

海底光缆修复高精度定位与测量控制技术研究

孙威

中国海底电缆建设有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2453

[摘要] 本文以亚太直达海底光缆系统(APG)S3段故障应急修复工程为研究对象,故障点位于东海大陆架95米水深海域,受浑浊水体、渔业活动干扰大,通信容量骤降30%。作为现场负责人,作者创新提出光电融合立体定位技术,集成岸基OTDR初步圈定、水下声学空爆信号捕捉与船载USBL动态纠偏,将故障点平面定位精度控制在 ± 3 米内。项目构建水下立体测量与ROV精细化作业体系,实现故障搜寻、打捞、熔接、埋设全流程高精度管控,并配套数字化智能安全管理。工程仅用9天完成修复,较行业平均工期缩短40%,通信链路全面恢复,为复杂浅海海缆应急抢修提供了可复制的技术范式。

[关键词] 海底光缆; 故障定位; 光电融合; 声学定位; 工程测量

中图分类号: P225.2 文献标识码: A

Research on high-precision positioning and measurement control technology for submarine cable repair

Wei Sun

China Submarine Cable Construction Co., Ltd

[Abstract] This article takes the emergency repair project of the S3 section of the Asia Pacific Direct Submarine Cable System (APG) as the research object. The fault point is located in the 95 meter deep sea area of the East China Sea continental shelf, which is greatly affected by turbid water and fishing activities, resulting in a 30% drop in communication capacity. As the on-site supervisor, the author innovatively proposed the optoelectronic fusion stereo positioning technology, integrating shore based OTDR preliminary delineation, underwater acoustic airburst signal capture, and ship borne USBL dynamic correction, to control the plane positioning accuracy of the fault point within ± 3 meters. The project aims to establish an underwater stereo measurement and ROV precision operation system, achieving high-precision control of the entire process of fault search, salvage, welding, and burial, and supporting digital intelligent safety management. The project was repaired in just 9 days, which is 40% shorter than the industry average construction period. The communication link was fully restored, providing a replicable technical paradigm for emergency repair of complex shallow sea cables.

[Key words] submarine fiber optic cable; Fault location; Optoelectronic fusion; Acoustic positioning; engineering survey

引言

2024年初,亚太直达海底光缆系统(APG)S3段在东海大陆架突发阻断,导致东亚至北美通信容量骤降30%,严重威胁跨境金融、云服务稳定。故障点地处95米水深浅海区,正值冬春渔业旺季,浑浊水体与密布渔网令传统“盲扫”定位陷入困境——公里级误差无异于大海捞针。作为项目现场负责人,笔者亟需突破复杂海况下的高精度定位与作业控制瓶颈。本文将系统阐述“光电融合立体定位”“ROV精细化操控”等核心技术,复盘9天高效完成应急修复的工程实践,为浅海复杂海域海缆抢修提供可复

制的技术范式。

1 项目背景

当前全球数字经济发展速度较快,国际海底光缆是跨境数据传输的核心基础设施,全球超过95%的国际语音、数据和互联网流量,都由这类设施承载。链接东亚与北美的重要信息通道时,有亚太直达海底光缆系统(APG),该系统的S3段横跨东海大陆架,是区域通信网络的骨干节点(图1)。

2024年一季度,亚太直达海底光缆(APG)S3段突发阻断,导致东亚至北美通信容量骤降30%,严重影响国际金融、跨境云服

务与企业专线运行。故障点位于东海大陆架中部,水深约95米,海域海况恶劣、洋流湍急、水体浑浊,且渔业活动频繁,海底渔网、锚链等障碍物多,搜寻与修复难度极大。我司接到任务后立即启动一级应急响应,本人作为项目负责人,需在极短时间内完成故障探测、定位、打捞、熔接及埋设全流程技术管控,攻克复杂环境下高精度定位与测量控制的核心难题。



图1 APG

2 项目核心挑战

综合研判历史数据与实际环境后,笔者将本项目需要应对的工程技术挑战整理为以下三个维度:

