

文章编号:1673-9469(2025)01-0090-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.012

## 基于GIS+BIM的风电场智能选址关键技术及应用研究

王雷<sup>1</sup>,张彦彪<sup>1</sup>,苗程广<sup>2</sup>,吕科<sup>1</sup>,王君<sup>1</sup>

(1. 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司,内蒙古 呼和浩特 010000;

2. 北京国遥新天地信息技术股份有限公司,北京 100101)

**摘要:** 针对传统选址设计方式亟须提高效率等问题,以风电场微观选址为研究对象,提出了基于GIS+BIM融合的智能选址方法,通过两者融合并集成地理环境、业务数据等多源数据,构建包含空间数据库的数字孪生体,结合遗传算法和粒子群优化算法,实现了风电场可视化、智能化选址。通过试点应用分析,该方法对于风电场初设选址环节,满足了设计精度,总效率提升了60%,总成本降低了66%。

**关键词:** 双碳;风电场;建筑信息模型;地理空间系统;数字孪生体;智能选址

**中图分类号:** TU986

**文献标识码:** A

## Research on Key Technologies and Applications of Intelligent Site Selection for Wind Farms Based on GIS+BIM

WANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Yanbiao<sup>1</sup>, MIAO Chengguang<sup>2</sup>, LYU Ke<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Huhehaote, Neimenggu 010000, China;

2. Beijing Guoyao Xintiandi Information Technology Co., Ltd., Beijing 100101, China)

**Abstract:** In response to the urgent need to improve efficiency in traditional site selection design methods, an intelligent site selection method based on GIS+BIM fusion is proposed for microsite selection of wind farms. By integrating multiple sources of data such as geographic environment and business data, a digital twin containing spatial databases is constructed. Combining genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm, visual and intelligent site selection of wind farms is achieved. Through pilot application analysis, this method meets the design accuracy requirements for the initial site selection of wind farms, increases overall efficiency by 60%, and reduces overall costs by 66%.

**Key words:** double carbon; wind farms; BIM; GIS; digital twin; intelligent site selection

风能作为新能源的重要组成部分,其工程选址是一个复杂的过程,需要考虑多种因素,如地理环境、气候条件、资源分布、社会经济等。传统的选址方法往往只考虑单一因素,难以综合考虑各种因素的影响,导致选址结果不尽如人意<sup>[1-3]</sup>。因此,如何实现新能源项目的智能选址已成为当前研究的热点和难点。

风电场选址通常分为宏观选址及微观选址两个范畴,宏观选址通常指在较大区域范围内,结合风能资源、发展政策、环境地理、交通运输及施工安装条件等因素,通过定性及定量分析,为风能开

发提供决策依据<sup>[4-5]</sup>。微观选址通常是项目场址明确后,结合风场总容量,对风机的数量和风机点位,包括集电线路和道路路径进行最优的推荐,传统的方法以 AutoCAD 二维图纸结合地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 信息为主,多采用人工经验,从而导致风机点位不合适,造成工程成本高或风电发电量未达到规划预期<sup>[6]</sup>。随着数字化技术的不断发展,为新业务发展提供了赋能和支持,如基于 GIS+建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 的三维设计模式已在输变电工程前期设计及选址过程中得到应用和推广,

收稿日期:2024-01-18

基金项目:国家电网公司科技项目(41510022001)

第一作者:王雷(1973—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士,高级工程师,研究方向为发电设计数字化、新能源信息化数字化设计管理。

国家电网也相继颁布了输变电工程三维设计标准族, GIS 与 BIM 有效结合, 可实现空间信息与数据融合, 可在新能源项目规划和设计中发挥重要作用。然而, 对风电场及其他新能源设计和选址尚未有系统性、科学性的研究<sup>[7]</sup>。

基于此, 文章以风电场微观选址为研究对象, 提出了基于 GIS+BIM 融合的风电场选址关键技术和应用研究。文章所述方法, 实现了风电场项目可视化、自动化、协同化智能选址, 提升了选址效率, 减少了设计成本。本研究成果可为太阳能、地热能等其他新能源工程领域提供思路和方法。

## 1 微观选址要求

风电场微观选址需要遵循满足整体发电量最大、保证风机安全性两大原则<sup>[8]</sup>。实际选址过程中, 需考虑以下约束条件: (1) 遵循发电量最大原则, 充分利用有益于风速的地形对风机进行布设, 且风机间距应至少大于 5 倍风轮直径; (2) 结合道路运输、地质地形条件等综合考虑, 满足线路长度最短原则, 且利于运输和安装约束; (3) 应充分考虑风场内道路、线路和建筑等因素, 不影响风机布设工作的开展<sup>[9-10]</sup>。

