doi:10. 13756/j. gtxyj. 2026. 250296.
光纤光缆技术
沈振余,黄莉莺,胡毅,等. 海底光缆路由与埋深磁异常探测技术研究[J]. 光通信研究, 2026(5):112-119.
Shen Z Y, Huang L Y, Hu Y, et al. Research on Detection Technology of Magnetic Anomalies for Submarine Cable Routing and Burial Depth[J]. Study on Optical Communications, 2026(5):112-119.

海底光缆路由与埋深磁异常探测技术研究

沈振余[1],黄莉莺[1],胡 毅[2],刘伯然[2],王立明[2],全 义[3],宋晓云[2,4]
(1. 中国移动通信集团福建有限公司 厦门分公司,福建 厦门 361008; 2. 自然资源部第三海洋研究所,福建 厦门 361005; 3. 山东志留纪勘测设计有限公司,济南 250101; 4. 中国海洋大学,山东 青岛 266000)

摘要:【目的】针对近浅海无中继海底光缆因信号微弱、难以定量探测的难题,文章提出一种基于主动源磁异常探测方法,实现对平面路由与埋设深度的精确探测。【方法】通过在光缆铠装层施加直流电以主动增强磁异常信号。首先利用各向异性标准化方差边界探测(Normalized anisotropy variance-Edge detection,NAV-Edge)技术识别异常,再采用低秩矩阵分解法进行位场分离,以精确提取目标体信号;最后结合磁化率反演与 Euler 反褶积方法,对目标位置和深度进行联合反演计算。以厦门嵩鼓海缆为实例,采用 G-882SX 海洋磁力梯度系统进行探测验证。【结果】实验结果表明,施加 5 A 直流电可产生约 140 nT 的磁异常幅值差异,信号强度显著提升,且光缆传输性能未受影响。该方法可实现厘米级探测精度,平面定位平均均方根误差小于 10 cm,埋深反演平均误差小于 0. 1 m,与实际施工数据高度吻合。【结论】本研究形成了一套完整的、针对无中继海缆的磁异常探测技术流程,有效解决了传统探测手段的局限性,具有高效、准确、成本低和工程安全性好的显著优势,为近浅海区域海底光缆的维护与管理提供了可靠的技术支撑,应用前景广阔。

关键词:磁异常探测技术;无中继海底光缆;路由与埋深探测;磁化率反演;Euler 反褶积
中图分类号:TN929 **文献标志码**:A

Research on Detection Technology of Magnetic Anomalies for Submarine Cable Routing and Burial Depth

SHEN Zhenyu[1], HUANG Liying[1], HU Yi[2], LIU Boran[2], WANG Liming[2], QUAN Yi[3], SONG Xiaoyun[4,2]
(1. China Mobile Communications Group Fujian Co., Ltd., Xiamen Branch, Xiamen 361008, China; 2. The Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 3. Shandong Silurian Survey and Design Co., Ltd., Jinan 250101, China; 4. Ocean University of China, Qingdao 266000, China)

Abstract:【Objective】Addressing the challenge of quantitatively detecting unrepeatered submarine optical cables in near-shallow sea areas due to their weak intrinsic signals, this study aims to propose a novel method based on active-source magnetic anomaly detection for accurate and quantitative assessment of their planar routes and burial depths.【Methods】The core of this method involves actively enhancing the magnetic anomaly signal by applying a 5A direct current to the cable's armored layer. Firstly, the Normalized Anisotropy Variance-Edge detection(NAV-Edge) technology is employed to identify anomalies. Subsequently, the low-rank matrix decomposition method is used for potential field separation to precisely extract the target body's signal. Finally, the target's location and depth are jointly inverted by combining magnetic susceptibility inversion and Euler deconvolution. The Gulangyu to Songyu Submarine Cable in Xiamen served as a case study, detected using a G-882SX marine magnetic gradiometer system.【Results】Experiments demonstrated that applying a 5A direct current could generate a magnetic anomaly amplitude difference of approximately 140 nT, significantly enhancing the signal strength without affecting the cable's transmission performance. Detection results confirmed that this method achieves centimeter-level accuracy, with an average root mean square error for planar positioning of less than 10 cm and an average burial depth inversion error of less than 0. 1 m, showing high consistency with actual construction data.【Conclusion】This study establishes a complete technical process for magnetic anomaly detection specifically tailored for unrepeatered submarine cables. The method effectively overcomes the limitations of traditional detection approaches, offering significant advantages including high efficiency, accuracy, low cost, and operational safety. It provides reliable technical support for the maintenance and management of submarine optical cables in near-shallow sea areas, indicating broad application prospects.

