

面向智能电网的地下电力管线三维建模关键技术研究

文 / 樊 亚 上海茗川测绘技术有限公司

摘要：针对传统电力管线建模依赖人工干预、效率低且难以适应复杂地下环境的问题，本研究提出一种基于多源管线数据（如 CuD、点云管线属性数据库）的快速三维建模方法。通过融合改进的参数化 BIM 建模技术，实现管线空间坐标与属性数据的自动化匹配与批量重构，并引入拓扑优化算法解决管线交叉冲突问题。

关键词：地下电力管线；三维建模；多源数据融合；BIM 技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.080

引言

电力供应是现代社会发展的重要保证，智能化电网是具有高度智能、自动化、数字化及交互性的新一代电力系统，是未来电力系统的重要趋势。而地下电力管道作为智能化电力系统的重要组成部分，担负着电力传送以及电力分配的重要作用，但由于地下环境复杂、管道布局混乱，传统的一维地图以及简单的三维模型无法完全直观地表达地下电力管道所处的空间位置、连接关系以及管道属性等

具体信息，给管道规划、建设与运营管理造成极大困扰。

随着 GIS、激光测量、BIM 等技术的不断发展，为我们提供了一种新工具和新视角建立地下电缆的三维实体模型，通过多样化的数据采集和融合能更好地还原地下电缆的实际情况。本文的目标是以高效率和高精度完成不同的数据源的数据处理和深入分析，再借助先进的建模技术，寻求一种精确度高的地下电缆三维建模方法，以期智能电网的发展提供技术支持。

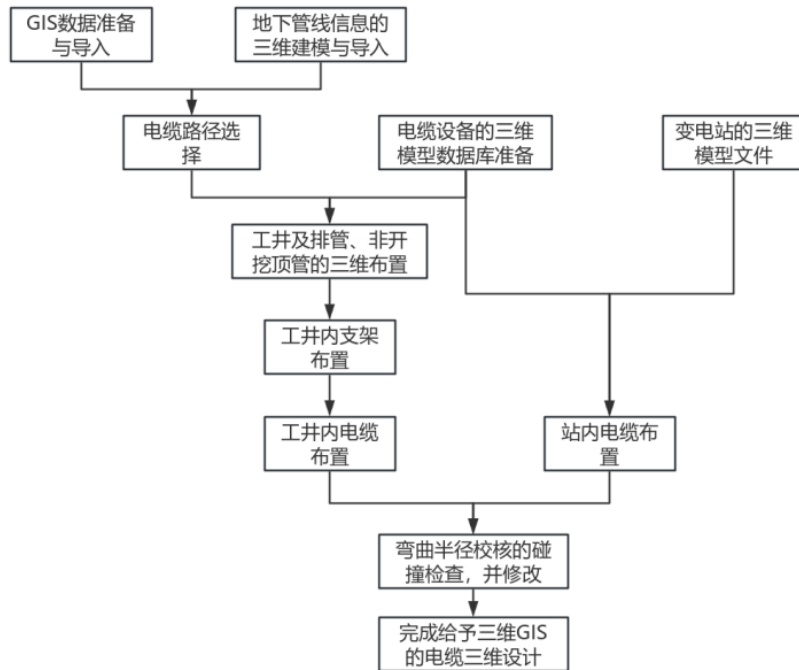


图 1 基于 GIS 的城市地下电缆三维设计方法与流程

一、地下电力管线三维建模理论基础

（一）多源管线数据类型与特点

1. CuD 数据结构与应用场景

城市公用网络数据 (CuD) 是基于城市地理数据模型 CityGML 的专用数据扩展类型，专用于描述城市的公用网络，其电缆管道具有非常精细的几何外形以及较强空间相关性，能够详细描述各类属性信息及相关信息，如电力管线的几何外形、空间相关性等。