目前, 微观选址主要采用线性方法和计算流体动力学方法 (Computational Fluid Dynamics, CFD)<sup>[11-12]</sup>, 它们在处理复杂地形及复杂约束条件时, 计算结果存在不确定性, 从而导致出现较大误差, 同时计算过程需要人工干预, 存在缺少可视化、自动化、智能化不足等问题。文章提出采用 GIS<sup>[13-14]</sup>+BIM<sup>[15]</sup> 融合、空间数据库等关键技术, 将选址所需各因素多源数据有机融合在一起, 构建

风电场数字孪生体, 充分利用空间信息与数据融合的协同能力, 以及数据分析能力, 并集成如蚁群算法、粒子群算法等先进人工智能技术, 支撑风电场选址工作高效、精确地开展<sup>[16]</sup>。

## 2 技术准备

### 2.1 参数化建模

在三维参数化模型中, 首先依据设计图纸, 对设备进行类别分类, 梳理并提取设计参数信息; 然后进行拓扑结构设计, 对整体模型进行图元分解, 设计建模参数, 基于 GIS 平台的三维建模引擎, 构建风机、风机基础、光伏电站、升压站等基础模型, 并通过参数设置实现交互式编辑, 最终构建基础模型库<sup>[17]</sup>, 如图 1 所示。

### 2.2 无人机信息采集

通过无人机航测技术获取风电场高分辨率影像和 1:2 000 比例尺的地形图, 并采用 WGS84 坐标系导入数字孪生模型, 形成可用于指导设计和施工的风电场数字地表模型。将该地表模型与风资源参数、行政边界、土地性质和地质资料等信息以相同的坐标系导入数字孪生模型中<sup>[18]</sup>。

数字孪生模型通过 BIM 与 GIS 技术相结合, 生成数字化虚实一体的风电场, 可详细分析所选位置的地形, 并避开行政边界, 经过多次排查和甄选, 多个专业设计师和项目业主共同确认可施工机位, 确保项目容量。数字孪生模型帮助设计师和项目业主深入掌握机位情况, 可进行优化选址, 降低了设计与实际情况脱节而返工的风险<sup>[19]</sup>。

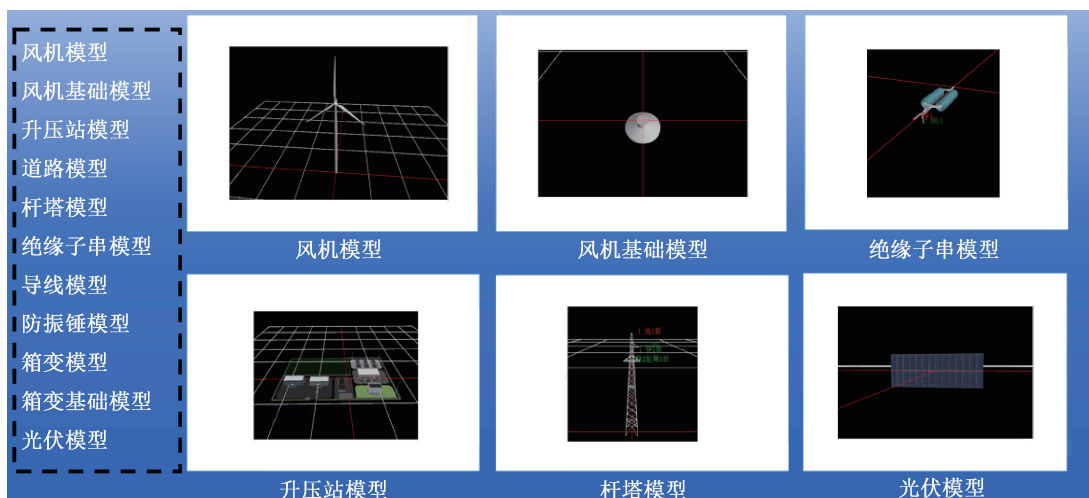


图 1 基础模型库

Fig. 1 Basic model library

### 2.3 GIS+BIM 多源异构数据转换与融合

新能源工程项目设计阶段会产生大量的模型和数据。这些模型和数据的来源、格式、属性和调用方式各不相同。为实现各模型和数据的无缝连接和交付,需要将这些模型和数据进行融合,其中最为关键的是 GIS 及 BIM 的数据转换与融合。