Key words: magnetic anomaly detection technology; unrepeatered submarine cable; routing and burial depth detection; magnetic susceptibility inversion; euler deconvolution

0 引 言

海底光缆作为智慧海洋经济与全球通信网络的关键基础设施,广泛应用于海岛与大陆、沿海城市间的通信连接。近年来,海上工作平台与海上风电场规模化部署,其重要性愈发凸显。然而,近岸浅海区

收稿日期:2025-09-06; 修回日期:2025-10-10; 纸质出版日期:2026-10-10
基金项目:福建省科技计划引导性资助项目(2022Y0070);厦门市自然科学基金资助项目(3502Z202573091)
作者简介:沈振余(1980-),男,浙江瑞安人。工程师,本科,主要研究方向为海底光缆与光纤传感。
通信作者:胡毅,正高级工程师。E-mail:huyi@tio.org.cn
© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

域的海底光缆常因渔业捕捞、海洋工程建设等人类活动以及海底地质变化、洋流等因素受到破坏[1-2]，一旦发生故障，修复成本高、耗时长，给社会经济和人们生活带来严重影响。海底光缆的埋设深度是衡量其防护等级、评估其风险状态的重要技术指标，因此，精确探测其路由和埋深是维护工程质量的关键环节。

目前，国内外对于海缆探测进行了大量的研究，主要方法有磁法探测、侧扫声呐和浅地层剖面探测等。周普志等[3]基于有中继海缆远供系统电流产生的磁场，由正演曲线推导出光缆平面位置，但未提及埋深；姜坤等[4]提出一种基于光纤温度混合域特征的海缆深埋和浅埋状态识别方法；吴坤等[5]基于布里渊温度效应实现海缆浅埋和深埋状态的识别，但无法定量探测深度；丹麦 Horns Rev 3 海上风电场针对海缆运行状态监测需求，开发了拉曼光时域反射仪（Raman Optical Time Domain Reflectometer，ROTDR）、相位敏感光时域反射仪（Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer，φ-OTDR）及船舶自动识别系统（Automatic Identification System，AIS）集成解决方案，根据温度传感数据能够实现海缆埋深监测[6]；而 Lux 等[7]则进一步提出了一种基于分布式光纤测温与热力学模型的实时埋深监测方法，其核心思想在于厘定海缆的散热特性与其埋藏深度；Sakagami[8]开发了一种携带高分辨率立体摄像机的水下机器人，其携带的摄像机可以拍摄清晰的特写图像，从而判断海缆的运行状态；Isaacs[9]提出了一种基于声呐图像的海缆自动检测算法，能够更好地在杂乱图像中检测海缆位置。

但近浅海大量无中继海底光缆因直径小、无铜导体等特点，难以适配现有埋深及路由探测方法[10-12]。鉴于此，本文提出“主动通电增强信号–低秩矩阵分解去噪–联合反演精准定位”的一体化磁异常探测新方法，通过在海缆的铠装钢丝层施加稳定安全直流电，利用显著增强的磁异常信号实现对无中继海缆埋深和平面路由的精确定量分析，并通过敷设于厦门东渡航道海域的通信海缆实验验证其有效性，为无中继海底光缆运维管理提供了低成本、操作简便且精度高的技术支撑，可显著降低海缆受外部施工破坏、船锚钩断的风险，减少经济损失，兼具重要现实意义与广阔应用前景。

1 磁异常探测方法

海底光缆系统依据是否有中继器分为无中继海底光缆系统和有中继海底光缆系统。无中继海底光缆一般不包含铜导体层。按照外铠装保护型式，海底光缆可分为轻型海底光缆（Lightweight Cable，LW）、轻型保护型海底光缆（Lightweight Protected Cable，LWP）、单层铠装海底光缆（Single Armored Cable，SA）、双层铠装海底光缆（Double Armored Cable，DA）和重型铠装海底光缆（Rock Armored Cable，RA）等多种结构。在海水深度小于 500 m 的海域，通常选用 DA，并采用埋设方式，埋设深度一般不小于 3 m。

图 1 展示了 DA 型无中继海底光缆的结构，包括纤芯、阻水纤膏、不锈钢管、内外层铠装镀锌钢丝、聚乙烯护套（PE Sheath）和聚丙烯绳（PP Yarns）等，其成品外径为 34.4±2.0 mm。针对无中继海底光缆特性，对其磁异常识别、分离与反演技术展开分析。

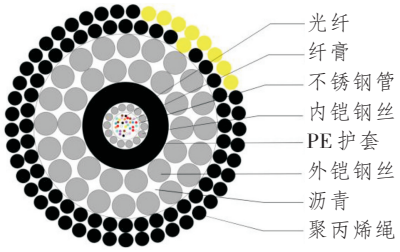


图 1 双层铠装无中继海底光缆结构图（DA）

Figure 1 The structure of double armored submarine cable without repeaters (DA)

1.1 磁异常识别与增强方法

磁异常是铁磁性物体磁化后产生的感应磁场，对恒定分布地磁场造成的干扰现象[13]。本文采用 NAV-Edge 技术进行磁异常初步识别，该方法相对稳定，可有效地突出目标位置，且对噪声干扰具有较强的鲁棒性。其创新在于，通过对无中继海缆铠装层施加 5 A 直流电，人为增强其磁信号，可使原本微弱的磁异常幅值提升约 140 nT，效果显著优于传统被动磁测方式，为后续精准识别与反演奠定了坚实基础。