CuD 数据从数据结构上来看，是从大到小由城市大区域到小的管道组件等各种级别的组成，并非单纯存储

电力线路上的地理位置、尺寸以及材料等基本属性信息，还能体现其中的拓扑关系，比如连接起点、连接终点、分岔点等等。CuD 数据在实际应用中，更多的是帮助城市进行规划建设，方便人们了解目前地下电缆信息，同时也能作为以后电缆计划和设计的参考；在运维管理中，根据实时监测的信息对目前电力线路的使用情况进行动态跟踪和分析。

2. 点云数据获取与管线特征提取

激光扫描或无人机倾斜摄影等高端设备获得的大规模点云数据，能有效地描述实物的几何形态和表面属

性特征。对于地下电缆模型的建构，其获取途径一般选择地面激光扫描或车载激光扫描。前者适用于对单一区域内的电缆获取高精度图片，进而提取出具体的几何参数；后者适合于大规模的电缆调查项目，可以在较短时间内获取较广覆盖范围内的大量的电缆点云数据。

当点云数据得到之后，我们需要做的便是从里面提取出管道特性。最为常见的几种提取管道特性的方法有：几何特征的方法和机器学习的方法。前者的原理是通过管道在线的云数据上较为直观的线性、圆柱面等几何特征，利用直线拟合、圆柱面拟合等算法对管道点云数据进行提取；后者则是通过训练分类模型，达到自动识别出在线云数据中管道点的目的。我们可以较为准确且方便地从庞大的云数据当中筛选出地下电缆管道的点云数据，以此为基础来进行地下电缆管道的三维建模。

3. 管线属性数据库架构设计

管线属性数据库是承载所有地下电力管线特性数据信息的基本，其本身的存取和管理质量对存取的效率等有着十分显著的影响。理想的数据库要能够对基础属性（包括管道名称、编号、管径、材料、埋深等）、操作属性（包括输送电压等级、电流、负荷等）、维护属性（包括安装日期、修理记录、使用年限等）等等这些数据信息进行涵盖。

通常会采用关系型数据库对数据库结构进行设计，通过建立不同的表格来记录不同的属性数据，通过外键的关系构成表之间的联系。例如，可以建立“管线基础资料表”用来记录管道的基础信息，“管线运行状态表”用来记录管线的运行状态，“管线维护记录表”用来记录管线的维护信息，利用管道编号的外键将这三个表格关联起来。另外为了加快数据查询和管理的速度，需要适当地设计索引和视图，保证数据库能够及时完成各种数据的操作。

（二）BIM 建模技术原理

1. 参数化建模核心思想

模型组件都有参数的限定，通过几何参数以及限制来界定 BIM 建模方式核心理念即是参数化建模。这种方法实现了对于模型的快速创建以及修订，其在模型创建以及修改过程中，模型组件已不再是个体的几何物体，而是被定义为能够被参数驱动的智能对象。比如在创建电缆管道模型的过程中，可以将其直径、长度、弯曲等参数设置成参数，然后根据事前已经设定的限制规则对其加以修改，从而快速生成满足需求的电缆管道模型。

在参数化建模下，可通过参数的变化快速完成建模工作，从而提高建模效率和适应性；对于多个设计的调整，可快速进行设计选项生成与比选；当需要完成模型后期的调整时，仅仅通过修改参数，整体模型能够自动更新，从而能够大幅度降低多次建模的成本。同时也可方便地做到模型与其他工程信息的链接，从而提供以后的工程研究、实施模拟等应用工作所需求的精确信息基础。



图 2 参数化建模图

2. BIM 在电力管线建模中的优势

BIM 技术在建立电力管线模型当中能够展示出显著的优势，一是能够将电力管线的几何信息、属性和电力管线和其余构件间的空间关系合并于一个三维模型内，达到对其进行完整显示和控制。二是由于电力管线在施工期间可能出现交叉，而 BIM 技术是具有多专业协同功能，所以当电力管线与其他比如水、气管线进行配合设计时，各专业设计师能够在同一个模型内工作，同时能够立即看到各类管线影响的情况，实现对管线的及时调整避免施工阶段的设计变更或返工。

