

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0102-06

输变电工程输电线路三维数字化平台设计与实现

李凯¹, 武东亚², 周怡², 宋景博¹, 张金凤¹

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450000; 2. 国网河南省电力公司, 郑州 450000)

摘要:随着特高压输电工程规模的不断扩大,输电线路途经区域的地理环境日趋复杂,传统二维设计手段在应对地形地貌、生态环境及施工成本等多重约束时,逐渐暴露出路径规划不直观、数据整合困难、设计效率低下等问题。针对上述挑战,设计并实现了一套输变电工程输电线路三维数字化平台。该平台结合三维地理信息系统、卫星遥感技术和众多的3D设计软件,可以进行输电线路的可视化设计。研究利用该平台对复杂的地理信息进行采集,然后利用加权栅格矩阵对建设的三维地理信息进行建模,接着以最低建设成本和最高收益为目标,使用Q值算法对输电线路的最优路径进行规划。最后将其应用到华东-华北特高压直流输电工程中取得了显著效果。以A1-1路线为例,结果显示,平台设计的路线比原计划路线节约成本约102.6万元,缩短工期16天,可以极大减少输电线路的设计成本,缩短设计时间。

关键词:输电线路;三维地理信息系统;卫星遥感技术;Q值算法;可视化设计

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0102-06

Design and implementation of a 3D digital platform for transmission lines in power transmission and transformation engineering

Li Kai¹, Wu Dongya², Zhou Yi², Song Jingbo¹, Zhang Jinfeng¹

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450000, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: With the continuous expansion of the scale of ultra-high voltage transmission projects, the geographical environment of the areas where transmission lines pass through is becoming increasingly complex. Traditional two-dimensional design methods gradually expose problems such as lack of intuitive path planning, difficulty in data integration, and low design efficiency when dealing with multiple constraints such as terrain, ecological environment, and construction costs. In response to the above challenges, a three-dimensional digital platform for transmission lines in power transmission and transformation engineering is designed and implemented. This platform combines 3D geographic information systems, satellite remote sensing technology, and numerous 3D design software to enable visual design of transmission lines. The research utilizes this platform to collect complex geographic information, and then models the three-dimensional geographic information constructed using a weighted grid matrix. Then, with the goal of minimizing construction costs and maximizing profits, the Q-value algorithm is used to plan the optimal path of transmission lines. Finally, it was applied to the East China North China ultra-high voltage direct current transmission project and achieved significant results. Taking the A1-1 route as an example, the results show that the platform designed route saves about 1.026 million yuan in cost and shortens the construction period by 16 days compared to the original plan route. The research and design platform can greatly save the cost and shorten time.

Keywords: transmission lines; GIS; satellite remote sensing technology; Q-value algorithm; visual design

智能互联华东-华北特高压直流输电工程是连接华东与华北两大经济区实现电力资源跨区域优化配置的关键工程。工程新建特高压换流站4座,新建特高压直流输电线路横跨华东与华北两大地区。该输电工程能够将华东地区丰富的清洁能源输送到华北地区,缓解华北地区的能源供需压力,同时也能够带动沿线地区的经济发展和产业升级。但是工程穿越的区域地形复杂多变,从华东的平

原水乡到华北的山地丘陵,存在高山、河流、湖泊等地形要素,对线路走向和铁塔位置提出挑战,且线路设计需要充分考虑环境保护和生态平衡^[1-2]。同时当地气候条件恶劣,工程面临着高温、高湿、高盐雾等挑战。此外,部分地区交通不便,会影响设备材料的运输和施工进度。

针对上述挑战,国内外在输变电工程输电线路的设计与实现方面已开展了广泛的研究。国内刘彪等^[3]基于计

收稿日期:2024-09-23;录用日期:2025-01-24

基金项目:国网河南省电力科技项目(5217L0210009)

作者简介:李凯(1992—),男,硕士,工程师,研究方向:电气工程。

引用本文:李凯,武东亚,周怡,等. 输变电工程输电线路三维数字化平台设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(6):102-106,182. (Li Kai, Wu Dongya, Zhou Yi, et al. Design and implementation of a 3D digital platform for transmission lines in power transmission and transformation engineering [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(6):102-106,182.)

