



引用格式:莫子孟,任常斌,罗海,等.基于双向贯穿扫描方法的海底管道稳定性诊断研究[J].海南大学学报(自然科学版中英文),DOI:10.65658/j.hndk.2025070802.

Citation:MO Zimeng, REN Changbin, LUO Hai, et al. Research on stability diagnosis method of submarine pipeline based on bidirectional cross-sectional scanning[J]. Natural Science of Hainan University, DOI:10.65658/j.hndk.2025070802.

Open Access

基于双向贯穿扫描方法的海底管道稳定性诊断研究

莫子孟¹,任常斌^{2,3},罗海^{2,3},周世凯⁴,刘晓晓^{2,3}

(1. 国家能源集团乐东发电有限公司,海南乐东 572500; 2. 浙江大学海南研究院,海南三亚 572025;
3. 海洋环境监测与探测装备海南省工程研究中心,海南三亚 572025;
4. 海南智汇亨科技有限公司,海口 570100)

摘要:针对海底管道传统横切扫描方法仅能获取截面局部信息、难以捕捉沿管道轴向连续形变特征的问题,本文提出一种基于浅地层剖面声学探测的横切与纵切双向贯穿扫描数据融合方法。通过布置垂直和沿管道轴线的双向测线,结合参量阵浅地层剖面仪与高精度定位系统,实现对管道倾斜、截面椭圆度、纵向高程偏差、接缝错位及外部环境异常等多维参数的同步提取与综合分析。以南海某输水管道为对象开展现场试验,准确识别出管道倾斜、凹坑、障碍物及凸起等典型隐患,验证了该方法在海底管道稳定性诊断方面的有效性与工程适用性,为长距离海底管道的连续形变监测与安全运维提供了可靠技术手段。

关键词:海底管道;浅地层扫描;双向贯穿;数据融合;稳定性诊断

中图分类号:P756.2 文献标志码:A

DOI:10.65658/j.hndk.2025070802 CSTR:32403.14.hndk.2025070802

Research on stability diagnosis method of submarine pipeline based on bidirectional cross-sectional scanning

MO Zimeng¹, REN Changbin^{2,3}, LUO Hai^{2,3}, ZHOU Shikai⁴, LIU Xiaoxiao^{2,3}

(1. Ledong Power Plant, China Energy Co. Ltd., Ledong 572500, China; 2. Hainan Institute, Zhejiang University, Sanya 572025, China; 3. Hainan Provincial Engineering Research Center for Marine Environment Monitoring and Detection Equipment, Sanya 572025, China;
4. Hainan Zhihui Xiang Technology Co., Ltd., Haikou 570100, China)

Abstract: To address the limitation of traditional cross-sectional scanning methods for submarine pipelines, which only capture localized cross-sectional information and hard to detect continuous axial deformation features, this paper proposes a data fusion method based on acoustic sub-bottom profiling that integrates both cross-sectional and longitudinal scanning. By deploying survey lines both perpendicular and parallel to the pipeline axis, and utilizing a parametric sub-bottom profiler combined with a high-precision positioning system, this method enables the simultaneous extraction and comprehensive analysis of multiple parameters, including pipeline inclination, cross-sectional ellipticity, longitudinal elevation deviation, joint misalignment, and external environmental anomalies. Field tests conducted on a water pipeline in the South China Sea

Received: 2025-07-08; Revised: 2025-08-11; Accepted: 2025-08-12;

Corresponding author(s): LIU Xiaoxiao, xxliu616@zju.edu.cn

successfully identified five types of typical anomalies, including pipeline tilt, depressions, obstacles, and upheavals. The results verify the effectiveness and engineering applicability of the proposed method for diagnosing submarine pipeline stability, providing a reliable technical approach for continuous deformation monitoring and safety maintenance of long-distance submarine pipelines.

Keywords: submarine pipelines; sub-bottom profiling; two-way penetration; data fusion; stability diagnosis

0 引言

海底管道作为海洋能源输送的核心基础设施,其结构稳定性直接关乎国家能源安全与海洋生态安全^[1]。海底极端服役环境使管道面临多重失效风险,例如地质灾害可诱发地层错动导致管道剪切,强洋流冲刷易造成管基掏空形成悬跨,加之人类活动引发的机械损伤,共同构成系统性威胁^[2]。其中管端剪切-悬跨转换区因应力集中现象突出,成为断裂泄漏的高危区域,实证研究表明大量的管道失效事故源于此类连接区的结构失稳^[3]。

