

一种基于三维激光扫描点云数据的变电站快速建模方法

龙丽娟^{1,2}, 夏永华^{1,2*}, 黄德^{1,2}

¹昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

²云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093

摘要 以 3ds Max 脚本 (MAXScript) 建模为主、手动组合变电站建筑物单体为辅, 提出一种基于三维激光扫描点云数据的变电站三维模型构建方法。所提方法能够解决变电站三维建模中手工建模效率低和模型可扩展性差等问题。以云南省富源县某 110 kV 变电站三维建模为例展开实验, 实验结果表明, 所提方法在一定程度上可满足精度要求, 并且能够降低变电站的建模成本, 提高变电站的建模效率。

关键词 遥感; 三维激光扫描点云数据; 变电站三维建模; MAXScript; 可扩展性

中图分类号 P237 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.202801

Fast Modeling Method for Substation Based on 3D Laser Scanning Point Cloud Data

Long Lijuan^{1,2}, Xia Yonghua^{1,2*}, Huang De^{1,2}

¹Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China;

²Surveying & Mapping Technology and Application Research Center on Plateau Mountains of Yunnan Higher Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

Abstract Taking 3ds Max script (MAXScript) as the main modeling and manual assembly of substation buildings as a supplement, a method for constructing 3D substation models based on 3D laser scanning point cloud data is proposed. The proposed method can solve the problems of low efficiency of manual modeling of substation 3D modeling and poor model scalability. Taking the 3D modeling of a 110 kV substation in Fuyuan County, Yunnan Province, as an example, the experimental results show that the proposed method can meet the accuracy requirements of the model to a certain extent and can reduce the modeling cost of the substation and improve its modeling efficiency.

Key words remote sensing; 3D laser scanning point cloud data; 3D modeling of substation; MAXScript; scalability

OCIS codes 280.5600; 010.0280; 010.3640

1 引言

变电站是电力系统的重要组成部分, 其不同于常规的民用建筑工程, 内部有众多的电气设备, 分布数量大且电力电缆相互交错, 载荷情况十分复杂^[1]。由于变电站处于实时运行状态, 不允许停止运行, 否

则不能正常为人民生产和生活供电, 最终给人民财产与安全造成重大损失。变电站的操作人员在接受岗位培训时, 既不能在运行的设备或系统上进行实际操作试验, 也不能人为地设置事故进行观察和处理, 这使得学员不能得到充分的锻炼。当对变电站进行改扩建、维修以及施工车进场时, 在没有直观的

收稿日期: 2019-11-19; 修回日期: 2019-12-30; 录用日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(41861054)、科技服务项目(KKF0201856026, KKF0201956004)

* E-mail: 1691754330@qq.com

现场施工作业指导系统的情况下,需要提前实际勘测,并建立限高和限宽等规范设施。同时为了保证现场的施工安全,还需对设备的带电情况进行详细的检查工作,这将造成相关技术人员的工作时间长和变电站大修停电维护时间久等问题^[2]。因此,若能建立一个与变电站实际运行状况相似的变电站三维模型,则可以很好地解决上述问题。

综上所述,变电站三维建模以及变电站的数字化管理已成为未来变电站的发展方向,这不仅能够加快变电站的重建和改扩建速度,还能够提高变电站的管理效率,促进变电站的经济效益最大化。

已有许多科研人员开展了三维建模方面的研究与开发工作。Maas等^[3]采用了参数基元库匹配的方法进行三维建模,该方法虽然参数表达模型的拓扑正确性高,但对点云的数据质量不敏感,且模型的精度受参数模型库中模型类别的影响较大。Poullis^[4]基于栅格数据结构提出了一种屋顶面片边界优化的建模框架,该方法能够处理大面积的城区建筑,但处理过程中需对每个屋顶面片进行单独处理,这不能保证建筑模型拓扑的“封闭性”。Lafarge等^[5]提出了基于栅格数据结构的建筑、植被和复杂地形的三维建模方法,该方法将三维建模的问题转换为在特定的约束条件下不同类型地物标签的扩散问题,保证了模型的几何精度和紧凑表达。Nan等^[6]基于面片基元的走势直接划分了建筑物 MVS(Multi View Stereo)点云数据空间,然后将建模问题转换为三维流形几何约束下的子面片二值标号问题。

张红春^[7]以数字工厂为例,阐述了使用点云建模技术建立数字化工厂的流程,得出点云数据能够构建出高质量和精细化的三维模型,尤其是复杂几何物体的三维模型。刘求龙等^[8]采用了基于三维激光扫描点云的变电站手动建模方法,该方法根据点云数据创建一次设备和二次设备模型,然后对模型进行组合,该方法数据量大,操作繁杂且周期长。赵春林^[9]提出了一种基于全景照片的三维建模方法,尽管三维建模的速度得到很大的提高,但无法满足无人监测和自动巡检的精度要求。张子谦等^[10]提出了一种组件匹配的快速建模方法,该方法能够高效地构建大规模变电站的三维场景,与手动建模方法相比具有较大优势。但模型库中的模型需要手动点击 3ds Max(3D Studio Max)建模命令并修改相应参数来创建,一方面,模型塌陷后,则不能修改尺寸,另一方面,变电站建筑物的三维模型是由许多简单的三维单体模型按照一定的位姿组合而成。所