算语言与数字化技术,开发了一个针对架空输电线路工程EPC项目的基础设计施工阶段的塔基可视化查询平台。该平台集成了塔位精确定位、铁塔基础的三维可视化模拟、设计施工信息的实时反馈与更新、以及全面的信息管理功能,旨在实现数据的联动处理、深度分析及一体化管理,并支持项目过程中的双向动态调整与优化。但不同的设备和浏览器可能对平台的运行效果产生影响。如果平台的兼容性不佳,可能导致在某些设备上无法正常使用,影响项目的顺利进行。丁磊等^[4]提出基于激光雷达与LiEarth平台的输电线路三维可视化方法。采用激光雷达对LiEarth平台的输电线路进行数据采集,利用小波阈值对具有噪声的数据进行阈值计算,采用小波阈值法对计算完成的数据进行去噪,依据去噪结果,构建三维可视化模型,采用粒子群算法对该模型进行求解,以此实现LiEarth平台的输电线路三维可视化。但激光雷达的扫描效果可能受到天气、光照等环境因素的影响。例如,在恶劣天气条件下,激光雷达的扫描精度可能会降低。且对于复杂地形和植被覆盖区域,激光雷达的穿透能力有限,可能无法完全获取地下或植被覆盖下的地形信息。国外Yang等^[5]为科学合理规划智慧城市中的输电线路,首先利用地理信息系统(GIS)平台获取规划区的地理信息,并结合国家电

网的典型设计成本和地方文件估算智慧城市区并网后的电网成本。接着,采用蚁群算法在智慧城市中优化确定输电线路的最佳路径。最后,对规划的主要经济技术指标进行了综合评估。蚁群算法虽然是一种有效的路径优化算法,但在实际应用中可能受到多种因素的限制,如算法参数的选择、计算资源的限制等,这些因素可能影响算法的性能和结果的准确性。

为了解决上述方法存在的问题,研究开展了输变电工程输电线路三维数字化平台的设计与实现工作,期待为电力工程设计提供更加高效优质的解决方案。

1 三维数字化平台

1.1 平台设计分析

研究设计的输变电工程输电线路三维数字化平台主要以数字化驱动模型的形式,通过360°高清影像、数字高程模型、施工地地理数据等构建出数字化的三维工程施工环境^[6-8]。再以3D设计软件为基础,根据输电线路位置和建设信息,采用三维图像建模技术、3D测量技术、物联网技术、人工智能技术,实现输电线路途经路线的三维信息构建^[9]。为有效地管理和整合输电线路相关的各种数据,研究对该平台的数据管理结构设计见图1。