现有检测技术主要采用浅地层声学的横切扫描方案,通过垂直管道轴线的声学、光学采样获取局部截面信息^[4]。浅地层剖面仪(sub-bottom profiler, SBP)利用发射高频声波脉冲,接收地层界面反射信号,实现对地层剖面结构信息的非破坏性采集^[5]。地质探测角度方面,主要研究海底土壤力学性能对管道受力的影响机理,王继立等^[6]利用浅地层剖面仪实现了对海底管道的埋深、悬跨及周边地层结构的声学成像检测,验证了该类设备用于管线巡检的可行性。祁晓雨^[7]采用小道距高分辨率多道地震系统,开展了渤海南部-渤海海峡地层探测工作,通过对采集参数的优化,提高了浅地层分层和地质构造识别精度。土体特性分析技术方面,孟垂乾等^[8]建立了波浪-海流-管道-地基相互作用模型,量化分析土体参数对管道稳定性的影响;甘永波等^[9]利用土体强度参数随机场模型,在横向荷载下分析了管-土互作的空间变异性特征;熊春宝等^[10]基于三维地质建模技术,整合海底地形、土体信息,实现管道在位稳定性的空间化评价。数据处理方面,Yegireddi等^[11]将图像处理方法、神经网络分类方法应用到浅表层声学剖面数据中,进行海底沉积物类型的自动分割与分类,提高了海底沉积物类型的智能化识别水平。综上所述,目前海底底质探测技术已发展至高分辨率声学探测和耦合分析相结合的方式,能够为海底工程地质勘察、管道安全评价等方面工作提供相应技术支持。

近年来有关海底管道稳定性的诊断,在地质评价、声学探测以及数据融合等方面取得了一定进展,但在实际工作中存在局限性:(1)轴向采样间隔(通常 10~20 m)难以捕捉渐进式沉降与长距离剪切滑移;(2)传统声呐设备分辨率局限无法识别较小尺度形变;(3)单点测量模式导致对海床滑移的误判率升高,横切扫描方式无法反映管道沿轴向的连续变形和伸缩,无法反映海床滑动剪切滑移造成的长距离位移^[12]。

针对上述问题,本研究提出双向贯穿扫描的数据融合方法,利用水平方向间隔扫描、垂直方向连续扫描同时完成对多通道数据采集和分析,以判断海流冲刷、地质活动等对海底管道造成的破坏,形成对检测技术的有效补充。

1 双向扫描的稳定性诊断方法

1.1 横切方向扫描方案与数据处理 对海底混凝土管道进行横切方向检测,根据管道横向沉降差、截面椭圆度等建立横切检测指标体系以评价管道沉降和变形。浅地层剖面仪是一种基于主动声学探测的水下地球物理设备,其核心原理是通过声波在海底地层中的反射特性,实现浅层地质结构的非侵入式成像^[13-14]。换能器垂直于或者近乎垂直地向下发射一定频段范围内高频声波脉冲(一般频带为 1~24 kHz),幅值范围一般控制在 0.1~10 ms 的范围内,声波穿透海水层直达海底后部分能量穿入沉积层再向下传递,穿过沉积层在遇到地层物理特性不同时会出现反射、透射及散射现象,反射波返回到换能器并被换能器接收,然后处理成反射信号被记录下来,用以确定地层物理特性的参数及其界面。

1.1.1 横向沉降差 横向沉降差是表征管道截面两侧地基不均匀沉降的核心参数,其数值直接反映结构

侧倾风险。海流长期侧向冲刷或局部土体流失可能导致管道单侧基础承载力下降,进而引发顶板高程差异与接缝错位。

定义横向沉降差为管道顶板左右两侧高程的绝对差值:

$$\Delta x = |Z_{\text{left}} - Z_{\text{right}}| \quad (1)$$

其中, Z_{left} 和 Z_{right} 通过声波双程走时计算获得,声速 v 根据现场水体温盐剖面校准,计算公式为

$$Z = \frac{v \cdot t}{2} + \Delta Z_{\text{DGPS}} \quad (2)$$

其中, ΔZ_{DGPS} 为(differential global positioning system, DGPS)高程校正,用于消除潮位波动影响。

实际部署时,沿垂直管道轴线布设间距 10~20 m 测线,采用 12 kHz 中心频率,脉冲长度 0.1 ms,同步记录姿态传感器数据以补偿船体横摇误差。对声学剖面进行时深转换与地形校正,提取管道顶板反射层,采用滑动窗口法计算序列。

判定方法视具体工况要求决定。本研究的低风险($\Delta x \leq 0.2$ m),满足《水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015》允许范围;高风险($\Delta x > 0.4$ m),需立即修复^[15]。

1.1.2 截面椭圆度 截面椭圆度反映管道受侧向土压力或基础滑移引起的截面畸变程度,其数值变化可预警混凝土开裂风险。

理想矩形截面在非对称荷载作用下接近椭圆化,椭圆度的定义式为长轴(D_{max})与短轴(D_{min})的比值:

$$\text{椭圆度} = D_{\text{max}} / D_{\text{min}} \quad (3)$$

其中, D_{max} 和 D_{min} 是利用声学图像边缘检测和椭圆拟合得到的。

对横切声学图像进行 Canny 算子边缘检测,消除散射噪声。为提高效率与一致性,采用自适应阈值分割提取管道轮廓拟合椭圆参数。拟合时,基于最小二乘法拟合截面轮廓,求解椭圆方程参数,自动化脚本可输出椭圆度值及长短轴参数。

$$\frac{(x \cos \theta + y \sin \theta - h)^2}{a^2} + \frac{(-x \sin \theta + y \cos \theta - k)^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

其中, (h, k) 为椭圆中心, θ 为旋转角, a 和 b 为长短半轴。

判定方法视具体工况要求决定。本研究的安全阈值($D_{\text{max}}/D_{\text{min}} \leq 1.15$),符合《预制混凝土管段标准规范: ASTM C1577》混凝土变形限值;失效预警($D_{\text{max}}/D_{\text{min}} > 1.25$),则预警混凝土开裂^[16]。

