引文格式：张枝枝,赵延岭,吕宝雄,等. 利用三维激光扫描技术的变电站精细化模型构建方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 94-97. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.02.021

利用三维激光扫描技术的变电站精细化模型构建方法

张枝枝[1]，赵延岭[1]，吕宝雄[1]，李文浩[1]
（1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065）

摘　要：为了提高点云数据处理的精度和三维精细化建模的效率，利用三维激光扫描技术获取变电站的点云数据，提出一种电力设备分类建模的思路。首先，采用“V”字型拼接标靶组配合扫描仪获取变电站点云数据；其次，根据设备结构特点分为线性设备、规则设备和复杂设备3种类型，线性设备通过分离点云、提取关键点和拟合多段线等进行批量自动化建模，规则设备通过构建标准模型库提高模型复用率，最终完成变电站精细化模型构建。结果表明合理的标靶布局（“V”字型）能够有效地提高点云数据的拼接精度和效率；所提出的三维精细化建模思路，线性设备建模效率提升80%以上，规则设备建模效率提升30%左右，整体上提升了变电站三维精细化建模的效率，这为实现电网运检智能化提供数据基础。

关键词：三维激光扫描；变电站；标靶球布设；精细化建模
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）02-0094-04

Construction Method of Substation Fine Model Using 3D Laser Scanning Technology

ZHANG Zhizhi[1], ZHAO Yanling[1], LYU Baoxiong[1], LI Wenhao[1]
(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of point cloud data processing and the efficiency of 3D fine modeling, we used 3D laser scanning technology to obtain point cloud data from substations and proposed a power equipment classification modeling method. Firstly, we used a V-shaped splicing target group in conjunction with a scanner to obtain substation point cloud data. Then, according to the structural characteristics of equipment, we divided it into linear equipment, regular equipment, and complex equipment three types. Linear equipment performs batch automated modeling by separating point clouds, extracting key points, and fitting polylines. Regular equipment improves model reuse rate by building a standard model library. Finally, we completed the refined model construction of substations. The results show that a reasonable target layout (V-shaped) can effectively improve the accuracy and efficiency of point cloud data stitching. The proposed 3D refined modeling method improves the efficiency of linear equipment modeling by over 80%, while regular equipment modeling efficiency by about 30%. Overall, it improves the efficiency of 3D refined modeling in substations, providing a data foundation for achieving intelligent power grid operation and inspection.

Key words: 3D laser scanning, substation, target ball layout, fine modeling

目前，国内外学者基于点云数据通过聚类分析方法，根据形面的不同拓扑特征将其划分为多个独立的子集（即点云集）[1-3]。常用的室内小型数据集：Shape Net Core[4]、Scan Net[5]、S3DIS等[6]，大场景典型数据集：Semantic KITTI[7]、Semantic3D[8]、DALES[9]、WHU-MLS等[10]，都是针对室内环境设施和城市场景建筑模型的；周汝琴[11]、彭淑雯[12]、陈正宇[13]、黄郑[14]等学者借助点云分类模型对点云数据分割，提取出地面、植被、电力线和杆塔信息，多用于室外大场景模型，但没有基于变电站设备分类提出点云分割的应用。

在精细化三维模型构建方面，由于变电站内设备种类的多样性、设备结构的复杂性、厂站布局的不同等问题，传统建模方法存在复用性差、周期长的缺点[15]，难以满足项目工期的需求。针对智能变电站运维的三维模型构建问题，张子谦等[16]提出基于组件匹配的快速建模方法，显著提高变电站建模效率和精度，但仅适用于大规模变电站粗模；喜文飞等[17]通过构建空间三角网获取古建筑的精细三维模型，该方法在细部件结构模型构建效果较好。

本文研究思路是将变电站内设备划分为线性设备、规则设备和复杂设备3类，首先自动化分离线性设备点云，通过提取关键点批量拟合的方式快速构建线性设备模型，然后组建标准模型库，通过“积木式”搭建的方式构建规则设备模型，克服传统建模方式（时间长、建模难）的弊端。

第一作者简介：张枝枝（1991—），硕士，工程师，从事三维激光扫描与摄影测量等工作，E-mail：704971474@qq.com。

1　研究内容

1.1　研究背景

变电站通常分为常规敞开式开关设备（air insulated switchgear，AIS）和全封闭式组合电器（gas insulated switchgear，GIS）[18]式2种厂站，站内主要由主变压器、隔离和接地开关、断路器、CT、PT、电容电抗器等23类设备构成，涉及426种部件，类型众多且结构复杂，建模实施难度极大。

