

山地风电场道路评价体系的构建与应用研究

王韶纤 赵政

湖南三一智慧新能源设计有限公司，湖南长沙，410000；

摘要：山地风电场道路设计面临地形复杂、生态敏感及运输安全等约束，传统人工经验依赖难以科学量化工程风险与经济效率。构建可机读的多维度评价体系旨在解决选线方案技术合规性、运输适配性、工程经济性与环境协调性协同优化难题。研究聚焦指标体系结构化、智能模型开发及系统集成应用，为自动化选线提供量化决策依据，提升山地风电工程标准化与可持续性水平。

关键词：山地风电场道路；评价指标体系；智能评价模型；工程应用

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.046

引言

山地风电场道路需统筹陡峻地形适应性、大型设备运输可行性及生态环境保护刚性需求。现有设计评价多依赖局部经验，缺乏系统性量化工具制约自动选线技术落地。通过建立强制约束与优化控制四维指标架构，同步开发多目标智能模型与动态权重机制，支撑选线方案多维度自动化评分与迭代优化。该体系将工程规范、功能需求及环境成本转化为可计算参数，实现技术逻辑与工程实践的深度耦合。

1 多维度指标筛选原则

1.1 强制性、优化性

强制约束类指标形成道路设计的技术底线要求，直接决定方案可行性。这类指标对应国家规范与设备运输安全的刚性条件，具有一票否决特性，最小转弯半径合规率、纵坡超限率等均属此类核心要素。其阈值来源于车辆动力学模型与道路工程设计规范交叉验证结果，在自动选线系统中设定为硬性过滤条件。相较而言，优化性指标体现项目特定场景下的价值取舍，如连续急弯指数影响设备运输损耗周期，土石方平衡系数反映施工土方调度效率。这类指标允许在给定区间内浮动，通过权重调节实现特定目标强化。例如植被破坏面积在生态敏感区域可设定更高权重系数，引导路线规避核心保护区，工程经济性维度指标则适配预算约束调整阈值容忍度^[1]。

1.2 可量化、可自动提取、山地特色

指标的数据源兼容性与计算逻辑自动化程度决定评价体系落地效能。可量化原则要求每个指标具象为数学表达式，纵坡超限率需解析纵断面设计图的坡度坐标数据连续计算超限路段占比。可自动提取特性推动指标与工程文件格式深度绑定，高边坡占比依托横断面图自动识别坡高超过 20m 的路段几何参数，土石方平衡系数对接 BIM 模型的挖填方量计算结果。山地特色指标则着

重解决特殊地形问题，连续陡坡指数针对山区地形起伏特征定义特定坡度阈值下的持续爬坡距离，转弯半径指标需兼容山区道路受限空间中的折线式转弯路径解析。此类指标设计需预先调试 DEM 数据精度与地形参数匹配度，规避平原地形评价体系的机械套用。

2 四维指标架构

2.1 技术合规性（强制约束）

2.1.1 最小转弯半径合规率

最小转弯半径参数直接关联风机叶片运输车辆的转向几何特性，设计阶段调用特定车型数据库匹配设备运输条件。现场实测转弯半径数据与数字路线模型中的曲线半径参数进行动态比对，针对局部曲线路段超高不足现象引入螺旋线缓和曲线校正机制。模型校验程序自动识别曲线段内侧净空余量低于临界值路段，生成路线平面线形控制点调整建议坐标数据包。

2.1.2 纵坡超限率

路线纵断面高程变化斜率构成该指标计算基础。坡度值持续超过行业标准预设阈值的路段被标记为超限段落，纵坡超限率统计超限路段累计长度占路线总长的比值^[2]。道路设计文件中的变坡点桩号与设计高程成为核心数据源，系统自动识别连续上坡路段中坡度阈值突破的起止桩号区间。

2.2 运输适配性（功能性优化）

2.2.1 连续急弯指数

平面线形设计中曲率突变频率反映运输风险等级。该指数计量每公里道路内转弯半径低于 25m 的急弯总数，大型设备运输过程急弯频繁导致叶片结构疲劳损伤概率升高，道路中心线坐标串的曲率变化点空间定位构成计算关键。优化目标引导路线规避短距离内的反复方向切换设计。

2.2.2 连续陡坡指数

纵坡线性组合特征关联车辆动力性能损耗。特定坡度阈值以上的连续爬坡距离构成指数计量单元，单公里路径内累计陡坡长度数值体现动力系统过载风险程度，海拔高程变化率超过8%的持续爬坡路段纳入统计范畴，山区道路设计需权衡爬坡效率与设备安全运行平衡点。

2.2.3 视距不足段落占比

道路线形空间可视性评估保障运输安全基础。驾驶员视线受地形阻挡的路段长度占比构成量化依据，平曲线与竖曲线叠加区域的视线盲区判定依赖三维空间分析，运输安全规范要求的停车视距阈值成为基准判定参数，地理信息系统平台执行地形遮蔽效应的空间叠置计算。