以,简单修改模型尺寸将导致三维单体模型之间的大小和位置不协调。如果模型库中创建的是 500 kV 变电站建筑物模型,当创建 220 kV 和 110 kV 等类型的变电站三维模型时,此模型库将不再适用,需重建模型库,但这将会耗费人力和物力。

从整体来看,变电站三维建模的方法众多,但如何在保证模型精度的前提下,提高建模效率仍有一定挑战。本文提出一种基于三维激光扫描点云数据(简称点云数据),以 MAXScript 建模为主、手动建模为辅的变电站模型构建方法。所提方法能够真实模拟变电站的真实场景,为仿真模拟事故现场、变电站的重建和改扩建提供数据支持。以云南省富源县某 110 kV 变电站为例展开实验,根据点云数据提供变电站建筑物模型底部和高度等方面的参数,采用 MAXScript 进行建模,然后将变电站建筑物模型进行组合,最后通过渲染得到精确的变电站三维场景。

现有的变电站三维建模方法主要是通过手动选择三维建模软件的基本模型和相关命令来完成定制模型的设计,所提方法则是集成 3ds Max 中的基本模型与相关命令,通过给定相应参数来完成模型的构建。与现有方法相比,所提方法具有较强的可扩展性,当模型与点云数据的大小和尺寸不符时,可实时更改模型尺寸,使其与点云数据的贴合度达到最佳。

2 点云数据的采集和预处理

2.1 点云数据的采集

实验采用澳大利亚 MAPTEK 公司生产的 I-Site 8200ER 三维激光扫描仪作为扫描仪器,用来采集点云数据。I-Site 8200ER 三维激光扫描仪的最大测程为 500 m,测角精度为 10"^[11],集成了高分辨率的全景相机,可同步获得与点云数据精准匹配的纹理信息。该扫描仪具有系统体积小、重量轻、集成度高、携带方便、精准度高、验收方便、自动拼接和数据真实等标志性特征。

2.2 点云数据的预处理

由于变电站扫描场景具有复杂性和特殊性、电气设备之间的遮挡情况、周围电磁场的环境、三维激光扫描仪视场角的限制以及扫描仪本身构造特性的影响,需在多个方向和多个角度对点云数据进行扫描,以得到多视点和多时段的点云数据。并且在扫描作业时容易产生噪声,造成大量的数据冗余,所以在进行点云数据的处理和分析之前必须对其进行预

处理操作。

2.2.1 点云数据的精简

为了提高点云数据的精度和处理速度、配准前需减少点云数据的数量,一般通过人工来选择噪声点,或采用一些可用的过滤工具去除与研究目标无关的数据点,通常有按范围过滤、按反射强度过滤、按地形过滤^[12]和按距离过滤^[13]等多种方式,实验

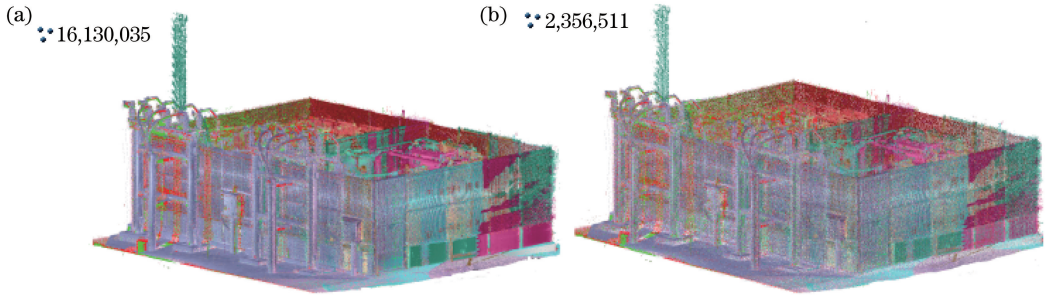


图1 变电站电抗器点云数据的精简结果。(a)精简前;(b)精简后

Fig. 1 Simplified results of point cloud data of substation reactors. (a) Before streamlining; (b) after streamlining

2.2.2 点云数据的配准

点云数据的配准是三维激光扫描技术中的关键问题,进行数据配准的原因是由于物体间的遮挡或扫描仪器距离扫描目标太远,导致一个扫描站不能获取物体全部的形态特征,进而需要多次架站来扫描。多站架设会导致获取的数据独立且位于不同的坐标系下,具有多视点特性,不便于数据的处理与分析,所以需对采集到的点云数据进行配准。点云数据的配准是将多视点和多时段的点云数据转换到同一个坐标系下的基本操作过程^[14]。

主要采用按距离过滤的点云数据精简方法。

按距离过滤的点云数据精简方法:首先确定采样距离的阈值 δ ,如果某一数据点与其排列方向上的下一个数据点的空间距离大于阈值 δ ,则保留该点,反之删除。当 $\delta=0.015\text{ m}$ 时,点云数据精简结果如图1所示。从图1可以看到,精简后的数据量明显减少。