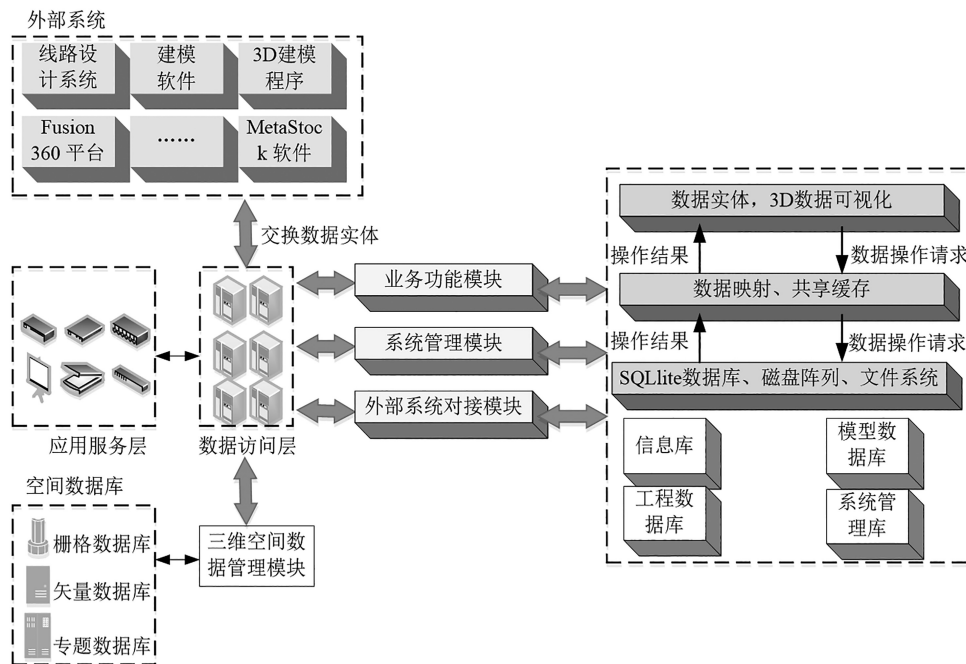


图1 平台数据管理结构设计

Fig. 1 Platform data management structure design

如图1所示,研究设计的数据管理结构主要用于连接平台的数据服务层和数据访问层,负责管理输电线路工程数据的更新、删除、备份等操作,确保数据的持久性和一致性,同时也负责处理用户的数据查询和请求^[10]。对于平台技术架构的设计,整个平台开发构架于Xamarin开发工具之上,利用Dapper框架访问关系型数据。此外,平台利用SharpMap开源GIS库实现输电线路工程二维数据的获取、调整、管理、可视

化展示和图形导出;同时利用虚拟地球系统Google Earth实现输电线路的模型设计。最后,采用Model-View-ViewModel框架实现用户对平台系统的操作。对于平台网络架构的设计是采用C/S模式,将平台上所有的数据以200Mbps的网络接口将用户端和平台服务器连接起来实现数据的传输^[11]。输变电工程输电线路三维数字化平台的具体技术信息涵盖了多个方面,具体实现步骤见图2。

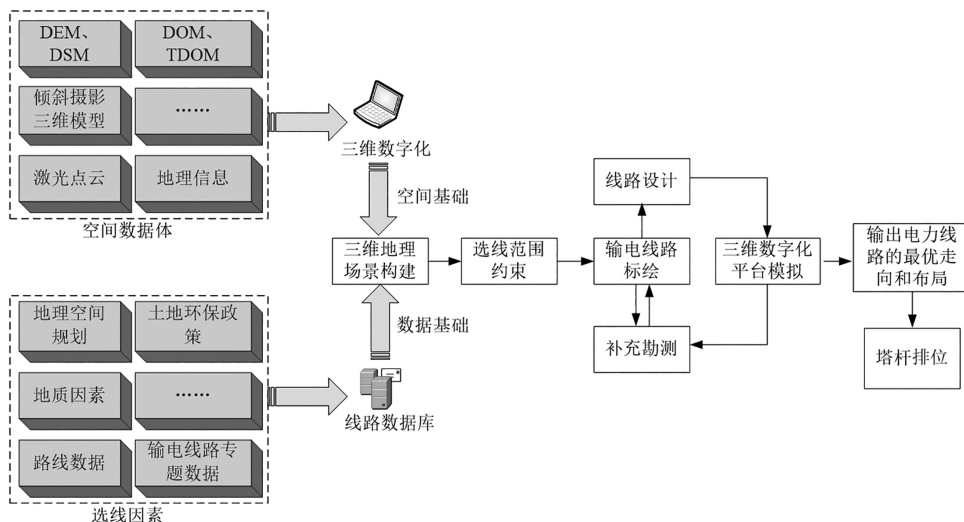


图 2 输变电工程输电线路三维数字化平台技术路线

Fig. 2 Technical roadmap of 3D digital platform for transmission lines in power transmission and transformation projects

如图 2 所示,研究首先整合目标区域的数字高程模型、数字正射影像、激光点云等数据,构筑出一个空间数字化框架,作为输变电工程输电线路设计的空间数据载体。然后分析影响输变电工程输电线路设计的关键因素,包括地质因素、政策因素等,构建线路数据库。在研究构建的输变电工程输电线路三维数字化平台中实现三维数据与矢量专题数据的融合,构建出一个综合的三维地理场景平台。在该三维地理场景中,根据输变电工程的多项准入条件,如土地使用类型限制、保护区边界以及与公路的适宜间距等,计算出这些条件各自的影响区域^[12]。随后,将这些影响区域在三维地理场景中进行叠加,从而明确界定出线路规划时需避让的区域与可安全使用的区域。基于高精度的 DEM 数据,执行坡度分析,对可使用区域内的地形

