



ZHANJIANGWAN KUAHAI DUNGOU
SUIDAO GONGCHENG GUANJIAN JISHU
YANJIU YU YINGYONG

湛江湾跨海盾构隧道工程关键技术

—— 研究与应用 ——

严振瑞 刘庭金 唐欣薇 丁仕辉 著

中国建筑工业出版社

本书受以下单位和项目资助：

广东省水利电力勘测设计研究院

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室

国家自然科学基金面上项目（51678248、51878296）

广东电网有限责任公司科技项目资助（GDKJXM20172975）

湛江湾跨海盾构隧道工程关键技术 研究与应用

严振瑞 刘庭金 唐欣薇 丁仕辉 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

湛江湾跨海盾构隧道工程关键技术研究与应用/严振瑞等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 8

ISBN 978-7-112-23730-2

I. ①湛… II. ①严… III. ①水下隧道-隧道工程-盾构法-研究-湛江 IV. ①U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 090634 号

本书针对湛江湾跨海盾构隧道工程, 系统地介绍了该工程的项目特点、工程难点及关键技术。主要内容包括: (1) 工程综述; (2) 工程选址选线及跨海方案的优化设计; (3) 高水压软土盾构跨海隧道衬砌结构设计及承载机理研究; (4) 海边深厚砂层深挖竖井结构设计; (5) 跨海隧道高水压软土盾构设备选型及适应性设计; (6) 高水头小直径盾构海底长距离掘进施工关键技术; (7) 海边深厚强透水砂层深挖竖井施工关键技术。

本书可供从事水利水电、隧道结构、岩土工程等领域科研、设计、施工技术人员及高等院校师生参考。

责任编辑: 辛海丽

责任校对: 姜小莲

湛江湾跨海盾构隧道工程关键技术研究与应用

严振瑞 刘庭金 唐欣薇 丁仕辉 著

※

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京富诚彩色印刷有限公司印刷

※

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9 $\frac{3}{4}$ 字数: 233 千字

2019年8月第一版 2019年8月第一次印刷

定价: 135.00 元

ISBN 978-7-112-23730-2

(34039)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

位于广东省西南部的湛江湾跨海隧道工程，是我国首条跨海输水的盾构隧道，也是国内首次下穿亚洲最高等级（45万吨级）人工航道的跨海管道工程。这一调水工程是鉴江供水枢纽工程的重要组成部分，建成后可为广东湛江地区未来发展与水安全保障提供重要支撑，具有显著的经济和社会效益。

湛江湾跨海盾构隧道工程位于湛江港咽喉要道，航道等级高。由于地理位置的特殊性和地形地质条件的复杂性，隧道施工风险高，难度大，面临着诸多关键技术挑战。隧道外水压力高，跨海距离长，且要穿越强透水砂层、软弱黏土层及黏土—砂互层等多种不同类别地层。同时，海水环境施工对设备及结构防腐蚀提出了更高的要求。湛江湾跨海盾构隧道是鉴江供水枢纽工程的关键工程，它的建设充分展示了跨海输水隧道盾构技术在水利工程领域中的应用。

工程的相关设计、施工和研究单位对隧道工程的关键技术进行了攻关，开展了脚踏实地的设计与实验研究工作。对线路选址及盾构隧道跨海方案进行了优化，设计了一种新型的跨海隧道专用衬砌管片，针对性开展了盾构设备的选型与功能设计优化，在高水压复杂软弱地质条件下小直径盾构的始发、接收和长距离掘进技术方面取得了突破！

本书全面总结了该项工程的宝贵经验，为跨海输水工程提供参考与借鉴，对保障湾区滨海城市水安全有重要的意义！本书作者严振瑞和唐欣薇均为我的学生，承担和完成了本工程设计及其科研任务，本人甚感欣慰，特为序。

中国科学院 院士
清华大学 教授



2019年7月于清华园

前 言

鉴江是广东省境内仅次于珠江，粤西地区最大的入海河流，水资源丰富，除满足流域内需求外，还可以满足湛江市东部坡头、南三岛及东海岛的用水需求。鉴江供水枢纽工程是向湛江钢铁项目、中科炼化项目以及外围东海岛经济技术开发区提供工业及居民用水的跨流域调水工程。按钢厂远期 2000 万吨/年、炼化远期 3000 万吨/年规模设计，上述钢铁和炼化项目及外围用水总需水量约为 3.32 亿 m^3 /年，除考虑部分利用当地水资源外，由岛外流域引水流量为 $10\text{m}^3/\text{s}$ 。湛江湾跨海管道位于湛江港出海的咽喉要道，北接南三岛，南连东海岛，跨海段长 2.75km，需穿越湛江港 30 万吨级龙腾航道，地理位置十分敏感。该工程是目前穿越航道等级最高、亚洲最深人工航道的跨海管道工程。

