

Application of integrated geophysical exploration technology in site selection and investigation of karst mountain wind farms

Yuping Liu Binglei Zhang Xihui Lv Rongze Hu Wenbo Liu

China Power Construction Group Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810008, China

Abstract

Wind farm site selection in karst regions faces challenges such as complex terrain, variable geological conditions, and intense karst development. Taking a karst mountainous wind farm project as an example, this paper systematically elaborates on the comprehensive application of various geophysical exploration methods—including high-density electrical surveys, cross-hole electromagnetic wave CT, and pile-bottom karst detection—combined with engineering drilling techniques for systematic implementation in site selection, foundation type selection, and construction guidance. Through full-process investigation practices covering feasibility studies, preliminary design, construction drawing design, and construction phases, a “geophysical exploration first, drilling verification, comprehensive analysis” investigation model has been established. Practical results demonstrate that integrated geophysical exploration technology significantly enhances the efficiency and accuracy of micro-siting investigations in karst regions, effectively identifies spatial distribution characteristics of karst formations, reduces engineering risks, and provides reliable technical support for wind farm construction under complex geological conditions. This approach holds significant value for promotion and application.

Keywords

wind farm; karst exploration; high-density electrical method; cross-hole electromagnetic wave CT; pile bottom karst detection; comprehensive geophysical exploration

综合物探技术在岩溶山区风电场选址勘查中的应用研究

刘宇平 张秉来 吕西辉 胡荣泽 柳文博

中国电建集团青海省电力设计院有限公司, 中国·青海 西宁 810008

摘 要

岩溶地区风电场选址勘查面临地形复杂、地质条件多变、岩溶发育强烈等挑战。本文以某岩溶山区风电场工程为例,系统阐述了综合运用高密度电法、跨孔电磁波CT、桩底岩溶探测等多种物探手段,结合工程钻探技术,在风电场选址、基础选型及施工指导中的系统性应用。通过可行性研究、初步设计、施工图设计和施工阶段的全流程勘察实践,构建了“物探先行、钻探验证、综合研判”的勘察模式。实践表明,综合物探技术可显著提高岩溶地区风机微观选址勘察效率与准确性,有效识别岩溶空间分布特征,降低工程风险,为复杂地质条件下的风电场建设提供可靠技术支撑,具有重要的推广应用价值。

关键词

风电场; 岩溶勘查; 高密度电法; 跨孔电磁波CT; 桩底岩溶探测; 综合物探

1 引言

风能作为一种清洁可再生能源,在我国能源结构中的比重逐年提升。根据国家能源局数据显示,截至 2022 年底,我国风电装机容量已达 3.65 亿千瓦,位居世界第一。然而,风电场多建于山地、丘陵等复杂地形区域,若场址位于岩溶发育区,则地基稳定性与基础选型成为工程建设的关键难题^[1]。岩溶地区地质条件复杂,主要表现为基岩面起伏大、土岩组合关系复杂、溶洞发育随机性强等特点,给风电场选址和基

础设计带来极大挑战^[2]。传统的单一钻探手段虽然能够直接获取地质信息,但毕竟是一孔之见,难以全面掌握岩溶空间分布特征,且在山地环境中实施困难、成本高、周期长^[3]。而综合物探技术以其高效、无损、信息量大的特点,在岩溶勘查中展现出显著优势。通过多种物探方法的有机结合,可以相互补充、相互验证,形成更加全面、准确的地质模型^[4]。

本文以贵州某风电场工程为例,重点探讨综合物探技术在岩溶地区风电场选址勘查中的具体应用,包括方法选择、工作布置、数据解释和成果验证等环节,以为类似工程提供参考和借鉴。

【作者简介】刘宇平(1991-),男,中国青海西宁人,硕士,高级工程师,从事电力工程勘察与设计研究。

2 物探方法原理与技术特点

2.1 高密度电法

高密度电法是以地下介质电性差异为基础的地球物理勘探方法。其基本原理是通过布设多道电极进行扫描测量，获取地下视电阻率分布图像，进而推断基岩面起伏、覆盖层厚度及岩溶发育情况^[5]。

