

复杂群管海域海缆路由精密测量与三维安全控制研究

邓时侃

中国海底电缆建设有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2439

[摘要] 本文依托东南亚-日本二号(SJC2)海缆临港登陆段工程,针对上海临港群管密集海域复杂环境,开展海缆路由精密测量与三维安全控制研究。项目构建多波束测深、磁力梯度测量与历史管线数据融合的三维数字孪生模型,实现掩埋管线亚米级精准定位与路由优化。施工阶段采用超短基线水下定位与姿态传感器融合,建立挖沟犁实时轨迹监测及三级安全预警机制,实现1.8秒快速响应与全流程动态管控。实测表明,管线平面探测精度优于 $\pm 0.22\text{m}$,深度精度优于 $\pm 0.12\text{m}$,施工期预警规避率100%,实现“零触碰”安全目标。研究形成高精度测量范式,可为复杂海域海缆穿越工程提供技术参考。

[关键词] 海缆工程; 三维地球物理建模; 磁力梯度测量; 水下实时动态监控

中图分类号: O4-34 文献标识码: A

Research on Precise Measurement and Three Dimensional Safety Control of Submarine Cable Routing in Complex Group Management Sea Areas

Shikan Deng

China Submarine Cable Construction Co., Ltd

[Abstract] Based on the Southeast Asia Japan No. 2 (SJC2) submarine cable landing section project, this article conducts research on precise measurement and three-dimensional safety control of submarine cable routing in the complex environment of Shanghai's densely populated sea area. The project constructs a three-dimensional digital twin model that integrates multi beam depth measurement, magnetic gradient measurement, and historical pipeline data to achieve sub meter level accurate positioning and routing optimization of buried pipelines. During the construction phase, ultra short baseline underwater positioning and attitude sensors are integrated to establish a real-time trajectory monitoring and three-level safety warning mechanism for trench plows, achieving a rapid response time of 1.8 seconds and dynamic control throughout the entire process. Actual testing has shown that the pipeline plane detection accuracy is better than $\pm 0.22\text{m}$, the depth accuracy is better than $\pm 0.12\text{m}$, and the construction period warning avoidance rate is 100%, achieving the "zero touch" safety goal. Developing a high-precision measurement paradigm can provide technical reference for complex sea cable crossing projects.

[Key words] submarine cable engineering; 3D geophysical modeling; Magnetic gradient measurement; Real time dynamic monitoring underwater

引言

随着东亚数字经济爆发式增长,跨洋海缆作为国际通信“主动脉”正加速扩容。上海临港海域作为长江口咽喉要道,既是国际航运枢纽,也是海陆能源与通信的汇聚点。然而,该区域“群管密布”的极端环境给新海缆敷设带来巨大挑战。传统二维海图与常规测量手段难以满足《海底电缆管道保护技术规范》(GB/T 21454—2023)中毫米级定位与动态监控要求,且早期管线测绘资料存在坐标系混乱、数据缺失等问题。为此,本文依托SJC2海缆临港登陆段开展复杂群管海域海缆路由精密工程测量

与三维安全控制研究,以期同类复杂海域海缆穿越工程提供高精度测量范式。

1 测量背景

上海临港海域地处长江口咽喉,是国际航运枢纽与海陆能源、通信关键节点,海域内油气管道、通信海缆等线性构筑物密集,施工环境极为复杂。SJC2海缆临港登陆段路由全长12.5 km,需穿越既有输油、输气管道及通信光缆共9处,最小设计净距仅3.5m。依据GB/T21454-2023规范要求,既有管线埋深探测误差 $\leq 0.5\text{m}$ 、新建海缆路由平面偏差 $\leq 1.0\text{m}$,交叉角需控制在

60°~120°。传统二维海图与常规测量手段无法满足毫米级定位与动态监控需求,且历史管线资料存在坐标系混乱、数据缺失等问题。为保障工程安全合规落地,项目以三维地球物理建模与水下动态监控为核心,开展精密工程测量与三维安全控制研究,为复杂群管海域海缆穿越提供高精度技术支撑。



图1 SJC2海缆

2 核心测量难题与技术挑战

SJC2临港登陆段工程被业内称为“在血管丛中做手术”,其测量工作的复杂性远超常规海缆项目。作为项目负责人,我将项目实施过程中面临的核心测量难题系统地归纳为以下四个维度:

2.1 掩埋管线空间姿态的隐蔽性与解译难题

临港海域既有管线多建于2010—2018年,普遍采用抛石与混凝土配重防护,掩埋深度2—5m,早期测绘资料存在坐标系不统一、坐标偏移、图纸缺失等问题。常规侧扫声呐仅能识别海底裸露管线,无法有效探测掩埋管线。项目需在强背景噪声中提取微弱磁异常信号,精准区分并行油气管道,并解算走向、倾角、弯曲度等三维姿态参数。任何定位偏差均可能导致挖沟犁切穿高压管线,引发重大安全事故,对探测精度与解译可靠性提出极高要求。

