

架空输电线路的三维数字化设计技术的分析

毛瑞旭 王宗实

沈阳电力勘测设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]在全球能源结构转型与“双碳”战略推进的背景下,电力行业正经历从传统基建模式向数字化、智能化方向的深刻变革。架空输电线路作为电力系统的骨干网络,其设计质量直接影响电网安全、经济性与环境适应性。然而,传统二维设计模式受限于信息割裂、协同效率低下及空间表达不直观等缺陷,难以满足复杂地形环境、高密度输电走廊及绿色低碳发展的新需求。三维数字化设计技术通过整合地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM)与人工智能算法,构建覆盖规划、设计、施工、运维的全生命周期管理体系,为输电工程提供更高效、精准的解决方案。文中聚焦该技术体系的理论框架、核心优势与实施路径,系统剖析其技术逻辑与应用价值,旨在为电力行业数字化转型提供理论支撑与实践参考。

[关键词]三维数字化设计;架空输电线路;点云数据

DOI: 10.33142/aem.v7i5.16800

中图分类号: TM75

文献标识码: A

Analysis of 3D Digital Design Technology for Overhead Transmission Lines

MAO Ruixu, WANG Zongshi

Shenyang Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: Against the backdrop of global energy structure transformation and the promotion of the "dual carbon" strategy, the power industry is undergoing a profound transformation from traditional infrastructure models to digital and intelligent directions. As the backbone network of the power system, the design quality of overhead transmission lines directly affects the safety, economy, and environmental adaptability of the power grid. However, traditional two-dimensional design patterns are limited by defects such as information fragmentation, low collaborative efficiency, and lack of intuitive spatial expression, making it difficult to meet the new demands of complex terrain environments, high-density transmission corridors, and green and low-carbon development. 3D digital design technology integrates geographic information systems (GIS), building information modeling (BIM), and artificial intelligence algorithms to build a full lifecycle management system covering planning, design, construction, and operation, providing more efficient and accurate solutions for power transmission projects. The article focuses on the theoretical framework, core advantages, and implementation path of this technology system, systematically analyzing its technical logic and application value, aiming to provide theoretical support and practical reference for the digital transformation of the power industry.

Keywords: 3D digital design; overhead transmission lines; point cloud data

引言

覆盖 10 万公里架空输电线路、28 万基输电杆塔以及地形地貌地物等数据,将真实电网在数字空间以数字孪生的方式,一比一三维立体还原和数字化全景呈现。数字技术的引入,将给能源电力行业带来深远变革。国家能源局印发《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》提出,针对电力、煤炭、油气等行业数字化智能化转型发展需求,通过数字化智能化技术融合应用,为能源高质量发展提供有效支撑。到 2030 年,能源系统各环节数字化智能化创新应用体系初步构筑、数据要素潜能充分激活,一批制约能源数字化、智能化发展的共性关键技术取得突破。在此背景下,三维数字化设计通过构建虚实映射的智能平台,实现线路路径优化、设备选型验证与施工模拟的一体化管控,成为突破行业瓶颈的关键技术路径。

1 数字化转型对电力行业的推动

电力行业作为国民经济的基础性产业,其数字化转型

已成为国家战略的重要组成部分。2022 年国家发展改革委发布的《电力行业数字化转型行动计划》明确提出,需在 2025 年前实现输电线路设计、施工、运维的全流程数字化覆盖。以国家电网为例,其 2023 年发布的《数字电网白皮书》显示,三维数字化设计技术已在特高压工程中实现试点应用,设计周期平均缩短 30%,成本节约率达 15%。南方电网在粤港澳大湾区开展的“数字孪生电网”建设项目中,通过三维设计平台集成线路走廊地理信息,成功规避了 52 处生态敏感区域^[1]。行业实践表明,数字化转型不仅提升工程效率,更成为实现电网绿色低碳发展的核心路径。

2 架空输电线路三维数字化设计理论框架

2.1 设计流程重构

传统架空输电线路设计采用分阶段、多专业的串行作业模式,导致设计周期冗长、信息传递效率低下,且跨专业协同难度大。三维数字化设计通过构建全流程数据贯通

的一体化平台,实现了从勘测、电气计算、结构设计到施工模拟的并行协同。其核心在于以数据驱动取代人工经验主导的设计范式,通过参数化建模技术将设计规则转化为可执行的逻辑算法。例如,基于规则引擎的自动校核系统,能够实时检测导线弧垂与安全距离的合规性,减少人工复核工作量。此外,全生命周期数据管理系统的引入,使设计变更可自动触发关联模型的更新,避免因信息滞后导致的返工。