1.1.3 倾斜角 倾斜角 θ 表征管道整体或局部区段的倾斜程度,主要由地基不均匀沉降或外部荷载(如船舶撞击、海流侧向冲刷)引起。定义管道轴线与水平面的夹角:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta H}{L}\right) \quad (5)$$

其中, ΔH 为管道两端的高程差,通过 SBP 声学剖面提取顶板反射层高程后计算获得, m ; L 为测段长度,即管道倾斜区段的水平投影距离, m 。

倾斜角检测流程包括以下步骤:沿管道轴线布设纵切测线,采用 10 kHz 中心频率,垂向分辨率 0.15 m,同步记录定位数据(平面精度 ± 0.1 m);对声学剖面进行时深转换与地形校正,提取管道顶板反射层高程序列;将管道划分为若干测段(每段长度 10~20 m),分别计算各测段两端的高程差 ΔH 及水平距离 L ,代入式(5)求解 θ 值;利用运动传感器数据修正船体横摇、纵倾引起的测量误差,确保角度计算精度。

判定方法视具体工况要求决定。本研究中安全范围($\theta \leq 5^\circ$),倾斜程度可控,无需立即干预;中度风险($5^\circ < \theta \leq 10^\circ$),需加强监测并评估地基加固需求;高风险($\theta > 10^\circ$),需立即进行纠偏或结构补强。

1.2 纵切方向扫描方案与数据处理 对海底混凝土管道的纵切面进行纵向检测,通过采集并分析各个声学层特性、声波速度以及管周围土体性质反演值,根据纵向高程差、轴线偏转角度、接口错动量指标,建立起纵切检测指标体系,并作为管道变形、倾斜、错位的诊断依据。

1.2.1 纵向高程偏差 管道顶板或底板实际高程与其设计标高的差异即为纵向高程偏差,体现了局部地

基沉降或隆起对结构线形产生的影响。其计算公式为

$$\Delta y = y_{\text{实际}} - y_{\text{设计}} \quad (6)$$

其中, $y_{\text{实际}}$ 通过声波双程走时 t 与声速 v 计算获得:

$$y_{\text{实际}} = \frac{v \cdot t}{2} + \Delta y_{\text{潮位校正}} \quad (7)$$

其中, 潮位校正值由实时水位监测数据与定位高程融合得到。

实际部署时, 沿管道轴线布设纵切测线, 采用 10 kHz 中心频率, 垂向分辨率 0.15 m, 同步记录定位数据 ± 0.1 m。对声学剖面进行时深转换与地形校正, 提取顶板反射层, 利用三次多项式拟合设计轴线, 计算各测点 ΔZ 值, 生成高程偏差分布曲线。

判定方法视具体工况要求决定。本研究中, 安全范围 ($|\Delta y| \leq 0.3$ m), 满足文献 [16] 中的要求; 高风险阈值 ($\Delta y > 0.5$ m), 接缝渗漏风险显著增加。

1.2.2 接缝错位量 接缝错位量指管道预制节段间横向或纵向错动距离, 错位超限可能导致止水带失效与渗漏通道形成, 其计算公式为

$$\delta = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (8)$$

其中, Δx 和 Δy 分别为接缝处水平和垂直错动量。

实际部署时, 首先在纵切剖面接缝表现为反射界面中断或偏移, 测量错位量 δ , 然后采用多源验证方法, 结合侧扫声呐图像分析错位方向, 排除表面附着物干扰。

判定方法视具体工况要求决定。本研究中, 允许值 ($\delta \leq 30$ mm), 满足《预制混凝土管道规范: ASTM C147》接缝密封性要求; 失效预警 ($\delta > 50$ mm), 需紧急维修。

1.2.3 管道外部环境 外部环境异常指海底管道周边存在的非设计性障碍物、凹坑、凸起等地质或人工干扰体, 可能引发管道应力集中、地基失稳或机械损伤, 包括多种类型: (1) 障碍物, 如沉船残骸、石块、废弃锚链等硬质物体, 可能直接撞击或压迫管道; (2) 凹坑, 海底沉积物局部冲刷或塌陷形成的凹陷区域, 导致管道支撑力分布不均; (3) 凸起, 地质活动或人工抛填形成的隆起地形, 可能造成管道悬空或局部弯矩超限。

实际部署时, 在管道轴线上按纵向布置纵测线 (间距 2 ~ 5 m), 使用 12 kHz 声波脉冲 (垂向分辨率为 3.3 cm) 记录反射信号强度和界面形态。凹坑表现为反射层连续中断, 凸起表现为异常高的反射界面。障碍物大多伴有绕射双曲线。用侧扫声呐 (频率 500 kHz, 分辨率 0.1 m) 获得海底表面高分辨率影像, 辨识出障碍物轮廓和凹坑边界, 并可将海草、泥沙等覆盖影响去除。在 SBP 深度数据的基础上叠加侧扫声呐平面图像, 建立三维异常体, 测量凹坑深度、凸起高度、障碍物体积等, 定位 (± 0.02 m) 标出异常的位置, 并将其绘成空间分布图。

