为斜率; b 为截距; $L_1(a, b)$ 为拟合得到的 XOY 平面的电力线分布。

在 XOZ 平面的方程模型为电力线在竖直平面下的拟合曲线。在进行应用时,电力线被视作无刚

性的柔性悬链式线条,依照此假设,电力线的理想模型为悬链式模型。而基于悬链式模型推导而来的电力线拟合方程则为悬链式方程。然而,在实际应用中,悬链式方程对电力线的拟合精度却并不高,二元二次多项式模型被视为悬链式模型的近似表达,并伴随更高的精度。因此,采用二元二次方程组作为电力线三维方程式模型,如式(8)所示。

$$L_2(A, B, C) : z = A(x^2 + y^2) + B\sqrt{(x^2 + y^2)} + C \quad (8)$$

式中: $L_2(A, B, C)$ 为拟合得到的三维空间电力线分布; A, B, C 为拟合系数。

如此一来,运维人员只须采集输电杆塔的三维点云数据,便可利用所提取的横担坐标拟合出输电线路的弧垂情况,结合短时间内线下树竹、房屋等的点云数据并不会发生太大变化的特性,进而便可分析线路的隐患情况。

4 结 论

上面基于分类后的三维输电杆塔点云数据,研究了 5 种常规杆塔塔型的精确识别算法,并在此基础上提出了线路台账信息的智能提取方法。从应用情况可知,所提出的方法可快速识别杆塔塔型,识别成功率高于 90%;参数的提取精度更高,可精确到小数点后 3 位,且误差小于 1.6%。在利用智能化手段快速获取了杆塔的台账信息后,结合输电线路的静态点云信息,即可进一步对线路通道进行隐患分析,全方位快速高效地获取线路运行状态,及时发现线路异常,保障线路安全。

基于三维点云数据的智能化处理手段,可以极大程度上提高输电线路的运维质效,让运维人员仅仅采集一次杆塔点云数据便可以掌握杆塔的运行状态,进而进行相应的诊断。这为输电线路的智能化发展、线路的动态增容、电力杆塔的建设验收以及优化调度等工作奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 张宏志. 500 kV 输电线路典型缺陷分析图册[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 全国架空线路标准化技术委员会线路运行分技术委员会. 架空输电线路运行规程:DL/T 741—2019[S]. 北京:中国电力出版社,2019. (下转第 104 页)