2.2 技术体系构成

2.2.1 地理信息系统基础

GIS 技术为三维数字化设计提供了空间信息整合与分析的核心能力。通过融合高分辨率卫星影像、数字高程模型、地质构造数据及气象历史记录,构建多维度的线路走廊环境模型。在路径优化中, GIS 的空间叠加分析功能可自动识别生态保护区、矿产压覆区等敏感区域,结合地形坡度、地质稳定性等约束条件生成最优路径方案。同时,动态环境模拟技术能够预测线路运行期间的地质灾害风险,例如基于历史滑坡数据的机器学习模型,可评估不同路径方案的长期安全系数。这种空间智能分析能力,使设计从被动避让转向主动风险防控,显著提升线路工程的抗灾韧性。

2.2.2 BIM 技术融合应用

BIM 技术在架空输电线路设计中的应用,突破了传统二维图纸的信息表达局限。通过建立设备级参数化构件库,实现杆塔、金具、绝缘子等部件的三维精细化建模。构件属性中嵌入材料规格、力学性能及工艺要求等非几何信息,支持设计阶段的结构强度校核与工程量自动统计^[2]。在协同设计场景中, BIM 模型作为多专业数据交互的载体,可实现电气间隙校核、电磁干扰分析等跨学科仿真。例如,导线舞动仿真模块通过耦合气象数据与结构动力学参数,能够预测极端天气下的线路摆动幅度,指导防舞装置优化设计。此外, BIM 与施工进度管理系统的集成,可生成 4D 施工模拟动画,直观展示各阶段施工界面与资源调配需求。

2.2.3 点云数据处理技术

激光雷达与无人机倾斜摄影技术的结合,为线路勘测提供了高精度、高效率的数据采集手段。点云数据经过去噪、配准与语义分割处理后,可自动提取植被高度、建筑物轮廓及交叉跨越设施的空间坐标。在路径优化中,点云生成的数字地表模型能够精确反映线路走廊的地物分布,辅助设计人员评估林木砍伐量、房屋拆迁范围等关键指标。针对复杂地形区域,多期点云数据的对比分析可监测地形变趋势,为杆塔基础设计提供地质稳定性评估依据。此外,点云数据与 BIM 模型的融合应用,可实现施工阶段的实景与设计模型偏差分析,指导现场精准放样与施工质量控制。

3 核心关键技术分析

3.1 三维空间建模技术

三维空间建模技术是架空输电线路数字化设计的核心基础,其核心在于构建高度逼真且可交互的三维场景。基于非均匀有理 B 样条曲面建模技术,能够精确描述杆塔曲面的复杂几何特征,同时结合实体建模方法实现导线、绝缘子等组件的物理特性表达。在微地形建模领域,通过离散点云插值算法生成高精度数字高程模型,可模拟山脊、沟谷等地貌细节,坡度分析精度可达亚米级。动态粒子模拟技术的引入,能够复现导线在风荷载作用下的舞动轨迹,结合流体力学仿真预测导线与空气的相互作用力,为防舞装置设计提供理论依据。此外,光照渲染引擎的优化使三维场景具备真实感可视化能力,支持设计人员多视角观察线路与周边环境的空间关系,辅助决策者直观评估方案的可行性。

3.2 多源数据集成技术

多源数据集成技术通过构建统一的数据中台架构,解决电力工程中异构数据的融合难题。采用基于本体的语义建模方法,对 GIS 空间数据、BIM 构件属性、气象监测记录及设备台账信息进行标准化映射,建立跨领域数据的逻辑关联关系^[3]。在数据清洗环节,通过模糊匹配算法消除不同来源数据的命名冲突与量纲差异,例如将杆塔坐标系统一转换至国家 2000 大地坐标系。实时数据流处理技术的应用,可同步接入气象雷达、地质灾害监测站等动态信息源,实现线路运行风险的分钟级预警。数据血缘追踪功能完整记录每个数据的产生、加工与使用路径,确保设计过程的可追溯性。在安全管控层面,采用分级授权机制与数据脱敏技术,防止敏感地理信息与设备参数的泄露。