本研究中, 低风险标记: 凹坑深度 ≤ 0.5 m, 且未穿透管道埋深安全层 (设计埋深的 80%); 凸起高度 ≤ 1 m, 管道底部与凸起间距 ≥ 2 m; 障碍物体积 ≤ 1 m³, 距离管道侧壁 ≥ 3 m。高风险标记: 凹坑深度 > 1 m, 或穿透安全层导致管道局部悬空; 凸起高度 > 2 m, 或直接接触管道底部; 障碍物体积 > 5 m³, 或侵入管道安全距离。

2 试验设计

本研究以某近海电厂引水管道为研究对象, 发电机组采用海水直流循环冷却系统, 通过采用圆形取水头+引水管道的方式从海中取水, 在使用中出现取水流量明显降低的情况, 需要对引水管道进行全面检测, 探测涵道位置如图 1 所示。

主要仪器采用参量阵浅地层剖面仪 (Innomar SES2000), 主频 100 kHz, 脉冲长度 0.1 ms, 电脉冲功率 18 kW, 垂向分辨率达 0.05 m, 最大穿透深度 50 m (软泥地层)。辅助设备采用高精度北斗定位系统 (水平定位误差 ± 0.02 m)、运动传感器 (姿态补偿精度 $\pm 0.01^\circ$)、侧扫声呐及声速剖面仪 (实时校正声速偏差)。

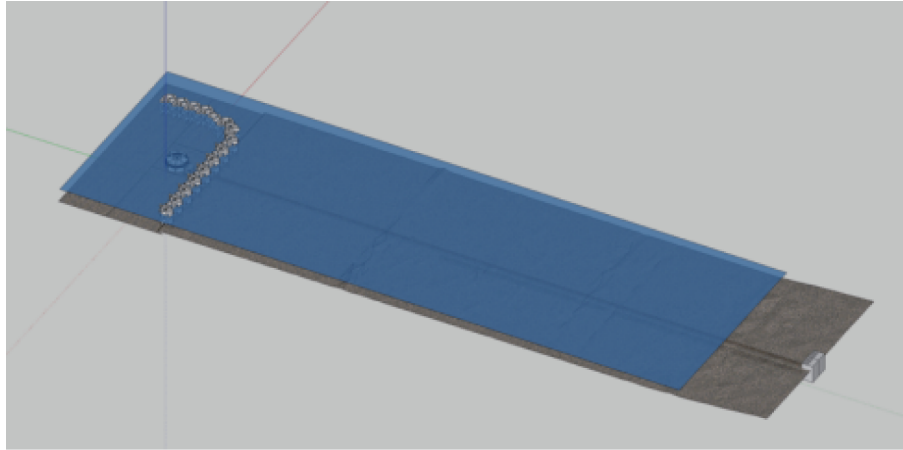


图1 取水管道和回水管道探测三维示意图

横切剖面扫描测线按垂直管道轴线方向布设,以管道设计中心线为基准,布设与管道轴线平行的测线,覆盖管道两侧各 20 m 范围内的测线,利用横切剖面扫描开展管道埋深以及走向检测;数据采集船速为 2~3 kn、采样率设定为 48 kHz,保证横向分辨率不大于 0.5 m,在实施过程中注重收集管道两侧各个方向上的管道截面形态(如管道的左右横向错位、埋深突变点和两侧的地层反射界面等)的信息。

纵切剖面扫描时,按照沿着管道轴线方向连续布置,扫描线延伸至起点、终点两侧各 20 m。每个断面内采集数据连续不间断,在数据采集过程中船速 ≤ 4 kn,并且在 ≤ 100 m 范围外设置校验点,同时利用声学信标对采集数据与管道实际坐标进行比对,以保证管道的实际位置。其具体测线布置及测量方式如图 2 所示。