#### 2.3.1 模型和数据格式的转换

由于 BIM 和 GIS 的数据格式不同,BIM 和 GIS 集成需要兼容的中间数据格式。BIM 将其几何构件及表示建设设施的语义数据采用工业基础类 (Industry Foundation Classes, IFC) 通用格式进行存储;GIS 将其地理空间、几何形状、位置拓扑等数据采用城市地理标记语言 (City Geography Markup Language, City GML) 标准格式进行存储。如图 2 所示,在 IFC 和 City GML 数据间基于同一语义模型建立映射关系,实现数据兼容与转换,从而实现数据共享<sup>[20]</sup>。

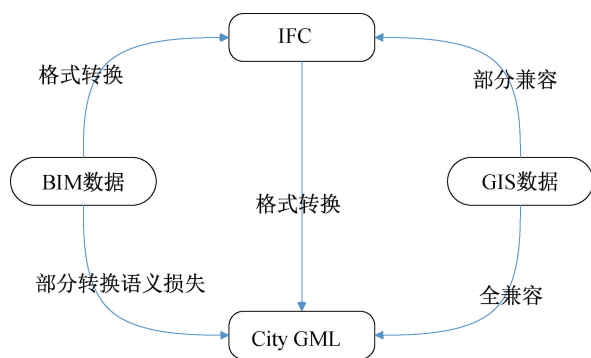


图 2 BIM+GIS 数据格式的兼容性与转换

Fig. 2 Compatibility and conversion of BIM+GIS data formats

#### 2.3.2 空间数据坐标变换

为标识地理位置, GIS 通常使用大地坐标;而 BIM 中通常使用高斯平面直角坐标。因此,只有通过坐标变换才能将 BIM 模型放置在 GIS 的正确位置,步骤如下:

步骤 1:通过二维坐标变换,将本地坐标系的平面直角坐标变换为北京 54 坐标系的平面直角坐标。

步骤 2:通过高斯逆计算,变换为北京 54 坐标系的大地坐标。接着变换为北京 54 坐标系的空间直角坐标。

步骤 3:通过 3D 坐标变换将北京 54 坐标系的空间直角坐标变换为 WGS84 坐标系的空间直角坐标。

步骤 4:将 WGS84 坐标系的空间直角坐标变换为 WGS84 坐标系的大地坐标。

通过上述方法对 BIM 模型中的所有顶点进行变换,实现 BIM 与 GIS 坐标的融合。

#### 2.3.3 属性数据关联

BIM 模型具有丰富的属性信息。传统的改造过程中,BIM 模型仅以三维展示的形式呈现,导致改造过程中丢失了大量的属性信息。在构建 BIM 模型的过程中,每个模型组件都会被赋予一个 Element ID,而这个 Element ID 的转换包括 EBS、IFC、IFD 等代码的转换,它代表了该模型的唯一“身份证”,可用于将属性与 GIS 平台数据库进行链接,实现 BIM 模型数据与 GIS 数据的集成。

### 2.4 空间数据库构建

为支撑风电场微观智能选址,提高选址效率及精确性,主要技术难点是如何将选址所涉及的影像、地形、地质、水文等多因素及其海量数据有机且高效地组织起来,为选址业务提供可视化、协同化、智能化数据展示和数据分析服务。文章结合前述多源数据融合技术,提出了空间数据库构建思路,如图 3 所示。

主要设计说明如下:(1)空间数据库按数据分类包括且不限于影像数据集、矢量数据集、三维模型集、业务数据集等,支持多来源、多类型、多结构的 1~10 TB 海量数据存储;(2)通过对空间数据进行金字塔构建,并提取业务标签和三维标签,与空间信息对接,较好地空间数据与业务数据和 BIM 三维数据等非空间信息进行融合,并通过建立快速索引机制,由数据发布总线提供矢量发布、影像发布和业务数据发布,以提供数据展示和分析等应用;(3)数据展示应用包括二、三维场景浏览,数据透视浏览,多源数据集成浏览等功能;数据分析应用包括数据查询统计、数据挖掘分析、地理空间分析等功能。

## 3 风电场微观选址

文章以夏津县拟建风电场为试点,对风场选址业务进行应用研究。项目位于德州市内,该地区受冬夏季风影响较大,风向相对集中,风切变较大,具有较好的风能资源。其选址过程主要包括:风电资源评估、风机智能选址、风电上网电量估算等环节。

