

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.24.014

珠海歌剧院上岛管线海底拖管案例设计

刘羽, 付朝晖, 徐晓明
(珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519000)

摘要: 珠海歌剧院市政供给管线工程为多管线(给水、污水、电力、通信)共同穿越香炉湾海域的上岛工程。结合场地空间、海域环境、堤岸基础、工程地质等多方面条件,设计采用多管共井的海底拖管方案,经济、安全、高效地实现了多管线一次性上岛。详细阐述了跨海敷管方案选择、线位选择、管材选择、管线间距确定、精度控制措施以及工作井设计、导向孔轨迹确定、扩孔和成孔加固措施等设计内容。目前该项目已安全稳定运行超过5年,保障了歌剧院的正常运营。

关键词: 多管共井; 海底拖管; 工作井设计; 导向孔轨迹设计; 扩孔及成孔加固措施
中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)24-0076-06

Case Design of Submarine Tow Technique for Pipeline Connecting to the Island of Zhuhai Opera House

LIU Yu, FU Zhao-hui, XU Xiao-ming
(Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519000, China)

Abstract: The municipal supply pipeline system of Zhuhai Opera House is a multi-pipeline project (including water supply, sewerage, electricity and communication) that crosses the Xianglu Bay to the island. Based on the field space, marine environment, embankment foundation, engineering geology and other conditions, the design scheme of submarine tow technique in a shared working shaft was adopted to bring multiple pipelines on the island at once, which had the advantages of economy, safety and efficiency. The design contents, such as selection of pipeline cross-sea scheme, determination of pipeline route, selection of pipe material, determination of pipeline spacing, measures of precision control, design of working shaft, determination of pilot hole trajectory, reaming and pore-forming reinforcement measures, were described in detail. At present, the project has been run safely and stably for more than 5 years, which ensures the normal operation of the opera house.

Key words: shared working shaft; submarine tow technique; working shaft design; pilot hole trajectory design; reaming and pore-forming reinforcement measures

长距离穿越海域管道工程,一般根据所处水域的洋流特征及地质条件,采用顶管法、沉管法、拖管法及管桥法等敷管方法^[1],但在多条不同种类管道需要同时穿越时,如何避免场地空间限制、海洋潮汐、海底复杂地质条件、两侧堤岸基础等情况的影

响,快速、准确、可靠地实现跨海穿越是管道工程的设计难点。

以珠海歌剧院管线上岛工程为例,介绍拖管技术在多种类、多数量、小口径管道长距离穿越海域工程中的应用。

通信作者: 刘羽 E-mail: 122188595@qq.com

1 工程概述

珠海歌剧院是我国第一座建在海岛上的剧院,其主体为一大一小两座“贝壳”形建筑,总建筑面积约 $5\times 10^4\text{ m}^2$ 。歌剧院位于珠海香洲东部野狸岛北侧填海区域,场地三面环海,一侧与野狸岛相连,野狸岛则通过桥梁与陆域连接(见图1)。



图1 项目区位图

Fig.1 Location of the project

根据区域规划及歌剧院的市政供给需求,配套建设管线主要包括给水、污水、电力、通信等4种管线,均需从情侣路接驳上岛,穿越海域长度约为355 m。

各管线具体规格见表1。

表1 管线规格

Tab.1 Pipeline specifications

项目	数量	管径/mm	穿越海域长度/m	备注
给水管	1根	DN400	355	压力管
污水管	1根	DN300	355	压力管
电力管	12孔	DN150	355	
通信管	12孔	DN100	355	

2 建设条件分析

2.1 现状桥梁

现状野狸岛有两座桥梁与外界连通:一座为海燕桥,桥梁总宽14 m;另一座为歌剧院施工用临时钢便桥,桥梁总宽4 m,位于海燕桥北侧约30 m。两座桥梁均不具备随桥加建管线的条件,需另外寻找管线上岛路径,同时管线敷设需避免对两座桥梁的

