

基于空间分析的送电线路选线方法

谷 裕 赵 航

沈阳市规划设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]基于空间分析的送电线路选线方法通过融合多源地理数据与多目标动态优化算法,为复杂地形与生态约束下的路径规划提供了系统性解决方案。研究整合地形高程、地物分布、地质风险及运输成本等多维因子,构建自适应权重调整的成本表面模型,结合改进路径搜索算法与三维可视化验证技术,实现避障优先、经济性与安全性协同优化的线路生成。模型验证表明,该方法能够有效平衡人工经验与算法效率的互补优势,在降低传统选线主观偏差的同时,提升对隐性空间约束的响应精度。研究为电力工程选线提供了可扩展的技术框架,其方法论对类似线性基础设施的智能规划具有借鉴意义。

[关键词]空间分析;选线;方法

DOI: 10.33142/aem.v7i5.16801

中图分类号: P208

文献标识码: A

Method for Selecting Power Transmission Lines Based on Spatial Analysis

GU Yu, ZHAO Hang

Shenyang Planning & Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: The method of selecting power transmission lines based on spatial analysis provides a systematic solution for path planning under complex terrain and ecological constraints by integrating multi-source geographic data and multi-objective dynamic optimization algorithms. Research on integrating multidimensional factors such as terrain elevation, land distribution, geological risks, and transportation costs, constructing an adaptive weight adjusted cost surface model, and combining improved path search algorithms and 3D visualization verification technology to achieve route generation that prioritizes obstacle avoidance and optimizes economy and safety. Model validation shows that this method can effectively balance the complementary advantages of manual experience and algorithm efficiency, while reducing the subjective bias of traditional line selection and improving the response accuracy to implicit spatial constraints. The research provides a scalable technical framework for power engineering line selection, and its methodology has reference significance for intelligent planning similar to linear infrastructure.

Keywords: spatial analysis; line selection; method

引言

送电线路选线是电力系统规划中兼具技术复杂性与社会敏感性的核心环节。传统选线方法依赖人工踏勘与经验决策,在应对山地、生态保护区等复杂区域时,常面临效率低下、避让逻辑僵化及长周期成本失控等瓶颈。随着地理信息系统(GIS)与空间分析技术的成熟,多源异构数据的融合为线路路径的量化决策提供了新范式:遥感与DEM数据可精准解析地形起伏特征,地质风险模型能预判潜在地质灾害,而地物分类技术则为生态敏感区避让划定动态边界。然而,现有研究多聚焦单一因子优化,缺乏对自然条件、工程约束与社会成本的系统性协同,且算法设计与工程实践的脱节导致模型实用性受限。本文以多目标动态优化为核心,构建融合空间异质性解析、智能算法寻优与人机协同验证的选线模型,旨在突破传统方法的静态决策局限,为复杂环境下的送电线路规划提供兼顾效率与鲁棒性的技术路径。

1 选线核心影响因子分析

1.1 地形因子

地形因子是送电线路选线中不可忽视的基础性影响

因素,其空间异质性直接决定了线路的可行性与经济性。在复杂地形区域,高程差异往往成为线路设计的首要挑战,高海拔地区易受极端气候影响,增加设备绝缘与防雷要求,且低温环境可能导致材料脆化,需通过特种钢材或复合材料提升结构韧性;而低洼地带则可能面临积水或地质灾害风险,例如季节性洪涝可能侵蚀塔基,需结合水文数据与历史灾情划定避让阈值,或通过桩基深埋与排水系统加固提升抗灾能力。坡度的陡缓进一步制约施工与运维效率,陡坡区域不仅加大材料运输难度,还可能因土体稳定性不足导致塔基位移,尤其在风化岩层或松散堆积区,需结合护坡工程、挡土墙或分段架设进行综合优化,同时考虑微地形特征(如局部凹陷或凸起)对塔位布局的隐性影响。地形破碎度(如沟壑、山脊分布)对线路走向的连贯性提出更高要求,频繁转折不仅增加杆塔数量与成本,还可能因视觉遮挡影响后期巡检,例如连续山脊间的盲区可能阻碍无人机巡线视线,需通过路径曲率调整或增设观测塔优化监测覆盖。此外,坡向的差异可能导致线路两侧微气候条件显著分化,阳坡面昼夜温差剧烈加速金具老化,而阴坡面长期潮湿易引发绝缘子污闪,需通过差异化防腐涂层