2.3 工程经济性（经济性控制）

2.3.1 单公里造价（万元/km）

工程造价定额标准体系支撑该指标计算框架，道路工程分项工程量清单汇总产生单位长度建设成本。路基土方挖填方量、路面结构层厚度、边坡防护规模形成核心计费要素。山地特殊地质条件引发的地基处理成本增幅计入修正系数，造价指标指导自动选线系统规避高成本地质断裂带区域。

2.3.2 土石方平衡系数

挖填方工程调度效率衡量施工组织合理性。填筑利用方体积与开挖方总量的比值构成核心计算模型，系数趋近于一的理想状态表征最小弃方与借土需求，三维地理信息模型的数字高程数据支持土方量自动测算。平衡系数优化显著降低山区弃渣场土地占用与转运能耗。

2.4 环境影响性（环境适配）

2.4.1 生态敏感区缓冲区距离

法定保护区域边界约束路线布局决策空间。拟建道路中心线与自然保护区核心区边缘的最小欧氏距离构成核心数据，生态保护红线电子围栏数据自动执行邻近度空间计算。五公里缓冲区范围内的路线方案触发环境影响预评估流程。

2.4.2 高边坡占比(>20 m)

切方边坡垂直高度关联地质风险等级。开挖深度突破20m的路段长度比例反映边坡稳定性威胁。岩土工程勘察报告的岩体结构面数据支持风险分级评估，高边坡防护结构造价增量同步耦合至经济性评价模块，地质雷达监测数据持续更新边坡稳定性预警参数。

2.4.3 植被破坏面积

原始地表植被损失范围量化生态环境扰动。施工红线范围内不同植被类型的损毁面积构成统计基础。多光谱遥感影像解译技术区分乔木林、灌木林与草地类型，林地类型分级扣分规则实施差异化生态补偿计量，土地复垦方案设计深度影响植被恢复成效评估结果。

3 智能评价模型开发

3.1 多目标优化模型构建

模型融合技术合规性与运输适配性目标，工程经济性和环境影响性目标共同构成四维评价框架。核心目标函数设置依赖山地环境的实际边界条件，强制约束类指标作为不可逾越的刚性边界嵌入计算体系^[3]。最小转弯半径合规参数调用车辆转向几何数据库进行实时校验，坡道梯度限制条件直接关联连续陡坡指数的计算逻辑。经济类目标函数引入岩体结构面特征修正的边坡支护成本计算公式，环境维度指标整合植被类型分级量化模块。数字高程模型数据驱动纵坡超限路段的自动识别流程，路线平面线形曲率变化点的空间拓扑关系决定急弯指数计算精度。优化算法采用混合架构处理变量耦合问题，在满足刚性约束前提下探索帕累托最优解空间分布特征。

3.2 权重分配方法与适应性调整机制

权重初始配置基于层次分析法构建的判断矩阵标度体系，历史项目数据库存储云贵高原与秦巴山地的典型权重模板。生态保护红线区域项目自动激活环境影响性目标加权增强机制，施工阶段大功率运输车辆参数变更触发适配性指标动态调节模块。系统界面提供可视化权重调节控件，允许用户根据暴雨预警等级手动提升边坡稳定性指标权重值。运行校核程序周期性检测各维度赋值总和是否满足基本要求，新机型风机叶片长度突破阈值时自主匹配新版权重配置方案。

3.3 自动化评分与优先级排序算法设计

模糊综合评价体系处理模型输出的非劣解集，采用百分制转化规则统一各维度量纲。连续陡坡参数运用梯形隶属函数实现阈值边界柔化处理，植被破坏面积依据乔木林灌木林草地区域实施分级扣分制度。方案优选算法改进传统TOPSIS模型，计算各候选方案在四维评价空间与理想解的欧氏距离分布。风险定位系统在数字地图标注视距不足桩号区间与高边坡段落，排序结果反馈机制驱动平面线形控制点坐标的迭代修正。最终方案交付包涵地质雷达对高风险边坡的检测验证方案，形成技术适配性环境协调性的闭环控制链。

4 系统实现与集成应用

4.1 评价系统与自动选线模块的联动机制

评价模块核心算法库与选线引擎建立实时数据交换通道，三维地形约束库动态传输数字高程栅格至选线决策系统。选线引擎初始路径方案生成后触发评价模块参数校验指令，路线平面线形转折点坐标导入技术合规性子模块执行转弯半径合规计算。纵断面高程数据流转至运输适配性分析单元测算连续陡坡指数临界段，植被

覆盖矢量数据同时加载至环境影响评价图层叠加运算。经济性约束指标如土石方平衡系数阈值作为预设边界条件直接写入选线引擎迭代计算框架，选线方案空间拓扑特征差异参数实时映射至评价雷达图谱可视化界面。