本工程对线路选址及盾构隧道跨海方案进行优化，设计了一种新型的跨海隧道专用衬砌管片，针对性开展高水压条件下软土盾构设备的选型与盾构设备适用性功能设计，解决了海边深厚强透水砂层及软弱地层中修建盾构工作井及盾构的始发、接收和高水压条件下盾构海底长距离掘进的技术难题。

湛江湾跨海盾构隧道工程于 2011 年 11 月 11 日盾构始发，2012 年 12 月 14 日盾构到达，2.75km 跨海隧道掘进仅用 13 个月，平均月进尺超过 210m。跨海隧道工程施工质量优良，管片拼装精确，接缝无错台、张开、渗漏现象，止水效果良好，工程建设达到了安全、优质、高效的目的。2015 年 3 月 13 日开始提前向钢铁项目供水，跨海隧道工程的顺利建成，为按时向湛江钢铁项目供水解决了最关键的技术问题！

本工程已取得 3 项发明专利和 3 项实用新型专利，获得 2017 年度大禹水利科学技术二等奖和 2015 年度广东省水利学会水利科学技术一等奖，为建设高水压软土盾构隧道的设计和长距离掘进不换刀安全施工提供了成套技术，扩展了小直径、高水压盾构隧道长距离掘进的适用范围，社会效益显著，其设计经验、施工工艺和研究成果对其他类似的工程项目具有一定的参考价值。

全书共 7 章。第 1 章为工程综述，主要介绍工程背景、项目特点、关键技术难点与创新；第 2 章介绍了工程选址选线及跨海方案的优化设计；第 3 章介绍了高水压软土盾构跨海隧道衬砌结构设计，并对其承载机理进行了研究；第 4 章介绍了海边深厚砂层深挖竖井结构设计；第 5 章介绍了跨海隧道高水压软

土盾构设备选型及适应性设计；第6章介绍了高水头小直径盾构海底长距离掘进施工关键技术；第7章介绍了海边深厚强透水砂层深挖竖井施工关键技术。

本书由严振瑞负责组织和定稿，严振瑞、刘庭金、唐欣薇、丁仕辉编写，黄文敏、姚晓庆、黄鸿浩协助书稿的整理与校对。

湛江湾跨海盾构隧道工程关键技术攻关与实施应用，不仅凝聚了项目全体工作人员的智慧与汗水，亦得到各级领导的密切关注与业内众多专家的鼎力支持，在此对广东省水利厅、湛江市鉴江供水枢纽工程建设管理处、广东省水利电力勘测设计研究院、广东水电二局股份有限公司、粤水电轨道交通建设有限公司、广东省水利水电科学研究院、华南理工大学等单位表示衷心的感谢，谨以此书献给所有为此项目付出艰辛工作的单位与个人。

限于作者水平，书中不妥之处，敬请广大读者批评指正。



2019年7月于广州

目 录

第 1 章 工程综述	1
1.1 工程背景	1
1.2 项目特点	2
1.3 技术难点	3
1.4 关键技术创新	4
第 2 章 工程选址选线及跨海方案的设计优化	6
2.1 跨海管道线路方案选择及跨海选址的优化	6
2.2 跨海方案的优化论证	8
2.2.1 跨海管道工程地质勘察	8
2.2.2 管道跨海方式的选择	10
2.2.3 跨海管道埋深的论证及优化	10
2.2.4 跨海隧道布置及断面方案的设计优化	12
第 3 章 高水压软土盾构跨海隧道衬砌结构设计及承载机理研究	15
3.1 高水压软土盾构隧道衬砌管片设计	15
3.2 管片混凝土材料设计	20
3.2.1 原材料选取	20
3.2.2 配合比及材料性能	22
3.3 三维数值模型	22
3.3.1 基本假定	22
3.3.2 材料本构关系及接触关系定义	23
3.3.3 几何模型及网格划分	23
3.3.4 荷载模式及边界条件	23
3.3.5 结构变形规律分析	25
3.4 不同影响因素下管片衬砌结构力学性能分析	29
3.4.1 外水压力	29
3.4.2 地层侧压力系数	35
3.4.3 封顶块位置	39
第 4 章 海边深厚砂层深挖竖井结构设计	43
4.1 竖井设计概况	43