或加强绝缘子间距设计予以应对。实践中,地形因子的解析需融合宏观规划与微观适应性调整。宏观层面,基于数字高程模型(DEM)提取地形起伏度与坡度变率,划分施工难度分级区;微观层面,通过高精度遥感或实地勘测识别潜在地质缺陷(如隐伏裂隙或溶洞),结合BIM技术模拟塔基受力分布,优化桩基深度与混凝土配比。这种多尺度协同分析能够在满足电气安全与机械强度的前提下,通过路径曲率调整、塔位微调及局部结构强化等手段平衡自然条件与工程需求,从而为后续多因子协同优化奠定技术基底。

1.2 地物因子

地物因子作为送电线路空间布局的重要制约条件,反映了人类活动与自然环境的交互作用对路径选择的复杂影响。地表覆盖类型中,密集居民区与工业设施的存在往往形成刚性避让边界,不仅涉及拆迁成本与政策协调,还需考虑电磁环境对周边敏感设施的潜在干扰;而农田、林地的穿越则需权衡生态保护与工程效率,例如高郁闭度森林可能增加林木清理与防火成本,同时触发环保法规限制。线性地物如铁路、公路与河流的交叉需遵循安全净空与防洪标准,其空间走向可能迫使线路采用大跨度跨越或局部绕行,进而改变整体拓扑结构。此外,文化遗产区、军事管制区等特殊地物的避让优先级极高,需通过多部门协同论证确定替代方案。地物因子的解析需兼顾空间分布的离散性与关联性,例如通过缓冲区分析量化避让范围,结合用地性质动态调整路径权重,在保障安全与合规的前提下,最大限度降低工程实施的社会阻力与自然扰动。

1.3 地质条件

地质条件对送电线路选线的约束具有隐蔽性与长期性特征,其复杂性常成为工程风险的潜在诱因。活动断层与地震带的分布直接威胁线路稳定性,需通过历史地震数据与地质构造分析划定高风险避让区,并针对无法绕避区段设计差异化抗震措施,如柔性塔基或冗余结构。岩土力学性质的差异则影响塔基选址与施工工艺,松散堆积层易引发基础沉降,需采用深桩加固;而喀斯特地貌区的溶洞发育可能导致地基塌陷,需结合物探技术预判隐伏地质缺陷。此外,滑坡、泥石流等动力地质作用的活跃区域,需综合地形坡度、岩体破碎度及降水条件构建动态风险评估模型,通过锚固工程或排水系统降低灾害连锁反应。水文地质因素同样不可忽视,地下水位波动可能加速金属构件的腐蚀,而季节性冻土区的冻融循环则对地基保温设计提出特殊要求。地质条件的解析需贯穿“避让优先、治理补充”原则,借助多尺度地质调查与数值模拟,在工程经济性与安全冗余度之间寻求动态平衡,从而为线路全生命周期稳定性提供底层支撑。

1.4 人力运输距离

人力运输距离的考量在送电线路选线中体现为工程

实施可行性与经济性的现实博弈。复杂地形环境下,运输路径的可达性直接制约施工效率,陡峭坡地与密集植被覆盖区域往往迫使人力或器械绕行,显著增加时间与资源消耗;而平坦地带的线性距离虽短,却可能因跨越多类产权地块引发协调成本上升。山区线路建设中,临时索道或分段运输的采用需结合地貌破碎度与材料重量动态规划,例如针对塔材、绝缘子等重型设备优先选择机械辅助路径,而轻质材料的运输则可依赖人力以降低基建投入。此外,偏远区域的基础设施匮乏可能延长二次转运距离,需通过临时道路修整或协作式运输网络优化缩短物流半径。人力运输距离的评估需跳出几何距离的单一维度,综合地形阻力系数、搬运工具适配性及社会协作成本构建多维决策模型,在施工便捷性与全周期成本间寻求最优折衷,从而为线路从设计蓝图到实体落地的转化提供现实支撑。