在本工程中，高密度电法主要用于风电场选址阶段的初步筛查，为风机位优化提供依据。测量设备采用重庆奔腾数控技术研究所生产的WDJD-4型高密度电法仪，电极间距根据探测深度要求设置为5-10米，测量装置选择温纳装置或施伦贝谢装置。

2.2 跨孔电磁波 CT

跨孔电磁波 CT 技术是利用电磁波在不同介质中的传播特性进行层析成像的地球物理方法。其原理是通过在两钻孔之间发射和接收电磁波，获取电磁波场强数据，通过反演计算重建孔间岩体电磁波吸收系数分布图像，从而精确识别岩溶洞穴、裂隙等不良地质体^[6]。

本工程采用中国地质科学院物化探研究所生产的 JW-6 型跨孔电磁波仪系统，工作频率为 12-24MHz，点距 1 米，采用同步扫描方式采集数据。每个风机基础布置 4 个钻孔，组成 6 个 CT 剖面，实现对基础下岩体的全面扫描。

2.3 桩底岩溶探测

桩底岩溶探测是专门针对桩基工程开发的检测技术，采用声呐反射原理对桩井底部以下一定范围内进行弹性波探测。其工作原理是通过发射换能器向桩底发射弹性波，当声波遇到波阻抗界面（如基岩面、溶洞顶底板）时会产生反射波，通过分析回波信号的振幅、频率和时差等特征，可以判断桩端以下是否存在溶洞、软弱夹层等不良地质体^[7]。本工程采用 JL-SOMAR（A）型桩底溶洞探测仪，探测深度为桩底以下 3 米，若发现异常，则加深桩井并重新检测，直至满足设计要求。

3 工程概况

3.1 项目背景

贵州某风电场工程属山地风电场项目，项目总装机容量 120MW，布置 48 台 2.5MW 风电机组，配套建设 1 座 110kV 升压站，场区处地质构造复杂，岩溶发育强烈。

3.2 地质条件

风电场场地地貌属构造剥蚀中山地貌，地形起伏大，坡度一般 15°-20°，局部达 30°-40%。灰岩区喀斯特地貌发育典型，呈现峰丛、溶洼、落水洞、石芽等微地貌特征。岩土工程勘察揭示，场区地层结构复杂，自上而下可分为：①素填土（ Q_4^{ml} ）：松散，厚度 0.5-2.00m；②粉质黏土（ Q_4^{cl+dl} ）：可塑-硬塑，厚度 2-12m；③粉质黏土混角砾：稍密-中密，厚度 3-12m；④碎石土：中密-密实，厚度 2-12m；⑤灰岩（ P_2^{qm} ）：中等风化-微风化。

岩溶发育程度分区评价显示，39 个灰岩区风机位中，岩溶强发育 22 个，中等发育 10 个，微发育 7 个。

3.3 勘察难点

本工程勘察工作面临以下主要难点：（1）地形复杂，交通不便，设备搬运困难；（2）岩溶发育强烈，空间分布随机性强，勘察精度要求高；（3）风机基础荷载大，对地基均匀性和稳定性要求高；（4）工期紧张，需要快速高效的勘察方法；（5）水资源缺乏，钻探施工用水困难。

针对这些难点，项目采用了综合物探技术结合钻探验证的勘察方案，既提高了工作效率，又保证了勘察质量。

4 综合物探实施与成果分析

4.1 高密度电法应用效果

高密度电法在风电场选址中发挥了重要作用。通过大面积扫面测量，初步掌握了场区岩溶发育规律：低阻异常区（视电阻率 $<100\Omega \cdot m$ ）多对应岩溶强烈发育区，中阻区（ $100-500\Omega \cdot m$ ）对应中等发育区，高阻区（ $>500\Omega \cdot m$ ）对应完整基岩区。

现场主要按“川”字形、交叉线形布置 2-4 条测线，均采用了温纳装置及施伦贝尔装置施测。例如 FJ02 风机位场地西测线高密度电法等视电阻率拟断面图如图 1 所示，从反演结果图中将溶洞异常显示的清晰，浅部的空洞，底部的低阻岩溶发育区，均在高密度反演图上清晰反映出来。反演图显示空洞距离地表约 5m，高约 10m，宽约 10m，底部的岩溶发育异常区深度大于 45m。后续钻探验证表明，该处确实存在溶洞发育，与物探解释结果基本符合。