点云数据的配准算法分为基于特征的数据配准算法和无特征的配准算法两类,其中基于特征的数据配准算法包括基于控制点配准、基于线特征配准和基于曲率的点云配准^[15],无特征的配准算法包括ICP(Iterative Closest Point)算法^[16]和基于KDTree改进的ICP算法^[17]。实验采用基于控制点的配准算法对点云数据进行配准。基于控制点的配准算法是直接利用外部控制点将扫描坐标系转换至外部坐标系,从而实现多视点数据配准。点云数据的配准过程如图2所示。

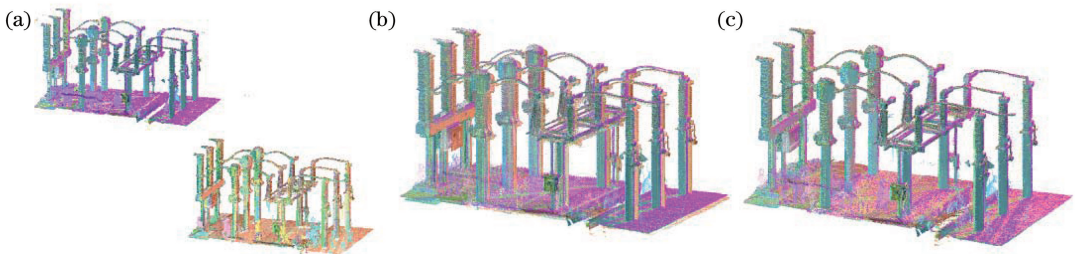


图2 点云数据的配准过程。(a)配准前;(b)粗配准;(c)精配准

Fig. 2 Registration process of point cloud data. (a) Before registration; (b) coarse registration; (c) fine registration

2.2.3 点云数据的去噪

由于点云数据在采集过程中会受到扫描环境、仪器本身以及外界环境等干扰,从而使原始数据中含有大量的噪声点。这些不必要的噪声点和空洞不仅影响点云数据的质量,而且还会增加点云的数据量,因此点云数据的去噪对后续工作的进行十分重要。依据点云数据中噪声分布的特点,可以对其进

行有效的过滤和去除,以达到提高数据质量和减小数据冗余的目的。

根据噪声点的空间分布情况,可将噪声点分为飘移点、孤立点、冗余点和混杂点。对于前三种噪声点,实验采用Maptek I-Site Studio软件来去除,而混杂点采用中值滤波法来去除。中值滤波的实现过程为在一个窗口中对点云数据进行扫

描,将扫描到的数据按某一坐标方向进行排序,将排序后位于中间的数据点方向值作为窗口输出时

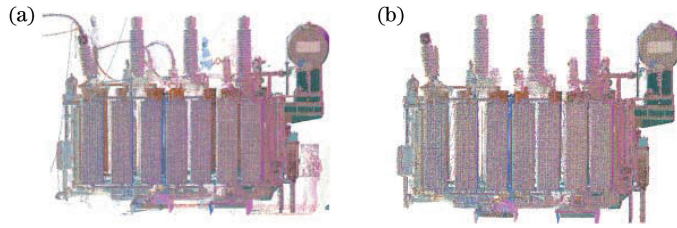


图3 变压器点云数据的去噪结果。(a)去噪前;(b)去噪后

Fig. 3 Denoising results of transformer point cloud data. (a) Before denoising; (b) after denoising

3 变电站典型设备的三维建模

变电站设备分为一次设备和二次设备^[19],一次设备包括变压器、避雷器和母线等用于直接生产、输送、分配和使用电能的设备,二次设备包括自动控制装置和继电保护装置等用于对一次设备和系统的运行状况进行测量、保护、控制和调节的设备。

常见的三维建模软件有 AutoCAD、3ds Max、SketchUp 和 CityEngine 等^[20]。与其他主流三维建

的对应方向坐标值^[18]。变压器点云数据的去噪结果如图3所示。

模软件相比,3ds Max 软件具有操作界面简洁直观、视图功能直观强大、设计效率高等优势,所以实验采用 3ds Max 软件对变电站进行建模。由于变电站内部的电气设备数量众多且结构复杂^[21],实验采用 MAXScript 单体建模的方式,首先对每个建筑物进行单体构建,建立模型库以实现多次复用,然后在复用的基础上依据点云数据的形状和位置实现精确复用。采用 3ds Max 软件构建变电站建筑物的三维模型流程如图4所示。