2.1 广域范围内的高精度故障点快速定位难题

海底区域辽阔,海缆故障点通常隐蔽性较强,以往用的“盲扫”方式效率偏低。当前使用的岸基OTDR(光时域反射仪)能将故障距离测算至公里级,但在平面位置上存在数公里的误差。95米水深的浑浊海域内,可见光无法穿透,声呐探测易受海底地形起伏、渔业设施干扰。要开展海缆快速修复,需在24小时内将故障点从数公里的误差范围缩小至数米级,这也是当前最大的技术障碍。

2.2 动态海况下的水下立体测量与水下作业控制

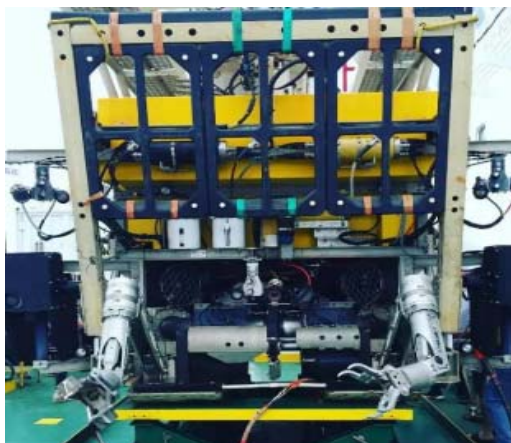


图2 ROV

即使确定了平面位置,海底光缆可能被厚厚的淤泥掩埋,或被渔网缠绕。ROV(水下机器人)在水下作业时(图W),受水流影响会产生漂移,其搭载的传感器数据存在累积误差。此外,海缆修

复要求在甲板上进行精密的光纤熔接,这需要船只在风浪中保持极高的动态定位精度(DP精度),任何微小的船体位移都可能导致ROV脐带缆缠绕或打捞失败。如何建立一套涵盖水面船舶、水下ROV及海底目标的立体测量控制网,确保“测得到、抓得准、接得上”,是本项目的第二大难点。

2.3 修复后海底地形复原与长期稳定性监测

海缆修复不仅仅是接上断点,还需确保修复后的光缆具备足够的机械强度和掩埋深度,以抵御未来的渔业活动威胁。在软质海床上,如何测量和控制海缆的埋设深度(设计要求 ≥ 1.5 米),以及如何评估高压喷水犁的作业效果,直接关系到修复后的长期可靠性。缺乏有效的海底微地形测量手段,将导致修复段再次成为脆弱点。

3 解决方案

为应对前述技术挑战,本文确定的总体技术路径涵盖了“光电融合立体定位、ROV精细操控、全过程质量计量”三部分,完成了高精度水下测量控制技术重点攻关。

3.1 技术路线筛选与“光电融合”定位模型构建

方案论证阶段,本文排除两类单一技术方案,一类只靠GPS水面定位,另一类单纯依赖侧扫声呐的方案。前者无法穿透水体,后者在复杂海底环境中误报率极高。基于对大地测量学与海洋物理学的交叉应用,我构建了“光电融合”的立体定位模型:

光纤时域反射(Optical Domain)的检测逻辑依托瑞利散射原理,先借助OTDR向光纤发射光脉冲(图3),再解析反射信号的回波时间差,算出故障点距离最近登陆站的具体距离,就能初步把故障范围圈定在5公里带状区域中。



图3 OTDR

水下声学定位(Acoustic Domain): 初步圈定的区域后,引入水下声学定位技术。本文选用自主研发的水下声学信标,搭配船载超短基线(USBL)系统。

3.2 关键测量技术的实施与验证

3.2.1 故障点精确定位实施

项目采用“光电融合立体定位”方案,先通过岸基OTDR设备圈定故障大致范围,再向故障纤芯施加高压脉冲,利用击穿点产

生的“空爆”特征声波信号,配合船载USBL系统实时接收解算。结合DGPS船位数据,采用数字带通滤波算法剔除渔船、海洋生物等环境噪声干扰,有效提升信号识别准确率。整套方案在24小时内完成精准定位,将故障点平面误差控制在±3米以内,高程误差控制在±0.5米,满足应急抢修高精度、快响应要求。

3.2.2 ROV精细化搜寻与高程控制

完成故障定位后,使用FCV-1000型ROV搭载高清成像声呐开展栅格化海底扫描,同步生成三维地形图,快速锁定光缆位置。通过声呐与机械臂配合,探明光缆被淤泥掩埋约1.2米,采用高压水枪清淤后确认故障原因为渔船拖锚损伤铠装层。作业中依托张力传感器实时监控光缆受力,通过。