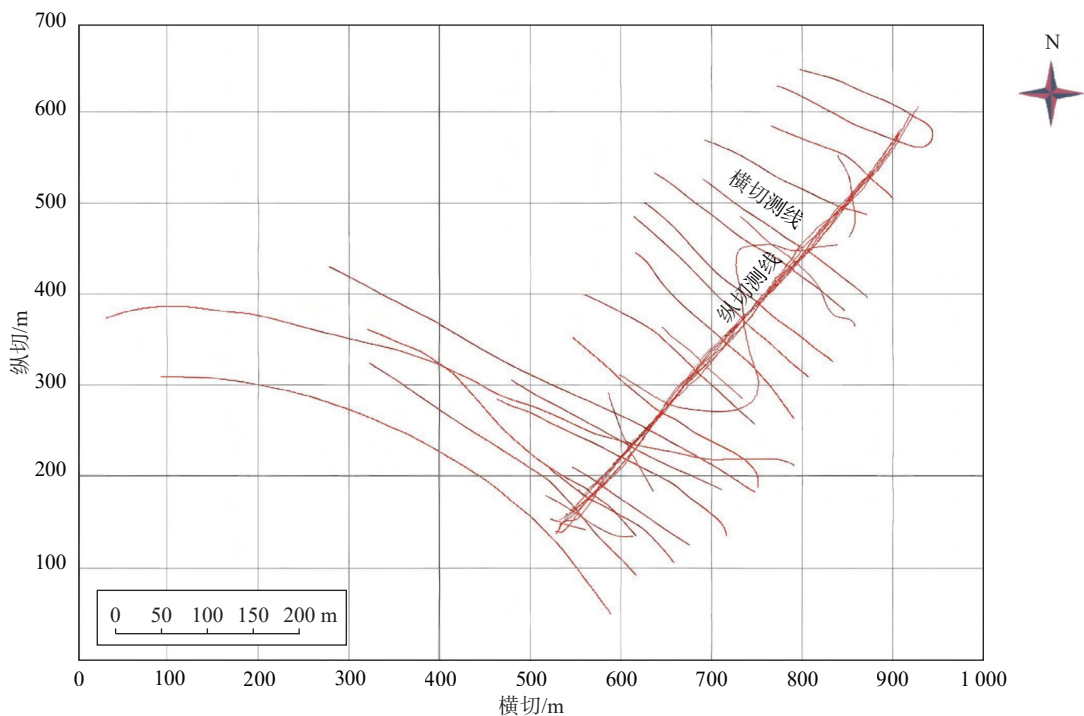


图2 管道横切、纵切测线

在复杂地质区域(如已知断层带、强冲刷区)或实时监测到反射信号强度异常波动(超过设定阈值)时,进行加密扫描,动态缩小测线间距,以避免遗漏细节形变。

3 试验结果分析

横切分析通过声学数据来获得管道沿径向的特征参数。采用浅地层剖面仪在管道区域布设多条横

向剖面, 声波信号以脉冲形式发射, 记录反射强度及回波时间。剖面布设的间距根据管道的直径和埋深进行调整, 控制在 5 ~ 10 m 范围内, 以保证分辨率。对横切采集的数据进行处理, 数据处理包括以下几个步骤: (1) 数据格式统一化, 将多源声学数据、北斗/DGPS 定位数据、姿态传感器数据统一转换为标准 HDF5 格式存储, 按通道分层管理, 确保数据时空同步性与后续处理便利性; (2) 信号增强, 通过频率滤波去除低频噪声, 增强有效信号的清晰度; (3) 时间校正, 根据声波传播速度和回波时间, 计算反射信号的深度信息; (4) 图像生成, 将处理完成的数据绘制成地质剖面图。横切面的结果反映该处管道的埋深、管径以及周围的沉积特征, 如图 3 所示。

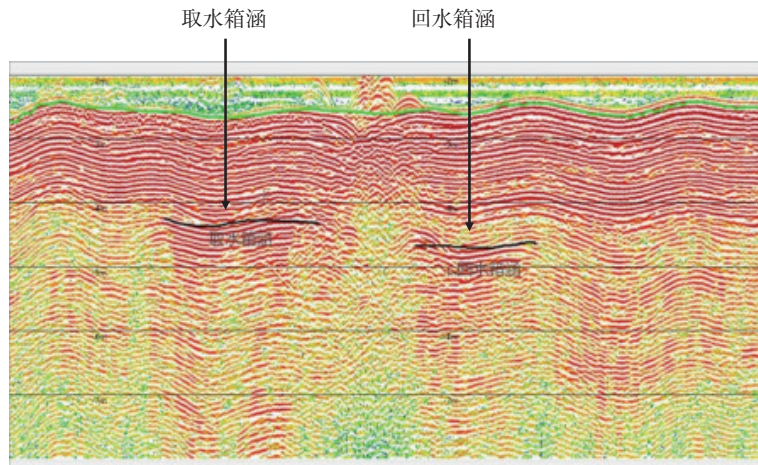


图 3 管道横切检测图像

纵切分析获得管道沿轴线方向的结构特性, 根据管道材料及连接处的声学性质不同来进行的, 当声波通过管道连接处时, 因为突变或者有材料差异, 将产生不同于正常连接处的反射信号, 可以用来判断连接处是否具有良好的稳定性。通过沿管道走向布设纵向剖面, 声波脉冲垂直作用于管道轴线。为提高数据采集精度, 在连接处区域增加采样密度, 间距控制在 2 ~ 5 m。对纵切采集的数据进行处理, 数据处理包括以下步骤: (1) 噪声消除, 采用自适应滤波技术去除动态噪声; (2) 异常检测, 通过对比不同连接处的反射信号特征, 识别位移、变形或界面松动等异常现象; (3) 多次叠加, 将多次采样数据进行叠加处理, 以提高信号的信噪比。纵切分析可以清楚地看出管节的接口的外形以及跟周围地层间的耦合作用。水下取水涵道纵切浅地层剖面如图 4 所示, 实际的海底平整, 上下起伏由海况造成。