其次，BIM 模型还能与工程项目建设过程、工程竣工后的维护等环节结合。在建筑过程中，可以将 BIM 模型与施工进度表结合，实现在建过程中的可视化仿真的模拟和监视；在运营阶段，通过 BIM 模型中存储的管线特性数据、位置信息，发现其准确的位置从而找到故障从而尽快消除，提高了运行维护管理效果和准确度。

二、基于多源数据的快速三维建模关键技术

（一）多源数据融合技术

1. 数据格式转换与标准化处理

在创建地下电力管线三维模型时，会遇到很多不同来源的数据，这些数据各自有着特有的文件格式，比如 CuD 数据通常采用 XML 格式存储，点云数据通常有 LAS 和 PLY 两种格式，而有关管道属性的数据很可能存储在 SQL 数据库中。所以，想要做到不同类数据的统一，就一定要对不同类数据进行格式转化。CuD 数据可以利用相关解码器，将其转化成一种便于操作的中介格式，如 JSON 格式；点云数据可以通过点云处理程序，将不同格式转化成统一的格式，便于后期处理与研究，如 LAS 格式。

2. 空间坐标系统一方法

由于多源数据采集过程中可能存在不同的空间坐标系如高斯-克吕格坐标系、utm 坐标系等，在数据融合前需对空间坐标系进行统一。常见的空间坐标系的统一方法有坐标转换、投影变换。

坐标转换是将由不同坐标系中的坐标值转换为同一坐标系的过程，平面坐标转换通常有七参数坐标转换或者三参数坐标转换等等。高度变换，通常可以通过高程基准面的统一来实现，高程基准面的统一是通过大地球表面来实现的。投影变换将地理坐标（即经纬度坐标）转换为平面坐标以便于对二维平面上的要素进行处理和显示。在地下电缆线路模型构建中我们一般会选择符合城市空间的高斯投影坐标系，并使用在同一坐标系内，确保各来源数据在空间上的统一性。

(二) 改进的参数化 BIM 建模技术

1. 自动化匹配算法设计

建立一组高效的自动配对算法, 实现管道位置和属性的无缝对接。算法利用管道唯一的标识码(管道序号)作为匹配的依据, 它会对来自不同源的数据进行搜索和比对, 所有带有该种标识码的管道数据记录之间进行关联, 实现经纬信息和属性信息关联的目标。

2. 批量重构流程优化

对于传统 BIM 建模方式, 布置很多根管时在调整方面出现低效的问题。为了实现大范围管路调节工作效率

的提高, 对管路数据要进行分类处理。结合管路性质、区域等特征将数据划分不同的阶段, 减少数据量实现工作速率的增长。

重建过程中采用并行计算的思路, 利用多核 CPU 或分布式的计算集群, 对多个批次的管道数据同时进行模型处理。同时对模型创建过程中的参数设置与约束也进行了优化, 先预先定义常用管道参数模板, 在大量重建中直接调用模板参数, 减少了参数设置的工作量。最终实现在一次重建中的大规模地下电缆线的快速重建, 提高了 3D 建模效率。