坡度进行细致分级。排除那些坡度过于陡峭、不利于工程实施的区域,以确保选线路径整体地形趋于平缓,减少施工难度和成本。剔除坡度过大区域后,保留符合所有准入条件的区域,作为后续选线规划工作的空间范围。依据划定的范围约束和以往的设计经验,在平台的三维环境中进行精准的线路规划。通过标绘工具,在实景三维数据平台上,精确连接工程的起点与终点,绘制出一条与真实地理环境紧密贴合的线路路径。随后,对该线路路径上杆塔排位的合理性与可行性进行评估,直到选出一条最优的线路。

1.2 基于 Q 值算法的线路设计

利用输电线路三维数字化平台确定了电力线路的最优走向和布局后,即可进行杆塔排位,具体流程见图 3。

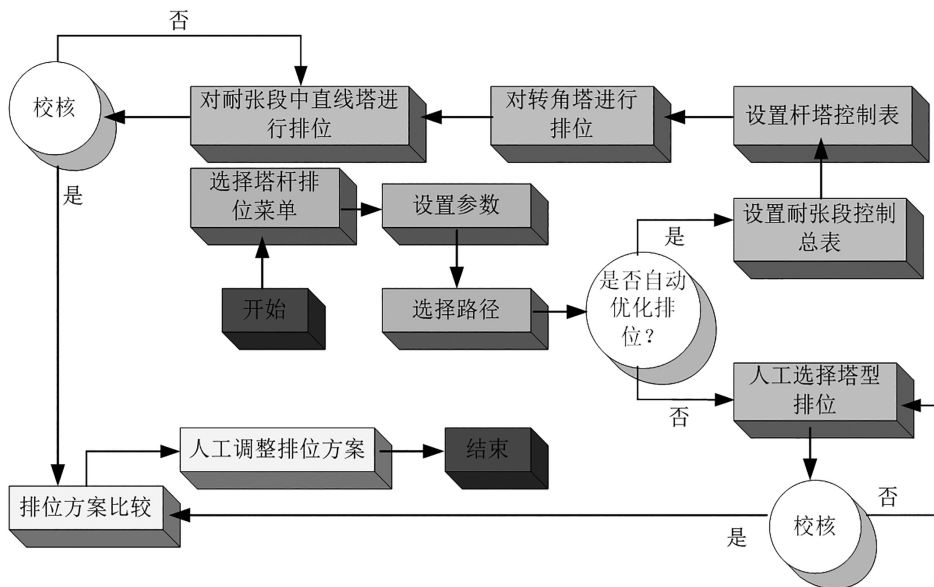


图 3 杆塔排位流程图

Fig. 3 Tower ranking process diagram

图 3 中输电线路的杆塔排位通过自动选线和手动优化选线的方式辅助设计人员进行线路的优选工作。杆塔

的路径选择和位置安排则是根据平台中的三维地理信息
系统选取的线路路径数据进行优化排布的。但在实际的

输电线路设计中,还需要考虑地形、杆塔架设、材料运输成本等多重因素。因此,研究在该三维数字化建设平台中融入加权栅格矩阵,对输电线路的整体成本进行计算。平台将收集到的三维场景数据模拟成真实的线路建设场景,然后将所需要建设的输电线路等效为栅格矩阵,即

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{a1} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{1b} & \cdots & m_{ab} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, M 为栅格矩阵; a 和 b 表示三维建设场景的不同地形区域; m_{ab} 为该区域上进行输电线路建设的成本权重。基于栅格矩阵的输电线路架设成本计算流程见图 4。