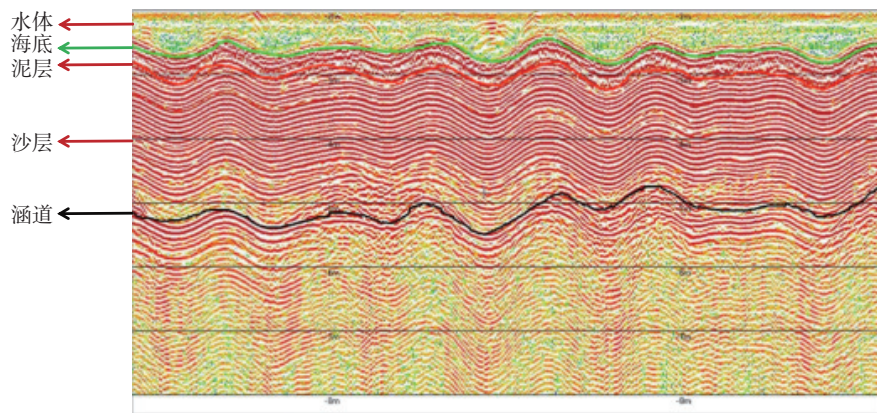


图 4 管道纵切检测图像

通过对各幅图像数据进行拼接融合, 可以显示出横切面、纵切面的地质图像及管道所经过的路段情况。从历史资料结合当地的地质特点, 本研究浅层剖探共查出 5 个隐患点, 如表 1 所示。

1 号点位置回水涵道横切面发现管道顶部特征与水平面夹角较大, 东南侧较西北侧高差约 0.3 m, 夹角约 15°, 检测图像如图 5 所示, 判断此处管道存在倾斜。

表 1 隐患点位测试数据

点位	故障项目	计算参数
1	管道倾斜	$\theta \approx 15^\circ, \Delta S \approx 0.3 \text{ m}$
2	管道上方存在凹坑	长约6 m, 宽约13 m, 落差超过1 m
3	管道上方存在障碍物	埋深约0.8 m
4	管道上方存在凸起	长约30 m, 凸起高度超过2 m
5	管道上方存在凹坑	长约12 m, 落差超过1 m

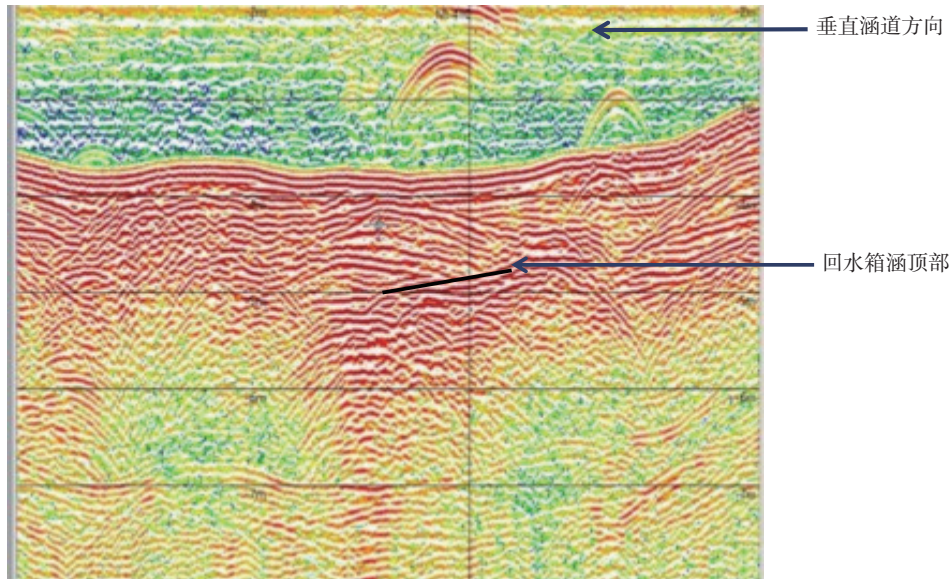


图 5 1号点位检测图像

2号点位置存在凹坑, 该凹坑横跨2个涵道, 垂直涵道方向长度约6 m, 宽度约13 m, 较平坦海底上落差超过1 m, 检测图像如图6所示。

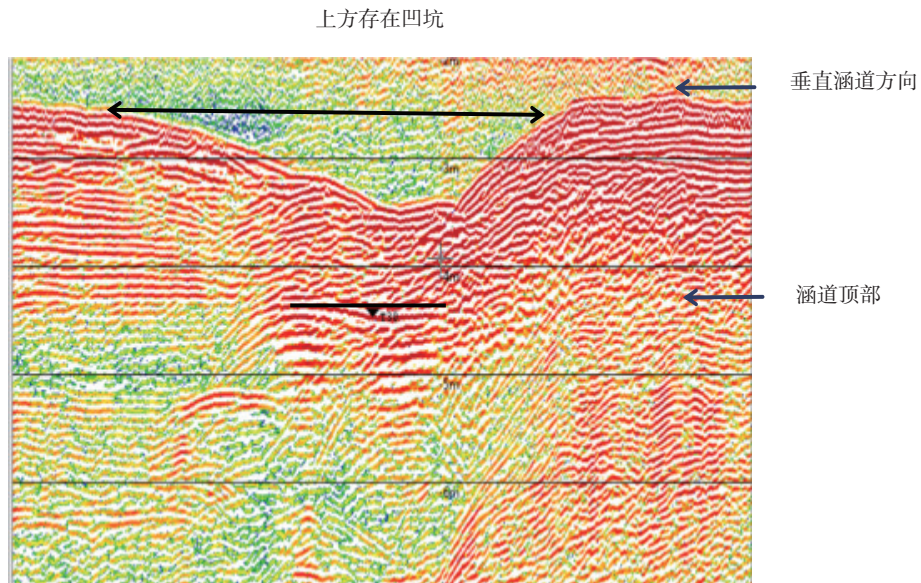


图 6 2号点位检测图像

3号点位置在取水涵道上方发现疑似埋藏障碍物, 埋深约0.8 m。此处反射信号强度高, 有绕射双曲线形成, 表明该疑似埋藏障碍物密度较大, 硬度较高, 推测可能为石块, 金属残骸等, 检测图像如图7所示。