1.2　技术路线

根据项目对建模精度的要求，制定了相应的工作流程见图1。

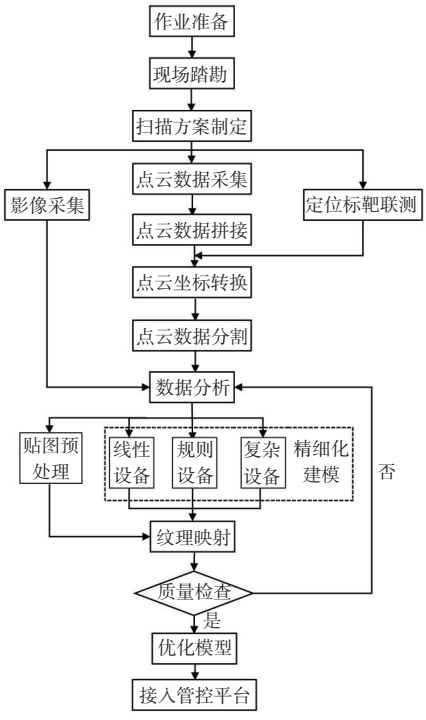


图1　技术方案流程图

2　点云数据获取及预处理

2.1　点云数据获取

本项目采用FARO Focus M70三维激光扫描仪进行变电站内点云数据采集。首先，根据变电站内设备分布将拼接靶球按3个一组构建一个“V”字型靶球组，然后使用扫描仪逐站点扫描。FARO Focus M70主要性能指标见表1。

为了避免数据冗余同时保障点云的重叠度，布设站点时需要注意以下几点：

1）站点位置选择：基于靶球的点云数据拼接需要每个测站能够采集3个以上相同靶球的点云数据，即在“V”型标靶球区域内布设扫描站点，以避免产生测站盲区，从而导致点云数据处理难度增大和建模工作量增加。

表1　FARO Focus M70性能参数

性能指标	参数值
扫描距离/m	0.6~70
扫描精度/mm	±3
扫描速率/s	50万点
视场角（水平/垂直）/（°）	360/300
倾斜补偿/（°）	±2°
工作温度范围/℃	−20~55
重量/kg	4.2

2）扫描顺序：首先对电站内设备分块进行顺时针或逆时针扫描，扫描仪架设在设备前2~3 m处，然后在设备之间进行扫描站点补测，测站间距通常为10~18 m，以保障相邻扫描站之间点云重叠度不小于30%。

3）规范仪器操作：扫描仪架设时使仪器倾斜角度在补偿范围之内，避免因仪器过度倾斜引入数据误差。

2.2　点云数据预处理

点云数据预处理分为点云去噪、点云拼接和坐标转换3个阶段：

1）点云去噪。点云数据在采集过程受扫描系统和扫描环境的影响会产生许多噪声，应对其剔除[19]。将采集到的点云数据导入软件，首先对点云数据进行降噪处理，纠正点云的小型噪声；然后，设置扫描测站距离参数，一般为扫描距离的70%，本项目选择单次扫描测站不超过35 m距离内的点云数据作为有效数据。

2）点云拼接。常用的点云数据拼接方法有基于点云特征匹配[20]的方法和基于标靶球匹配[21]的方法2种。内业数据拼接时采用基于靶球的全自动拼接方法，测站点云数据拼接误差应小于2 mm。

3）坐标转换。在点云数据拼接完成后，需要对拼接后的变电站点云数据进行大地坐标转换，通常采用定位标靶联测的方式进行坐标转换，得到大地坐标系统下的变电站点云数据。

3　精细化模型构建

本文将变电站设备划分为线性设备、规则设备和复杂设备3类，针对不同的设备类型分别进行模型构建。

3.1　线性设备

电力线是变电站中连接内外线路的重要设备，建模过程中既要保证线路的完整连贯性，又要确保其精

确性。获取的电力线点云数据有如下特征：

1）点云密度稀疏：电力线距离地面较远且尺寸较细，导致获取的点云数据存在稀疏和不连续的特点。

2）线性特征：电力线在空中通常形成直线或曲线。

3）空间分布特征：变电站电力线通常位于一定的高度上且纵横交错。

根据电力线点云数据的特点，制定了电力线模型自动化构建的方案。

第一步，根据电力线空间分布特征，按高程从下往上依次为地面、设备、站内电力线和进出站电力线。利用高程阈值分割法将地面和设备点云数据剔除，将站内电力线和进出站电力线分成2类，此步骤处理完的点云数据仍包含部分龙门架数据。