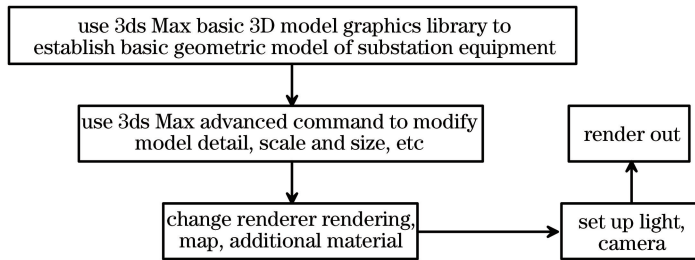


图4 构建变电站建筑物的三维模型流程

Fig. 4 Process of constructing 3D model of substation building

3ds Max 软件提供两种编写插件应用程序的方法:基于 C++ 的软件开发工具包(SDK)和 MAXScript,SDK 允许程序员使用 C++ 来扩展 3ds Max 的特性、功能和接口。MAXScript 则是专门为补充 3ds Max 而精心设计的、面向对象的语言,拥有一些特殊的功能和构造,用来反映 3ds Max 用户界面中的高级概念。选择何种语言主要取决于用户希望插件来完成的工作,这两种语言具有各自的优点和局限性。通常 MAXScript 编写插件的运行速度比 C++ 慢,因此若是性能问题,即当插件是计算而不是交互时,最好使用 SDK。MAXScript 提供了比 SDK 更高级别的一些方法,并支持一些不显示 SDK 的 3ds Max 功能。如果需要使用 MAXScript 支持的功能,最好选择 MAXScript,特别是通过 OLE/ActiveX/Dotnet 控件显示 3ds Max 功能,使用 MAXScript 更容易进行编码^[22]。

实验中由于调试 C++ 插件经常需要重新编译、启动 3ds Max 和调整 GUI 资源,这将导致开发和调试的速度相对较慢,且实验主要运用 3ds Max 接口和方法对变电站建筑物进行建模和贴图,所以 MAXScript 语言是最好的选择。建模前,应对 3ds Max 平台进行单位设置,使其系统的单位比例与显示一致,均设为 cm。常用的接口有 Geometry 接口和 Graphical 接口等,常用的方法有 Modifier 等,其中 Geometry 接口中包含各种基本几何体,Graphical 接口主要用于绘制各种基础的一维和二维图形,如 Circle 和 Ngon 等。Modifier 是一个算法集合,其包含各种赋予最基本几何体和一维、二维图形复杂外形的核心算法,如 Extrude、Edit_Poly 和 Edit_Spline 等,Edit_Poly 和 Edit_Spline 与 EditableSpline 和 EditablePloy 功能基本相同,为了方便操作,一般使用 EditableSpline 和

EditablePloy。变电站建筑物建模流程如图 5 所示。

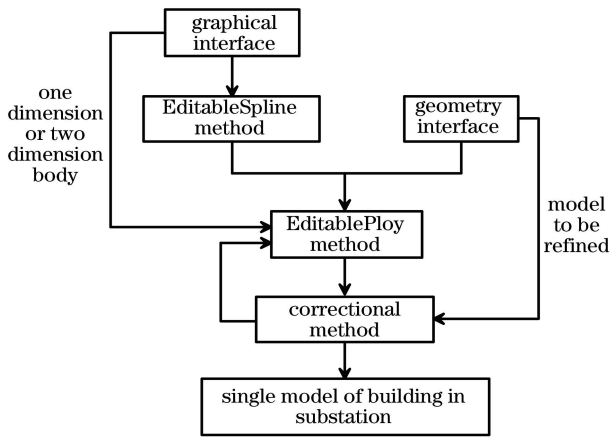



图 5 变电站建筑物建模流程

Fig. 5 Modeling process of substation building

实验主要介绍变电站设备中最常见的几种建筑物单体建模,如绝缘子、变压器和主控楼。采用 MAXScript 对变电站建筑物中的绝缘子、变压器和主控楼进行建模,将所有使用到的接口和方法都集

表 1 绝缘子支柱的创建

Table 1 Creation of insulator post

Type	Project	Value /cm	3D model
Porcelain bushing model	Height of total porcelain bushing	50.4	
	Porcelain sleeve radius	5.2	
	Height of single porcelain bushing	3.6	
Insulator upper support and flange model	Height of top seat	3.6	
	Connected part radius	5.1	
	Connection height	6.7	
Insulator lower support and flange model	Height of base part	3.6	
	Connected part radius	5.1	
	Connection height	3.9	

3.2 变压器建模

变压器按用途可分为电力变压器、仪用变压器、试验变压器和特种变压器。变电站中最重要的设备是电力变压器,其是一种静止的设备,用来将某一数值的交流电压(电流)变成频率相同的另一种或几种数值不同的电压(电流)。电力变压器按冷却介质不同分为分干式变压器和油浸式变压器。实验以油浸式变压器为例,对其进行建模,与绝缘子模型相比,由于变压器结构复杂,手动创建三维模型耗时且费力,尤其是变压器散热器部分的建模。采用 MAXScript 对油浸式变压器进行建模,只需简单几步就能完成。当变压器散热器、高低压接线柱、油箱、油枕和吸湿器等尺寸发生变化时,若采用手动建模的方法进行建模,则必须从头开始创建变电站模

成在卷展栏中,用户可更改和选择卷展栏上的参数来完成模型的构建。

3.1 绝缘子建模

绝缘子俗称瓷瓶,由瓷质和金具两部分组成,两者中间的部分由水泥黏合剂胶合,瓷质部分用于保证绝缘子的电气绝缘强度,金具部分用于固定绝缘子。绝缘子的功能主要是支持和固定载流导体,使载流导体与地面之间形成良好的绝缘。

绝缘子类型各异,实验主要以绝缘套管上的绝缘子为例来进行建模。绝大部分用户在创建绝缘子三维模型时,均是使用 3ds Max 手动建模的方法,不仅建模速度慢,而且当绝缘子高度和数目改变时,需重新建模,这将会耗费人力和物力。与手动建模相比,MAXScript 建模具有速度快和扩展性强等优点。