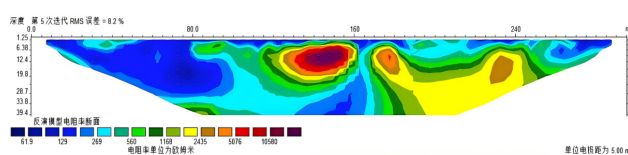


图 1 溶洞施伦贝尔装置反演图

高密度电法成果为风机位优化提供了重要依据。通过综合分析，取消了 5 个位于岩溶强烈发育区的原规划风机位，避免了潜在工程风险。

4.2 跨孔电磁波 CT 探测成果

跨孔电磁波 CT 探测在施工图设计阶段开展，主要目的是详细查明风机基础下岩溶空间分布特征。FJ08 风机位地表为第四系覆盖层，基岩为灰岩。本次风机场地在钻探完成后采用中国地质科学院物化探研究所生产的 JW-6 型跨孔电磁波仪系统在各钻孔之间进行了跨孔电磁波 CT 探测，以查明钻孔之间基岩起伏及岩溶发育情况。现场采用同步和完备测量、扫频模式进行数据采集，发射频率分别为 12MHz、16MHz、20MHz 及 24MHz，发射、接收点距均为 1m，根据风机场地钻孔布置图，将四个边界孔两两对穿，按照 ZK1-ZK2-ZK3-ZK4-ZK1、ZK1-ZK3、ZK2-ZK4 剖面进行布置，每个风机场地共计 6 对孔。例如 FJ06 风机位场地跨孔电磁波 CT 物探地质断面图如图 6 所示，图中红色区域表示高吸收系数区，对应岩溶发育带，蓝色区域对应溶洞；浅灰色区域表示低吸收系数区，对应完整基岩。在剖面中部（深

度 6-14m) 存在连续的高吸收异常带, 推断为岩溶发育带; 在剖面底部 (深度 >20m) 吸收系数普遍较低, 表明该深度以下岩体完整性较好。可以推测存在溶洞 3 处, 溶蚀发育区 1 处。综合各剖面及地质资料分析可知, FJ06 风机位场地岩溶发育, 溶洞规模相对较小, 局部溶蚀发育。这些成果为风机基础设计提供了直接依据。统计表明, 场地跨孔电磁波 CT 共发现规模以上溶洞 (直径 >1m) 21 处, 其中 85% 得到钻探验证, 表明该方法具有较高的可靠性。

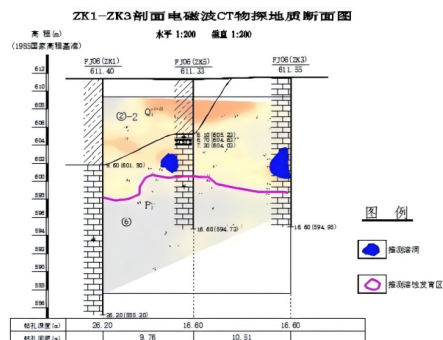


图 2 FJ06 风机位场地电磁波 CT 物探地质剖面图

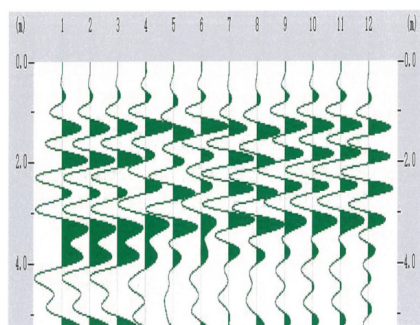


图 3 风机 FJ15-3 号桩桩井底部岩溶探测成果

4.3 桩底岩溶探测应用效果

桩底岩溶探测在施工阶段实施, 主要目的是确保桩端持力层稳定性。图 7 为风机 FJ15-3 号桩桩井底部岩溶探测成果图。图中横坐标为水平距离, 纵坐标为深度, 颜色代表反射波强度。如图所示波形一致性一般, 部分波形有畸变, 波形衰减基本正常。推测桩底 3 米深度范围内未发现溶洞或软弱夹层, 岩体裂隙发育, 局部岩体较破碎