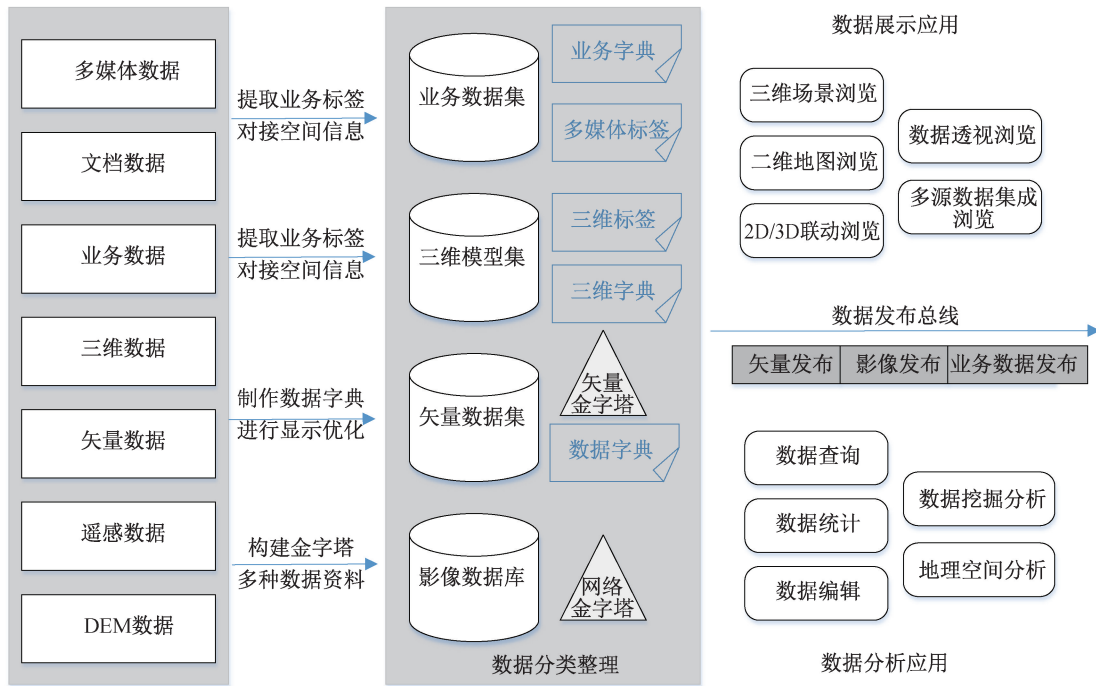


图 3 空间数据库构建

Fig. 3 Construction of spatial database

### 3.1 风电资源评估

通过宏观选址明确风场场址后,需进行风电资源评估进行发电量预测,同时为后续风机选址、布置及装机容量规划提供决策和数据依据。文章将宏观选址结果与风资源 WT 软件对接,导入结果数据,并关联风机模型,根据夏津气象站近 30 年风向频率资料进行统计分析,图 4 所示为多年风向玫瑰图。

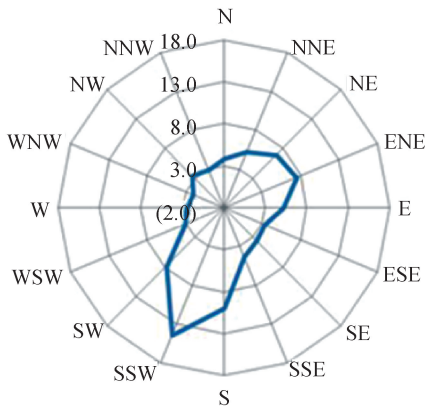


图 4 夏津气象站多年平均风向玫瑰图

Fig. 4 Multi-year average wind rose diagram of the Xiajin Meteorological Station

调用该地气象站多年累计数据,可见最多的扇区是南南西(SSW)方向,平均风向频率值为 14.6%;主要风向集中在 S—SW 之间,频率为 32.3%。

### 3.2 风机智能选址

风机选址采用了 1 : 5 000 数字化三维地形图,具体包括:风机位置及机型初选、风机位置调优两个步骤。

#### 3.2.1 风机位置及机型初选

为实现风机位置及机型智能初选,文章提出通过设定粒子群算法的目标函数,作为风力发电机选型优化算法,与遗传算法嵌套使用。在遗传算法中,有效设定遗传算法的目标函数,将最短风机距离(即安全距离)限制条件也加入其中,可进行风力发电机多型号混装中位置和型号的优选。总体实现参见图 5,具体初选步骤如下:

(1)从多源数据融合后的空间数据库中读入风机 BIM 模型文件及配置参数、风场地形和气象等数据,图 6 为风机 BIM 模型及参数配置。

(2)按照安全距离和最低发电量作为风机选址的基本约束条件,对其进行抽象化处理,由目标函数中罚函数项进行表示。

(3)在风场 GIS 地图中将风机进行随机分布,风机分配到的横、纵坐标生成位置矩阵。参照遗传算法,设染色体数量等于矩阵行数,每行表示一个染色体,即为一种排布方案。需注意的是,采用融合后的地理信息数据,可自动对农田、林地、居