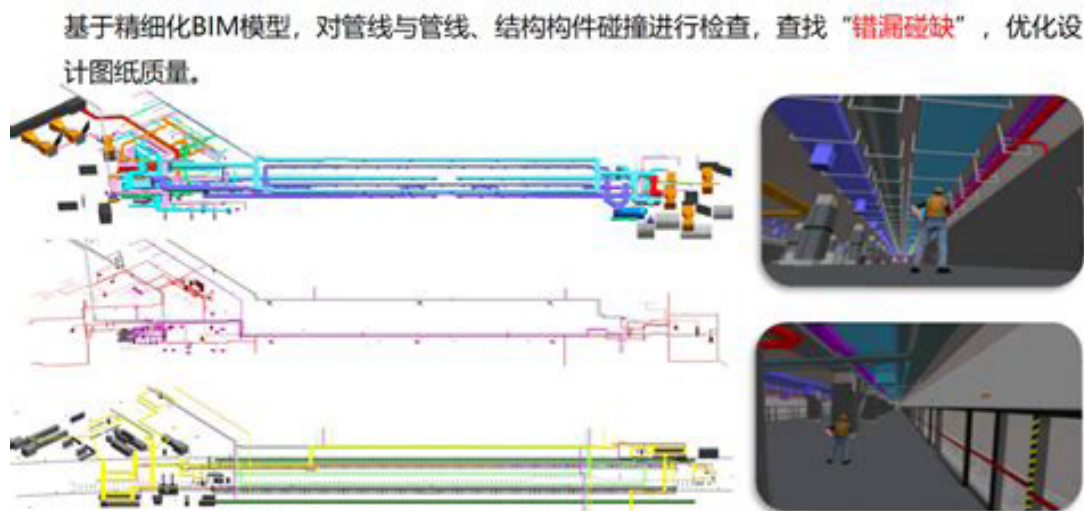


图 3 BIM 协同设计

(三) 拓扑优化算法研究

1. 管线交叉冲突检测机制

管道空间位置关系应用算法方法: 在对电缆设施地下电缆线路进行模型建模时存在大量的管道碰撞现象, 大大影响了建模的精度及其利用性。因此, 本文提出了基于空间几何关系来实现电缆管线之间的碰撞检测, 这种检测算法主要通过检测管道的间距、管道之间的接触信息, 来判定是否存在碰撞的情况。

2. 冲突解决方案与优化策略

交叉冲突得到确认后, 需要考虑管道交叉冲突的解决方案。常用的解决方案有调整管道高度方案、修改管道路径方案、增设管道避让方案等, 在制定解决方案时要考虑管道功能需求、施工难易程度、费用等各种因素。

对于重要的电缆线路, 若调高的矛盾不损伤线路的实际使用, 可优先采用; 若调高的矛盾不可调, 则要调整该线的路径, 调整后再验证该线路的合理性和对环境的影响。

结语

本文主要针对以往地下电缆沟管道模型构建过程中存在的问题展开分析, 并深入研究了以多数据源进行高效三维模型构建的最佳技术方案, 解剖了不同种类管线的数据和其属性特征, 强调了 CuD 数据、点云数据和管

线属性数据库在地下输电线路模型构建过程中的重要性; 基于 BIM 建模的相关基础原理, 结合改进的参数化 BIM 建模技术实现线路的空间坐标位置信息和属性数据联合配准和规模化重构造; 并采用拓扑优化算法优化处理线路与其它设施之间的交叉冲突。

参考文献

- [1] 刘莉莉, 张晓宇, 叶小兵, 张雨薇. 基于三维点云自动化建模及空间量测智能数字电网应用 [A] 2023 年江西省电机工程学会年会论文集 [C]. 江西省电机工程学会, 江西省电机工程学会, 2024: 3.
- [2] 邢昆, 赵立刚, 李利军, 郭涛, 裴兴毅, 杨博超. 三维数字化仿真技术在电缆通道建设管理中的应用 [J]. 科技风, 2017, (17): 64.
- [3] 吕磊, 单宝麟, 闫松. 基于三维 GIS 的地下电力管线管理系统的设计与实现 [J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39 (03): 95-98.
- [4] 尹晖, 孙梦婷, 干喆渊, 张晓鸣, 黄珊. 基于 SketchUp 的输电杆塔三维建模研究 [J]. 测绘通报, 2015, (04): 34-37.

作者简介: 樊亚, 1982 年 6 月, 女, 汉族, 江苏, 大学本科, 工程师, 注册测绘师, 研究方向: 地下管线三维跟踪测绘及质量管理。