本工程共对 15 台风机 256 根桩进行了桩底探测, 发现 37 根桩存在桩底岩溶问题, 均通过加深桩井方式处理成功, 避免了潜在安全隐患。

4.4 综合物探成果验证

为验证综合物探成果的可靠性, 对物探解释异常区进行了加密钻探验证。统计结果表明: 高密度电法异常验证符合率达 78%; 跨孔电磁波 CT 异常验证符合率达 85%; 桩底岩溶探测异常验证符合率达 92%。验证结果证明综合物探技术具有较高的可靠性。

同时发现, 物探方法之间存在一定的互补性: 高密度电法覆盖面广但分辨率较低; 跨孔电磁波 CT 分辨率高但仅限于钻孔间区域; 桩底岩溶探测针对性强但探测范围有限。

三种方法结合使用, 能够实现从面到线、从线到点、从点到体的全方位勘察^[8]。

5 结论与建议

(1) 综合物探技术与钻探相结合的工作模式在岩溶地区风电场勘查中应用效果显著, 形成了“物探先行、钻探验证、综合研判”的高效勘察技术体系^[9], 识别岩溶发育特征, 为风机位优化和基础设计提供科学依据。

(2) 高密度电法、跨孔电磁波 CT 和桩底岩溶探测三种方法优势互补, 结合钻探验证, 形成了完整的岩溶勘察技术体系, 显著提高了勘察资料的完整性与可靠性。

(3) 风电项目物探技术存在局限性: ①受勘探精度和网度限制, 以及地形地质条件的影响, 一些上覆灰岩较薄、埋藏浅的小型岩溶裂隙及埋深大于 40 米的异常可能会漏判; ②高密度电法仅依据电性参数进行解释, 当地层物性差异不明显时, 其推断结果存在多解性; ③岩溶发育无规律且变化大, 在解释覆盖层深度和岩溶异常时存在一定误差, 物探成果必须结合钻探验证进行综合确认与校准。

(4) 在总体规划阶段, 应根据物探解译的岩溶分布情况对风机位进行优化调整, 优先避开大型岩溶发育带。若因风资源等条件限制无法避让时, 必须在详细勘察的基础上, 对风机基础方案进行技术经济综合对比, 确定采用桩基穿越或地基处理 (如注浆加固) 等最佳处理方案。

(5) 重视前期地质调绘工作, 充分利用遥感、航拍等新技术, 宏观把握岩溶发育规律, 指导物探工作布置。

(6) 加强物探数据的综合解释与三维建模, 实现多源数据融合分析, 提高解释精度和可靠性。

(7) 加强勘察与设计的互动, 建立地质模型与设计参数的直接关联, 实现勘察成果的高效利用。

参考文献

- [1] 王宁宁, 洪斌. 喀斯特地貌山地风电线性工程施工安全管理[J]. 云南水力发电, 2025, 41(06): 196-198.
- [2] 高家奇. 川西南复杂高原山地风电基建的地质分析与可行性评估[J]. 电工技术, 2024, (03): 74-76.
- [3] 王海飞. 风机基础土岩组合地基变形与稳定性研究[D]. 浙江大学, 2022.
- [4] 王晓伟, 顾小双, 梁小龙. 综合物探手段在线型工程中的应用[J]. 工程勘察, 2025, 53(05): 83-90.
- [5] 张业. 综合物探方法在铁路路基岩溶勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(05): 738-743.
- [6] 段春龙, 杨亚磊. 电磁波 CT 技术在岩溶勘查和注浆检测方面的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(04): 435-441.
- [7] 孙红林, 张邦, 刘铁华, 等. 桩端岩溶三维超声成像方法及应用研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(02): 26-32+37.
- [8] 胡俊杰, 徐洪苗, 王鹏, 等. 基于三维可视化的跨孔电磁波 CT 在岩溶勘察方面的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(04): 443-449.
- [9] 廖俊清, 陈致同, 刘彦华. 综合物探方法在北盘江大桥岩溶地质勘察中的应用[J]. 地质学刊, 2020, 44(Z1): 185-191.