

融合多波束地形与中浅地层剖面的海缆路由三维地质断面构建技术

曾庆权 曹友华 涂道勇 何欣阳 周宸
中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司
DOI:10.32629/hwr.v10i2.6859

[摘要] 针对海上风电场海缆路由勘察中存在宏观地形与微观地质数据割裂、单一数据源存在局限、异构数据互通困难及数据解译困难的工程现实问题,本研究提出一种多源数据融合方法,利用多波束测深数据构建高精度海底地形,结合中浅地层剖面与钻孔数据,通过克里金插值等技术构建三维地质体,设计标准化JSON交换格式,实现CAD与GIS异构数据的互联互通。最后基于GeoScene for JS开发WebGIS平台,实现了海底地形与地层信息的二三维一体化融合直观可视化,降低地形地质数据的解译难度。工程应用表明,该方法能有效识别不良地质体,直观展示海缆与地质环境的空间关系,为海缆路由路径优化、设计和施工提供全面直观的地质信息,提升工程决策的科学性。

[关键词] 海上风电场; 海缆路由; 多波束测深; 中浅地层剖面; 异构数据互通; 三维地质断面
中图分类号: TM925.11 **文献标识码:** A

Construction technology of three-dimensional geological section of submarine cable route by combining multi-beam topography and shallow stratum profile

Qingquan Zeng Youhua Cao Daoyong Tu Xinyang He Chen Zhou
Power China Fujian Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] To address the engineering challenges in submarine cable route surveys for offshore wind farms—such as the disconnection between macro-terrain and micro-geological data, limitations of single data sources, difficulties in interoperability of heterogeneous data, and complexities in data interpretation—this study proposes a multi-source data fusion method. The approach utilizes multibeam bathymetric data to construct high-precision seabed topography and integrates sub-bottom profiler and borehole data to build a 3D geological model through techniques such as Kriging interpolation. A standardized JSON exchange format is designed to enable interoperability between CAD and GIS heterogeneous data. Finally, a WebGIS platform based on GeoScene for JS is developed, achieving integrated 2D and 3D visualization of seabed topography and stratigraphic information, thereby reducing the difficulty of interpreting terrain and geological data. Engineering applications demonstrate that this method can effectively identify adverse geological features, intuitively display the spatial relationships between submarine cables and geological environments, and provide comprehensive and clear geological information for route optimization, design, and construction of submarine cables, thereby enhancing the scientific basis for engineering decision-making

[Key words] offshore wind farm; submarine cable route; multibeam bathymetry; sub-bottom profiler; heterogeneous data interoperability; 3D geological cross-section

引言

在“双碳”目标背景下,随着海上风电场的开发力度不断加大,海缆作为海上风电场送出的核心载体,其路由规划、施工以及运维的安全性显得尤为关键^[1]。海缆路由区域海底地形与

地质结构数据是实现海上风电场海缆路由的科学规划设计、保障其长期安全运行的关键依据。根据现有研究,探测海底地形与地质结构数据的主流方法有两种,分别是多波束地形测量技术和中浅地层剖面技术。多波束地形测量技术能够一次性获取大

面积的高分辨率海底地形数据,精确刻画海底的起伏形态,为避开复杂地形提供依据^[2];中浅地层剖面技术以声波反射原理为基础,能够揭示海底以下的地层结构、岩性变化以及断层、浅层气等不良地质现象,是评估海缆铺设可行性的关键支撑要素^[3]。

然而,单一数据源存在显著局限性:多波束测深无法直观揭示其下的地质结构;而中浅地层剖面数据难以与宏观地形精确匹配。此外,海上风电场海缆路由勘察中存在宏观地形与微观地质数据割裂、数据交换标准缺失及可视化展示困难的问题,制约地形和地质数据价值的充分发挥,影响路由方案的科学决策与风险管控。