4.2	围护结构数值仿真分析	47
4.2.1	有限元模型	47
4.2.2	始发井围护结构变形与受力分析	49
4.2.3	接收井围护结构变形与受力分析	53
4.2.4	计算分析小结	57
4.3	接收井围护结构施工监测及反馈分析	57
4.3.1	位移	57
4.3.2	钢筋应力	59
4.4	竖井结构计算与稳定性分析	62
4.4.1	底板结构受力计算分析	62
4.4.2	井底土体加固厚度验算	68
4.4.3	内衬结构抗掉落和抗浮验算	69
4.4.4	最大排水量估算	70
第5章	跨海隧道高水压软土盾构设备选型及适应性设计	72
5.1	盾构机选型及适应性设计	72
5.1.1	盾构机型选择	72
5.1.2	适应性设计特点	73
5.2	盾构机技术性能和参数	74
5.3	盾构机部件及功能	78
5.3.1	盾构机主体	79
5.3.2	刀盘驱动系统	87
5.3.3	掘进系统	87
5.3.4	铰接装置	87
5.3.5	注浆系统	88
5.3.6	管片拼装机	88
5.3.7	泥水缓冲气压室	88
5.3.8	环流输送系统	89
5.3.9	后配套台车	90
5.4	泥浆处理及循环系统	90
5.4.1	泥浆处理系统设计	90
5.4.2	泥浆环流系统工艺流程设计	95
5.4.3	泥浆处理系统的管理	97
第6章	高水头小直径盾构海底长距离掘进施工关键技术	98
6.1	移动式反力架盾体顶管法分体始发技术	98
6.1.1	进洞口端头及后座土体加固	99
6.1.2	盾构始发技术特点	99

6.1.3	盾构始发施工流程	101
6.1.4	施工关键技术	104
6.2	长距离软基掘进施工技术	105
6.2.1	盾构掘进循环时间及流程	105
6.2.2	洞内运输及通风和管线布置	105
6.2.3	泥水管理	106
6.2.4	盾构掘进	107
6.2.5	管片拼装	108
6.2.6	背填注浆	109
6.2.7	盾构机泥饼清除技术	110
6.2.8	陡坡段盾构掘进	113
6.3	盾构到达接收施工技术	114
6.3.1	富水软弱地层盾构到达接收新技术的研究	114
6.3.2	到达前准备	118
6.3.3	盾构到达	119
第7章	海边深厚强透水砂层深挖竖井施工关键技术	121
7.1	地下连续墙施工技术	121
7.1.1	生根式导墙	122
7.1.2	泥浆制备	126
7.1.3	成槽工艺	127
7.1.4	钢筋网制作安装	128
7.1.5	地下连续墙混凝土浇筑	130
7.2	竖井旋喷封底施工技术	131
7.2.1	竖井旋喷封底施工	131
7.2.2	降压井及基坑排水施工	132
7.3	旋喷注浆质量监控系统	135
附录1	符号说明	137
附录2	建设掠影	138

第1章 工程综述

1.1 工程背景

湛江市地处祖国大陆最南端，广东省西南部，位于北纬 $20^{\circ}12'$ ~ $21^{\circ}35'$ ，东经 $109^{\circ}31'$ ~ $110^{\circ}55'$ 之间，东临南海，南隔琼州海峡与海南省相望，西濒北部湾，北接茂名市和广西壮族自治区，东西宽 97km，南北长 190km，幅员总面积为 12471km^2 ，海岸线总长为 1556km，含大小岛屿 9 个、港湾 18 处，适于建深水良港的海岸线长达 97km。其中，湛江港是世界少有的天然深水良港，是中国八大港口之一，万吨级以上泊位共 15 个，年吞吐能力达 1768 万 t，成为我国沿海通往非洲、中东、欧洲、东南亚、大洋洲海上运距最短的港口。

湛江市现辖湛江市区、遂溪、徐闻两个县及廉江、雷州、吴川三个县级市，全市有 88 个乡镇、31 个街道办事处、1522 个村民委员会、260 个社区居委会。全市现有人口 713.94 万人，其中乡村人口 447.91 万人，市区人口 153.02 万人，镇区人口 113.01 万人。2003 年农业总产值 183.52 亿元，工业生产总产值 531.65 亿元。湛江市农业自然资源丰富，农、渔生产条件好，是我国蔗糖、热带作物、水果、水产的重要生产基地。

湛江市市区包括赤坎、霞山、麻章、坡头和东海岛开发试验区，面积 1460km^2 ，人口 128 万人。湛江市水利局 2001 年编写的《广东省湛江市江河流域综合规划报告书》，对湛江市管辖范围进行了全面的水资源综合分析、平衡与规划。根据该报告预测，湛江市区至 2010 年缺水量为 25971.46万 m^3 ；至 2020 年缺水量为 54209.95万 m^3 。规划通过鉴江挡潮蓄淡工程、鹤地水库加固扩建及渠系改造工程、修建南三水库、五里山水库和海湾水库等工程解决。

湛江市地表多年平均径流量为 168.86亿 m^3 ，可开发的浅层地下水为 20.99亿 m^3 ，多年平均水资源总量约为 189.85亿 m^3 ，人平均年水资源占有量为 2659m^3 。从水资源占有量看，湛江市范围的水源并不缺乏，属于工程性缺水。实施规划工程后，可以满足湛江市近远期规划的供水需求。

从湛江市范围的水资源分析情况看，鉴江是流经湛江范围的最大河流，鉴江水量丰富，目前径流的利用率较低，大部分径流流入南海，湛江市是广东省工程性缺水较严重的地区，为了解决湛江市的用水问题，建设鉴江口蓄、引水工程十分必要。

