

# 高压海底电缆长距离穿越航道的可行性研究

李 诚

(中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300452)

**摘 要** 通过实验测定并选取高压海底电缆内穿钢制护管的摩擦阻力系数。基于模型实验结果估算海缆拖拉状态下的摩擦阻力, 评估分析海缆长距离穿越渤海海域某现有航道方案的可行性, 并在此基础上, 通过实验结果推算出不同型号海缆可实施拖拉穿越的长度, 为海缆穿越相关工程项目提供理论基础与实验依据。

**关键词** 海底电缆 长距离穿越 摩擦阻力系数

中图分类号: TM247.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)07-0007-03

随着我国海洋经济的发展兴起, 海底电缆因承担岸电供电、海上风力发电、海岛与大陆联网等功能<sup>[1]</sup>, 具有极高的建设研究价值、经济活动价值和社会利用价值。

海底电缆工程作为世界公认最为复杂的大型工程<sup>[2]</sup>, 是通信、电力等领域不可或缺的推动者, 它具有影响广泛、工程造价贵等特点, 其施工方案的科学性、可行性至关重要。根据渤海油田首个岸电应用示范项目的前期研究方案, 敷设两条电压等级为 110kV 和 35kV 的海缆需穿越现有港口航道。在项目初期了解到, 该航道已制定扩建方案待实施, 计划将航道加大挖深并对一条穿越航道的现有原油海管在穿越区域实施局部下沉改线, 对主航道区内海管施加 3m 以上厚度的人工抛石回填。海缆下沉改线和回填的施工日期远早于岸电应用项目可实施海缆全线敷设的计划日期。

对于海底电缆的安装条件分析, 目前国内已有多位学者进行过相关研究。闫宏生等采用简化模型, 提出了合规的海底电缆安装环境条件, 进而分析影响因素, 总结出相关参数对海底电缆正常铺设的影响规律; 汪雅薇等分析了海底电缆的安装条件, 总结出相关参数影响海缆张力及弯曲半径的规律。为避免航道二次开挖的工程成本以及二次禁航带来的社会经济成本等影响, 实现按期通航, 工程上海缆在穿越航道区域应与改线原油海管同期施工。由此形成的铺缆方案为借海管下沉改线工程施工契机在海管管沟内预埋钢制护管, 后期在岸电项目施工阶段通过预埋护管内部拖拉海缆实现穿越航道。<sup>[3]</sup>

为论证该铺缆方案的可行性, 需要计算海缆穿护管时牵引力大小是否超出海缆最大允许拉力, 以避免施工过程中由于载荷过大造成海缆永久性损伤。但由于开展该方案可行性研究所需的基础数据在以往类似

工程实践中缺少相关记录, 无法选取较为真实的摩擦系数并估算出海缆拖拉牵引过程中施加的摩擦力, 因此设计本文实验进行摩擦阻力系数测定。

## 1 拖缆方案与计算理论

### 1.1 海缆长距离穿越航道方案介绍

方案计划在海管下沉改造工程实施期间随改线后原油管道同管沟铺设两条空心钢制护管并在两端加以密封防淤, 再与改线后管道一并进行抛石回填保护, 使航道先按期恢复通航。后期在保持主航道通航的状态下在主航道两侧实施海缆牵拉内穿钢管施工: 开启航道下方预埋的空心钢管两端的密封盖板, 借助管内预留的牵引钢缆, 在护管的一侧由施工船舶施加牵引力, 另一侧敷设船送缆, 通过将海缆在护管内拖拉的方式实现穿越航道。

### 1.2 摩擦力计算

为进行海缆在钢制护管内的牵引力计算, 首先需要针对方案中钢制护管路由长度和摩擦力实验用管进行初步规划。在此基础上, 对钢制护管内拖拉海缆过程中海缆与护管内壁间摩擦系数进行实验测量, 得到海缆外层材质与钢制护管的摩擦系数。最后依据标准要求及相关实验数据, 对 110kV 和 35kV 海缆在钢制护管的牵引力进行分别计算, 评估海缆拖拉的可行性, 并计算推算出不同型号海缆可实施拖拉穿越长度。