2 因子权重与量化方法

因子权重与量化是送电线路选线从多目标决策向空间可操作模型转化的核心环节,其科学性直接影响路径优化结果的合理性与可信度。在权重分配层面,主观赋权法(如层次分析法)通过专家经验构建判断矩阵,能够有效捕捉地形复杂度、生态敏感性等难以直接量化的隐性约束,但需通过一致性检验与群体决策降低个体认知偏差;客观赋权法(如熵权法)则依托因子数据离散程度自动计算权重,适用于地质风险、运输成本等具备明确量化指标的影响因子,但其结果可能因数据采集偏差产生系统性误差。实践中常采用主客观组合赋权策略,例如通过AHP确定地形与地物因子的基础权重,再基于熵权法对地质与运输因子进行动态修正,从而兼顾工程经验与数据驱动的双重优势。量化方法的设计需与空间分析技术深度耦合:地形起伏度可通过DEM数据提取坡度变率与高程标准差进行分级赋值;地物避让需求则依据土地利用类型的保护等级(如生态红线区、基本农田)设定差异化的成本系数;地质条件需融合历史灾害数据与岩土参数构建复合风险指数,并通过空间插值实现连续表面表达。量化过程中,栅格化处理与重分类规则需遵循阈值分段合理、等级过渡平滑原则,避免因离散化过度导致路径搜索陷入局部最优。此外,因子间的非线性交互效应(如陡坡与地质灾害的协同放大作用)需通过空间叠加分析或机器学习模型予以识别,以修正单一因子加权的局限性。权重与量化体系的构建本质上是工程可行性、经济性与安全性的动态博弈过程,需结合区域特征与项目目标迭代调整,方能在复杂约束中锚定最优解空间。

3 基于空间分析的选线模型构建

3.1 模型总体框架

基于空间分析的送电线路选线模型以多源异构数据融合与多目标协同优化为核心,构建数据驱动决策-算法动态寻优-结果可视化验证的闭环逻辑体系。模型框架围

绕地理空间约束与工程需求的双向映射展开。首先通过GIS平台整合地形高程、地物分布、地质风险及运输成本等矢量与栅格数据,构建多维因子成本表面;在此基础上,采用改进路径搜索算法(如融合避障规则的A*算法)实现初始路径生成,并结合遗传算法的全局优化能力对路径曲率、塔基间距等参数进行迭代修正^[1]。模型通过引入自适应权重调整机制,动态响应不同区域的主导约束条件,例如在地质脆弱区提升风险因子权重,在生态敏感区强化避让优先级,以此平衡经济性与安全性的冲突。最终,模型输出端集成三维可视化模块,支持多方案比选与交互式修正,通过空间拓扑关系校验与工程经验反馈持续优化决策边界,形成从空间解译到工程落地的全链路技术闭环。

