

海底管道铺设的动态质量监控技术及应用效果分析

李振超（中海油能源发展股份有限公司清洁能源分公司，天津 300456）

摘要：本文结合某海底管道铺设项目实际情况，对动态质量监控技术在其中的实践应用及其效果进行分析。根据该项目实际情况，分析动态质量监控技术在海管铺设船动态定位和铺设姿态监控、管道焊接、张力和变形监控、铺设位置与埋深监控、海管泄漏情况监控等方面的应用。经实践应用可知，通过动态质量监控技术的合理应用，该项目的海底管道铺设施工质量、安全、工期和成本均得到了有效控制，具有较好的应用效果。

关键词：海底管道；铺设施工质量；动态化监控技术

中图分类号：TE973

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)030-0115-03

Dynamic Quality Monitoring Technology and Application Effect Analysis for Submarine Pipeline Laying

Li Zhenchao(CNOOC Energy Development Co., Ltd. Clean Energy Branch., tianjin 300456, China)

Abstract: This article analyzes the practical application and effectiveness of dynamic quality monitoring technology in a submarine pipeline laying project based on its actual situation. Based on the actual situation of the project, analyze the practical application of dynamic quality monitoring technology in the dynamic positioning and laying posture monitoring of subsea pipeline laying ships, pipeline welding, tension and deformation monitoring, laying position and burial depth monitoring, and subsea pipeline leakage monitoring. Through practical application, it is known that the reasonable application of dynamic quality monitoring technology has effectively controlled the construction quality, safety, schedule, and cost of the submarine pipeline laying in this project, and has good application effects.

Keywords: submarine pipeline; Construction quality of laying; Dynamic monitoring technology

在海底管道铺设施工中，考虑到施工环境条件比较复杂，施工流程比较繁琐，施工周期长，各环节质量对整个项目质量至关重要，因此需对其施工质量展开动态化监控。为达到这一目标，工程单位应合理引入当前先进的动态化质量监控技术，结合具体质量控制目标和现场实际情况等，采取合理的措施对海底管道铺设施工质量实施动态化监控。以便及时发现和解决各类缺陷，确保整体铺设施工质量。

1 项目概况

此次研究的是某海底管道铺设施工项目。该项目海底管道总长度是48km，管道直径是800mm，输送压力设计值是10MPa，管道起点是一个天然气处理平台，终点是陆上天然气接收站。根据该项目海底管道铺设工程设计要求，将使用DP3(动力定位系统级别)铺管船采用S型铺设法进行海管铺设。考虑到施工区域内的海底地形条件比较复杂，存在很多珊瑚礁、沙丘和海沟等，季风影响明显，且6-10月份频繁活动的台风也会使施工面临更大难度。为确保该项目海底管道铺设施工质量，工程单位采用动态化监测技术对其质量展开跟踪监测。本文主要对该海底管道铺设动态质量监测技术的实践应用及其效果进行分析。

2 动态质量监控技术实践应用

2.1 管道铺设船动态定位和姿态监控

在该项目施工区域复杂的海底地质条件下，为确

保铺管船作业稳定性，工程单位通过多协同动态定位以及姿态监控法，对其实施动态监控。首先是动态定位，铺管船将搭载4台全回转推进器和2台艏侧，与2套长基线水声定位系统和3套高精度GPS定位系统配合使用，从而建立了一个立体化定位网络^[1]。借助动态定位系统，对船体传感器、声呐和卫星等信号进行实时接收，将定位数据更新频率设置在10次/秒。其次是姿态监控。将3个光纤陀螺仪和6个三轴加速传感器合理布设在铺管船的首部、尾部和铺管作业区域船体上，对船体施工中的横摇、纵摇以及垂荡角度进行实时监测，将数据采集频率设计为100Hz。同时在姿态监控系统中合理设置预警和停机机制，在船体横摇角度超出±5°、纵摇角度超出±3°的情况下，系统会将相应的预警信号自动发出；在船体横摇角度超出±8°、纵摇角度超出±5°的情况下，系统停机保护机制将自动触发。借助三维可视化平台，可将船体的具体位置、航速、航向和姿态等参数实时显示出来，且能够和气象雷达系统之间保持联动，从而对船体12h之后所受的风浪影响做出准确预测。施工过程中，借助PID算法，可对推进器输出功率做出自适应调节，使3级海况条件下的铺管船定位偏差不超过±1%。为确保台风季节中的施工效果，工程单位还开发了一个台风规避与回位功能模块，规避台风时，该模块会在撤离之前精准记录铺管船所处位置，台风过