绝缘子建模主要用到 Geometry 接口和 Graphical 接口中的 Cylinder 和 Circle 命令, Modifier 方法中的 Extrude、TurboSmooth 和 Uvwmap 等算法。绝缘子支柱的创建如表 1 所示。

型,而采用 MAXScript 进行建模,无需重建,直接运行建模脚本,并在卷展栏上更改参数即可,大大提高模型的可扩展性。

变压器建模主要用到的 Geometry 接口和 Graphical 接口中的 Box、Cylinder、Rectangle、Circle 等命令, Modifier 方法中的 Extrude、TurboSmooth、Shell 和 Uvwmap 等算法。以油浸式变压器为例,变压器模型的创建结果如图 6 所示,变压器模型创建参数如表 2 所示。

3.3 变电站主控楼的建模

变电站主控楼是控制变电站运行的中心,用于监视所有运行设备的状态,如变压器、断路器和隔离闸刀等分、合闸位置以及电流、功率、电压和频率等参数状况,实验中变电站主控楼为一层建筑,根据现

表2 变压器模型的创建参数

Table 2 Creation parameters of transformer model

Type	Project	Value /cm
Radiator	Length	20.7
	Width	61.0
	Height	84.9
High voltage porcelain bushing	Radius	5.9
	Height	38.8
High voltage bushing	Radius	5.6
	Height	2.5
Low voltage porcelain bushing	Radius	3.1
	Height	12.2
Low voltage bushing	Radius	2.3
	Height	2.1
Oil pillow	Radius	8.2
	Height	40.3
Oil purifier	Length	20.9
	Width	5.2
	Height	23.0
Tank	Length	77.2
	Width	207.4
	Height	115.2

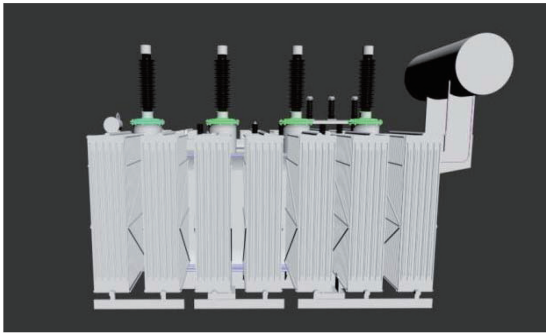


图6 变压器模型的创建结果

Fig. 6 Transformer model creation result

场采集的数据,采用 MAXScript 对其进行三维建模。

变电站主控楼建模主要用到的 Geometry 接口和 Graphical 接口中的 Box、Pivot、Sliding window 等命令, Modifier 方法中的 Uvwmap 算法。变电站主控楼的创建结果如图 7 所示,变电站主控中的 Uvwmap 算法模型创建参数如表 3 所示。

完成实验中所有变电站建筑物三维模型的创建后,将创建的建筑物三维模型脚本存储起来,当新建或改扩建其他类型变电站时,运行已有的脚本并更改卷展栏上的相应尺寸就可以构建具有新尺寸的建筑物三维模型,这大大减少变电站新建或改扩建三维模型建造的人力和物力以及成本。

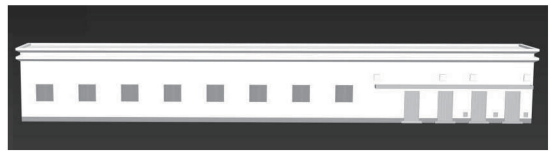


图7 变电站主控楼的创建结果

Fig. 7 Result of creating main control building of substation

表3 变电站主控楼的模型创建参数

Table 3 Model creation parameters of main control building of the substation

Type	Project	Value /cm
Main control building	Length	248.6
	Width	2056.0
	Height	224.4
Window	Height	69.9
	Width	70.9
	Depth	3.0
Door	Height	118.7
	Width	56.2
	Depth	3.0
Eaves	Length	622.8
	Width	35.9
	Thickness	13.8
Vent	Height	25.6
	Width	23.3
	Length	11.9

4 变电站建筑物的组合

完成变电站建筑物三维模型的创建后,需要将这些建筑物三维模型匹配到其真实位置上。当识别建筑物位置时,由于点云数据杂乱,无法准确给出建筑物的精确位置^[23-24]。实验采用点云数据聚类 and 最小二乘拟合算法拟合变电站建筑物的精确位置,主要步骤:点云数据聚类即将原始的点云数据分割成三个部分,单纯地面点云数据(删除)、变电站建筑物位置点云和变电站建筑物点云;根据变电站建筑物点云,将已建好的变电站建筑物单体模型组合成一个完整的变电站建筑物三维模型;采用最小二乘拟合算法对变电站建筑物的位置点云进行拟合,得到变电站建筑物三维模型的精确位置;将变电站建筑物匹配到所得的精确位置上,进而得到完整的变电站三维模型。变电站建筑物的组合流程如图 8 所示。采用最小二乘法拟合的变电站建筑物位置如图 9 所示。