1.2 位场分离与低秩矩阵分解

地表观测的磁异常是中深部区域场与浅部局部场的叠加，图 2 所示为磁异常叠加示意图。位场分离是借助数学物理方法将局部异常（图 2 中蓝色线）和区域异常（图 2 中红色线）从观测异常中分离的过程。为准确提取由海缆产生的局部异常，本研究运用位场分离低秩矩阵分解法，其核心原理为利用局部场的延滞矩阵具有稀疏性，区域场的延滞矩阵具有低秩性来进行分离。分离效果的关键在于平衡参

数 λ 的选取。本研究参考张紫薇等[14]提出的基于相关系数的最优参数选择方法，以确定最佳的 λ 值。有效避免了 λ 值过小导致局部场逼近原始场，或 λ 值过大导致局部场信号过度衰减的问题，确保所提取海缆磁异常信号的真实性与有效性。

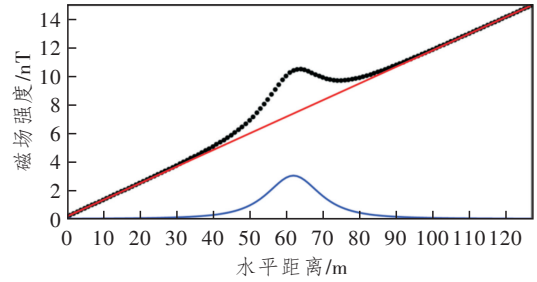


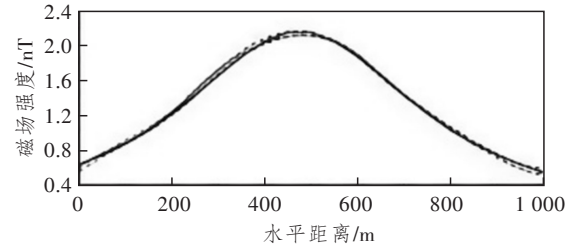
图 2　磁异常叠加示意图

Figure 2　Schematic diagram of magnetic anomaly superposition

1.3　磁异常反演与定位

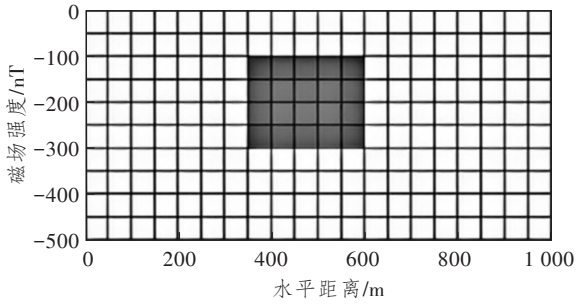
获取局部磁异常后，采用磁化率三维反演与 Euler 反褶积进行联合反演，以确定海缆的空间位置与埋深。

磁化率反演：采用张恒磊等[15]提出的曲波压缩反演方法，将地下空间划分为 0.05 m×0.05 m 的精细单元，适配海缆小尺度特征，通过反演每个单元的磁化率，推测目标体的空间位置与规模。磁化率三维反演如图 3 所示，根据结果可以推测目标的空间位置以及规模大小等参数。



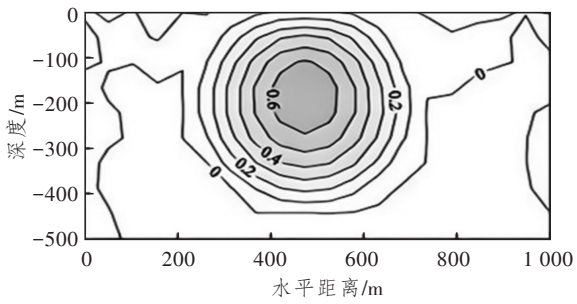
(a)磁异常

(a)Magnetic anomalies



(b)真实模型

(b)True model



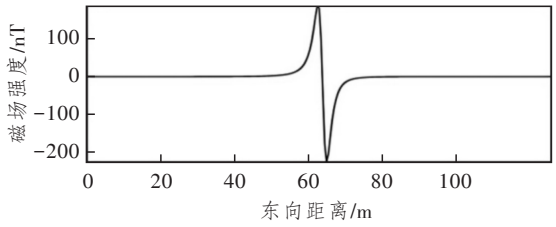
(c)反演结果

(c)Inversion results

图 3　磁异常三维反演

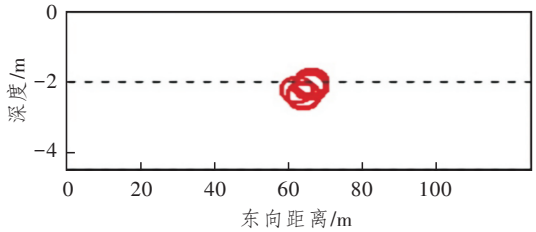
Figure 3　Three-dimensional inversion of magnetic anomalies