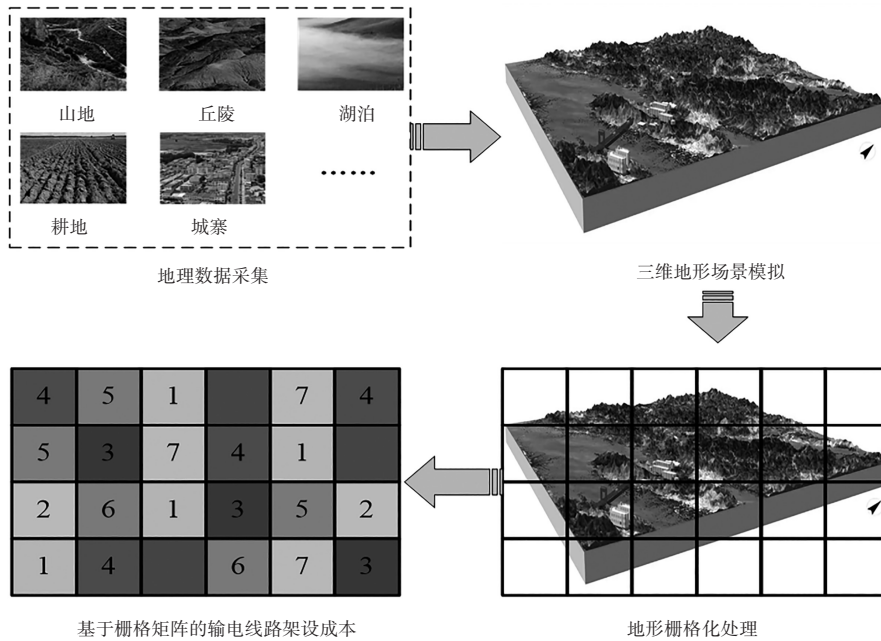


图 4 基于栅格矩阵的输电线路架设成本计算流程

Fig. 4 Calculation process of transmission line installation cost based on grid matrix

设输电线路起点为栅格里面的任意区域,则 s_t 定义为栅格矩阵中第 a 行第 b 列的元素 m_{ab} ; 而实施的动作 a_t 则定义为上、下、左、右、左上、左下、右上、右下,这表示输电线路建设的方向。因为需要考虑栅格区域里面不同地势的建设成本,则在输电线路建设过程中,动作花费成本的总和最小函数 r_t 定义为

$$r_t = 100 - \int a_t m_t dt \quad (3)$$

式中, m_t 为 t 时刻输电线路架设相关的费用率。利用 Q 值函数作为输电线路建设中最低成本和最高收益的评估函数,即

$$Q(s, a) = R(s, a) + \lambda V_\zeta(s_t, a_t) \quad (4)$$

式中, λ 为系数。 ζ 的最优策略为

$$\zeta^* = \operatorname{argmax} Q(s, a) \quad (5)$$

评估函数更新方案为

$$Q^*(s_t, a_t) \leftarrow R(s_t, a_t) + \lambda V_\zeta(s_{t+1}, a_t) \quad (6)$$

综上,利用 Q 值函数评估输电线路建设最低成本和最高收益的具体过程为:首先初始化评估函数 $Q(s, a)$,

图 4 中栅格里面的数字代表该区域输电线路的架设成本的等级,数值越高则建设成本越高。根据输电线路建设的地形栅格,将输电线路建设路线最优问题转化为建设成本最低和收益最大化问题。输电线路建设收益为

$$V_\zeta(s_t, a_t) = E \left[\sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i r(s_{t+i}, a_{t+i}) \right] \quad (2)$$

式中, $V_\zeta(s_t, a_t)$ 为输电线路建设收益函数; ζ 为实施策略; s_t 为在 t 时刻平台设计输电线路的状态; a_t 为 t 时刻平台设计输电线路实施的动作; γ 为小于 1 的常数; i 为实施动作的次数; $r(s_t, a_t)$ 为在 s_t 和 a_t 的转台下,输电线路所获得的回报。

将所有的 $Q(s, a)$ 设置为 0。而后设置初始状态变量 s 为输电线路建设的起点状态,时间为 t 时刻。根据当前的 $Q(s, a)$ 值和最优建设策略选择输电线路建设的实施动作 a 。随后实施动作 a ,利用平台观察建设后给出奖励 r 和新的建设状态 s' 。再计算下一个状态 s' 时,基于当前 Q 值的输电线路建设最大预期收益。最后重复以上步骤,直至到达设计的目标要求或达到最大步数。