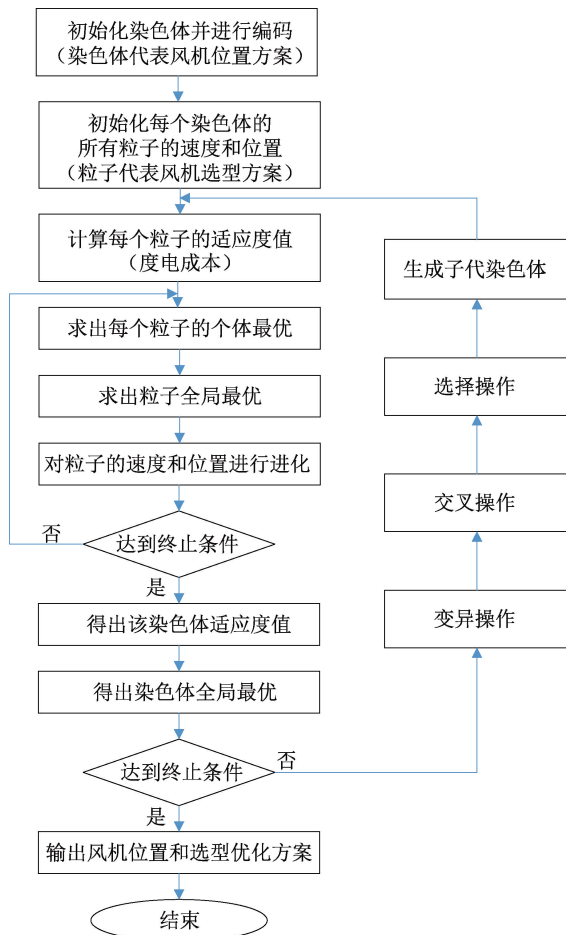


图5 风机位置及机型初选流程图

Fig. 5 Preliminary selection process diagram of wind turbine location and model

民点等区域进行识别,并从地图坐标中剔除,或设为不可选区域。

(4) 根据前文输入的风机型号及参数,按照粒

子群算法确定搜索空间,并将其分为包含至少3个粒子数的  $N$  个子空间,从而生成风机型号初始矩阵。

(5) 对型号初始矩阵进行二进制编码,参照粒子群算法,粒子数设为矩阵行数,每行代表一种风机选型方案,即为每个粒子。

(6) 为求得所有粒子的全局最优值,在每个粒子的子空间内,随机初始化所有粒子的速度和位置,并按照公式(1)计算其适应度(度电成本),当前群体最优位置设为全局粒子最优位置。

(7) 参照粒子群算法,对粒子速度和位置进化规则进行设置,依照进化规则对粒子执行进化。

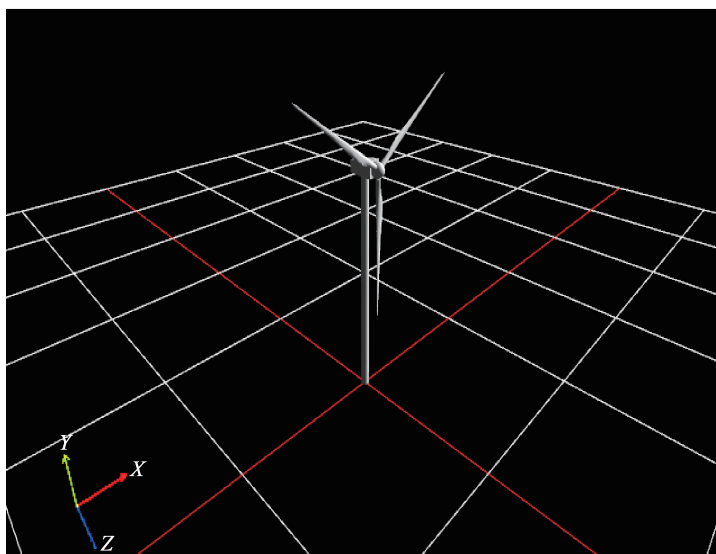
(8) 判断是否已达到进化最大代数,若是则停止进化,遍历粒子子空间内的种群最优位置,直至选出全局最优位置,其适应度亦为全局粒子最优适应度值,并作为该染色体适应度值进入步骤9,否则返回步骤6。