Euler 反褶积：该方法灵活高效、对先验信息依赖度低。本研究将滑动窗口大小设为 20 m，在保证稳定性的前提下提升定位精度。反演精度依赖于磁异常导数的计算准确性，在复杂环境下可采用等效源法进行优化[16]。图 4 所示为磁异常 Euler 反褶积得到的目标定位结果。



(a)磁异常

(a)Magnetic anomalies



(b)目标定位结果

(b)Target positioning results

图 4　Euler 反褶积

Figure 4　Euler deconvolution

2　分析与讨论

2.1　海底光缆磁异常模拟

海缆探测区邻近厦门市且位于航道中，环境磁场复杂，码头、航道行船及海底障碍物等产生的干扰磁场幅值可达数十纳特，可能掩盖海缆产生的感应磁场。为增强磁场信号，本研究采用人工注入电流的方法进行强化。利用 Mag3Dimaging 软件模拟海缆埋深 5 m 时，不同电流强度(3 A、5 A 和 10 A)对应的磁异常曲线，如图 5 所示。模拟结果显示，5 A 电流即可产生约 140 nT 的磁异常幅值差异。

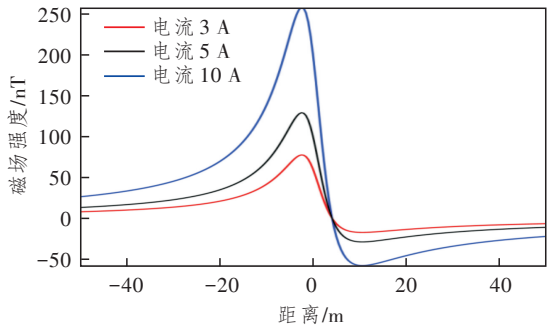


图 5　磁异常模拟

Figure 5　Magnetic anomalies simulation

2.2　磁异常探测技术流程

针对海底光缆主动磁探测的特点，本研究总结了一套如图 6 所示的磁异常处理解释技术流程。首先开展平面异常处理，采用 NAV-Edge 方法（窗口大小为 11 个数据点）初步识别目标位置。再选取典型剖面进行精细处理，采用前述低秩矩阵分解方法（λ 值经优化选取）去除干扰，得到局部磁异常。随后采用磁化率三维反演（压缩率 0.05，单元体剖分尺寸 0.05 m×0.05 m）和 Euler 反褶积（窗口 20 m）进行反演计算。若两种方法结果一致，则将相对坐标标定为绝对坐标；否则检查并重新反演。最后通过剖面与平面处理结果相互验证，确保准确性。所有数据处理均基于 Mag3Dimaging 软件实现。