因此,本研究利用多波束测深(MBES)构建高精度海底地形表面模型,确立空间基准;其次结合中浅地层剖面(SBP)数据,通过克里金插值等算法构建三维地质体;设计标准化的JSON交换格式以解决CAD和GIS异构数据互通问题;最后基于GeoScene for JS开发WebGIS平台,实现海缆路由区地形与地层信息的二三维一体化融合直观展示。为海缆路由规划、施工以及运维提供全面且准确的地质支撑,优化路由方案、降低施工风险。

1 融合方法与技术流程

本节针对海缆路由勘测中宏观地形与微观地质数据割裂、异构数据互通困难等问题,提出一套多源数据融合的完整技术流程,如图1所示。

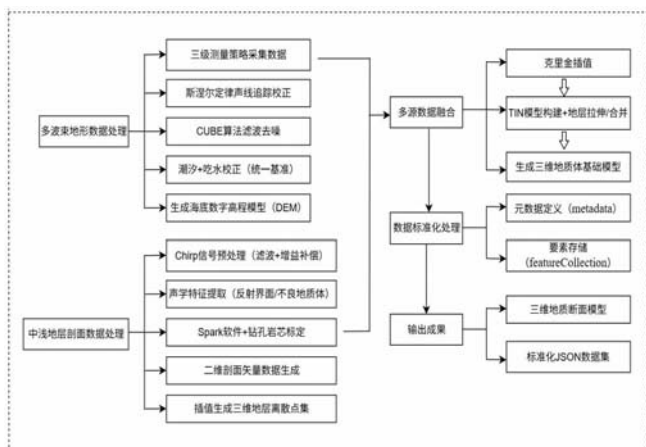


图1 融合方法与技术流程图

1.1 利用多波束技术初步形成全区海底地表数据

在非均匀水体环境中,声波传播路径易发生弯曲,为消除声速变化导致的深度误差,依据斯涅尔(Snell)定律对每条声线进行射线追踪校正,保障海底地形几何形态的真实性与可靠性。针对多波束测深获取的高密度点云数据,引入CUBE(组合不确定度与测深估计器,Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator)算法进行滤波处理,有效去除水体悬浮物及多路径效应产生的噪点,进而生成高分辨率的数字高程模型。最后,对多波束测深系统数据进行潮汐校正和吃水校正,将其统一到WGS84坐标系及深度基准面,以此构建整个三维模型的顶层基准面,确保后续中浅剖面地层数据、钻孔数据等均能以此为界向下延伸,保障海床表面的空间一致性,为地质分层及海缆路由设计提供空间参考系。

1.2 利用中浅剖面数据形成地质断面

在多波束测深系统确定的海床基准条件下,借助中浅地层剖面仪揭示海底以下地层结构,首先对原始Chirp信号实施带通滤波与时变增益补偿处理。随后开展特征提取工作,一方面识别不同沉积相的声学反射界面;另一方面精准识别浅层气、古河道、滑坡体等不良地质体。在特征提取基础上,运用SonarWiz系统或同类物探解释软件,结合钻孔岩芯数据对声学剖面进行标定,在剖面图上对断层线、地层分界线进行数字化处理,形成离散的二维剖面矢量数据。采用CAD+GIS集成插值技术将离散的二维剖面数据转化为连续的三维地质体;采用克里金插值法,基于协方差函数对地层界面的空间自相关性进行建模,以已知钻孔数据作为“硬约束”对插值结果进行校正,确保模型在控制点处的准确性;最后基于插值生成的栅格表面构建不规则三角网模型,完成从“面”到“体”的实体建模。