(9) 遍历所有染色体适应度值并求取最优解,即为遗传算法的全局最优解,由此得出风机位置及选型的最佳方案。

(10) 判断遗传算法是否已达到最大迭代次数,若是则输出上述风机最佳方案,否则以当前染色体为父代染色体,进行交叉、变异、选择操作,并生成子代染色体返回步骤5开始下一轮迭代。

上述步骤(6)所述的度电成本作为个体适应度计算公式为

$$CoP = \frac{CoE}{AEP} = \frac{\sum_i^N C_i + C_{O\&M} + C_{land} + C_{other}}{\sum_i^N P_i} \quad (1)$$



属性信息	模型预览	功率参数	参数化建模
属性名称	属性值		
*风机厂家	远景能源		
*塔筒类型	钢塔		
*风机型号	EN-182-7.0		
技术路线			
单机容量(MW)	7		
*风轮直径(m)	182		
*设计风区	I		
*设计年平均风速(m/s)	30		
*50年一遇10 min平均最大风速(m/s)	36.1		
50年一遇3 s平均极限风速(m/s)	50.5		
*湍流等级	1		
切入风速(m/s)	0		
切出风速(m/s)	0		
额定风速(m/s)	0		
*叶片长度(m)	0		
*扫风面积(m <sup>2</sup> )	0		
*单位千瓦扫风面积(m <sup>2</sup> /kW)	0		
*轮毂高度(m)	110		
年平均空气密度	1.06		
轮毂高度年平均风速(m/s)	7.6		
轮毂高度特征湍流强度I15	0.12		
塔筒重里	23.2		
锚栓重里			

图6 风机模型及参数示例图

Fig. 6 Schematic diagram of wind turbine model and parameters

式中:CoE 为风场全年发电所需成本,元或万元; AEP 为全年预估发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $C_i$  为风机购置所需费用,元或万元;  $C_{O\&M}$  为风电场每年运行维护所需平均费用,元或万元;  $C_{\text{land}}$  为风场占用土地所需平均费用,元或万元;  $C_{\text{other}}$  为年均其他成本,元或万元;  $P_i$  为每套风机全年平均预估的发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $N$  为风机个数。考虑到最小风机距离及最低发电量作为复杂约束条件,引入优化公式为

$$s. t \begin{cases} AEP \geq E_0 \\ d_{i,j} \geq D_s, i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j \\ x_i \in [\underline{x}, \bar{x}], i = 1, 2, \dots, N \\ y_i \in [\underline{y}, \bar{y}], i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为风电场最低年均预估发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $D_s$  为风机安全间距,  $\text{m}$ ;  $d_{i,j}$  为风机计算间距,  $\text{m}$ ;  $x_i$ 、 $y_i$  为风机选址后落在 GIS 地图中的横、纵坐标;  $[\underline{x}, \bar{x}]$  和  $[\underline{y}, \bar{y}]$  分别为其二维坐标的上下界;  $N$  为风机个数。

本项目根据风资源评估结果,风电场规划最低发电量为 50 MW,按上述初选过程,优选出 13 台型号为 GWH171 的风机,单机容量为 3.85 MW,叶轮直径为 171 m,轮毂高度为 145 m。

### 3.2.2 风机选址调优

完成上述风机位置初选后,进行集电线路选线和道路选址,并结合选线、选址结果进行调优。

(1)集电线路选线。通过设置杆塔单回路的

最小和最大导线容量、杆塔双回路最小和最大导线容量、压降参数等,按照路径最短,满足容量的要求,参考文献[21]所述,按照单源最短路径算法,开展集电线路的最优路径自动计算。文章所述方法,可在 GIS+BIM 构建的风电场数字孪生体中,通过地物分析能力自动规避了不可利用的区域范围,提高了自动选线的精确度,减少了人工核验和调整的工作。

(2)道路路径选址。通过对道路技术指标的设置,结合现有道路信息,现有的风机点位等信息,按照路径最短、造价最低的原则,参考文献[22]所述方法,在风电场数字孪生体中进行道路的路径自动推荐。同理,文章所述方法可结合数字孪生体中融合的地理空间及其他多源数据,自动将不可利用区域进行了规避,并对前后坡比超过 12%的区域自动进行标红显示。道路路径自动完成选址推荐,如图 7 所示,文章提出可在风场数字孪生体中,对道路进行模拟运输的碰撞校验,通过加载模型后可以对运输扇叶的姿态进行调整,模拟最真实的运输情况,并给出运输时碰撞的可能位置。