依据《GB 50217-2018 电力工程电缆设计标准》与《DL/T 5221-2016 城市电力电缆设计规定》计算中采用的计算公式如下:

$$T = \mu WL$$

$$T_1 = WL(\mu \cos \theta_1 - \sin \theta_1) \quad (1)$$

$$T_2 = WL(\mu \cos \theta_1 + \sin \theta_1)$$

式中,  $T$  为水平牵引时的牵引力,  $T_1$  为向下倾斜

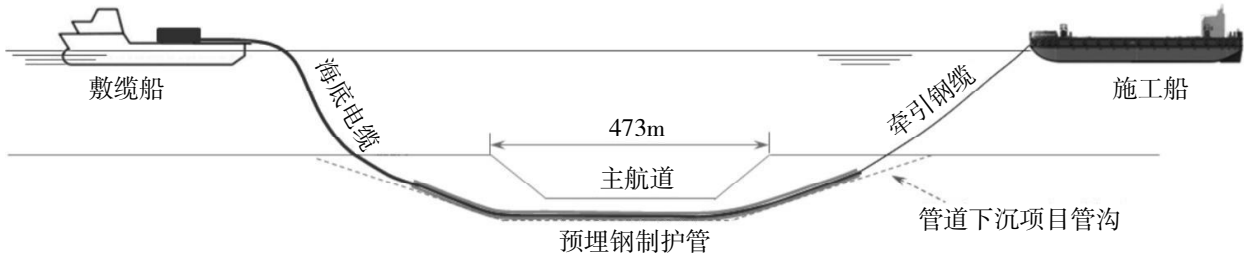


图1 海缆长距离穿越航道方案示意图

表1 海缆参数表

| 电压等级 (kV) | 截面规格 (mm <sup>2</sup> ) | 最大允许拉力 (kN) | 海缆外径 (mm) | 海缆干重 (kg/m) | 海缆湿重 (kg/m) |
|-----------|-------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| 110       | 3C × 500                | 320         | 201       | 81.4        | 54.6        |
| 35        | 3C × 400                | 190         | 146       | 46.1        | 32.7        |

表2 实验对象重量

|    | 干重 /kg | 湿重 /kg |
|----|--------|--------|
| 电缆 | 463    | 281    |
| 护套 | 59     | 31     |

表3 摩擦系数测定结果表

| 实验工况 | 最大静摩擦系数 | 动摩擦系数  |
|------|---------|--------|
| 电缆干拖 | 0.8402  | 0.7880 |
| 电缆湿拖 | 0.8944  | 0.7539 |
| 护套干拖 | 0.2644  | 0.2060 |
| 护套湿拖 | 0.4752  | 0.3309 |

牵引时的牵引力,  $T_2$  为向上倾斜牵引时的牵引力,  $W$  为拖带物的线密度,  $L$  为拖带物的长度,  $\mu$  为摩擦系数,  $\theta$  为倾斜角。

## 2 计算参数

### 2.1 海缆参数

海缆参数如表1所示。

### 2.2 钢制护管内穿缆长度计算

根据海管下沉改造工程的设计图, 作业海域主航道区长度 573m, 东西两侧过渡段的投影长度为 1259m 和 1242m, 造坡斜度为 1:120。

根据施工方案, 计划在护管铺设后进行碎石人工回填, 抛石回填的标高为距沟底 3m (其中 0.5m 碎石, 2.5m 毛石)。考虑回填层上方将产生大量回淤, 预计在第二阶段开启空心护管两端封板时, 淤泥层标高至少为距沟底 4.55m。在此基础上, 为确保预埋钢制护管两端封板开启的作业面位于淤泥层上方, 并且穿缆

过程中在封板敞开状态下为控制泥砂的涌摄入量, 确定 110kV 海缆及 35kV 海缆护管端部处管体中轴线均与沟底标高保持至少 4.8m, 即淤泥层标高与护管半径之和。

按照下式对海缆长度进行计算:

$$L=2a+b \quad (2)$$

式中:  $L$ ——110kV 海缆及 35kV 海缆护管设计长度;  $a$ ——造坡段的护管长度;  $b$ ——主航道沟底宽度。计算得到项目施工所需的海缆长度为 1725 m。

## 3 摩擦系数实验测试

### 3.1 实验用海缆及护管适用性分析

实验用海缆规格为 220kV 3C\*500mm<sup>2</sup>, 外径 250mm, 长度 4.39m, 最外层材质为聚丙烯和沥青混合材质, 减摩护套材质为聚氨酯。实验海缆在基础规格、成缆工艺、外表面材质方面均属主流型号规格, 可认为在岸电项目潜在的国内供应商产品范围内具有充分的代表性。实验用钢制护管为 24 寸, 内径 56.5cm, 长度 8.1m, 横