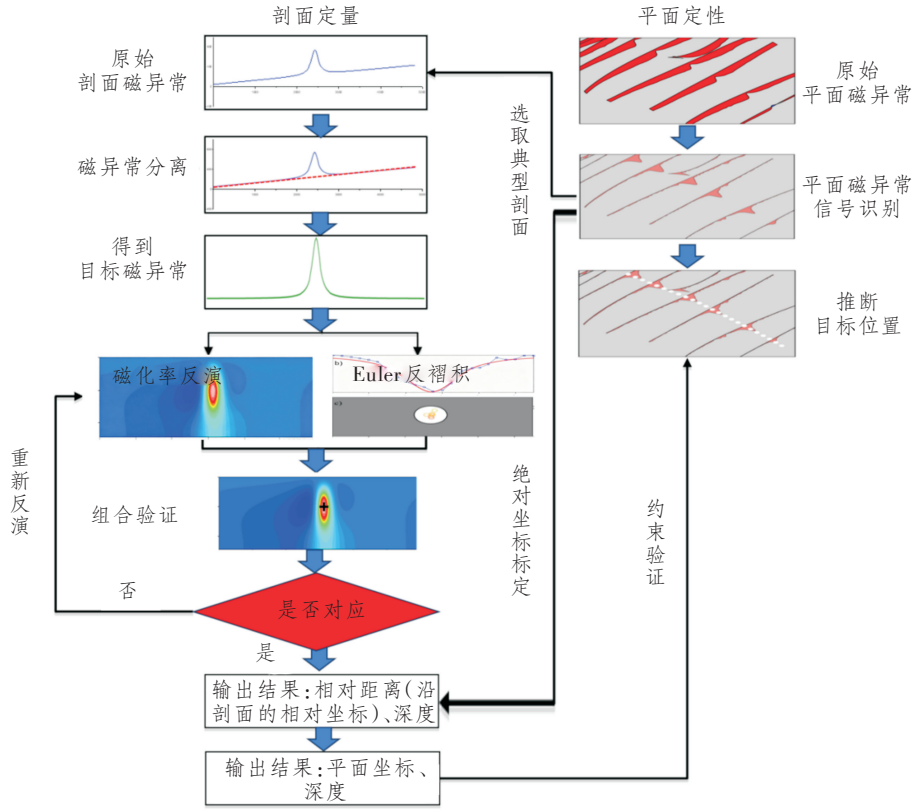


图 6　磁异常探测解释技术流程

Figure 6　Magnetic anomaly detection and interpretation technology process

3　探测工程实例

以 2024 年 6 月完工的厦门鼓浪屿至嵩屿海底光缆（嵩鼓海缆）路由复测项目为例，系统阐述磁法探测与解析的全过程。嵩鼓海缆敷设海域水深小于 20 m，采用 DA 型 96 芯无中继海底光缆，长度 1 945 m。施工采用水喷埋设犁穿越东渡航道，设计埋设深度大于 3 m。研究内容包括测线布设、设备选用及加电连接、数据分析，以及海底光缆的平面路由和埋设深度的判定成图。

3.1　测线布设

磁力测线布设图如图 7 所示，测线垂直于海底光缆路由方向布置，共设 50 条。路由两端测线间隔为 50 m；而在路由中段的航道区域，为了提高探测精度，测线间隔加密至 25 m。整个测线布设的总长度为 10 km。该布设方式兼顾探测全面性与关键区域的重点监测需求，有助于精准定位海底光缆的具体位置和相关特征。

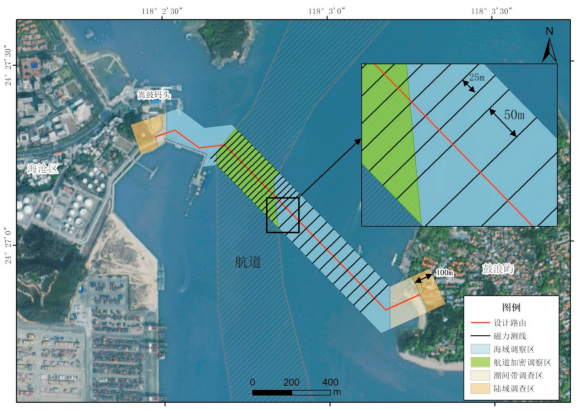


图 7　磁力测线布设图

Figure 7　Magnetic survey line

3.2　海洋磁力仪的应用

海洋磁力仪通过拉莫尔频率与环境磁场之间的精确比例关系来测量磁场。本次探测采用两台 Geometrics 公司生产的 G-882SX 型海洋磁力仪组成磁力梯度系统(如图 8 所示)。将两台磁力仪通过支架固定并保持一定间距,同步采集数据计算磁力梯度。采用拖曳方式测量,磁力梯度系统放缆长度设为 50 m,规避测量船自身磁干扰。



图 8　磁力梯度系统

Figure 8　Magnetic gradient system

3.3　海底光缆加电及安全性测试

目标海缆外径约 4 cm,日常运行处于无源状态,磁异常信号微弱。为确保在用海缆安全,先对备用海缆进行测试,施加总功率约为 1 200 W 的直流电持续 20 min。OTDR 检测显示,光纤衰减曲线线性良好且无明显台阶,1 310 nm 和 1 550 nm 波长衰减值分别小于 0.35 dB/km 和 0.22 dB/km,验证了通电安全性。随后对在用海缆进行加电(电路原理见图 9),在嵩屿端和鼓浪屿端接入海陆缆接头盒,在两侧沙滩分别布置地线,利用 PE 护套与海水之间的绝缘性形成回路,稳定施加 5 A 直流电。全程监测显示光缆状态正常,磁异常信号较未加电状态显著增强约 140 nT(图 10),与软件模拟结果高度吻合,验证了探测的可靠性及加电方案的有效性。

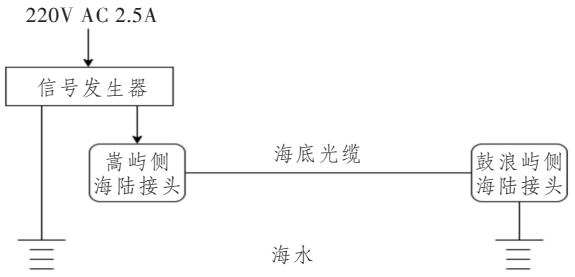
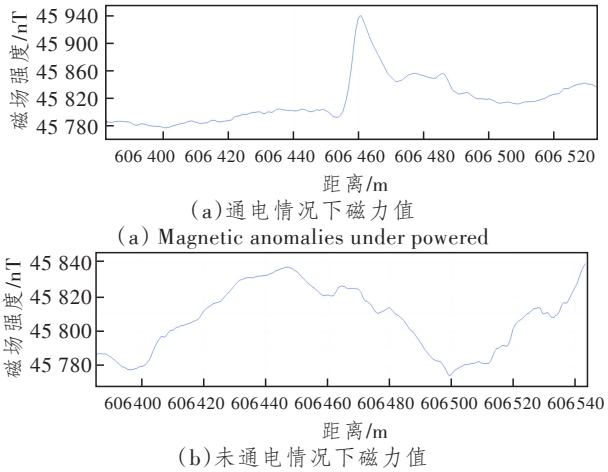