宝钢与韶钢、广钢集团在湛江市东海岛建设钢铁项目，而湛江市作为粤西经济相对薄弱的地区，钢铁项目建设将推动广东省经济协调持续稳定高速增长，使湛江市经济发展突飞猛进。然而，钢铁项目近期需水量为 20 万 t/d，远期需水量为 40 万 t/d，水源成为关键环节。为满足钢铁项目及东海岛外围工业和生活用水要求，水源须具有丰富的水量和较大

的调节库容,其中,鉴江是湛江市范围内符合条件的主要水源。因而,建设鉴江口蓄、引水工程势在必行,该工程被列入广东省“十一五”规划的重点项目,其建设对促进钢铁项目建设具有深远意义!

湛江湾跨海盾构隧道工程是服务于湛江金三角经济开发区工业及居民用水的跨区域调水工程,是鉴江供水枢纽工程的主要组成部分。工程功能为:通过泵站及管道送水至湛江钢铁基地、东海岛及外围,供水保证率为97%,供水能力为 $10\text{m}^3/\text{s}$;年均供水量为:近期1.4亿 m^3 ,远期2.8亿 m^3 (钢铁基地:1.6亿 m^3 ,东海岛:0.85亿 m^3 ,南三岛、坡头:0.35亿 m^3)。

整个输水工程线路总长39.5km,其中,鉴江泵站至钢铁工业基地分水口的主干线长26.2km,钢铁工业基地至红星水库的支线长13.3km。湛江湾跨海盾构隧道是主干线的组成部分,位于湛江湾口最窄处,距离长达2.75km,是全线的控制性工程。

湛江湾跨海盾构隧道北接南三岛,南连东海岛,位于湛江湾峡口位置。此处水深流急,水位受海洋潮汐的影响明显,亦是进出湛江港的咽喉,水面航运非常繁忙,地理位置十分敏感。盾构隧道作为输水专用隧道,由始发井、海底隧道和接收井三部分组成。海底隧道包含两端斜坡段和海底平直段,其线路设计为:由始发井起点中心高程-15m依坡率3.946%降至-56.0m高程后折为水平,斜坡段长1039m,水平段长600m;再依坡率3.0927%上升至-21.64m高程到达接收井,斜坡段长1111m。总体而言,海底地形起伏不大。隧道所处海底地形及穿越地层情况如图1-1所示,所处地层主要为黏土层(局部夹中粗砂或细砾砂)和砂层,穿越土层主要物理力学参数列于表1-1。基于以上水文地质条件,工程选用泥水平衡式盾构施工,隧道承压最大水头逾60m。

土层物理力学参数

表 1-1

土层类型	中细砂	黏土	黏土夹粗砂
重度(kN/m^3)	19.5	18.0	20.1
黏聚力(kPa)	—	22.6	—
内摩擦角($^\circ$)	28.0	15.3	30.2
侧向土压力系数 λ	0.39	0.51	0.32
基床系数(MN/m^3)	22.0	21.8	35.0

为节省工程费用,本项目采用城市地铁常用的盾构机掘进,隧道外径为6.0m,以便盾构设备重复利用。区别于常规输水隧洞,湛江湾隧道内铺设2根DN1800输水钢管,由于施工时操作空间的要求,隧道内检修通道及其他通风、照明等辅助设施的布置空间要求,选择盾构内直径为5.1m。隧道横断面如图1-2所示。

1.2 项目特点

本项目是小直径盾构在高水压复杂软土地层条件下长距离掘进的技术突破,存在以下特点:

- (1) 位于湛江港咽喉要道,航道等级高,靠近锚地;