3.2.3 甲板接续与链路损耗控制

缆绳拉上甲板后,我们在无尘棚里作业。用OTDR核完纤序,拿高精度熔接机搞定12芯光纤(图4),单芯损耗压到了0.05dB以内。为了避开伪增益的坑,我们做了双向OTDR测试取均值,保证链路衰减完全达标。



图4 光纤熔接

3.2.4 海底复原测量与埋设

修复后,我们调度ROV带喷水犁作业,稳住拖速,根据前视声呐随时调整犁头和埋深,确保最终深度过了1.5米的设计线。最后用多波束扫测了一遍,生成海底DEM模型复验,确认没露光缆。

3.3 智能化安全与进度管理系统

项目摒弃传统纸质记录,搭建基于多维时间轴的数字化孪生管理平台,实现OTDR、USBL、ROV等多源异构数据实时同步与云端归档,形成全要素、全过程数字化管控。建立“计划—实际—预测”动态闭环机制,系统每半小时自动生成测量日报,对比进度偏差并通过关键路径法动态计算工期浮动,支撑高效决策。作业中依据洋流与船体漂移数据实时调整船舶DP动力定位PID参数,将船位保持精度控制在1米内,避免脐带缆缠绕与碰撞风险。同时构建多级阈值预警体系,对光纤张力、ROV状态、海底地形等异常实时声光报警并强制停机。结合历史数据训练作业窗口期预测模型,研判天气与海况以规避风险。整套系统实现施工全过程智能监控与安全管控,保障项目9天内高效完成,达成“零碰撞、零污染、零伤亡”目标。

4 实施效果

通过实施上述创新性的测量与修复方案,本项目取得了显著的成效:

依托“光电融合”技术开展定位,传统方法需3-5天完成的定位任务,现在能压缩到24小时以内,定位精度与效率提升幅度大一些,平面定位精度可达±3米,创造了公司在东海复杂海域的定位速度纪录。

工程质量全部符合要求:12芯光纤接续一次就通过检验,平均接续损耗仅为0.03dB,优于0.05dB的设计标准。完成修复的中继段经衰减测试全部合格,24小时监测的误码率为0,通信性能已回到正常状态。

本项目在工期、经济性上表现更优:“启航号”到现场后,仅花9天就完成通信系统恢复。国际海缆组织统计,同等水深、故障复杂度的项目,平均需要15天才能完成。本项目工期缩减40%,经估算,直接挽回国际通信业务损失数千万元。

5 结论

亚太直达海底光缆系统APG S3段开展应急修复工程期间,笔者作为子项目负责人,顺利攻克了东海大陆架复杂环境下的多重技术难题,本次项目引入“光电融合立体定位”理念,解决了浑浊水域海缆故障点难以捕捉的行业痛点,最终定位精度达到亚米级,项目采用精细化的ROV水下测量控制方案,配套严格的甲板光纤损耗管理规则,保障了修复工程的高质量完成。

这一项目成功落地后,高精度水下声学定位技术与传统光电检测技术的联用效果得到确认,中国企业在国际海缆维护领域响应速度快、技术水平过硬的特点也得到印证,可保障全球海底通信网络维持安全稳定的运行状态。

【参考文献】

- [1]董向华.水下机器人在海底光缆工程作业中的应用[J].光纤与电缆及其应用技术,2025,(06):6-9+40.
- [2]欧惜慈.光缆故障如何破?定位打捞再修复[J].海洋世界,2012,(04):29-31.
- [3]梁艳豪.超短基线系统在海洋磁力勘测精准定位中的应用与工程验证[J].珠江水运,2025,(17):109-111.
- [4]刘宗喜,欧阳本红,王昱力,等.海底电缆敷设场景中超短基线组合定位方法研究[J].时空信息学报,2024,31(06):689-697.
- [5]孙宁松,史永晋,贺同福,等.海底管道巡检系统建模及其动态缆影响分析[J].舰船科学技术,2025,47(24):169-174.

作者简介:

孙威(1995—),男,汉族,安徽人,硕士研究生,研究方向为海洋工程测绘。