图 9　加电系统电路原理图

Figure 9　The electrical system circuit cartoon



(a)通电情况下磁力值

(a) Magnetic anomalies under powered

(b)未通电情况下磁力值

(b) Magnetic anomalies under unpowered

图 10　同一位置磁异常对比

Figure 10　Comparison of magnetic anomalies at the same location

3.4　探测结果分析

3.4.1　平面磁异常处理

采用 NAV-Edge 方法对观测磁异常进行处理,结果如图 11 所示。观测测区的北西向条带状异常显著,据此可准确推断出海底光缆的水平位置。图中可见一连续、清晰的北西向条带状高磁异常带,幅值介于 45 800~45 940 nT 之间,与通电模拟及预设海缆路由高度吻合。该异常带特征明显,有效突出了海缆目标,证明了加电增强与 NAV-Edge 识别方法的有效性,可准确推断海缆的水平位置(图中黑色线)。

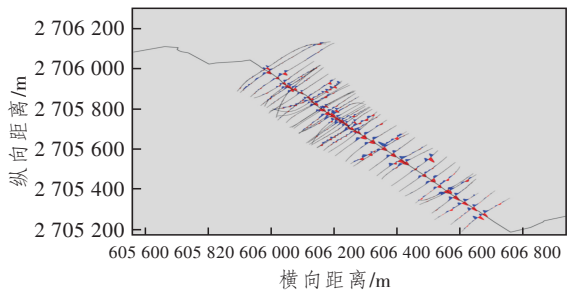


图 11　平面磁异常平剖图(黑色线为推测的光缆走向)

Figure 11　Magnetic anomaly profile map (with the black line indicating the inferred direction of the optical cable)

3.4.2 深度精细定位

选取 5 条典型剖面进行精细处理与反演解释。为分析 Euler 反褶积定位误差，试验了多个不同窗口区间，结果如图 12 所示。反演得到的海缆埋深介于 3.0～4.1m 之间（表 1），与设计要求及施工船只现场监测埋设犁深度（≥3 m）相符。各剖面定位平均均方根误差一般优于 10 cm，平均误差小于 0.1 m，体现了该方法的高精度与稳定性。例如，测线 25021549 反演深度值在 3.1～3.5 m 间波动，均方根误差 0.18 m，平均误差 0.06 m；而测线 25021548 反演结果高度一致，误差为 0。

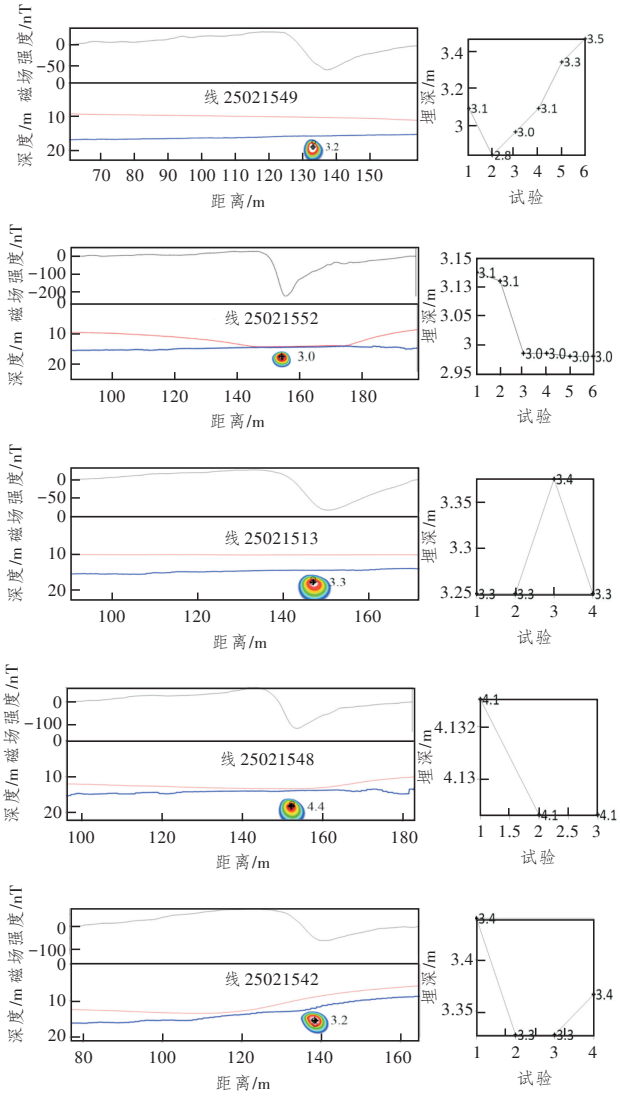


图 12 典型剖面精细反演（左）及埋深误差分析（右）

Figure 12 Typical profile detailed inversion (left) and burial depth error analysis (right)