2 结果分析

为验证平台设计的输电线路优化方案的有效性,选取晋东南-南阳-荆门输电线路工程以及淮南-南京-上海输电线路工程的相关数据作为数据集。对基于 Q 值算法的输电线路优化模型进行验证,同时选取文献[13]基于遗传算法的输电线路优化模型、文献[14]基于动态风险评估的输电线路优化模型、文献[15]基于动态簇粒子群优化的线路优化模型作对照,模型测试结果见图 5。

由图 5(a)可知,在晋东南-南阳-荆门输电线路工程数据集中,研究构建的模型迭代约 43 次,适应度值达到稳

定。且相比于其他 3 种模型,研究构建的模型迭代次数最少,适应度值最低。由图 5(b)可知,在淮南-南京-上海输电线路工程数据集中,研究构建的模型迭代约 24 次,适应度值达到稳定。说明研究构建的输电线路优化模型在处理不同输电工程数据时具有高效运算能力,并具有卓越的泛化能力,即在不同数据环境下均能保持稳定的优化效

果和较快的收敛速度。为进一步验证研究方法的实际应用效果,智能互联华东-华北特高压直流输电工程从初步设计到施工图设计阶段应用了研究所构建的三维数字化平台,通过平台中的三维数字化选线系统对整个路线进行优化初步排位。研究以 A1-1、A1-2、B1-1、B1-2 路段为例进行说明,这 4 条路段的长度和施工成本见图 6。