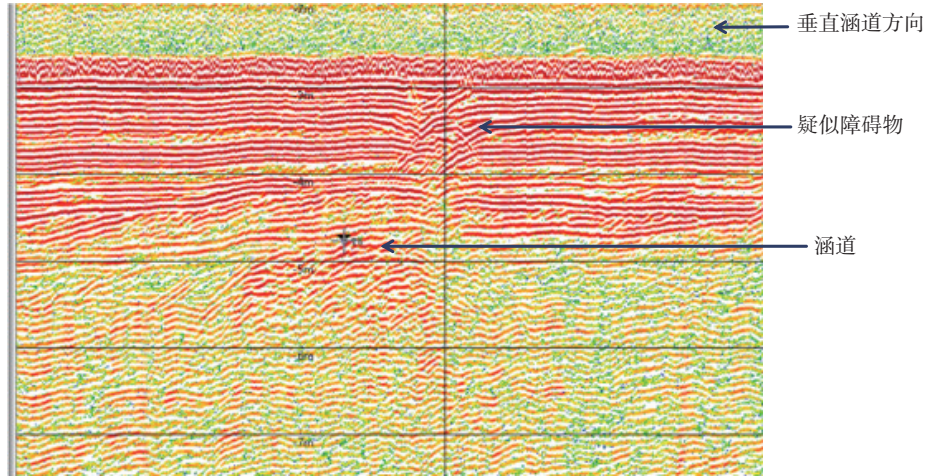


图7 3号点位检测图像

4号点位置存在地形凸起,该凸起横跨2个涵道,沿涵道方向长度约30 m,凸起高度超过2 m,最浅点水深不足1 m(理论最低潮面),检测图像如图8所示。

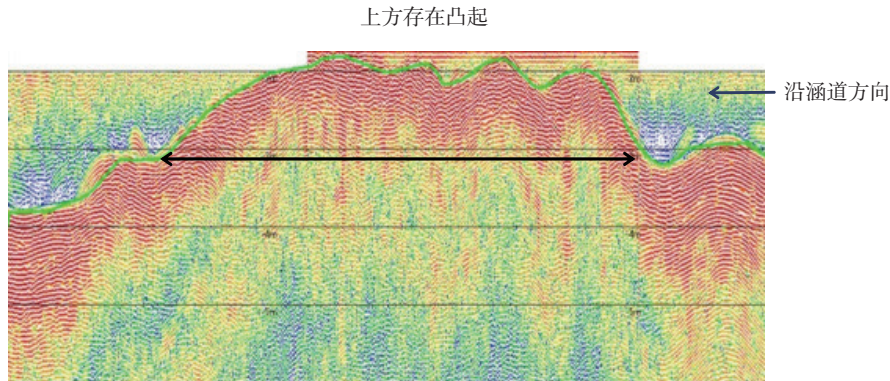


图8 4号点位检测图像

5号点位置存在凹坑,该凹坑横跨2个涵道,沿涵道方向长度约12 m,较平坦海底上落差超过1 m,检测图像如图9所示。

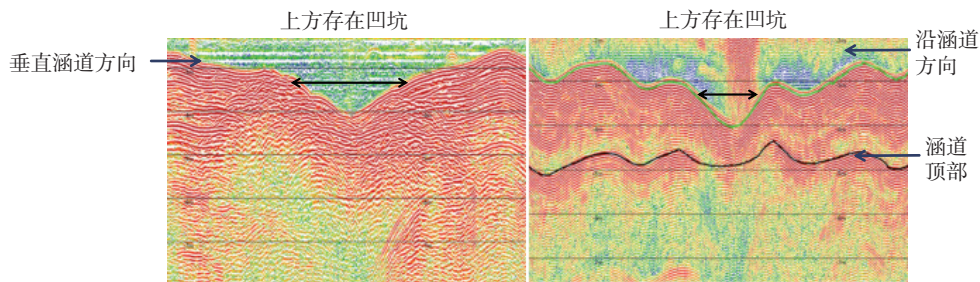


图9 5号点位检测图像

4 结论

本研究提出了横切与纵切相结合的联合分析方法可实现海底管道稳定性诊断,并运用数据拼合、综合分析方法提高诊断精度,为后期工程维护提供参考依据。采用本研究的方法实现了某真实海底管道的稳定性诊断,准确辨识出管道的位置及埋深,同时了解周边沉积物的分布情况,在该断面上发现管道典型的异常区域,如偏斜、局部凸起和凹坑等,分析发现连接处的形态特征及其与地质的耦合的特征描述。为提高监测实时性,可集成关键参数(倾斜角、椭圆度、沉降差、错位量、环境异常指标)的判定逻辑,支持作