完成变电站建筑物三维模型的组合后,调好灯

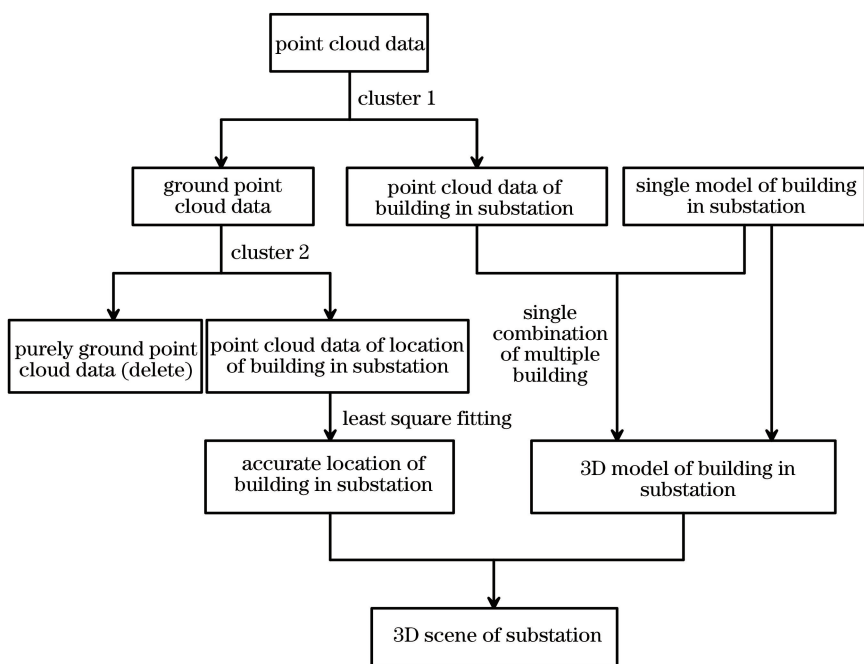


图 8 变电站建筑物的组合流程

Fig. 8 Schematic of combined process of substation buildings

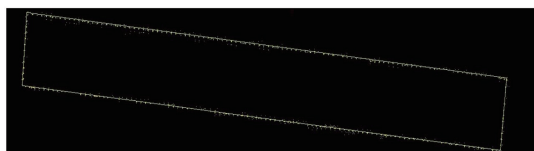


图 9 最小二乘法拟合的变电站建筑物位置

Fig. 9 Location of substation buildings fitted by least squares method

光和摄影机的位置,选择合适的渲染参数进行渲染,进而得到高精度的变电站三维场景,变电站渲染全景如图 10 所示。

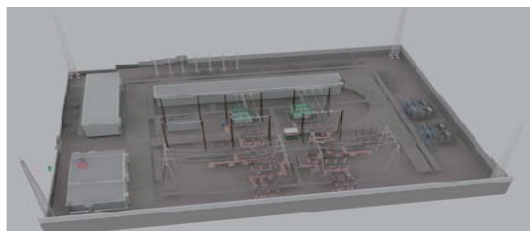


图 10 变电站渲染全景

Fig. 10 Substation rendering panorama

5 模型质量分析

三维模型是将地形和地物的空间信息和属性信息通过三维激光扫描仪直接或间接来获得,并将获得的数据与通用的三维软件进行结合,以构建客观物体所得的产物。三维模型是人为建造的虚拟场景,为了保证构建模型与真实世界中模型的一致性,

需对构建的三维模型进行质量分析。变电站模型与点云数据的拟合度如图 11 所示。

从图 11 可以看到,绝缘子、变压器和变电站主控楼的三维模型与点云拟合的效果较好,最大偏离值为 7.68 cm。产生偏离值的原因:变压器结构复杂,当采集点云数据时,变压器的部件之间存在遮挡,采集到的变压器部件点云不完整且噪声较多,导致模型与点云数据存在偏差。

三维激光扫描仪测得的变电站实体一般是由一些规则或不规则的几何结构组成,几何结构构建的好与坏将直接决定三维模型的质量,而这些几何结构中最显著的特点是尺寸的精确性。通过测量建筑物的主要尺寸并与所构建的对应三维模型进行对比,从而对模型的整体质量进行精度分析。变电站建筑物单体实测尺寸与模型尺寸如表 4 所示。

从表 4 可以看到,最大绝对误差为 1.7 cm,最小绝对误差为 0.1 cm,中误差为 1.3 cm。由于 1.7 cm 小于两倍的中误差 2.6 cm,所以 1.7 cm 属于偶然误差,产生的原因可能是三维激光扫描仪放置的位置与变电站主控楼宽所在边的入射角过大所引起的。根据有关文献,地物点相对邻近地物点的间距中误差应小于等于 8 cm,整体模型的中误差为 1.3 cm,远小于 8 cm,所以所提方法满足一般建筑的测量要求^[25]。