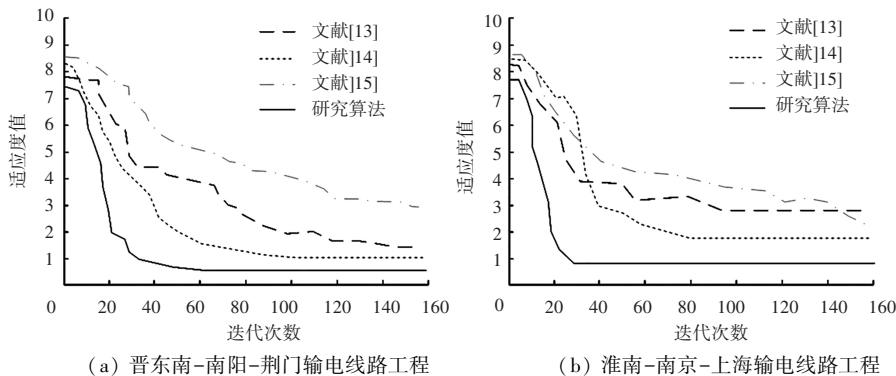


图 5 四种优化模型的训练结果

Fig. 5 Training results of four optimization models

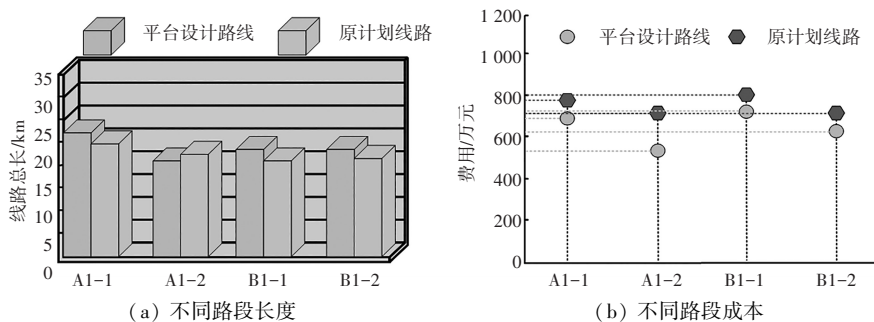


图 6 四条路段的长度和施工成本结果

Fig. 6 Length and construction cost results of four road sections

由图 6(a)可知,A1-1 路线,平台设计的路线比原计划路线长 0.9 km,这是因为该路线途经的山体陡峻导致无立塔,因此需要绕道。A1-2 路线,平台设计的路线比原计划路线短 0.6 km,这是因为避开了一些地形起伏较大的区域,使得走线更加直线化,减少了路径长度。B1-1 和 B1-2 路线,平台设计的路线比原计划路线分别长 1.0 km 和 0.8 km,这是因为这两条线路 90%为转角,且设计到的大部分区域,人力是无法正常进入,所以将原路线进行了调整,但是增加了距离。由图 6(b)可知,无论是增加了路线长度还是减少了路线长度,平台设计路线的预估费用均比原计划低。这是因为平台选择的路径会避开复杂地形、减少施工难度,提高施工效率,从而降低总体成本。以 A1-1 路线为研究对象,探究平台设计路线的施工效率,结果见图 7。

由图 7 可知,研究构建平台设计的路线虽然比原计划路线长,但是整个施工时间却缩短了约 16 天。此外,平台对施工过程中使用的设备材料按照属性进行了结构化管理,只需根据平台设计路线即可完成所有材料的一键式自动统计,极大提高统计效率并减少统计错误,各材料统计准确率均在 98%以上。

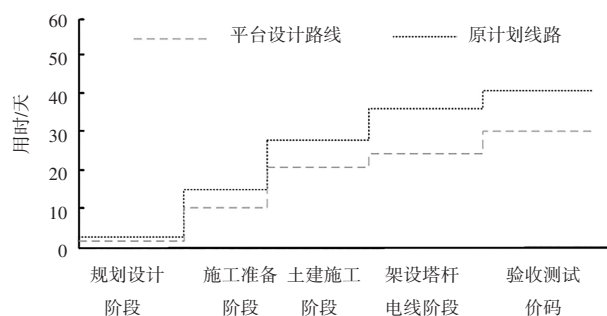


图 7 A1-1 路线施工用时

Fig. 7 A1-1 construction time for route

3 结 论

在电力建筑工程中,利用三维数字化进行设计已成为一种趋势。研究针对输电线路工程设计需要,融合了包括 3D 技术、地理信息等设计了一种基于三维数字化的设计平台。结果显示,该平台在性能稳定性和安全性上均满足输电线路工程的设计需要。在实际的应用中,该平台可以通过 VR 技术,再利用电子卫星高精度航测影像和地理数据,在平台的人机交互界面显示出真实的输电线路地理信

(下转第 182 页)

通过上述实验结果可以看出,在针对不同的转供场景进行负荷转供处理时,方法的实际转供效果也有所不同。通过数值上的对比可以明显看出,本文提出的基于匹配潮流的配电网负荷在线紧急转供方法在实际转供效果上明显优于两种常规的转供方法。

3 结论

本研究为配电网故障恢复领域提供了新的研究视角和思路,丰富了配电网优化调度的理论体系。通过将匹配潮流技术应用于负荷转供过程中,能够更准确地模拟和分析配电网在不同转供方案下的潮流分布,为制定最优的转供策略提供了科学依据。

参考文献

- [1] 马占业,李现伟,杜云朋,等. 基于预测的智能配电网负荷转供策略生成方法[J]. 电工技术, 2024(6): 111-113.
- [2] 付俊强,吴磊. 基于拓扑运行状态辨识的负荷转供技术[J]. 农村电气化, 2024(4): 1-5.
- [3] Lv L, Wu Z, Zhang J, et al. A VMD and LSTM based hybrid model of load forecasting for power grid security[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(9): 6474-6482.
- [4] 杨志淳,沈煜,杨帆,等. 基于电力 CPS 联合仿真的主配一体化电

(上接第 106 页)

息数据,让设计人员快捷地进行设计,极大程度上提高设计效率。平台可以精确地评估复杂地理环境中数字化信息然后进行三维场景建模,接着将三维场景转化为易于计算的加权栅格矩阵形式。然后引入数据挖掘中的 Q 值算法, Q 值算法基于历史数据和当前状态智能地规划输电线路最佳设计路线。此外,对设计好的路线,可以一键式自动统计所需设备材料,准确率均在 98% 以上。但是研究构建的平台精确度十分依赖采集数据的精确度,后期研究会将对数据的采集进行重点研究。