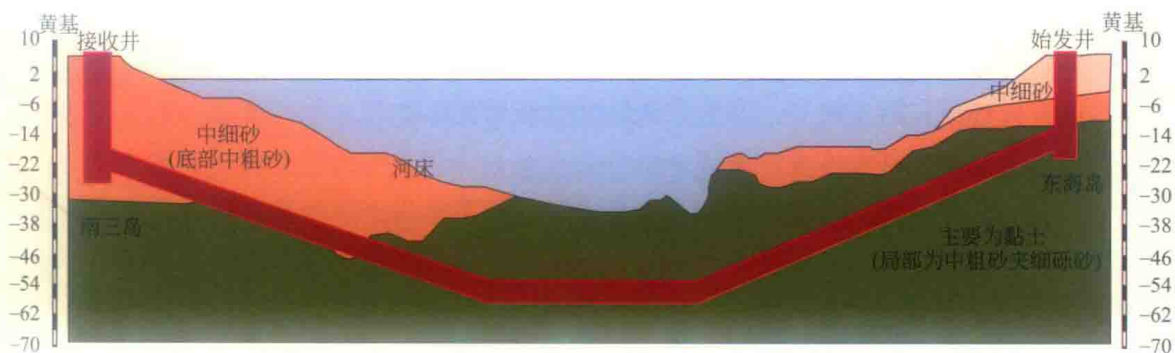
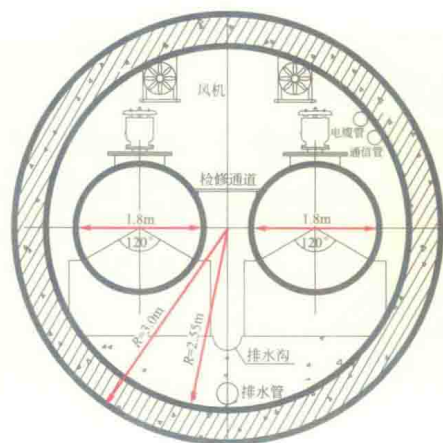
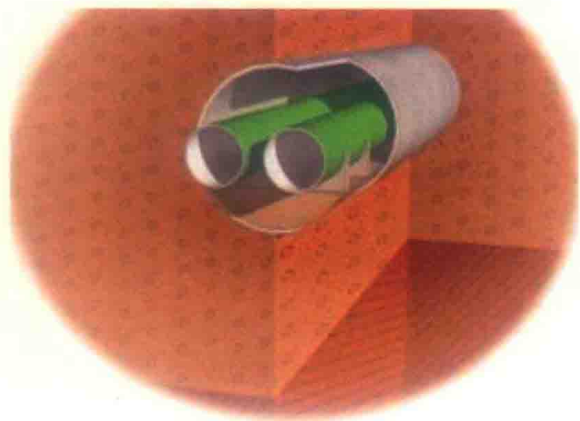


图 1-1 盾构隧道沿线地质剖面图



(a) 隧道横断面布置图



(b) 隧道横断面效果图

图 1-2 隧道横断面

- (2) 峡口水深大，最大水深近 50m，隧道最大水深 60m，最大外水压力高达 0.65MPa；
- (3) 工程地质条件复杂，隧道穿越强透水砂层、软弱黏土层及黏土夹砂互层等多种不同类别地层，且局部地层存在致密坚硬钙质铁质结核层；
- (4) 隧道跨海距离长，单端掘进长 2.75km，隧道外径 6.0m，衬砌后内径 5.1m，小直径盾构长距离跨海掘进施工难度大；
- (5) 工作井直径大，开挖深度大，且穿越海边深厚强透水地层；
- (6) 海水环境条件施工对设备及结构防腐蚀提出更高要求。

1.3 技术难点

1. 地理位置特殊

隧道位于湛江湾口最窄处，扼守湛江港进出咽喉，航道繁忙，峡口水深流急，且受到航道疏浚和船舶抛锚带来的地形冲淤影响，使隧道上方覆土厚度发生变化。

2. 盾构设备选型与设计

盾构设备需要同时适应砂层、黏土层和黏土夹砂互层等多种复杂软弱地层条件。盾构

机在石英含量高的砂层长距离掘进时，刀具磨损大，高水压条件下刀具更换困难；在黏土层掘进时，刀盘易结泥饼；地层局部存在致密坚硬的钙、铁质结核层。因而，刀盘和刀具配置难度大，且因长距离施工，刀盘刀具设计需满足更高要求。

3. 软弱地基深厚砂层中盾构机始发和接收难度大

工作井所处地层为深厚砂层且深度大，砂层与海水直接连通，自稳能力差。尤其邻近接收井位置隧道周边被强透水性砂层包围，盾构到达接收过程中易产生涌水、涌砂、崩塌等现象，出现安全质量事故，施工难度极大。

4. 盾构隧道在海底高水压复杂地质条件下长距离掘进施工风险高、难度大

(1) 湛江湾峡口水深流急，受潮汐影响，隧道最大水深达 60m，最大外水压力约 0.65MPa，对衬砌结构抗外压能力提出更高要求，高外水压力对设备和管片密封防水性能要求更高，且盾构机在强透水性砂层掘进时掌子面平衡控制难度大；

(2) 海底施工不能在中途设置工作井，隧道单向掘进距离达 2.75km，对设备的可靠性和耐久性要求高；

(3) 长距离掘进在施工运输、通风等方面存在诸多困难；

(4) 整个跨海隧道线路存在两个坡度较大的斜坡段。下坡段掘进易出现电机车溜车事故，而上坡段则易出现盾构后退现象，严重影响施工安全。因而，大坡度掘进对工程安全施工提出挑战！

1.4 关键技术创新

湛江湾跨海隧道工程是国内首条跨海输水的盾构隧道，也是国内首次下穿 45 万吨级（亚洲最高等级）人工航道的跨海隧道。根据建设需要，本工程优化了线路选址及盾构隧道跨海方案，设计了一种新型的跨海隧道用衬砌管片，针对性开展高水压下小直径软土盾构设备的选型与适应性设计优化，解决了高水压下小直径盾构在复杂地质条件下长距离掘进的施工技术难题和海边深厚砂层深挖竖井结构的设计与施工技术难题。