3.4.3 海缆平面位置及埋深结果

综合平面处理和剖面精细反演的结果，绘制海缆水平位置及埋深信息成果图（图 13）。白色线标示海缆水平分布，十字符号及数字表示精细反演得到的具体位置及埋深。进一步逐点平面分析表明，嵩鼓海缆主路由平面位置与规划批复坐标基本一致，最大偏移差值约为 8.73 m，最小 0 m，与设计基本一致，均位于权属范围内（图 13 红色线，北侧平均距权属边界 5.7 m，南侧 5.8 m）。埋深结果显示，登陆点及沙滩、暗礁段埋深较浅，入海后埋深增加，航道区埋深除边坡位置外普遍大于 3 m，与当时施工状态实时监测结果基本吻合，符合设计要求。

表 1 基于磁异常的海缆定位误差分析

Table 1 Error analysis of submarine cable localization based on magnetic anomalies

单位/m

测线编号	不同位置定位深度	平均深度	均方根误差	平均误差
25021549	3.1、2.8、3.0、3.1、3.3、3.5	3.2	0.18	0.06
25021552	3.1、3.1、3.0、3.0、3.0、3.0	3.0	0.05	
25021513	3.3、3.3、3.4、3.3	3.3	0.04	
25021548	4.1、4.1、4.1	4.1	0	
25021542	3.4、3.3、3.3、3.4	3.3	0.05	

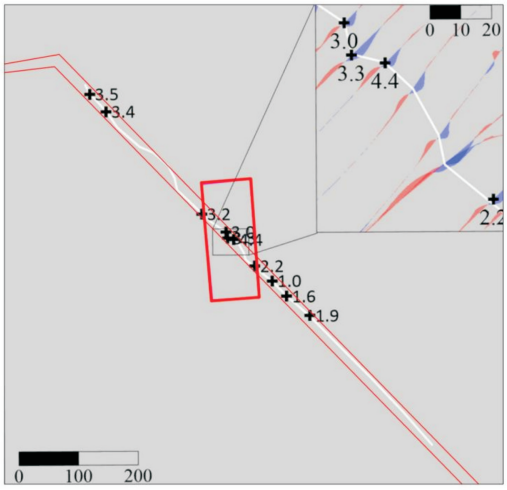


图 13 海底光缆水平位置（白色线）以及典型剖面反演的埋深（+号）

Figure 13 Horizontal position of the submarine cable (white line) and the inverted burial depth from the typical profile (+sign)

3.5 工程应用问题与讨论

目前海洋地球物理测量项目中，海底光缆探测方法主要包括声学探测法、被动磁法探测、电磁感应法与分布式光纤传感等。侧扫声呐可探测海缆裸露和悬空状态；浅地层剖面仪能获取路由区浅地层结构状况，对大缆径电缆具有一定探测效果；海缆仪专

用于探测有源(带电)海底光缆,但对海况要求高、效率低、成本高;分布式光纤传感通过分析光纤背向散射光,监测振动、声波、温度、应变等参数,间接推断浅埋、外力破坏等异常事件。此外,MEMS传感器、自主导航水下机器人等新兴技术也是研究热点。每类方法均有其适用性和局限性,需结合实际海缆结构和所处海域环境选择。

本文所提方法在工程实践中取得了预期效果,实施过程中也面临若干问题并形成相应解决思路:一是环境干扰抑制问题,近岸海底铁质杂物、废弃渔网等易造成误判,需融合侧扫声呐图像、海底地形等多源信息辅助判别,同时优化低秩分解λ值参数选择策略,提升抗干扰能力。二是电流稳定性问题,接地电阻受沙滩湿度、海上盐度影响较大,可通过加电前测试接地电阻、采用恒流源并实时监测保障电流稳定,条件允许时可在海缆两端同步加电形成闭环。三是反演结果一致性问题,复杂地质区可能出现反演深度差异,建议结合浅地层剖面数据辅助判断,或引入水下机器人交叉验证。四是深海长距离应用适用性问题,当前方法在近浅海验证有效,未来需通过数值模拟研究不同缆长、水深下的电流衰减与磁场响应规律,探索分段加电与分布式光纤传感融合的协同监测方案

4　结束语

本研究首次构建"主动通电增强信号–低秩矩阵分解去噪–联合反演精准定位"一体化技术流程,通过工程案例验证了磁异常探测技术在无中继海底光缆路由与埋深探测中的有效性,解决了无中继海缆因无源、磁信号微弱导致的定量探测难题。结果表明,该方法通过在海缆铠装层施加直流电增强磁异常信号,结合低秩矩阵分解、磁化率反演与Euler反褶积等手段,可实现海底光缆平面位置与埋深的精准定量探测,精度达厘米级且不影响光缆传输性能。

该方法成本低、易操作,为近浅海无中继海缆探测难题提供可靠技术支撑,具备重要工程应用价值。未来研究将拓展该方法在深海、长距离海缆中的应用,验证其在不同环境下的适用性,并结合分布式光纤传感构建"磁–热–声"多物理场协同监测体系,实现海缆路由偏移、温度应力变化及海洋地质环境的综合观测,进一步提升海洋通信基础设施的安全性与可靠性

参考文献:

[1] 王超, 褚彭魁, 叶胤. 海底光缆埋设评估及保护建议[J]. 信息通信技术, 2025, 19(1): 71–78.
Wang C, Chu P K, Ye Y. Submarine Cable Burial Assessment and Protection Proposal[J]. Information and Communications Technologies, 2025, 19(1): 71–78.