第二步，用RANSAC算法[22]来拟合导线的线性特征参数，将所有符合条件的电力线点云数据分离，并去除非导线部分的噪声点和异常值，对于分类错误的部分采用人机交互的方式修正，最终合并输出所有电力线点云数据。

第三步，通过曲率取样的方法提取电力线关键点，对提取的关键点数据拟合成三维多段线。

第四步，将三维多段线导入建模软件，根据电力线的实际尺寸设置三维多段线属性，设置完成后将三维多段线转换为可编辑多边形，最后保存电力线三维模型。

使用传统建模方式，单人需要约24 h才能完成一座330 kV变电站内电力线的建模工作。而采用本文所提出的建模方法，则仅需要约4 h的有效工作时间，效率提升了80%以上。

3.2 规则设备

首先根据设备的结构，调用传统几何模型库中的基础模型，例如柱体、方体或者面等，作为设备的基本构件进行“积木式”搭建，参考设计图纸、厂家零配件尺寸，构建规则设备的标准模型。再根据构建规则设备的标准模型，建立对应的标准模型库（图2），实现标准模型文件多次复用，在复用基础上根据点云对模型细部结构进行微调。

变电站内涉及的主要规则设备包括主变压器、站用变、断路器、避雷器、电压互感器、电抗器等，应用标准模型库能将建模效率提升30%左右。以主变压器精细模型为例，主变压器的主要部件包括箱体（本体）、油枕、呼吸器、取油口、低压和高压套管、法兰、CT接线盒、分接开关、本体端子箱、冷却系统、主要油管等，是整个变电站中设备结构最繁杂的

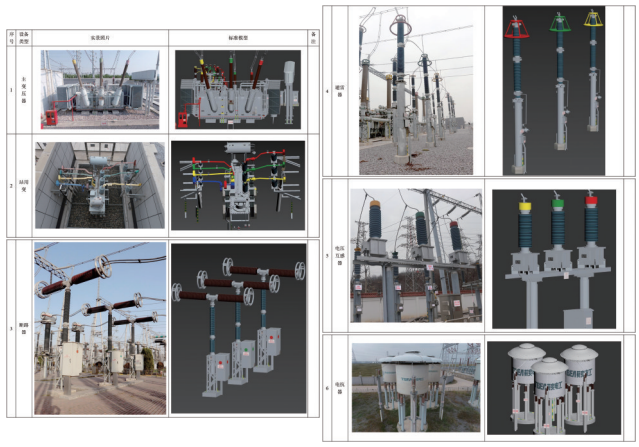


图2 标准模型库（部分）

模型。通过对比主变压器不同部件精细建模的用时（表2），主变压器的总建模效率提高30%，可以看出基于标准模型库实现了部分精细部件的复用性。

表2 主变压器精细模型主要部件用时对比

主要部件	传统建模方法/（h/人）	本文建模方法/（h/人）	提升效率/%
箱体	6	4	33
油枕	3	2	33
呼吸器	1	0.5	50
取油口	1	0.5	50
低压和高压套管	6	4	33
CT接线盒	3	2	33
分接开关	8	4	50
冷却系统	6	3	50
本体端子箱	2	2	0
主要油管	10	10	0
总计	46	32	30

在整个变电站内，绝缘套管是一种数量众多且种类多样的部件，可分为主变压器套管、电流互感器套管、电压互感器套管、避雷器套管和穿墙套管等，其中主变压器套管又分为高压套管和低压侧套管。这些绝缘套管都是由最基础的瓷件和安装法兰构成，但是不同套管上的瓷瓶在规格和数量上各不相同，按照传统建模方法，需要进行大量重复性工作，难以满足项目生产的实际需求。通过本文提出的构建标准模型库的方法，首先参数化构建单个瓷件和安装法兰，然后根据其规格和数量修改相应参数，即可自动生产对应设备的绝缘套管的标准模型；最后依据现场点云数据，将对应的绝缘套管移动或旋转至准确的位置，完成绝缘套管的建模工作。通过标准模型库中的零部件能够实现部分精细部件的复用性，极大地提高建模效