1.3 构建用于数据交换的JSON标准

为打破海缆路由勘测、设计、施工各阶段的异构数据壁垒,实现数据高效互通,设计一套轻量级、结构化的JSON数据交换标准,该交换文件采用GeoJSON的扩展结构,主要包含metadata(元数据)和featureCollection(要素集合)两部分,如图2所示。其中,metadata部分明确定义坐标系、高程基准、比例尺设置及标准地层配置表,为数据统一解析提供基础配置依据;featureCollection部分承载具体的几何与属性数据,实现核心信息的结构化存储。结合海缆工程特性,海缆平面图数据交换标准结构新增管线与路由要素,同时记录海缆与其他管线或障碍物的交叉点信息,为海缆工程全流程数据共享提供标准化支撑^[4]。

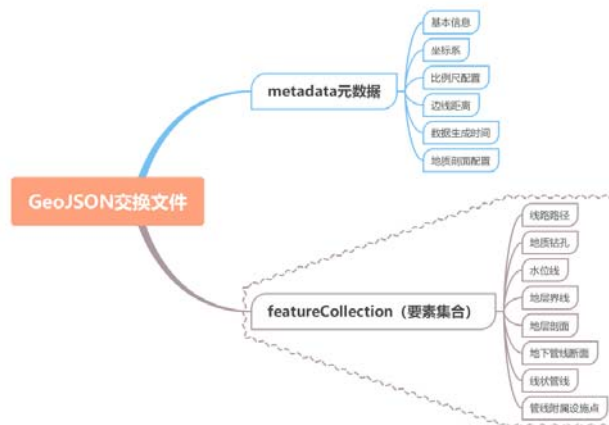


图2 数据结构示意图

1.4 基于交换数据构建二维平面的前端技术关键和效果

依托GeoScene API for JavaScript开发的海缆路由地质平台,在基于交换数据构建二维平面时,核心技术关键体现在三个方面:一是开发动态解析器,前端编写JSON解析引擎读取标准JSON文件,将metadata中的配置映射为对应的渲染规则,确保数据解析与可视化展示的一致性;二是采用Canvas/WebGL渲染技术,针对海量的水深点和地层界线,利用WebGL图层提升渲染性

能,避免DOM卡顿,保障大规模数据的流畅展示;三是实现自定义符号化,根据JSON中的CADLayer或FeatureType字段,自动匹配海图符号库,提升可视化的专业性与辨识度。

1.5利用钻孔及三维地质体构建三维场景的前端技术关键和效果

在利用钻孔及三维地质体构建三维场景过程中,前端技术关键围绕场景构建、数据可视化与交互功能展开:以GeoScene的SceneView作为三维容器,加载MBES生成的高精度海底地形服务,搭建三维场景的基础框架;根据JSON中钻孔的分层深度动态生成分段圆柱,以不同颜色区分不同岩性,实现钻孔三维可视化;将后端通过克里金插值生成的TIN或多面体模型导出,或直接解析JSON中的Polygon进行拉伸渲染,构建半透明的地下地质体,清晰呈现地下地层结构;借助API自带的Slice小部件,为用户提供地层任意剖切功能,方便观察海缆与地层内部结构的相对位置。

2 工程应用实例

2.1 工程概况

本工程为某海上风电场配套海缆路由勘测项目,勘测区域位于我国东南沿海开阔海域,属于典型的亚热带沿海海洋环境,受季风、潮汐及沿岸径流影响显著。路由走廊带整体呈近南北向延伸,全长约32km,宽度为500-800m,覆盖浅海至近海过渡区域,水深范围从8m渐变至65m。区域海底地形起伏较大,兼具平缓潮间带延伸区、水下浅滩及槽谷相间地貌,沉积环境复杂,涉及河流三角洲沉积、浅海相沉积等多种沉积类型。

2.2 数据介绍

本研究利用某海上风电场工程数据,主要包括多波束测深(MBES)数据、中浅地层剖面(SBP)数据、钻孔勘探数据及标准化整合后的JSON交换数据,各类数据采集与处理均符合海洋工程勘测相关技术规范。

2.3 结果分析与讨论

利用本研究融合方法和技术流程,本研究成功实现海底地形与地下地层一体化表征,以标准化JSON格式实现异构数据高效互通,WebGIS平台二三维可视化,支持风险点快速定位与交互分析。