[2] Bricheno L, Yeo I, Clare M, et al. The Diversity, Frequency and Severity of Natural Hazard Impacts on Subsea Telecommunications Networks[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 259: 104972.

[3] 周普志, 李正元, 沈泽中, 等. 海底光缆磁法探测技术研究与应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(4): 100–110.
Zhou P Z, Li Z Y, Shen Z Z, et al. Research and Application of Magnetic Detection Technology for Submarine Optical Cable[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(4): 100–110.

[4] 姜坤, 张帅, 傅翔, 等. 基于光纤温度混合域特征的海缆浅埋状态识别[J]. 激光与红外, 2024, 54(2): 312–320.
Jiang K, Zhang S, Fu X, et al. Recognition of Shallow Buried State of Submarine Cable based on Fiber Optic Temperature Hybrid Domain Features[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(2): 312–320.

[5] 吴坤, 吴明埝, 陈青青, 等. 基于布里渊效应的海缆埋深监测技术研究[J]. 光通信研究, 2025(4): 250097.
Wu K, Wu M N, Chen Q Q, et al. Research on Submarine Cable Buried Depth Monitoring Technology based on Brillouin Effect[J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250097.

[6] 马国明, 秦炜淇, 王思涵, 等. 海底电缆状态分布式光纤监测技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 370–387.
Ma G M, Qin W Q, Wang S H, et al. Review of Submarine Cable Condition Monitoring based on Distributed Optical Fiber Sensing[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 370–387.

[7] Lux J, Olschewski M, Schäfer P, et al. Real-Time Determination of Depth of Burial Profiles for Submarine Power Cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1079–1086.

[8] Sakagami N, Ishimaru K, Kawamura S, et al. Development of an Underwater Robotic Inspection System Using Mechanical Contact[J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30(4): 624–640.

[9] Isaacs J C, Goroshin R. Automated Cable Detection in Sonar Imagery[C]//2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Antonio,

TX, USA:IEEE, 2009: 5346577.

[10] 蔡璇, 许宝华, 李道鹏, 等. 海底缆线综合探测方法及应用[J]. 水利水电快报, 2023, 44(10): 36–40.
Cai X, Xu B H, Li D P, et al. Comprehensive Method and Application for Submarine Cable Detection[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2023, 44(10): 36–40.

[11] 戴清清. 海底管道隐患检测: 研究进展与未来展望[J]. 上海国土资源, 2024, 45(4): 197–202.
Dai Q Q. Underwater Pipeline Hazard Detection: Research Progress and Future Prospects[J]. Shanghai Land & Resources, 2024, 45(4): 197–202.

[12] 刘恩泽, 李海东, 王恒波, 等. 海洋地球物理方法在海底管道检测中的应用探讨[J]. 海岸工程,2025,44(1): 69–83.
Liu E Z, Li H D, Wang H B, et al. Application of Marine Geophysical Exploration Methods to Submarine Pipeline Detection[J]. Coastal Engineering, 2025, 44(1): 69–83.

[13] 罗汪彬, 陈鸿, 徐宏斌, 等. 综合地球物理方法在厦门220 kV海底电缆现状调查及分析中的应用[J]. 技术与市场, 2024, 31(10): 57–59.
Luo W B, Chen H, Xu H B, et al. Application of Comprehensive Geophysical Method in Investigation and Analysis of Xiamen 220 kV Submarine Cable[J]. Technology and Market, 2024, 31(10): 57–59.

[14] 张紫薇, 李厚朴, 张恒磊, 等. 基于低秩稀疏分解的重磁异常分离方法及应用[J]. 物探与化探, 2025, 49(1): 118–128.
Zhang Z W, Li H P, Zhang H L, et al. A Low-Rank Decomposition-based Method for Separating Gravity and Magnetic Anomalies and Its Application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(1): 118–128.

[15] 张恒磊, 耿美霞, 胡祥云. 基于曲波压缩的重磁异常三维反演及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(4): 993–1001.
Zhang H L, Geng M X, Hu X Y. Three-dimensional Inversion of Gravity/Magnetic Anomalies Based on Curvelet Compression and Its Applications[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(4): 993–1001.

[16] 金文博. 起伏地形下的重磁异常欧拉反褶积方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
Jin W B. Research on the Euler Deconvolution Method of Gravity and Magnetic Data with Undulating Terrain[D]. Changchun: Jilin University, 2024.