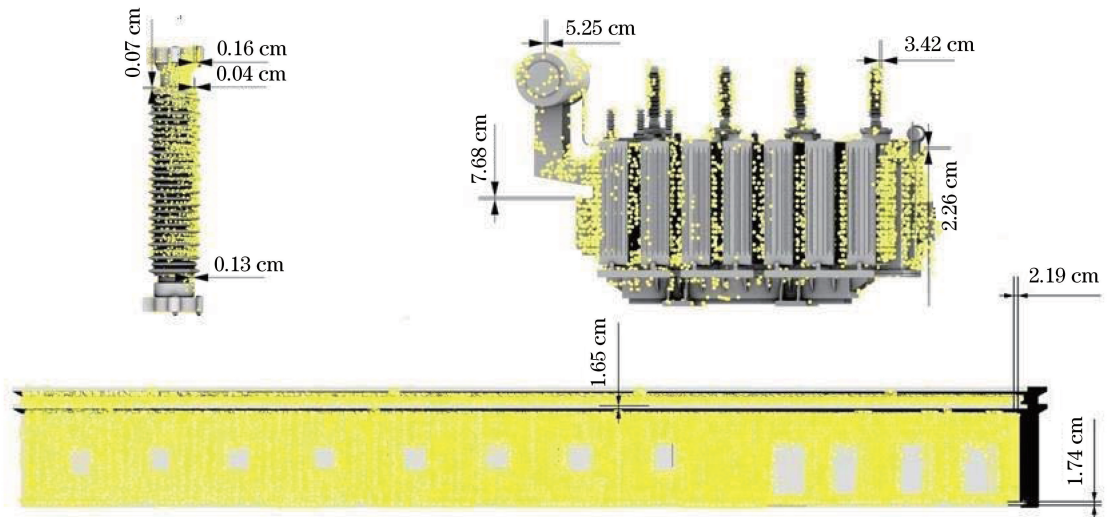


图 11 变电站模型与点云数据的拟合度

Fig. 11 Degree of fit between substation model and point cloud data

表 4 变电站建筑物单体实测尺寸与模型尺寸对比

Table 4 Comparison of measured size and model size of substation buildings

No.	Type	Actual size /cm	Model size /cm	Size deviation /cm
1	Insulator porcelain sleeve radius	6.4	5.2	-1.2
2	Insulator porcelain sleeve height	51.7	50.4	-1.3
3	Transformer radiator length	22.0	20.8	-1.2
4	Transformer radiator width	60.0	61.5	+1.5
5	Transformer radiator height	83.8	85.0	+1.2
6	Transformer oil pillow radius	8.0	8.1	+0.1
7	Transformer oil pillow height	43.2	42.1	-1.1
8	Transformer high-voltage porcelain bushing radius	7.1	6.2	-0.9
9	Transformer high-voltage porcelain bushing height	39.6	38.0	-1.6
10	Transformer fuel tank length	208.4	207.0	-1.4
11	Transformer fuel tank width	77.0	77.2	+0.2
12	Transformer fuel tank height	113.8	115.0	+1.2
13	Substation main control building length	2054.7	2055.9	+1.2
14	Substation main control building width	248.8	247.1	-1.7
15	Substation main control building height	224.4	223.0	+1.4

6 结 论

提出一种基于三维激光扫描点云数据,以MAXScript建模为主、手动组合变电站建筑物单体为辅的变电站三维模型构建方法。该方法构建的变电站三维模型精度高,且满足一般建筑的测量要求。在一定程度上,所提方法可以提高变电站三维建模的效率,降低建模成本。由于采用手动组合变电站建筑物单体并匹配其相应位置的方法来组合模型,这会耗费一定时间,所以有关变电站建筑物单体需根据点云数据形状自动组合和自动匹配位置等功能进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Wang T H, Jian X Z, Liu Z J, et al. Implementation and application of intelligent substation operation and maintenance training system based on virtual reality technology[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(10): 61-65.
王廷凤, 简学之, 刘子俊, 等. 基于虚拟现实技术的智能变电站运维培训系统的实现与应用[J]. 南方电网技术, 2018, 12(10): 61-65.
- [2] Jin S, Yi H H, Wang L, et al. Three-dimensional modeling of substation and meticulous management