首次提出高外水压力（0.65MPa）条件下衬砌设计采用两道橡胶止水加结构自防水不设二次衬砌的整体防渗体系，设计了一种结构简单、耐腐蚀、抗外压且不易二次变形、错台的跨海盾构隧道新型衬砌管片。

针对本工程小直径盾构在跨海高水压复杂地质条件下长距离掘进的特点，对盾构机的刀盘结构和刀具配置进行了适应性的设计改进，避免了在海底开仓换刀的风险；研发了“一种新型的盾构机盾尾密封装置的使用方法”，盾尾密封采用 4 道盾尾刷设计，在前刷、中刷、尾刷上增设了带折角的弹性钢片夹裹弹性钢丝，另在尾刷上增设了一个弧形向外的弹性钢片，有利于密封盾壳与洞壁的渗透通道，改进了盾尾密封性能，大大降低施工风险。

发明的“消除盾构机土舱或泥水室内泥饼的方法”，通过设置在盾构机土舱或泥水室密封隔板上的喷射孔向盾构机喷射高压液流，对土舱或泥水室内的泥饼进行旋喷切割，然后用盾构机的排渣系统对切割下来的渣土进行外排，可有效解决小直径盾构在高水压复杂

地质条件下长距离掘进的泥饼问题；研发的“一种盾构机到达掘进终点的接收结构”及“一种快速固结软基的装置及施工方法”，由接收井洞门前端的三道低强度（0.5MPa）塑性防渗墙与接收井的井壁围封成一个竖向封闭区间，形成接收井前室，在前室富水软弱地层中采用双重真空装置进行快速排水，加快前室内水位降低及土体的固结，无须进行洞门前大面积土体加固，实现盾构机在高水压复杂地质条件下的安全接收。

海边深厚强透水砂层深挖竖井采用地下连续墙、高喷墙围封与排水降压相结合的综合防渗方案。采用新型“生根”形式的地下连续墙导墙，可有效增强槽孔顶部的稳定；采用冲锤钻进施工导向孔，利用导向孔引导抓槽的地下连续墙施工新方法，能有效控制砂层中地下连续墙的垂直度，保证地下连续墙平整不开叉，从而有效保证深槽地下连续墙整体防渗效果；研发的“带有施工质量监控设备的高压喷射注浆系统”，成功克服了以往高压喷射注浆施工质量控制依赖人为经验判断的不足。

上述关键技术已成功应用于鉴江供水枢纽湛江湾跨海隧道工程。经过跨海管道工程选址选线及跨海方案的设计优化，减少直接工程投资约 15.2 亿元，节约长期运行费用 7680 万元/年，经济效益显著。湛江湾跨海盾构隧道工程于 2011 年 11 月 11 日盾构始发，2012 年 12 月 14 日盾构到达，2.75km 跨海隧道掘进仅用 13 个月，平均月进尺超过 210m。

跨海隧道工程设计技术先进，施工质量优良，管片拼装精确，接缝无错台、张开、渗漏现象，止水效果良好，工程建设达到了安全、优质、高效的目的，如图 1-3 所示。跨海隧道工程的顺利建成，为按时向湛江钢铁项目供水解决了最关键的技术问题。随着国内水利、市政等基础设施建设投入的持续推进，跨流域调水、跨江越海市政管道等项目需求越来越频繁，湛江湾工程关键技术对沿海复杂软土地区跨江越海盾构工程的建设，具有重要的借鉴意义！



图 1-3 已贯通的盾构隧道

第2章 工程选址选线及跨海方案的设计优化

湛江湾跨海管道方案是整个鉴江供水枢纽工程的难点和制约枢纽工程总体布局的关键，对枢纽工程输水线路布置及控制工程总投资具有决定性影响。湛江湾跨海管道方案论证存在以下难点及关键技术问题：

(1) 由于所处的地理位置特殊性和地形条件限制，查明湛江湾海底地形和地质条件异常困难。跨海管道选址位于湛江湾入口咽喉要道，进出港口航道繁忙，峡口水深、风高、浪急，海流条件复杂，地质勘察工作难度大。本工程跨海管道的工程地质勘察成为跨海管道方案论证的关键技术问题之一。

(2) 跨海管道穿越湛江港出海唯一的海上咽喉要道，地理位置敏感，地形条件特殊，跨海管道选址受诸多因素制约。跨海管道线路选择对枢纽工程输水线路布置及控制工程总投资具有决定性的影响。因此，跨海管道选址也是方案论证的关键技术问题之一。