业人员现场输入测量值快速获取风险等级参数,结合实时监测技术,为海底管道在使用期间的状态评价提供依据。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. World energy outlook 2022[R]. Paris: OECD/IEA, 2022.
- [2] LI X H, CHEN G M, ZHU H W, et al. Quantitative risk assessment of submarine pipeline instability[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 45: 108–115.
- [3] 于子健. 海洋石油在役海底管道安全事故分析及对策研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(10): 315–317.
YU Z J. Safety accident analysis and countermeasures study of submarine pipeline during operation period[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2024, 31(10): 315–317.
- [4] WANG L, ZHANG Y, LIU Q, et al. High-precision positioning of submarine pipeline fractures using sub-bottom profiler[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 152: 103527.
- [5] DYBEDAL J, BOE R. Ultra high resolution sub-bottom profiling for detection of thin layers and objects[C]//Proceedings of OCEANS'94. Brest: IEEE, 1994: I/634–I/638.
- [6] 王继立, 黄潘阳, 胡涛骏, 等. 浅地层剖面仪在海底管道检测中的应用 [J]. 船海工程, 2013, 42(3): 161–163.
WANG J L, HUANG P Y, HU T J, et al. Application of sub-bottom profiler in submarine pipeline inspection[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2013, 42(3): 161–163.
- [7] 祁晓雨. 小道距高分辨率多道地震系统在渤海海峡地层探测中的应用 [J]. 海洋科学进展, 2024, 42(4): 807–815.
QI X Y. The application of high resolution multichannel seismic system with small group interval to stratigraphic exploration in Bohai Strait[J]. *Advances in Marine Science*, 2024, 42(4): 807–815
- [8] 孟垂乾, 王乐, 张春会, 等. 基于水-土-管耦合分析平台的海底管道在位稳定性研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47(3): 618–626.
MENG C Q, WANG L, ZHANG C H, et al. In-place stability of submarine pipelines based on water-soil-pipeline coupling analysis platform[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(3): 618–626.
- [9] 甘永波, 李亚军, 李瑞杰, 等. 考虑土体强度参数随机场的横向加载管-土相互作用分析 [J]. 水利水运工程学报, 2024(2): 143–153.
GAN Y B, LI Y J, LI R J, et al. Analysis of pipe-soil interaction under lateral loads using random fields of soil strength parameters[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2024(2): 143–153.
- [10] 熊春宝, 李志, 孙轩, 等. 基于 3D 建模的海底管道在位稳定分析 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 2): 53–56.
XIONG C B, LI Z, SUN X, et al. Stability analysis of submarine pipelines based on 3D model reconstruction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(S2): 53–56.
- [11] YEGIREDDI S, THOMAS N. Segmentation and classification of shallow subbottom acoustic data, using image processing and neural networks[J]. *Marine Geophysical Research*, 2014, 35(2): 149–156.
- [12] 中华人民共和国自然资源部. 海洋地球物理资料整编技术规范: HY/T 0413—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Technical specification for compilation of marine geophysical data: HY/T 0413—2024[S]. Beijing: China Standards Press, 2024.
- [13] 董玉娟, 周浩杰, 王正虎. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在海底管线检测中的应用 [J]. 水道港口, 2015, 36(5): 450–455.
DONG Y J, ZHOU H J, WANG Z H. Application of side scan sonar and sub-bottom profiler in checking of submarine pipeline[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2015, 36(5): 450–455.
- [14] 张基茨. 浅地层剖面仪在深海搜寻中的应用 [J]. 珠江水运, 2021(18): 100–101.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard for durability design of port and waterway engineering structure: JTS 153—2015[S]. Beijing: People's Communications Publishing House, 2015.
- [16] ASTM International. Standard specification for precast reinforced concrete monolithic box sections for culverts, storm drains, and sewers designed according to AASHTO LRFD: ASTM C1577—19[S]. West Conshohocken: ASTM, 2019.

作者贡献声明

本声明旨在明确各作者对本论文的具体贡献,确保学术成果署名的规范性和公平性,各作者贡献如下:莫子孟明确了核心研究问题,构思整体实验方案,确立理论框架,并参与研究结论的分析与解读;任常斌负责数据的采集与整理,完成数据的统计分析与结果可视化,并对研究结论进行阐释;罗海负责论文初稿的撰写,完成内容的修订与语言润饰,并参与了数据分析及细节完善工作;周世凯负责开展现场实验和设备操作,参与数据整理与结果解读,并对论文进行了修改完善;刘晓晓在研究过程中提供学术指导,把握整体研究方向,并对方案设计与结论分析提出关键指导意见。

利益冲突声明

作者声明,其不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

不适用:本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 <https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025070802>。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到以下基金项目支持:国家重点研发计划项目(2024YFC2814904)和海南省深海技术产业化专项(DSTIC-CYCJ-2024002)。

This work was supported by the following funding projects:National Key R&D Program of China (2024YFC2814904);Hainan Provincial Deep-Sea Technology Industrialization Special Program (DSTIC-CYCJ-2024002).

作者简介

莫子孟(1989—),男,海南定安人,工程师,研究方向:机械工程装备运维调试工作, E-mail: 573988750@qq.com

刘晓晓(1987—),女,山西大同人,硕士研究生,工程师,研究方向:海洋工程与装备、海洋信息与装备的研究与实验, E-mail: xxliu616@zju.edu.cn

(责任编辑:高 喆,英文校对:吴 慰)



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© The Author(s) 2025. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.