安全产生影响。

2.2 两侧场地

陆地侧情侣路堤岸内依次为宽约4 m的海滨步道、18 m宽的滨海绿带及情侣路机动车道,施工空间相对狭窄;野狸岛侧堤岸内为公共停车场,宽度约50 m,空间较为开阔。

2.3 管线海底埋深要求

管线拟穿越区域为珠海香洲港航道,宽度约355 m,海底高程-3~-1 m,两侧堤岸高程4.5 m。

经通航论证,管线埋设深度需按通航500 t海船标准考虑,即管线外顶距离航道规划底标高不得小于2 m。

2.4 地质条件

香炉湾海域下地层依次为:淤泥层(层厚3 m)、粗砂层(层厚3~7 m)、黏土层(层厚0.5~7 m)、砾砂、砾质黏性土及岩层;香炉湾两侧海堤下地层依次为:人工填筑层(层厚5 m,含块石)、流塑状淤泥夹层(层厚4 m)、黏土层及岩层,堤脚外有5~10 m宽的抛石区域(厚度3 m)。管线主要穿越海堤下人工填筑层及海域下粗砂、黏土层,其中穿越海堤基础及堤脚外侧抛石区为工程难点。

3 工程方案论证

3.1 跨海敷管方案选择

根据建设条件,对顶管法、沉管法、拖管法及管桥法等4种常用跨海敷管方案进行比选分析。顶管法常用于管径 $>\text{DN}800$ 的管道,工程管径小,采用顶管法需先顶进DN800或以上大管作套管,再在内部敷设小管,且顶管如遇孤石、沉船等海底障碍物,则投资高、风险大;沉管受风浪、海底暗流影响大,多管线易发生缠绕、碰撞,施工过程难以控制,同时香炉湾受不规则半日潮影响,落潮时水深浅,不满足浮船拖运要求,故沉管方案可行性小;拖管常用于管径 $<\text{DN}800$ 的管道非开挖施工,广泛应用于供水、电力、电信、天然气、煤气、石油等管道的铺设施工中,适用于砂土、黏土、岩石等地质条件^[2],多孔小管径管道采用该工艺受潮汐影响小,不影响通航,经济性高,适用性好;管桥法需设置管桥连接情侣路与野狸岛,管道随管桥穿越香炉湾海域,管桥施工难度大、费用高且该海域有通航需求,因此管桥法不适合。

综上,最终确定采用拖管工艺方案。

3.2 拖管线位选择

线位选择需考虑的因素:

① 管线穿越香炉湾必须布设在远离滩涂、港口和锚地的稳定河段。

② 与现状桥梁保持安全距离。根据《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423—2013),水下管道距离桥梁墩台冲刷坑外边缘不宜小于10 m,且不应影响桥梁墩台安全。

③ 管线接驳长度。歌剧院位于野狸岛北侧,线位选择在桥梁北侧区域可减小管线长度。

综合考虑,工程线位选择在距离临时便桥中线以北40~55 m的区域,由北往南依次布置电力、给水、通信、污水压力管。

3.3 工作井布置

因项目处于环境高敏感区域,施工空间受限,因此需尽量减小对周边的影响,避免对堤岸及情侣路的破坏。结合管线多种类、小口径特点,采用用地集约、节省投资、施工快速的多管共井拖管方案,两侧工作井一次开挖成型,其中情侣路侧工作井布置在绿化带内,野狸岛侧工作井布置在停车场内。

3.4 管线间距确定

管线间距需考虑的因素:

① 适当的安全距离。项目长距离海底穿越,地质条件较复杂,钻孔轨迹精度控制难度大,安全距离按不小于2 m进行控制。

② 钻孔导向过程中的偏差。根据《城镇燃气管道穿跨越工程技术规程》(CJJ/T 250—2016),PE管导向孔横向最大允许偏差为 ± 1 m。

③ 各类管道终孔直径。结合拖管的扩孔方案,给水、污水管终孔直径分别为 $\varnothing 550$ 、 $\varnothing 450$ mm;由于电力、通信管道为多数量小口径管束,因此采用先拖套管再穿管束的方案,电力、通信套管终孔直径分别为 $\varnothing 900$ 、 $\varnothing 600$ mm。