通过上述选线、选址设计后,可进行复核和调优。在前述智能推荐的基础上,结合实际踏勘情况和专家经验对初选的机位坐标进行微调。

### 3.3 风电上网电量估算

图 8 为风电场 145 m 高度处平均风速分布图。



图 7 道路路径智能选址示意图

Fig.7 Schematic diagram of intelligent location selection for road paths

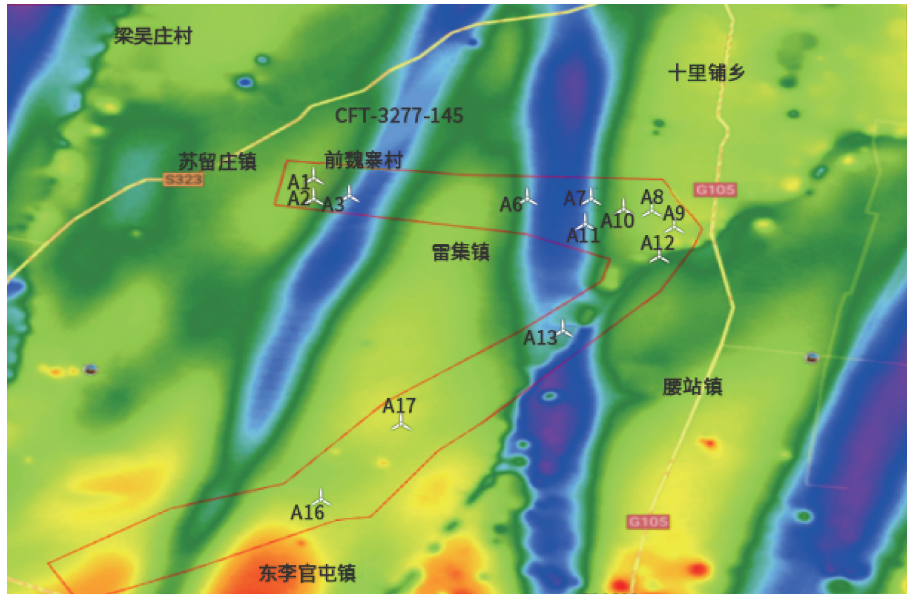


图8 风电场风速图谱

Fig. 8 Wind speed map of wind farm

完成风机初选及调优后,在风电场数字孪生体中,集成测风塔采集风数据,并调用 WT 软件结合风场风能资源分布情况进行图谱分析和发电模拟,本风电场年均发电量经估算为 206 728 MW·h,年均上网电量估算为 149 046 MW·h,折减系数为 72%,容量系数为 0.340,初步满足预期目标。

传统的风电场工程项目选址多采用人工及 AutoCAD 二维图纸等方式,需收集大量的电子、纸质资料,结合能源需求及环境情况,通过现场大量踏勘工作,并经过多轮评审和论证后,方能输出二维设计成果。各专业设计人员缺少协同手段,效率低且成本高。采用本文所述方法,以德州市夏津县拟建风电场为试点开展应用成效验证,经试点实际应用与传统应用对比可得,相较于同类型、同规模风电场工程项目,初设选址阶段由原来的平均 20 天、12 个专业 60 余人次,提升至 8 天、20 余人次,总效率提升了 60%,总成本降低了 66%。同时,基于三维设计,通过相关因素的完整呈现,可使设计成果更加直观地表示,减少了设计返工的同时,让工程方案更加准确,为后续工程建设提供了质量保证,保障了工程整体成本、工期和投资收益。

#### 4 结论

1) 文章通过 GIS+BIM 融合,并采用参数化建模、多源数据融合、空间数据库等关键技术,构建风电场数字孪生模型,将繁多的二维设计图纸升级为虚实一体化的三维设计。

2) 通过集成地理环境数据、风力资源参数模型、行政边界、土地性质和地质资料等多源数据,并在数字孪生体中集成遗传算法和蚁群算法等先进 AI 算法,实现了风电场项目的三维全景、全要素展示,具备了新能源项目工程设计可视化、自动化、智能化的协同设计能力。

3) 试点应用证明,文章研究方法与传统方式相比,总效率提升了 60%,总成本降低了 66%。

#### 参考文献:

- [1] 饶宏. 数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统[J]. 电力设备管理, 2021(8): 21-22.
- [2] 靳玮, 王弟海, 张林. 碳中和背景下的中国经济低碳转型: 特征事实与机制分析[J]. 经济研究, 2022(12): 87-103.
- [3] 袁宁, 胡庆国, 何忠明. 基于知识图谱的工程项目管理领域 BIM 研究热点分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1): 72-78.
- [4] 李俊凯, 葛莹, 鲍倩, 等. 利用地理场景的风电场微观智能选址方法[J]. 测绘科学, 2020, 45(4): 199-206.
- [5] 邓院昌, 余志, 钟权伟. 风电场宏观选址中地形条件的分析与评价[J]. 华东电力, 2010, 38(8): 1244-1247.
- [6] 王洁, 许昌, 韩星星, 等. 基于风力机尾流排斥的平坦地形风电场微观选址优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 62-69.
- [7] ANG Y Q, BERZOLLA Z M, REINHART C F. From concept to application: A review of use cases in urban building energy modeling[J]. Applied Energy, 2020, 279: 115738.