(3) 跨海管道要穿越规划 45 万吨级亚洲最深的人工航道和锚地，跨海管道只能采用海底穿越方式，且埋深必须保证同时满足管道和航道的安全。峡口地区海流复杂多变，海流和航道疏浚及船舶抛锚等都会影响海底地形的冲淤演变，管道埋深需充分论证；湛江湾峡口水深大，最大水深近 50m，跨海距离超过 2.5km。在海底高水压复杂地质条件下进行长距离施工，无论采用顶管还是盾构方案，其施工风险性及穿越难度均不容忽视，国内外鲜有工程案例。因此，跨海方式的选择是跨海方案论证最关键的技术问题。

(4) 钢铁项目对供水保证率要求极高，须保证不间断供水。钢厂自设安全水池容积有限，调节能力弱，跨海管道的输水形式是采用隧道内铺双管供水还是隧道单管供水另设备用水源供水，亦需要综合比较论证。

2.1 跨海管道线路方案选择及跨海选址的优化

输水工程的线路优化既涉及工程量、工程投资、运行管理费用等定量指标，又涉及施工环境条件、征地拆迁难易等定性指标，是一个复杂的多目标决策问题。工程的选址选线和总体布置方案的科学确定，对工程的技术经济合理性具有重要作用。经规划、地质、水工、施工、征地等多专业的反复论证，本工程优选一条经济合理、技术先进的输水线路方案，为工程建设的高效、优质、安全打下坚实基础。

湛江湾呈树枝状自南向北伸入内陆 50 多公里，水源地到东海岛须跨越湛江湾。湛江湾峡口水深流急，且为进出湛江港的咽喉，航道非常繁忙，地理位置的特殊性和地形、地质条件限制，成为制约工程实施的主要障碍。常规绕行方案为管线绕过湛江湾深水航道，主管由鉴江泵站向西穿过坡头区，在欧烟楼附近以沉管方式穿过五里山港至湛江市赤坎区登陆，绕过湛江经济开发区后沿北南偏西向行至南山，设加压泵站，此后管线由南山加压

站沿北南偏东向行至森林公园后沿北南偏西方向行至湖光，再沿东北大堤侧以架空钢管行至东海岛，此后管线向东至红星水库设入库分水口，分水后支管继续向东至湛江钢铁基地的安全水池，该方案管线长约 72.7km。

水源地到东海岛钢铁基地交水点的直线距离仅 25km，湛江湾峡口深海跨越方案线路长度大大缩短，但前提是必须解决湛江湾峡口深海跨越的技术难题。经多次现场查勘拟定的湛江湾跨海方案线路由鉴江泵站起，向南偏西穿过坡头区乾塘镇至南三出海口，以沉管穿过南三出海口至南三岛，再沿南偏西方向穿过南三岛至湛江湾入海口，在湛江湾入口处海底穿过湛江湾至东海岛湛江钢铁基地，此后管道由东向西穿过钢铁基地及中科炼化厂至红星水库。湛江湾跨海方案泵站至钢铁基地分水口的主干管长 26.2km，钢铁基地至红星水库的支管长 13.30km，干支管总长 39.5km。

从线路长度、泵站级数及装机规模、征地移民、工期及施工难度、工程投资及运行费用等方面对两方案进行综合比选，管道线路方案比较列于表 2-1。

线路方案综合比较表

表 2-1

项目	线路 1(湛江湾跨海方案)	线路 2(绕行方案)	优缺点比较
线路长度	39.5km	72.7km	绕行方案线路长度增加 33.2km,其线路长度是湛江湾跨海方案的 1.85 倍
泵站级数及装机规模	1 级 10000kW	2 级 20780kW	绕行方案管线长,线路水头损失增加一倍,需要增设加压泵站一座,装机增加 10780kW
征地移民	管线所经过地区大部分为水塘、林地和水田。永久征地 39.6 亩,临时征地 1712.67 亩,搬迁人口 126 人,征地移民投资 2919.39 万元	穿过湛江市霞山居民住宅区、商业区、工厂、学校。永久征地 67.4 亩,临时征地 2999.49 亩,搬迁人口 982 人,征地移民投资 6827.11 万元	湛江湾跨海方案征地比绕行方案少、搬迁量不大,征地投资少 3072.04 万元;绕行方案影响范围广,企业、人口搬迁处理复杂,征地投资大
施工难度及工期	沿线可利用的场地较宽阔,可满足工程各施工项目所需临时征地要求。南三出海口沉管施工长度 1.213km,最大水深 9.2m,施工难度较大;湛江湾跨海盾构长 2.5km,航道水深近 50m,施工难度大	沿线部分经过城区,施工场地布置较困难。五里山港沉管施工长度 2.8km,水深较深,船只往来频繁,施工难度较大;经过湛江堵海东北大堤段为架空钢管,长度 4.4km,施工工期较长	总体上湛江湾跨海方案跨海施工难度较大;绕行方案线路较长,穿湛江市城区征地困难,施工工期较长
工程投资	134419.8 万元	286573.39 万元	湛江湾跨海方案少 152153.59 万元
运行费用	6179 万元/年	13859 万元/年	湛江湾跨海方案少 7680 万元/年