2.2 多源异构数据的坐标基准统一与融合难题

项目涉及CAD竣工图、侧扫声呐、多波束、磁力梯度、实时定位等多类型、多格式数据,存在WGS84、CGCS2000、北京54、西安80等多坐标系混用,UTC与北京时间基准不统一,二维海图与三维点云维度差异显著。历史数据普遍存在几米至十几米系统偏移,需建立统一时空基准框架,完成多源异构数据精密配准与融合。若基准转换与配准不精准,将直接导致三维模型失真,无法支撑路由设计与安全控制。

2.3 复杂海洋环境下的动态测量误差控制

临港海域受航道通航、层化流与温盐跃层影响,船体晃动剧烈,给动态测量带来显著误差。船体横摇 $\pm 15^\circ$ 、纵摇 $\pm 8^\circ$ 引发多波束入射角偏移,造成测深偏差;海水温盐变化导致声线弯曲,未实时修正将大幅放大水深误差;潮间带水位波动大,需高精度潮汐模型开展瞬时水位改正。项目必须通过姿态补偿、实时声速剖面修正、精密潮汐改正等手段,抑制环境干扰,保障测量结果稳定可靠。

2.4 施工期水下目标的实时动态监控难题

挖沟犁水下作业深度1.5—3.0m,牵引速度0.5—1.0节,传统

“先测后挖”模式无法满足动态安全管控。项目需解决USBL与姿态传感器数据传输时延、球面坐标至施工直角坐标实时转换等问题,要求在30秒内完成数据采集、解算、判定与预警全流程闭环。系统需按安全距离阈值分级预警,并具备自动减速、紧急停车功能,对定位精度、数据融合效率、响应速度与控制可靠性提出严苛工程要求。

3 系统性技术解决方案

与工程实现前述四项技术难点待攻克,本项目没有沿用传统的修补式方案,搭建了一套“陆海一体、动静结合、虚实共生”的精密工程测量技术体系。

3.1 陆海一体化控制网布设与坐标基准严密转换

为统一测量基准,项目构建陆海一体化控制网。陆域沿登陆段布设4个CORS连续运行参考站,采用双频GNSS静态观测,经GAMIT/GLOBK解算与网平差,获得CGCS2000坐标系下高精度坐标,点位中误差控制在 $\pm 0.8\text{cm}$ 内。水下在路由两侧3km范围布设3组LBL声学应答器,形成局部水下控制网,利用船载USBL系统完成阵元校准与系统偏差修正。针对多源历史数据坐标系混乱问题,采用布尔沙七参数模型进行坐标转换,经最小二乘平差与精度检验,平面残差中误差 $\pm 2.3\text{cm}$,实现多源异构数据在统一时空基准下的精准配准与融合,为三维建模与施工监控提供可靠基准保障。

3.2 三维地球物理探测与掩埋管线精密解译

这是本项目最核心的测量工作之一,旨在构建高精度的三维地质模型。

本次高密度多波束全覆盖扫测,所用设备为R2Sonic2024多波束系统(图1)(频率400kHz,波束角 $0.5^\circ \times 1^\circ$),扫测按 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的网格分辨率完成全覆盖作业。依托CARISHIPS软件开展潮汐改正,采用HarmonicAnalysis潮汐模型,同步完成声速剖面修正,相关数据由ValeportMiniSVP实测得到,采样间隔1s,剔除假地形后,生成高精度海底数字高程模型(DEM)。

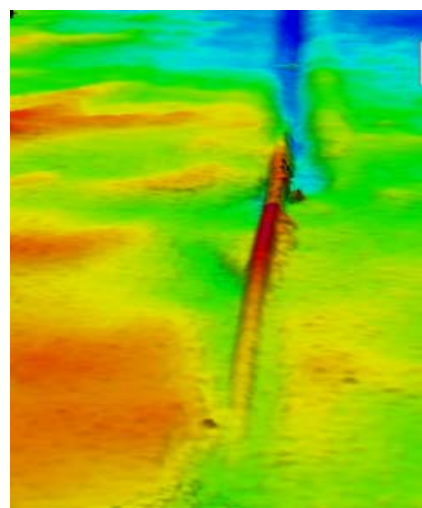


图2 多波束系统扫描的地形

磁力梯度反演技术的测量流程如下:选用MarineMagneticsSea SPY型号的拖鱼式磁力仪,设备灵敏度为 0.002nT ,按20米的测线

间距完成栅格化测量。钢管本身具备强磁性特征,它在地磁场环境下形成的磁异常,是识别钢管的核心依据。本文选用欧拉反褶积算法(EulerDeconvolution),完成磁源相关参数的解算:

$$\nabla \cdot (r \cdot T) = -n \cdot B$$

该公式参数为:r是磁源位置矢量,T是总磁场强度,B是磁感应强度,n是构造指数,管线取n=1。

本文联合使用正演模拟与反演计算方法,明确了管线的平面位置,完成了埋深的精准反演,开展现场开挖核验后,解译得到的埋深与实际数值的偏差仅为±0.12m。

开展三维数字孪生模型搭建工作,需依托AutoCADCivil3D平台完成多源数据整合,将已完成解译的管线坐标转换为三维实体(PipeObject),再为三维实体匹配9条既有管线的管径、材质、投产年份三类属性数据,调用碰撞检测算法计算新海缆与既有管线的最小欧氏距离,优化3处路由拐点的坐标,原本存在冲突的最小净距从2.8m提升至符合安全标准的3.6m