综上所述,确定各管中心间距为5 m,详见图2。

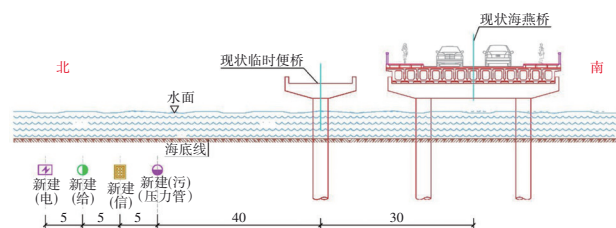


图2 管线标准横断面图

Fig.2 Standard cross section of pipeline

3.5 管材选择

拖管常用柔性管材主要有钢管、高密度聚乙烯管(HDPE)、PE管3种。

管材需能承受管道内压、管外荷载以及施工过程中的回拖力,3种拖管管材的具体性能比较如表2所示。

表2 拖管管材性能比较

Tab.2 Performance comparison of towing pipe materials

项目	钢管	高密度聚乙烯管	PE管
使用寿命/a	25	40~50	40~50
耐腐蚀性	需考虑管道内外及接口防腐	耐腐蚀性好	耐腐蚀性好
过流能力	良好	优异	优异
单管质量	较重	较轻	较轻
施工难度	变形模量较小,管道轴线调整难度大,需对焊缝进行100%无损检测	变形模量较大,轴线调整方便,无需进行无损检测	变形模量较大,轴线调整方便,无需进行无损检测
拖拉长度	曲率半径较大,拖拉距离较长,可达1 km	曲率半径较小,拖拉距离较短,一般不超过400 m	曲率半径较大,拖拉距离较长,可达1 km
承压性	承压性能好	一般用于非压力管道	承压性能好

管线从海底穿越,后期检修难度大,因此对管材防腐性及使用寿命要求高。

钢管施工过程复杂,防腐及焊接质量控制难度相对较大;高密度聚乙烯管曲率半径较小,一般用于短距离非压力排水管道;PE管耐腐蚀性好、使用寿命长、抗拉强度大,且具有柔性,与本工程需求契合度最高,因此管材统一选用PE100管(1.6 MPa, SDR11)。

4 工程技术方案

4.1 拖管工艺及施工流程

拖管施工流程主要包括导向孔施工、扩孔施工及管道回拖3个阶段。

施工工艺所需设备主要由水平定向钻机、动力系统、控向系统、泥浆系统、钻具及辅助机具等组成^[3]。

该工程拖管施工中的具体工艺流程如图3所示。

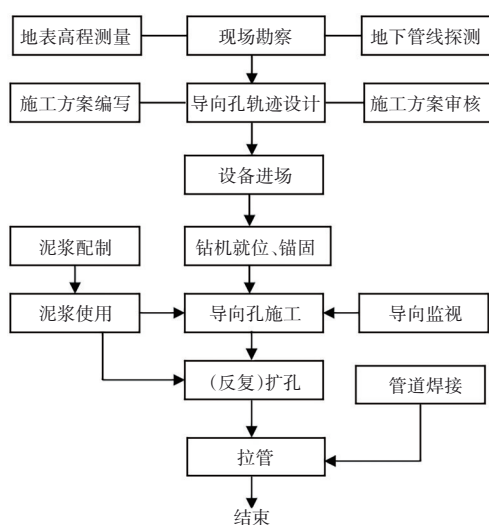


图3 拖管施工工艺流程

Fig.3 Flow chart of towing pipe construction

4.2 回拖力计算

拖管过程中受力复杂,且地层性质难以准确模拟,因此很难有一个与工程现状吻合、普遍适用的计算方法。现行多本规范中提供了水平定向钻回拖力计算方法,主要有摩擦力算法、净浮力算法、土压力算法以及ASTM算法,各方法中回拖力组成包括摩阻力、端阻力及黏滞力。该工程选用摩擦力算法,该法是通过实践摸索和工程总结的经验公式,主要考虑管外壁周围摩擦力和扩孔钻头端阻力,适用于给水排水等管道拖管计算,其基本公式及参数选取如下:

$$P=P_1+P_F \quad (1)$$

$$P_F=\pi D_k^2 R_u/4 \quad (2)$$

$$P_1=\pi D_0 L f_1 \quad (3)$$

式中: P 为总回拖力,kN; P_1 为管外壁周围摩擦力,kN; P_F 为扩孔钻头迎面阻力,kN; D_k 为扩孔钻头外径,m; D_0 为管节外径,m; R_u 为迎面土挤压力,砂性土为80~100 kN/m²; L 为回拖管道总长,m; f_1 为管节外壁单位面积的平均摩阻力,砂性土为0.5~0.7 kN/m²。

在管道回拖过程中,管材所能承受的最大回拖力 F 可按下式计算:

$$F=\sigma \times \pi (D_0^2 - D^2)/4N \quad (4)$$

式中: σ 为管道的材料弯曲强度,取18 MPa; N 为安全系数,本工程取2.0; D 为管节内径,m。

根据式(1)~(4)计算得出DN400及DN300 PE100管道回拖力 P 分别为143.5、89.9 kN,管材所

能承受的最大回拖力 F 分别为445.1、275.5 kN。

4.3 工作井设计

拖管施工两端需设工作井,一端能够摆钻机,另一端能够摆管道,对两侧场地空间要求较高^[4]。项目采用多管共井施工方案,工作井尺寸在长度方向考虑钻机、钻杆、钻头、管材组对、人员通行及操作等空间;宽度方向考虑管道间距、泥浆存放及操作空间;深度方向根据地质情况及管道埋深设置。情侣路侧宽度有限,管材组对摆放空间不足,因此将入土工作井设在情侣路侧绿化带上,用于摆放钻机,其尺寸为11.5 m×25 m×5.0 m;出土工作井设置在野狸岛侧停车场下,用于摆放管材,其尺寸为20 m×25 m×5.0 m。工作井采用12 m钢板桩支护开挖成型,底部浇筑30 cm混凝土,同时在情侣路工作井靠近机动车道侧施打一排 $\phi 500$ mm高压旋喷桩加固,以防止水土流失导致情侣路路面开裂及塌方(见图4、5)。

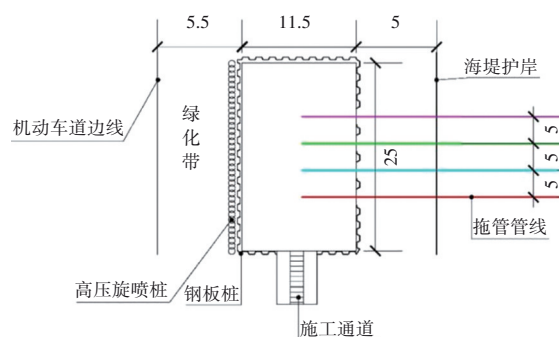


图4 情侣路侧工作井平面布置

Fig.4 Plane layout of the side working shaft at Qinglü Road



图5 情侣路侧工作井现场照片

Fig.5 Site photo of the side working shaft at Qinglü Road

4.4 导向孔轨迹设计

根据工作井布置、线路长度、管线深度、地质情况等进行钻孔轨迹的设计,导向轨迹须避让块石层及堤岸基础,同时要满足通航论证的埋深要求。如图6所示,设计从工作井底起钻,入钻角度 20° ,出钻角度 16° ,两侧分别设置10~21 m直线段穿越海堤,再转为造斜段,造斜段水平距离根据《定向钻进管线穿越铺设技术规范》计算确定^[5],两侧通过48~68 m造斜段(曲率半径 $R=175\sim 320$ m)与中间240 m水平段衔接。