通过上述技术实现,二维平面展示取得显著效果:成功实现海缆路由平面图与工程地质平面图的叠加展示;支持用户点击钻孔图标,弹出包含岩性描述、标贯击数的动态图表;能够自动生成地层分布范围的专题图。三维场景能够透视化展示海缆在海底地形上的敷设状态及与地层的关系,如图3所示;通过三维碰撞检测,自动分析海缆埋深是否满足保护要求;支持用户漫游查看海底微地貌,实时测量海缆长度及海底坡度。

本研究成果突破单一数据局限,降低了传统勘测盲区与数据互通难度;基于GeoScene for JS开发WebGIS平台,实现海缆路由区地形与地层信息的二三维一体化融合直观展示,降低了工程人员对于地形、地质数据的解译难度,相较于传统技术,其

“面-体”探测与可视化优势显著,可推广至海上风电场海缆路由送出有关工程。

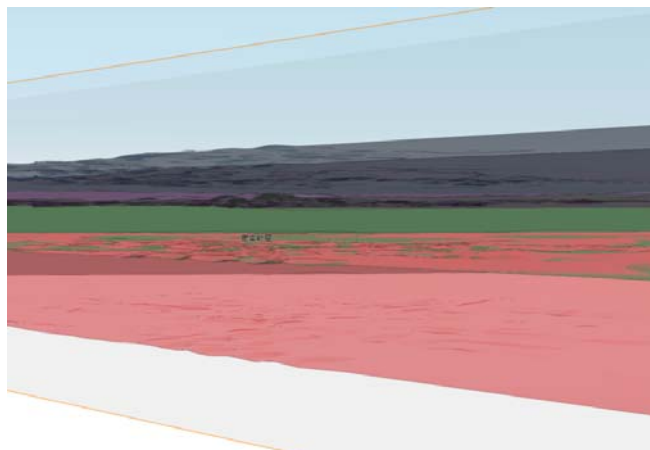


图3 海缆路由三维地质断面示意图

3 结论与展望

本研究提出的多源数据融合技术,以多波束测深(MBES)数据构建分米级精度海底地表基准,结合中浅地层剖面(SBP)数据揭示地下地层结构,依托钻孔数据提供岩性“硬约束”,通过克里金插值、CAD+GIS集成建模等关键方法,实现了地形与地层的一体化表征。该技术应用于某海上风电场配套海缆路由勘测项目,成功识别断层、古河道、浅层气富集区等4类不良地质风险点,且通过标准化JSON格式解决了异构数据互通难题,为路由优化、施工工艺选型及运维防护提供“地形-地层-风险”三位一体支撑。

未来可聚焦两大优化方向:一是针对当前地层界面人工解译效率低、主观性强的痛点,引入CNN算法,基于本文标准化数据集构建样本库,学习反射同相轴特征,实现地层界面自动识别与岩性预判;二是结合海缆长期运维需求,引入RNN算法整合多时期监测数据,建立地质环境演化时间序列模型,为地层沉降、风险点活动预警提供依据,延伸技术的全生命周期支撑价值。

[参考文献]

- [1]刘强,程武伟,雷芬丽.海上风电场海缆的敷设方法和路由探测技术[J].造船技术,2025,53(01):35-40.
- [2]李良.多波束测深系统在航道测量中的应用效果研究[J].珠江水运,2025,(23):97-99.
- [3]陈昌进.浅地层剖面探测技术在航道项目中的应用分析[J].科技资讯,2024,22(23):203-206.
- [4]黄玉林,李卫军.海上风电场海底电缆敷设路径及埋深综合检测[J].电力勘测设计,2023,(S1):91-96.

作者简介:

曾庆权(1993--),男,汉族,福建泉州人,工程师,硕士研究生,中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司,研究方向:电力勘测设计地理信息系统研究。