(下转第 104 页)

- 黑龙江科技信息, 2015(11): 180.
- [2] 吴本国. 地下车库漏水与结露调查暨改进措施[J]. 建筑工人, 2013, 34(9): 46-47.
- [3] 孔凡红, 郑茂余, 韩宗伟, 等. 新建建筑围护结构热质传递对室内温湿度环境的影响[J]. 建筑科学, 2008(8): 94-97.
- [4] PARK K, NAGAI H. Study on the heat load characteristics of underground structures part 2. computational analysis of the heat/moisture behavior and heat load of underground structures[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2007, 6(1): 189-196.
- [5] KUNZEL H M, HOLM A, ZIRKELBACH D. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope[J]. Solar Energy, 2005, 78(4): 554-561.
- [6] 赵猛. 华北地区地下车库除湿防结露方式研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- [7] 赵恒, 赵彬, 吴俊. 用于湿度独立控制的送风气流组织研究[J]. 制冷与空调, 2006(4): 10-13.
- [8] 吴国光. 地下建筑气流组织的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [9] 廖鸿利, 陈奕纯, 丁云飞, 等. 新风地板送风模式下冷辐射板结露特性研究[J]. 低温与超导, 2023, 51(5): 64-70.
- [10] 王威, 姜建中, 王戎, 等. 利用 CFD 模拟通风小室壁面结露分布的规律[J]. 制冷与空调(四川), 2019, 33(5): 556-561.
- (责任编辑 唐彦彦)
- 
- (上接第 96 页)
- [8] 刘永前, 邵振州, 颜灵伟, 等. 基于改进二进制萤火虫算法的风电场微观选址优化研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(1): 112-118.
- [9] 戴朋林, 李方彦. 多约束条件下智能优化风电场微观选址方法的探究[J]. 能源研究与利用, 2015(1): 31-34.
- [10] 谢博武, 李磊, 张垒, 等. 基于 WeFarm 的复杂地形风电场低效出力影响因素研究[J]. 风机技术, 2023, 65(4): 90-96.
- [11] 程雪玲. 风能模型的发展及 CFD 在风资源开发利用中的应用[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(6): 1-15.
- [12] 薛飞飞, 许昌, 韩星星, 等. 基于 CFD 的复杂地形风电场地形改造方案研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1959-1965.
- [13] 刘成堃, 张力, 马瑞, 等. 面向 3D GIS 场景的 BIM 模型转换与集成研究[J]. 地理空间信息, 2022, 20(1): 111-114+144.
- [14] 仲炜, 葛莹, 张杰, 等. 基于 GIS 的高海拔山区风电场智能微观选址研究[J]. 地理信息世界, 2018, 25(1): 130-134.
- [15] 何祥平, 王浩, 郜辉, 等. 高铁连续梁桥 BIM 参数化建模及其工程应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(3): 311-317.
- [16] 陈可仁, 王亚强. 基于 GIS+BIM 的风电场三维数字化设计系统研究[J]. 能源科技, 2021, 19(4): 50-53.
- [17] 尚海勇, 刘利强, 齐咏生, 等. 基于数字孪生技术的风电机组建模研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 391-400.
- [18] 吴红华, 张亮, 冯豪, 等. 基于无人机的复杂地貌上空风场实测研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(2): 92-103.
- [19] 崔丛, 胡立伟. BIM 与 GIS 技术在风电场三维建模中的应用研究[C]//第六届中国风电后市场交流合作大会论文集. 天津: 中国农业机械工业协会风力机械分会, 2019: 227-231.
- [20] 陈斌. BIM+GIS 在输变电工程建设管理中的研究与应用[C]//第七届全国 BIM 学术会议论文集. 重庆: 中国建筑工业出版社出版, 2021: 126-130.
- [21] 许昌, 陈丹丹, 韩星星, 等. 复杂地形风电场一体化优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(12): 3368-3375.
- [22] 吕宙安, 王东, 王中平, 等. 基于改进 RRT\* 算法的山地风电场道路路径优化[J]. 新能源进展, 2023, 11(6): 564-571.
- (责任编辑 唐彦彦)