向宽度及长度均可支持实验用海缆在管内进行完整的牵拉移动实验过程。

基于此套海缆及护管进行摩擦力系数测定实验所得的结果具有采纳价值,可作为计算牵引力的数据基础。

### 3.2 实验准备

为考虑实际工程中海水产生的浮力和粘滞阻力影响,分别测试线缆及护套在干拖和湿拖情况下的摩擦阻力。湿拖实验需将电缆浸没于水中,因此在钢制护管两端焊接封板,形成封闭区域。同时在封板上焊接定滑轮,实现在不拉力测量值大小产生影响的条件下,将水平方向拖拉力转为竖直向上的由起重吊机施加的起吊拉力。

在实验开始前,首先对S型拉力传感器进行了标定。可以看出传感器线性化程度高,满足测试精度要求。

分别对电缆、护套称取干重与湿重。实验中,在护套内添加42kg压载保证拖拉时速度均匀。模型重量测量结果如表2所示。

### 3.3 实验结果

采用实验布置中的模型,将吊机采用慢速启动,依次测量对应模型的拉力,作为测试件与管道之间的摩擦力,其中启动阶段的最大载荷即为最大静摩擦力,运动稳定段拉力的平均值作为动摩擦力。测得摩擦力除以对应的测试件重量,即可换算得出摩擦力系数。海缆与护管内壁间摩擦系数测定结果如表3所示。

实验发现,电缆在湿拖情况下,摩擦系数小于干拖情况。而护套在湿拖的情况下,摩擦系数有所增大。分析其原因可能在于:对于电缆,由于缠绕尼龙绳,其表面更为粗糙,而在水环境下,水填充如尼龙绳的缝隙间,可以在一定程度上减小摩擦系数。而护套与之相比,其表面本身相对光滑,在水中拖带时,水存在粘性阻力,因此造成了运动时所需的拉力增大。此外,由于滑轮与护套吊耳存在轻微高度差,且管内不同位置处的锈蚀程度并不完全相同,因此当护套拖带超过一定距离后,拉力存在一定的下降趋势。

测试结果表明,拖拉过程中的最大静摩擦力系数显著大于动摩擦力系数。换言之,当海缆被拖动后,海缆所受的摩擦力会呈现出减小趋势,因此拖缆需施加的最大牵引力按最大静摩擦力考虑,在选用牵引设备时需要按照最大静摩擦力进行设计选型。<sup>[4]</sup>

### 3.4 项目施工1725m海缆所需牵引力计算

基于实验测试得到的摩擦系数测定结果,对1725m海缆长距离拖拉所需的牵引力进行计算。结果为:110kV海缆未加装减摩护套工况下需842kN,加装减摩护套

工况下需448kN,均超过表1中最大允许拉力320kN;35kV海缆未加装减摩护套工况下需505kN,加装减摩护套工况下需268kN,均超过表1中最大允许拉力190kN。

### 3.5 安全拖缆长度的推算

为保障海缆安全,选取表1中最大允许拉力作为基准,乘以安全因子作为可实施拖缆的最大牵引力,对海缆可拖拉长度进行理论计算。结果为:在无减摩护套的工况下,35kV海缆和110kV海缆理论可拖拉长度均为600m,在加装减摩护套的工况下,两种规格的海缆理论可拖拉长度均为1200m,可见项目施工所需拖拉的1725m海缆长度已超出理论可拖拉长度。

## 4 结论

本文通过实验,测定铠装电缆穿过海底管道的摩擦阻力系数。在此基础上,结合相关标准推荐的经验公式,估算了不同工况下实施1725m海缆拖拉穿越所需的牵引力。计算结果表明,无论是否使用海缆护套,直接拖缆将导致牵引力大于电缆允许承受的最大拖力,将导致电缆永久性损坏。依据最大牵引力法,计算岸电工程所用规格海缆的理论可拖拉长度,为后续工程提供了计算依据。

本文计算结果证明该项目长距离直接拖拉海缆的方案损伤海缆的风险高,评估认为不可行,同时为海底电缆相关工程研究提供了理论基础与实验依据,充分节省了实际试错所需的时间成本及人力成本,避免了施工造成海缆的不可修复损伤带来的工期损失和经济损失。此外,也为后续长距离牵引海缆的同类项目指明了研究方向,即需要研究通过应用辅助装置以大幅降低电缆拖拉穿越过程中的摩擦力,保证穿缆施工的安全顺利开展。

## 参考文献:

- [1] 赵健康,陈铮铮.国内外海底电缆工程研究综述[J].华东电力,2011,39(09):1477-1481.
- [2] 郭学勇.浅谈海底电缆的实际应用[J].企业技术开发,2011,30(01):36-37,65.
- [3] 同[1].
- [4] 同[2].