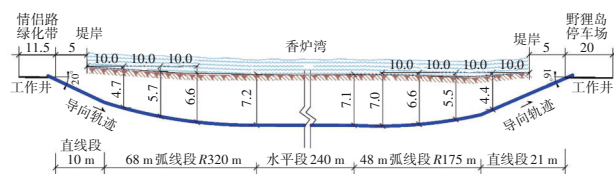


图6 导向孔轨迹示意

Fig.6 Schematic diagram of pilot hole trajectory

4.5 精度控制措施

项目出入土之间绝大部分为水面,使导向精度控制难度大大增加。主要采取以下控制措施:①控制钻杆的入射角度和方向,造斜段按设计倾斜度进行造斜钻进,每根钻杆的倾角改变量按5%控制;②加密监测频率,测量导向钻头的位置及孔洞的角度、方位等,陆域钻头每入土30 cm进行1次监测,海域直线段钻头每入土20 cm进行1次监测,造斜段每隔10 cm进行1次监测;③加强纠偏控制,过程中根据纠偏需求对导向孔钻进各种参数进行调整,纠偏遵循连续多杆小纠偏原则,避免在1根钻杆内完成纠偏。通过上述措施,项目导向轨迹最大偏差控制在30 cm以内。

4.6 扩孔设计

导向孔施工完后,需进行扩孔,扩孔的最终孔径取决于管道直径、管材及地质情况等。每次扩孔的级差控制在100~150 mm,且终孔直径为管道外径的1.2~1.5倍。工程铺设DN400给水管、DN300压力污水管、DN700电力套管和DN500通信套管等4种管线,考虑到砂层不易成孔及存在缩径等情况,最终确定终孔直径分别为 $\varnothing 550$ 、 $\varnothing 450$ 、 $\varnothing 900$ 、 $\varnothing 600$ mm。在扩孔的同时不断向孔内泵入化学泥浆,以便排出扩孔时所切削下来的泥土,防止孔壁坍塌以及减小回拖阻力。

4.7 成孔加固设计

香炉湾两侧海堤附近存在大量抛填块石,厚度约3 m,往下有厚度约4 m的流塑状淤泥层,该层持力性较差,对导向、回扩成孔极为不利。为避免上部块石压塌成孔,在两侧堤岸块石层底设置3排 $\varnothing 500$ mm高压旋喷桩进行加固处理(见图7)。海域下拖管穿越粗砂层,该地层胶结性差,泥浆易漏失塌孔,主要采取投加膨润土、分散剂(Na_2CO_3)、降失水剂(Na-CMC)等化学药剂的措施,同时通过控制泥浆压力(0.2~0.3 MPa)等进行加固。

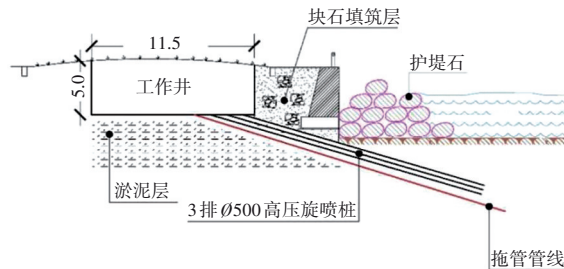


图7 高压旋喷桩加固示意

Fig.7 Schematic diagram of the high-pressure rotary pile reinforcement

4.8 管道试压

管道回拖前,需对给水及污水压力管进行水压试验,项目试验压力取1.0 MPa。试压流程主要包括试验前的准备工作、管道充水、封堵、打压和排水等,试验管段灌满水后,在不大于工作压力条件下,浸泡不少于24 h后试压。水压逐渐升至试验压力后,停止加压,保持恒压15 min后检查压力变化、渗漏流量,符合规范要求则为合格。