3.3 自动化设计算法

自动化设计算法通过将工程设计规则转化为数学优化模型,显著提升方案生成的智能化水平。遗传算法在路径优化中的应用,以线路长度、转角数量、拆迁成本等多目标函数为适应度评价指标,通过选择、交叉与变异操作迭代逼近最优解。深度学习技术通过训练历史工程数据库,建立地形特征与杆塔选型的映射关系,实现典型区段的自动化排位设计。在复杂交叉跨越场景中,强化学习算法可模拟设计人员的决策逻辑,自主调整导线弧垂与安全距离参数。拓扑优化算法的引入,能够根据荷载分布自动生成杆塔结构的轻量化构型,在保证力学性能的前提下减少材料用量。算法容错机制的设计,可自动识别并修正违反电气间隙、电磁屏蔽等规范要求的方案缺陷,确保输出结果符合行业标准。

4 技术优势与价值体现

4.1 设计效率提升机制

三维数字化设计通过构建参数化模板库与规则引擎,将重复性设计任务自动化。参数化建模工具允许设计人员

通过调整关键参数快速生成适配不同场景的杆塔模型,避免重复绘制带来的时间损耗。规则引擎内置数百条设计规范与校核逻辑,可实时检测导线弧垂、绝缘配合等关键指标的合规性,并将错误定位精度细化至具体构件节点。版本管理系统的引入支持设计方案的快速回溯与对比分析,方案迭代周期从传统人工模式的数周缩短至数小时。智能批注功能实现审查意见与三维模型的直接关联,减少沟通环节的信息失真。

4.2 工程精度保障体系

精度控制贯穿三维数字化设计的全流程。在数据采集阶段,采用 GNSS-RTK 定位技术与惯性导航系统组合定位方案,将地面控制点测量误差控制在厘米级。模型构建过程中,通过点云数据与 BIM 模型的配准比对,确保虚拟场景与实地环境的空间一致性。数字化移交阶段,基于工业级三维扫描仪获取施工实体点云数据,与设计模型进行偏差分析,识别并修正毫米级误差。在运维阶段,激光雷达定期扫描线路走廊,通过点云差分计算监测杆塔基础沉降、导线弧垂变化等细微形变,建立全生命周期的精度闭环管理。

4.3 协同工作模式创新

基于云原生架构的协同设计平台,打破传统专业间的数据壁垒。通过角色权限管理与数据版本控制,实现电气、结构、土建等多专业人员的并行作业。实时协同编辑功能支持多人同步修改同一模型,操作记录可精确追溯至具体用户与时间节点。移动端轻量化浏览器的开发,使现场施工人员能够通过平板设备查看三维模型,并实时反馈施工问题。数字会议系统的集成,支持异地团队通过虚拟现实设备进行沉浸式方案讨论,显著提升决策效率。知识图谱技术的应用,将设计经验转化为可复用的规则库,辅助新入职工程师快速掌握复杂场景的设计要点。

4.4 资源优化与可持续性

三维数字化技术通过精确量化工程需求,实现资源的精细化配置。在材料计算方面,BIM 模型自动统计混凝土、钢材等主要建材用量,误差率低于传统手工算量的 2%。施工模拟模块通过 4D 进度关联,优化机械调度与人力投入方案,减少设备闲置时间。在生态保护领域,基于遥感影像的植被识别算法,可自动生成线路路径的生态影响评估报告,指导设计人员优先选择低环境敏感度的走廊方案。碳足迹计算引擎集成材料生产、运输、施工等环节的碳排放因子,量化不同设计方案的碳中和贡献度,为绿色电网建设提供决策支持。

5 技术挑战与应对策略

5.1 数据管理难题

5.1.1 海量数据处理瓶颈

三维数字化设计产生的海量数据对存储、传输与计算能力提出严峻挑战。单条输电线路的全要素模型包含地形网格、设备参数、环境贴图等多类型数据,其存储规模随

场景复杂度呈指数级增长。为解决硬件算力限制,需采用分布式存储与并行计算架构,例如基于 Hadoop 的集群管理系统可将数据切片存储于多个节点,并通过 MapReduce 算法实现高效查询。在渲染优化层面,细节层次技术根据视点距离动态调整模型精度,降低 GPU 负载。数据流压缩算法在保持几何特征的前提下,将点云数据压缩至原始体积的 30%,显著提升网络传输效率。