表 1- 该项目海底管道焊接过程动态监测中的基本工艺参数控制情况

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	温度测温范围	0-1500°C	5	焊接速度	30-50cm/min
2	温度场温控精度	±5°C	6	保护气体流量	20-25L/min
3	焊接电流	180-220A	7	参数允许偏差	±5%
4	焊接电压	22-28V			

表 2- 该项目海底管道张力和变形动态监控中的相关参数设置与控制标准

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	张力控制范围	30%-70% 屈服强度	4	管道椭圆度	≤ 3%
2	张力超标预警值	65% 屈服强度	5	应变片设置间距	100m
3	自动降速张力值	70% 屈服强度	6	管道弯曲限值	≤ 2%

后按记录位置自动控制铺管船返回原来的作业点，以保障其定位精度和效率。

2.2 海底管道焊接过程动态监控

为有效确保该项目海底管道焊接施工质量，工程单位采用打底焊与药芯焊丝盖面填充的方式进行焊接，将 6 台温度传感器设备设置在每一道焊口位置，对焊接区域内的温度场分布情况进行实时监测，同时建立了一个三级动态监控体系。第一是焊缝参数实时监控，构建一个焊接参数采集系统，对焊接过程中的电流、电压、速度和保护气体流量等重要参数进行实时采集，借助工业以太网，将采集到的焊接参数实时同步到系统中控室。系统会根据预先设定的工艺参数以及允许误差等，对焊接施工参数进行实时分析，如发现参数超出允许范围，系统会立刻通过声光的形式发出报警，并对异常时段及其数据做好记录^[2]。同时借助高清工业摄像机实时拍摄焊接过程中的电弧状态，利用机器视觉算法，对电弧是否稳定进行实时、准确识别。并合理设置焊接自动暂停控制模式，在识别到电弧连续三次出现偏吹情况时，焊接施工会自动暂停，经检查校正异常后，方可继续焊接。在完成焊接 10min 之内，激光传感器会自动完成焊缝宽度、余高和错边等外观参数采集，并实时上传到三维扫描系统，由系统自动对其和标准值进行对比，自动做好不合格焊缝标记，并及时向质检终端推送，以供后续焊缝缺陷处理参考。表 1 为该项目海底管道焊接过程动态监测中的基本工艺参数控制情况。

2.3 海底管道张力和变形的动态监控

为避免管道因过度屈曲或拉伸而受损，该项目施

工中，工程单位通过双闭环张力监控系统，对管道铺设张力与变形情况实施动态监控。将高精度拉力传感器设备配置到主张力设备上，对管道所受轴向张力进行实时监测，根据预设的张力控制范围，分析管道张力情况，并通过张力过大报警和铺设速度自动降低机制的合理设置，对管道施工张力实施自动化控制。将 2 套高精度激光测深仪设置在管道进入海水的关键部位，对其外径变化情况展开实时监测，根据预设的椭圆度标准，判断其是否严重变形。同时将应变片合理布设在管段范围内，借助水下输出传输模块，将监测到的应变数据实时传递到船上设置的监控系统，由该系统对管道轴向应变及其弯曲应变做出实时计算，并根据预设的应变控制标准，对管道铺设角度做出自动化调整^[3]。表 2 为该项目海底管道张力和变形动态监控中的相关参数设置与控制标准。

2.4 海底管道铺设位置和埋深的动态监控

为确保海底管道铺设的路由准确性，使其位置符合工程设计要求，工程单位通过多技术融合的方式，对其铺设位置实施动态监控。将射频识别标签安装在每节管道上，记录管道编号及其坐标等信息，为其安装时的精准定位提供参考。将多波束探深仪用作水下探测设备，全面扫描管道施工区域，通过监测软件生成相应的施工地形数字化三维模型，对海管铺设路状态进行实时监控。在海管后挖沟工程船上搭载浅地层剖面仪和侧扫声呐装置，对管道埋深进行实时监测^[4]。如果海底管道铺设 S 型过大或过小，可以调整铺管船速度和海管铺设进行调节；施工中还可监测到海管埋深过大或过小的情况下，监测装置会及时发出相应的