率，有一定的实用和推广意义。

3.3 复杂设备

复杂设备通常包括规则设备中的复杂部件和结构非常复杂的特殊工艺设备。如果遇到复杂结构的部件，我们可以使用定制模型或调整已有模型的参数进行适配，通过优化更新或替换模型的精度和细部结构，构建出符合设备结构要求的三维模型。但是，当建模结构复杂且具有特殊工艺的设备时，需要使用NURBS曲面[23]构建，通过操纵可控制点对线段长度进行控制，调整曲线上的点位置以实现对曲线或曲面的调整，从而拟合出复杂模型的特殊结构，使其更加真实和精细。需要注意的是，在应用这些技术和工具进行建模时，实践者不仅需要掌握相应的技术和工具，还需要熟悉掌握编程语言和熟知电气设备的结构和部件。

4 结　语

结合变电站内设备布局的特殊性，设计了一种“V”字型拼接标靶布设方案，利用FARO Focus M70激光扫描仪获取变电站内各类设备的点云数据，有效地提高了点云数据拼接的精度。

对变电站中AIS和GIS2种配电装置类型所涉及的设备进行分类精细化三维建模，并应用虚拟现实技术进行可视化展示，以实现电网运检智能化分析管控，以及远程监管和维护变电站的操控，这为数字孪生技术的示范应用提供先导条件。

参考文献

[1] 龙丽娟,夏永华,黄德. 一种基于三维激光扫描点云数据的变电站快速建模方法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(20):1-10

[2] 高绍伟,薄志毅,王晓龙. 利用三维激光点云数据绘制地形图[J]. 测绘通报,2014(3):67-70

[3] 王郑阳,俞昊,孟昊,等. POWERLINE-ALS:一种用于输电线路场景深度学习语义分割的机载LiDAR点云数据集[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(2):33-43

[4] Zhang D W, Han J W, Cheng G, et al. Weakly Supervised Object Localization and Detection: A Survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021,44(9):5 866-5 885

[5] Minaee S, Bovkov Y, Poriklif, et al. Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 11(1): 1-22

[6] Xie Y X, Tian J J, Zhu X X. Linking Points with Labels in 3D: A Review of Point Cloud Semantic Segmentation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2020, 8(4):38-59

[7] Guo Y L, Wang H Y, Hu Q Y, et al. Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(12):4 338-4 364

[8] Bello S A, Yu S S, Wang C, et al. Review: Deep Learning on 3D Point Clouds [J]. Remote Sensing, 2020, 29(12):1-34

[9] Hu Q Y, Yang B, Xie L H, et al. Learning Semantic Segmentation of Large-scale Point Clouds with Random Sampling [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 44(11):8 338-8 354

[10] 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

[11] 周汝琴,许志海,彭炽刚,等. 一种高压输电走廊机载激光点云分类方法[J]. 测绘科学,2019,44(3):21-27,33

[12] 彭淑雯. 输电通道机载LiDAR点云分类方法研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院),2021

[13] 陈正宇,彭淑雯,朱号东,等. 基于样本加权PointNet++的输电通道点云分类研究[J]. 遥感技术与应用,2021,36(6):1 299-1 305

[14] 黄郑,顾徐,王红星,等. 基于改进PointNet++的输电杆塔点云语义分割模型[J]. 中国电力,2023,56(3):77-85

[15] 王小虎,郭广鑫,董佳涵,等.变电站应用实景复制技术建模和网络安全监控[J]. 中国电力,2021,54(11):221-228

[16] 张子谦,杨鸿斌,陈俣,等. 基于组件匹配的变电站快速建模方法[J]. 计算机应用与软件,2018,35(7):69-75

[17] 喜文飞,李灵索,杨勇,等. 基于点云数据的不规则文物三维重建:以经幢为例[J].测绘通报,2020,12(1):87-89

[18] 郭日彩,许子智,徐鑫乾. 220 kV和110 kV 变电站典型设计研究与应用[J]. 电网技术,2007,31(6):23-30

[19] 侯飞,胡召玲,刘晴. 基于三维激光扫描技术的古陵墓可视化[J].测绘工程,2013,22(5):78-81

[20] 钱其姝,胡以华,赵楠翔,等. 基于激光点云全局特征匹配处理的目标跟踪算法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(6):1-8

[21] 齐志军,彭警. 一种快速稳健的标靶球定位方法[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(6):617-621

[22] 曹航. 核设施扫描点云的处理与三维重构技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2022

[23] 宋俊芳,孙彬,蒲媛媛,等. 基于激光点云数据的叶片型面三维重构[J]. 计量学报,2023,44(2):171-177