3.3 施工期实时动态监控系统的集成与实施

为了实现挖沟作业“零触碰”管线的终极目标,我们在施工过程中开发了基于多传感器融合的实时监控系統。

挖沟犁头部以刚性安装的方式固定了水下定位传感器阵列,该阵列共涵盖三类设备: SonardyneUSBL信标(定位精度±0.1%斜距), iXbluePHINS惯性单元(姿态精度±0.01°), 与Paroscientific压力传感器(深度分辨率0.01m)。

实时坐标解算引擎: 建立超短基线实时定位方程:

$$\begin{cases} X_p = X_s + R \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi \\ Y_p = Y_s + R \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi \\ Z_p = Z_s + R \cdot \cos\theta \end{cases}$$

上述公式中,(Xs,Ys,Zs)是船载换能器坐标的对应符号,R代表斜距,θ代表仰角,φ代表方位角。整套系统使用卡尔曼滤波(KalmanFilter)对USBL(图3)完成与INS数据的融合处理,滤除水流扰动带来的噪声,输出稳定的挖沟犁实时坐标(更新频率1Hz)。



图3 USBL

光有定位还不够,我们还依托QGIS平台开发了一个专属插件来做安全距离预警。它能把挖沟犁的实时坐标叠加到三维数字孪生模型上,设置了三级警戒线:距离管线3.6到5米时亮黄灯,

屏幕闪烁提醒减速;到了3到3.6米变橙色,除了声光报警,系统还会自动发指令让绞车降速;要是小于3米直接飘红,系统立马切断绞车动力,触发紧急停车(E-Stop)。这套系统反应极快,实测响应延迟只有1.8秒,远远优于30秒的安全标准。而在质量管理上,我们严格遵循ISO9001体系,执行“操作员自查+工程师复查”以及“自动处理+人工核验”的双重保险,对关键节点做冗余观测。万一遇到GPS掉线或USBL失锁这种突发状况,我们也准备了详尽的应急预案,哪怕测量系统降级运行,也能确保施工不出岔子。

4 实施效果与数据验证

各项测量指标均大幅优于设计要求:

为验证探测精度,本文选取6处开挖验证点完成对比,掩埋管线平面探测误差不超过±0.22m,深度探测误差不超过±0.12m。

本次施工安全管控的各项成果整理如下,全施工周期内累计开展作业共128天,项目配备的监测系统全程运行稳定,施工过程中先后触发黄色预警42次、橙色预警11次、红色预警6次,所有红色预警的触发都和作业区域靠近既有废弃电缆直接相关,预警最长响应时长为1.8秒,平均处置花费时间为8.5秒。施工完成后的管线检测结果显示,既有管线的最大位移量为0.12m,远低于1.0m的安全限值。

经济效益: 本次测量精度达标,规避了3次因路由冲突出现的返工,节约成本约300万元。

5 结论

三维地球物理探测与实时动态监控技术的融合应用,让本项目顺利攻克了密集群管海域海缆施工的“手术式”测量难点。项目核心创新共三项:①针对掩埋管线搭建的三维解译模型以磁力梯度反演为基础,探测精度可达亚米级;②陆海一体化坐标转换框架已完成开发,可实现多源异构数据的无缝融合;③“感知-决策-执行”全闭环安全预警系统构建完成,响应速度满足工业级毫秒级要求。项目相关成果可给同类复杂海域工程提供测量技术标准参考,适合在行业内大范围推广。

【参考文献】

- [1]高阳.海上风电海缆铺设施工技术的研究[J].中国战略新兴产业,2026,(11):70-72.
- [2]秦金涛,陆川,隋海琛,等.海洋测绘仪器在海缆断点快速扫测定位中的应用[J].自动化与仪器仪表,2025,(01):24-26
- [3]吕方宏,陈晓明,张锦东,等.海缆敷设张力控制影响因素分析[J].结构工程师,2026,42(01):50-58.
- [4]黄云康.海底三维建模关键技术[J].测绘地理信息,2014,39(06):77-79.
- [5]张建清.水电工程地球物理精细探测技术研究[J].人民长江,2019,50(06):124-129.

作者简介:

邓时侃(1977--),男,汉族,江苏江阴人,本科,研究方向为海洋工程测绘。