- [J]. Value Engineering, 2019, 38(8): 62-64.
金石, 易欢欢, 王琳, 等. 变电站三维建模及精细化管理[J]. 价值工程, 2019, 38(8): 62-64.
- [3] Maas H G, Vosselman G. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2/3): 153-163.
- [4] Poullis C. A framework for automatic modeling from point cloud data [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(11): 2563-2575.
- [5] Lafarge F, Mallet C. Creating large-scale City models from 3D-point clouds: a robust approach with hybrid representation [J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 99(1): 69-85.
- [6] Nan L L, Wonka P. PolyFit: polygonal surface reconstruction from point clouds [C] // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE, 2017: 2372-2380.
- [7] Zhang H C. Application analysis of building electrical technology in the field of intelligent building construction [J]. Building engineering technology and design, 2018(21): 138-142.
张红春. 建筑电气技术在智能建筑建设领域的应用分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018(21): 138-142.
- [8] Liu Q L, Hu W S, Wang C, et al. Application of the 3D laser scanner to the Hui-Quan substation modeling [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(2): 210-212.
刘求龙, 胡伍生, 王骢, 等. 三维激光扫描仪在惠泉变电站三维模型构建中的应用 [J]. 测绘科学, 2011, 36(2): 210-212.
- [9] Zhao C L. Research and application of substation visualization based on 3D panoramic rapid modeling [D]. Shandong: Shandong University, 2013.
赵春林. 基于三维全景快速建模的变电站可视化的研究和应用 [D]. 山东: 山东大学, 2013.
- [10] Zhang Z Q, Yang H B, Cheng Y, et al. Rapid modeling method of substation based on component matching [J]. Computer application and software, 2018, 35(7): 69-75, 210.
张子谦, 杨鸿斌, 陈侯, 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, 210.
- [11] Li Z B, Xia Y H, Bai H Q. Research on angle measurement accuracy of MAPTEK I-Site8200ER 3D laser scanner [J]. Zhejiang Agricultural Science, 2017, 58(8): 1462-1464.
李泽邦, 夏永华, 柏宏强. MAPTEK I-Site8200ER 三维激光扫描仪测角精度研究 [J]. 浙江农业科学, 2017, 58(8): 1462-1464.
- [12] Beijing beike and science and technology development Co., Ltd. Laser scanning point cloud vegetation filtering method on basis of reflection strength and terrain: CN102608620A [P]. 2012-07-25.
北京北科安地科技发展有限公司. 一种依据反射强度与地形形态的激光扫描点云植被过滤方法: CN102608620A [P]. 2012-07-25.
- [13] Cheng X J, Jia D F, Cheng X L. Theory and technology of massive point cloud data processing [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014.
程效军, 贾东峰, 程小龙. 海量点云数据处理理论与技术 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2014.
- [14] Peng H, Xu J H, Ni S Q. Application of ground 3D laser scanning technique in substation fine measurement [J]. Surveying and mapping bulletin, 2017(12): 107-111.
彭昊, 徐敬海, 倪绍强. 地面三维激光扫描技术在变电站精细测量中的应用 [J]. 测绘通报, 2017(12): 107-111.
- [15] Pang Z Y, Zhou Z F, Qian L, et al. Research on simplification and registration of point cloud data [J]. Software Guide, 2019, 18(6): 25-28.
庞正雅, 周志峰, 钱莉, 等. 点云数据精简与配准研究 [J]. 软件导刊, 2019, 18(6): 25-28.
- [16] Zeng R T, Xu J H. PCL-based coarse registration algorithm for point cloud data [J]. Surveying and Mapping Science and Technology, 2019, 7(1): 18-23.
曾如铁, 徐金鸿. 基于 PCL 的点云数据粗配准算法研究 [J]. 测绘科学, 2019, 7(1): 18-23.
- [17] Guo J H. The applied research of improved ICP algorithm based on KDTree in point cloud registration [J]. Microcomputer and Application, 2015, 34(14): 81-83, 86.
郭俊辉. 基于 KDTree 改进的 ICP 算法在点云配准中的应用研究 [J]. 微型机与应用, 2015, 34(14): 81-83, 86.
- [18] Shuai M R, Liao X Y, Cheng H, et al. An improved mean-valued method of adaptive median filter [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(3): 53-56, 90.
帅慕蓉, 廖秀英, 程辉, 等. 一种改进均值的自适应中值滤波算法 [J]. 测绘通报, 2019(3): 53-56, 90.
- [19] China southern power grid Co., Ltd. Standard design

- of substation of China Southern Power Grid [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
中国南方电网有限责任公司. 南方电网变电站标准设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [20] Li Y D, Li A F, Sun W, et al. Transformer station three-dimensional modeling method and system based on surveying and mapping and two-dimensional image: CN105719277A[P]. 2016-06-29.
李永东, 李爱锋, 孙伟, 等. 一种基于测绘与二维图像的变电站三维建模方法及系统: CN105719277A [P]. 2016-06-29.
- [21] Qu Y L, Yue Q J, Lan C H. Research and application of 3Dmax technology in virtual substation design[J]. Communication World, 2016(2): 38.
屈宜丽, 岳秋菊, 蓝才会. 3Dmax技术在虚拟变电站设计中的研究与应用[J]. 通讯世界, 2016(2): 38.
- [22] Wang H. Complete learning manual of 3DS MAXscript script language[M]. Beijing: Publishing House of Ordnance Industry, 2006.
王华. 3DS MAXScript脚本语言完全学习手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.
- [23] He T, Xiong F G, Han X, et al. A feature curve extraction algorithm for point cloud based on covariance matrix[J]. Computer Engineering, 2018, 44 (3): 275-280, 286.
贺彤, 熊风光, 韩燮, 等. 一种基于协方差矩阵的点云特征曲线提取算法[J]. 计算机工程, 2018, 44 (3): 275-280, 286.
- [24] Wang X H, Wu L S, Chen H W, et al. Feature line extraction from a point cloud based on region clustering segmentation [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1110001.
王晓辉, 吴禄慎, 陈华伟, 等. 基于区域聚类分割的点云特征线提取[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1110001.
- [25] Bai H Q, Xia Y H, Yang M L, et al. 3D modeling and mapping technology and application in the development of large karst cave tourism [J]. Software Guide, 2019, 18(6): 138-142.
柏宏强, 夏永华, 杨明龙, 等. 大型溶洞旅游开发中三维建模测绘技术及应用[J]. 软件导刊, 2019, 18 (6): 138-142.