参考文献

- [1] 章立,王峰,殷洪海. 基于视觉识别的输电线路状态监测系统[J]. 自动化仪表, 2022, 43(8): 94-98.
- [2] 孙大军,张照辉,赵科,等. 基于小波变换协同深度信念网络的输电线路故障识别与定位[J]. 制造业自动化, 2024, 46(2): 13-18.
- [3] 刘彪,魏朝志,王晓燕,等. 输电线路工程 EPC 项目塔基可视化查询平台设计[J]. 电力大数据, 2024, 27(12): 91-100.
- [4] 丁磊,刘晔. 基于激光雷达与 LiEarth 平台的输电线路三维可视化方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 135-138.
- [5] Yang D, He T, Zhang Z S. Transmission Line Planning Based on Artificial Intelligence in Smart Cities[J]. Mobile Information Systems,

- 网负荷转供方法研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 530-537.
- [5] 李庆生,李震,孙斌,等. 考虑源荷储协调的高弹性配电网最优负荷转供方法[J]. 中国测试, 2023, 49(10): 64-70.
- [6] 吕超,费平. 电网负荷转供装置转供模式与当值策略实施研究[J]. 黑龙江电力, 2023, 45(5): 407-410,416.
- [7] 李吉峰,潘峰,王延勃,等. 考虑联络线负荷匹配特性的供电分区深度迁移学习负荷预测[J]. 电气应用, 2023, 42(9): 24-32.
- [8] 葛鑫,马仲坤,戚星宇. 机器学习在低压配电网负荷转供优化模型中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(9): 307-309.
- [9] 刘小康,张菁,张延迟. 基于改进层次-权法的含 PVES 配电网负荷转供优化模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(8): 55-63,72.
- [10] 曾宇,刘友波,高红均,等. 基于模型预测控制的高压配电网负荷转供与储能电站协同运行[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1902-1911.
- [11] 叶健民,王若愚,王天华,等. 各类预想事故情况下 500kV 终端站和枢纽站转供负荷能力定量对比[J]. 电工技术, 2022(13): 53-57.
- [12] 郑钢,胡炯,洪宇凯,等. 全维度主配网协同优化系统在电力负荷转供技术中的应用[J]. 中国高新科技, 2022(4): 54-55.
- [13] 冉秀敏,韩玺江,窦桑,等. 基于变分模态分解联合注意力机制的电力负荷预测[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11): 57-60.
- [14] 岳陈熙,徐庆峰. 110 kV 变压器增容改造中的负荷转供策略[J]. 电工技术, 2021(17): 89-91.
- [15] 曹茜,于志勇,荆世博,等. 改进和声搜索算法的配电网智能规划研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(7): 79-83.

- 2022(8): 1-8
- [6] 周凯. 基于射频技术的室内三维定位技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 279-286.
- [7] 叶娜,严昱欣,张翔,等. 基于 BIM+Cesium 三维可视化校园系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 140-145.
- [8] 张志劲,周天宇,蒋兴良,等. 典型覆冰形状下输电线路风荷载影响研究[J]. 电网技术, 2023(12): 5247-5255.
- [9] 张焕龙,齐企业,张杰,等. 基于改进 YOLOv5 的输电线路鸟巢检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 151-159.
- [10] 穆利智,李泽文,吕佳佳,等. 结合 EMD-WVD 和布谷鸟搜索算法的输电线路故障暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 137-144.
- [11] 郭玮,张铁刚,林清,等. 基于三维建模的数字化机房运维数据可视化系统[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(6): 105-107.
- [12] 赵锐,王云杰,李杰,等. 基于激光雷达信号的直流输电线路故障测距研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5): 121-125.
- [13] 熊君伟,王统,贺广零. 基于改进的遗传算法优化 BP 神经网络输电线路山火预估模型的研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 1(7): 79-83.
- [14] 李仕林,方程,赵明,等. 基于动态风险评估的输电线路巡检计划优化研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 119-124.
- [15] 王龙宝,栾茵琪,徐亮,等. 基于动态簇粒子群优化的无人机集群路径规划方法[J]. 计算机应用, 2023, 43(12): 3816-3823.