预警，可以及时通过调整海管挖沟船速度和挖沟机功率进行调节，从而确保海管铺设路由与挖沟深度符合工程设计要求。

2.5 海底管道泄漏情况的动态监控

在海底管道铺设施工质量验收阶段中，管道泄漏监控是一项关键内容。验收时，为实现管道早期泄漏问题的及时发现和处理，以免影响整体管线正常投产。此次项目中，工程单位通过多种在线监测法，构建了一个立体化动态监控网络。首先将高精度压力变送器以及流量计量设备安装在管道两侧，对其内部压力与流量进行实时监测，将数据采集时间间隔控制在1min，通过物联网将监测数据实时传递到监测系统。由系统对实测结果和规定限值进行对比分析，并通过压力梯度分析法，分析其压力变化程度，一旦发现管道压力在1h之内降低0.5MPa以上，且流量呈现出异常变化趋势，系统会自动发出泄漏预警，以便工作人员立即处理^[5]。同时将15套水下声学传感器设置在关键管段，组成一个监测阵列，对泄漏产生的声波信号进行监测和识别，通过光纤将其实时传输到监控系统，由系统用小波变换算法实施降噪处理，以实现管道泄漏的准确识别，并对泄漏位置及其严重程度等做出精准确定。

3 动态质量监控技术应用效果

3.1 质量控制效果

通过动态质量监测技术的合理应用，该项目海底管道铺设施工质量得到了有效控制。经完工后的第三方质量检测可知，海底管道焊接质量一次合格率高达99.7%，只有极少数焊口存在较轻的质量缺陷，按规程处理后全部合格；所有管道在施工过程中的受力都非常安全，并未出现严重变形情况，海管椭圆度、铺设路由位置偏差、海管埋深等均符合工程设计标准，且投产不存在泄漏问题。由此可见，该项目海底管道整体铺设施工质量得到了良好控制。

3.2 安全保障效果

在该项目中，通过动态质量监控技术的合理应用，全方位确保了海底管道铺设施工的安全性。施工中，铺管船动态定位系统在台风来临前后精准执行了规避撤离以及回位任务，为船体、施工设备和施工人员提供了良好的安全保障，施工期间未因台风而出现设备损坏或人员伤亡事故。通过焊接过程中的温度与电弧稳定性实时监控，及时发现和消除了火灾隐患，使焊接施工现场实现了零火灾安全防控。通过管道张力和变形情况的动态监控，有效避免了管道屈曲风险，为海底管道结构的安全性提供了良好保障。通过泄漏情况的动态监控，使管道泄漏处理的响应时间从原来的

24h缩短到2h及以内，确保了管道泄漏问题的应急处置效果，为管道安全运营提供了有力支持。

3.3 工期与成本节约效果

在该项目海底管道铺设施工中，动态质量监控技术的合理应用，也使其工期和成本得到了有效节约。就工期节约情况来看，通过焊接质量的动态化跟踪监控，使其施工质量显著提升，从而使每个施工段管道的焊接工期较传统模式下的施工工期明显缩短，整体工期更是实现了显著节约。且在铺管船动态定位系统支持下，铺管船可在台风过后立即精准就位，从而将停工待机时间比原计划降低20%。就成本节约情况来看，在动态质量监控技术支持下，该项目的施工成本主要在以下三方面得到了显著节约：第一，通过焊接质量动态监控，该项目的焊口返修率降低，施工成本显著节约；第二，通过管道张力的动态监控，该项目管道屈曲风险显著降低，从而降低施工成本；第三，通过管道位置和埋深的动态化监控，该项目水下开挖和管道埋设土方量及其施工成本都得到了显著节约。除此之外，通过管道泄漏情况的动态监控，不仅有效确保了该项目海底管道验收阶段的密封效果，也为后续运营中的管道泄漏及其修复工作提供重要监测和预警手段，从而可显著降低因天然气泄漏所导致的直接和间接成本。

4 结束语

综上所述，动态质量监控技术是该项目海底管道铺设施工中的关键支持技术。通过该技术的合理应用，使该项目中的管道施工质量、安全性和经济性都得到了良好控制。由此可见，动态质量监控技术在海底管道铺设施工中的应用效果非常显著。因此在后续同类工程施工中，工程单位可结合实际情况和管理要求等，合理引入并应用动态质量监控技术，以实现整体施工质量的有效监控。

参考文献：

- [1] 高原. 中深水海底管道自动化铺设施工技术探讨 [J]. 石油化工建设, 2024(11):144-146.
- [2] 刘娇男, 熊爱成. 实时3D声呐系统在海缆维护治理施工中的应用 [J]. 吉林水利, 2025(1):62-66.
- [3] 赵宁, 程志友, 朱西河, 等. SINS/DVL组合导航在海底挖沟机施工中的应用探索 [J]. 广州航海学院学报, 2023(1):24-28.
- [4] 吴业卫. 浅水海域内防腐管道铺设屈曲监测方法研究 [J]. 石化技术, 2022(2):107-108.
- [5] 李晓秋, 刘怀增, 李胜军, 等. 海底管道第三方破坏事故树分析与监测预警方法研究 [J]. 云南化工, 2021(5):101-103.