3.2 关键技术实现

关键技术实现的核心在于突破传统路径规划的静态约束,构建适应复杂空间异质性的动态优化逻辑。多源数据融合是模型落地的首要挑战,地形栅格、地物矢量及地质风险面数据需通过空间配准与语义关联消除尺度与格式冲突,例如利用模糊逻辑算法解决植被覆盖区与地质断层带的空间叠加歧义,确保成本表面生成的物理一致性^[2]。路径搜索算法的优化则聚焦于避障能力与计算效率的平衡:传统A*算法通过引入动态避让规则(如地物缓冲区碰撞检测)扩展搜索邻域,同时结合跳点搜索策略(Jump Point Search)压缩冗余节点遍历,显著提升复杂地形下的全局寻优速度;针对多目标冲突问题,改进型蚁群算法通过信息素权重差异化更新机制(如生态敏感区路径信息素衰减加速),驱动搜索代理向低环境冲击区域收敛。动态权重调整技术通过实时反馈模块实现,当路径逼近地质灾害高发区时,模型自动调用地质风险指数修正局部成本表面,并触发路径回溯与分支再探索,避免陷入单一目标导向的次优解。三维可视化交互技术的集成进一步强化人机协同决策,通过虚拟现实场景模拟塔基微调、线路转角等细节,结合人工经验校验算法结果的工程可行性,最终形成机器推演-人工干预-模型自修正的闭环迭代链路。

3.3 模型参数与验证

模型参数的合理性与验证体系的严密性是保障选线结果从理论推导向工程实践转化的关键枢纽。参数敏感性分析作为模型调优的起点,需通过正交试验或蒙特卡洛模拟揭示权重分配、成本阈值等核心参数的交互影响规律,例如地质风险因子的权重微调可能显著改变路径对断裂带的避让半径,而地物缓冲区距离的阈值设定则直接决定绕行策略的经济性边界。验证方法的设计需兼顾算法逻辑与工程经验的双重校验。空间拓扑验证通过GIS叠加分

析检测路径与避让区的冲突点,确保模型输出的几何合规性;物理可行性验证则依托历史工程案例回溯,对比模型推荐路径与实际施工方案的吻合度,识别因数据分辨率或算法局限性导致的局部偏差^[3]。针对多目标优化的非唯一解特性,引入帕累托前沿分析量化不同路径方案在成本、风险与环保性维度的权衡关系,结合专家评分法筛选综合最优解。此外,模型鲁棒性需通过极端场景测试(如高密度障碍区、复合地质灾害带)评估其容错能力,例如模拟数据缺失或噪声干扰下的路径搜索稳定性,验证算法在非理想条件下的实用价值。参数与验证体系的构建本质上是对模型假设-响应机制的持续修正,需通过迭代反馈将工程实践中的隐性知识(如区域施工惯例、政策约束)转化为参数调整依据,从而提升模型在复杂现实场景中的泛化能力与决策可信度。

4 结语

基于空间分析的送电线路选线方法,通过整合多源地理数据与多目标优化理论,为复杂环境下的线路规划提供了兼具科学性与工程适配性的技术框架。地形、地物、地质及运输因子的协同解析能够有效规避传统选线中重经济性、轻系统性的决策局限,而动态权重调整与智能算法的引入则显著提升了路径搜索对空间异质性的响应精度。模型的可视化验证与参数敏感性分析进一步强化了人机协同决策的优势,既保留了工程经验在隐性约束识别中的不可替代性,又通过算法迭代弥补了人工规划的效率短板。然而,模型的实用化仍面临多尺度数据融合精度、极端场景泛化能力及政策协调成本的挑战,未来可探索人工智能驱动的实时动态选线技术,结合数字孪生与物联网实现全生命周期风险预警。送电线路选线作为自然条件、技术逻辑与社会资源的交织命题,其方法论创新不仅是工程效率的提升路径,更是人地关系可持续协调的微观实践,亟待通过跨学科交叉与工程反馈循环持续完善。

【参考文献】

- [1]田旭.基于GIS空间分析的地理研学旅行线路设计与研究[D].贵州:贵州师范大学,2024.
- [2]李泽宇,高玉祥,程璐.基于GIS的风沙铁路选线地理环境数据库设计[J].铁道工程学报,2023,40(10):62-67.
- [3]周健.基于GIS技术的平原微山丘公路选线方法研究[J].运输经理世界,2022(30):19-21.

作者简介:谷裕(1988.6—),毕业院校:沈阳建筑大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:沈阳市规划设计研究院有限公司,职务:项目总监,职称级别:高级工程师。