4.2 “选线-评价-优化”闭环流程实现

自动选线模块输出的初级方案触发多目标评价体系动态诊断机制，评价结果数据结构转换模块提取四个维度指标的量化异常点坐标集。运输适配性维度连续急弯指数超限段落的桩号区间逆向传输至平面线形优化引擎，纵坡超限率检测异常点驱动竖曲线调整算法重新拟合变坡点高程值。经济性模块识别的桥隧结构冗余段落启动三维地质模型辅助的跨谷方案替代性比选，环境影响维度输出的高边坡风险坐标点触发支护结构优化设计程序库。优化路径的空间新坐标即时回传至选线引擎进行拓扑关系校核，每一轮迭代同步生成四维指标改善幅度热力图。闭环运行达到预设收敛阈值时自主输出最终路线方案及专项优化建议文档^[4]。

5 案例实证：南方某 200 MW 山地风电场

5.1 项目概况与数据准备

项目位于横断山脉南段褶皱构造带，规划 23 台单机容量 4.5 MW 风力发电机组。施工区地形起伏度最大达 682 米，主要发育二叠系灰岩与玄武岩互层地质结构。三维扫描系统采集区域地表点云数据构建 0.2 米分辨率数字地形模型，联合钻孔岩芯样本建立岩体完整性系数空间分布图谱。数据预处理阶段标定 7 处滑坡历史遗迹和 3 类珍稀植物核心分布区范围，同步整合气象站记录的十年暴雨事件路径影响半径数据包。现场踏勘补充 26 个关键控制点的高程坐标校验值，为选线模块建立空间三维约束条件基础框架。

5.2 指标体系自动提取与验证

评价系统导入地形地质数据后执行四维指标自动化提取流程，平面线形转折点识别程序标注 39 处转弯半径临界段数据。纵坡梯度计算模块检测 17 公里路线存在连续陡坡超限风险，曲线段视距通视分析模型融合植被点云数据识别 12 处盲区隐患点。工程经济性指标计算单元输出单公里造价浮动区间值，岩溶发育区段落自动调高边坡支护成本修正因子数值。环境影响维度定位 5 段路线穿越国家级生态公益林核心缓冲区，实测植被破坏面积数据与遥感解译结果误差维持在 5 亩阈值范围内。指标验证报告附有 18 号风机位支线道路的边坡雷达位移监测基准值比对档案。

5.3 权重场景实验

运行系统权重场景配置模块执行暴雨工况与经济

型模式双轨测试，暴雨模式自动将边坡稳定性指标权重提升。新型号 7MW 机组运输参数导入后系统启动动态调整机制，最小转弯半径指标权重增幅达系统预设上限阀值。手动调节界面将生态敏感区缓冲距离权重升至优先等级后，三号山脊路线向北偏移形成地质雷达探测验证方案。各场景下四维指标协调性热力图同步投影至三维地理信息系统决策大屏。

5.4 优化建议与工程反馈

评价系统输出的风险预警坐标集触发自动优化程序，17 号弯道转弯半径从 32 米迭代优化至 46 米方案。连续陡坡指数超限段落采用 S 形展线降低平均坡度值，岩溶区高边坡支护形式变更为锚索框架梁结构。环境影响模块建议的植被绕避方案使原设计路线缩短路基开挖长度 680 米，节约生态恢复保证金预算值^[5]。施工过程中发现的强风化玄武岩露头促使经济模块重算石方爆破工程参数表，优化后土石方平衡系数较初版提高 0.23。竣工测绘数据显示视距不足区段处置方案与系统预设坐标吻合度维持 92% 以上精度等级。

6 结语

本研究构建的山地风电场道路评价体系深度融合技术合规强制约束与多目标协同优化方法。多维度指标体系覆盖设计施工全程关键要素，智能模型通过权重自适应实现场景化路线优选。系统集成机制推动评价结果实时反馈选线修正，形成闭环决策链条。构建的方法体系与工具平台对提升风电场工程品质起到重要作用，推动行业技术向数字化规范化方向进步。持续完善评价指标阈值与动态监测数据联动机制是下一阶段重点方向。

参考文献

- [1] 王怡云. 风电场景观视觉评价方法研究[D]. 东南大学, 2021.
- [2] 王益仙, 杨燕. 典型山区风电场内道路水土保持措施及效果评价[J]. 云南水力发电, 2020, 36(05): 8-11.
- [3] 沈嘉铖, 孟家玮, 刘勇, 等. 降雨工况下山地风电场道路高陡回填边坡稳定性分析[J]. 黑龙江科学, 2025, 16(02): 92-95.
- [4] 王煜东. 风电场道路路线设计指标研究[D]. 大连海洋大学, 2024.
- [5] 陈柏松. 山西省 A 风电场群协同建设项目评价研究[D]. 华北电力大学(北京), 2023.

作者简介：王韶纤（1995-），男，汉族，山西永济人，中级工程师，硕士研究生，研究方向：山地风电场道路运输；赵政（1986-），男，汉族，湖南邵阳人，本科，正高级工程师，研究方向：山地风电场道路运输。