4.9 管道回拖及回填

管道回拖是穿越工程的关键环节,应在扩孔工序完成后连续进行,间隔时间不应超过3 h,管道回拖角度与钻孔导向轨迹一致,回拖过程一次完成,避免停顿发生塌孔现象。回拖采用开挖发送沟的方式保障管道稳定不晃动及减小回拖阻力,同时为了防止管壁被刮伤,在管道底每隔5 m铺垫装有细土的麻袋,麻袋上涂润滑油。由于PE管材在回拖力作用下有一定的伸长,其弹性应变会很快恢复,在回拖完成后将管头预留一段长度(约为总长度的1%),然后进行管道的切割、连接及封闭工作。当所有工作完成后,按照规范要求对两端工作井进行回填。

5 工程效果

工程采用拖管工艺顺利穿越香炉湾海域,管线平面位置、竖向标高、与陆地市政管线的衔接及管道质量等均满足设计及验收要求,通过海底拖管连通情侣路至歌剧院市政供给管线系统,满足歌剧院用水、排污、用电、通信需求,保障了歌剧院按期开业及正常运营。项目运行至今已超5年,工况良好,具有显著的社会、经济效益和示范效应。

6 结语

拖管穿越技术越来越多地应用于市政管网工程中,较好地解决了特殊地形、地貌条件下管线开挖施工的难题,相比于其他非开挖工艺,其具有施工周期短、工程造价低、环境影响小、工程质量高、使用寿命长等优点,但需精确控制其平面线位、竖向标高达到设计、规范要求。珠海歌剧院上岛管线采用拖管穿越香炉湾海域,在不影响通航、不破坏两侧堤岸及海洋环境的基础上完成多种类、多数量小口径管道施工,缩短了施工周期,降低了工程成本,可为后续类似工程提供参考、借鉴。

参考文献:

- [1] 于孝民,丁北斗,方建国,等. 大直径长距离输水管沉管施工技术研究[J]. 中国水利,2018(16):52-55.
YU Xiaomin, DING Beidou, FANG Jianguo, et al. Research on immersed pipe construction technology of the large diameter long-distance water delivery pipe[J]. China Water Resources, 2018(16):52-55(in Chinese).
- [2] 杨敬杰. 管道定向钻穿越河流施工风险控制[J]. 油气储运,2014,33(3):315-317.
YANG Jingjie. Risk control in directional drilling river-crossing construction of pipeline [J]. Oil & Gas

Storage and Transportation, 2014, 33(3):315-317 (in Chinese).

- [3] 尹东莉,刘丽妍. 水平定向钻技术在天然气管道穿越工程的应用[J]. 煤气与热力,2009,29(12):30-32.
YIN Dongli, LIU Liyan. Application of horizontal directional drilling technology to crossing project of natural gas pipeline [J]. Gas & Heat, 2009, 29(12):30-32(in Chinese).
- [4] 郭坤,李齐军. 重力流排水管道定向钻技术改进探讨[J]. 给水排水,2018,44(6):102-105.
GUO Kun, LI Qijun. Discussion on the improvement of technology of drilling pipe directional gravity drainage [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(6):102-105 (in Chinese).
- [5] 陈志龙,朱丹,陈焕旭,等. 濒海地区复杂地质条件下的污水管道定向钻施工技术[J]. 建筑施工,2017,39(5):681-683,686.
CHEN Zhilong, ZHU Dan, CHEN Huanxu, et al. Construction technology for directional drilling of sewage pipeline under complicated geological condition along coastal area [J]. Building Construction, 2017, 39(5):681-683,686 (in Chinese).

作者简介:刘羽(1985-),男,湖南武冈人,硕士,高级工程师,注册设备(给水排水)工程师,注册环保工程师,注册咨询工程师,水务设计所副所长,主要研究方向为市政给排水管网、城市综合管廊、水环境综合治理、生态环境工程等,曾获珠海市产业青年优秀人才、珠海市香洲区香山创新英才等荣誉称号。

E-mail:122188595@qq.com

收稿日期:2022-09-05

修回日期:2022-09-26

(编辑:孔红春)

借自然之力,护绿水青山