5.1.2 数据标准化解决方案

数据标准缺失导致跨平台模型交互时出现属性丢失、坐标偏差等问题。需构建覆盖几何建模、语义定义、数据交换的全链条标准体系。在几何层面,采用 ISO 10303 标准定义设备构件的拓扑关系;语义层面,基于 IFC 标准扩展输电线路专用实体类型,如“导线弧垂”“绝缘子串”等业务对象^[4]。数据治理工具链的开发至关重要,包括模型合规性检查器、属性映射引擎及坐标系转换插件。通过定义元数据规范,明确数据来源、精度等级与更新时效,确保多源数据融合的逻辑一致性。

5.2 技术融合障碍

5.2.1 异构系统兼容性问题

电力企业现有信息系统采用不同的数据模型与接口协议,形成技术融合壁垒。中间件技术成为关键突破口,例如基于 ESB 的消息路由机制,可实现 BIM 模型与资产管理系统的设备台账双向同步。在接口标准化方面,遵循 OGC 的 WFS、WMS 服务规范,确保 GIS 平台与设计软件的空间数据互操作。数据映射模板的预定义可自动化完成字段匹配,例如将 BIM 构件的“材料强度”属性转换为有限元分析软件中的弹性模量参数。

5.2.2 跨平台数据交互协议

跨系统数据交互需解决语义鸿沟与格式兼容性问题。IFC 标准作为建筑领域通用数据模型,可通过实体扩展增加输电线路特有属性,如“导线分裂数”“地线型号”等。基于 JSON-LD 的轻量化数据交换格式,支持动态添加行业语义标签,实现机器可读的上下文关联。在数据完整性保障方面,采用哈希校验与数字签名技术,确保传输过程中模型信息不被篡改。协议适配器的开发可兼容多种工业标准,降低平台迁移成本。

5.3 安全风险防控

5.3.1 三维模型信息安全

三维模型包含电网拓扑、地理坐标等敏感信息,需构建多层次防护体系。在存储层,采用 AES-256 加密算法对模型文件进行全盘加密,并结合国密 SM4 算法实现双重保护。访问控制层面,基于 RBAC 模型动态分配数据权限,例如限制施工承包商仅能查看局部线路模型。区块链技术的引入,通过智能合约记录模型修改日志,确保操作记录的不可抵赖性。零信任架构强制实施持续身份验证,即使内部用户也需通过多因子认证才能调取关键数据。

5.3.2 数字孪生系统可靠性

数字孪生系统的可靠性直接关系到电网物理实体的安全运行。需建立“模型-数据-算法”三位一体的验证机制：模型层面，通过形式化验证工具检查三维场景的几何逻辑一致性；数据层面，采用异常检测算法识别传感器数据的离群值；算法层面，对仿真引擎进行边界条件压力测试，验证极端工况下的计算稳定性。冗余容错设计同样重要，例如部署双活数据中心实时同步孪生体状态，确保单点故障时系统仍可持续服务。

6 结语

三维数字化设计技术的深化应用，标志着架空输电线路工程从粗放式建设向精细化管理的跨越。通过 GIS 空间分析、BIM 协同建模与智能算法的有机融合，该技术不仅显著提升了设计效率与工程精度，更构建了贯穿规划、施工、运维的全链条数字化体系。然而，数据治理、系统兼容性及安全风险等问题仍需持续攻关。未来，随着数字

孪生、边缘计算等技术的进一步成熟，输电线路设计将向实时感知、自主决策的更高阶形态演进。

[参考文献]

- [1]郑博.基于数字化的架空输电线路设计三维模型构建[J].电工技术,2023(15):122-124.
- [2]尤建新,李鹏程,李帆,等.三维数字技术在输电线路工程中的应用[J].集成电路应用,2023,40(11):180-181.
- [3]于跃,韩业庆.韩庄泵站 110 kV 供电线路迁改工程研究与实践[J].水电站机电技术,2024,47(2):60-63.
- [4]李明臻,路翎.三维数字化设计技术在输变电工程中的应用研究[J].山东电力高等专科学校学报,2024,27(1):14-17.

作者简介：毛瑞旭（1990.10—），毕业院校：东北电力大学，所学专业：电气工程及其自动化，当前就职单位：沈阳电力勘测设计院有限责任公司，职务：线路电气，职称级别：工程师。