经综合比较：湛江湾跨海方案线路短 33.2km；泵站装机少 10780kW；征地、移民和拆迁量较少，实施相对容易；工程投资少 15.2 亿元；年运行费用少 7680 万元/年。虽然湛江湾跨海方案需跨越湛江湾深海航道，施工难度大，但湛江湾跨海方案在管线长度、泵

站装机规模、征地面积及难易程度、工程投资、年运行费用等方面优势明显，因此，推荐采用湛江湾跨海方案。

2.2 跨海方案的优化论证

根据实测水下地形图（图 2-1），湛江湾峡口段为海底深槽，靠内口最大水深达 50.2m，随着峡口宽度的增加，深槽向外海逐渐抬升。考虑到深槽内口南三岛端有当地重要建筑物靖海宫（即龙王庙），东海岛侧有海军南海舰队一处军事设施，因此，跨海管道选址位于峡口靠外海侧。

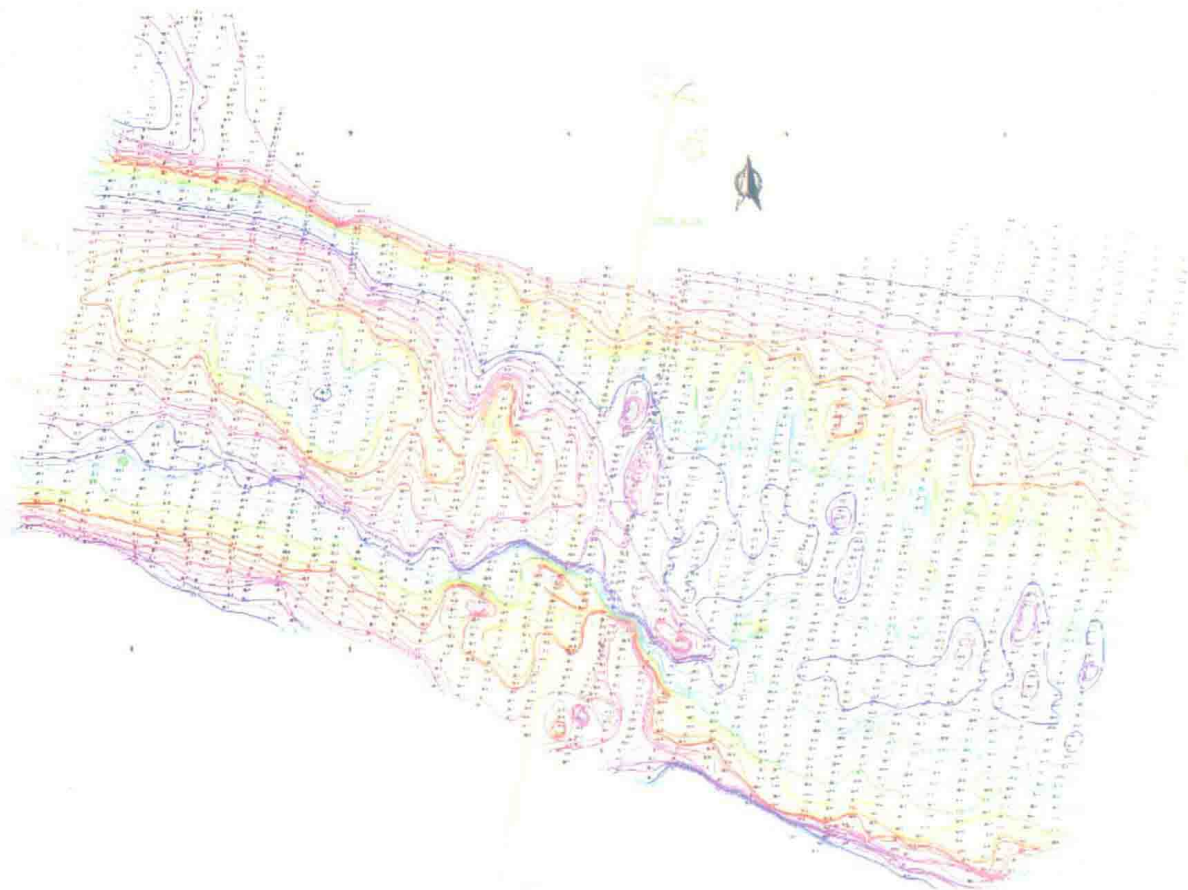


图 2-1 湛江湾跨海隧道水深图

2.2.1 跨海管道工程地质勘察

湛江湾内有南三岛、特呈岛、东头山岛和东海岛环绕，呈树枝状自南向北伸入内陆 50 多公里，湾内潮汐通道 10m 深槽向北可延伸至调顺岛附近。根据有关文献，该湾在低海面时期曾为陆上河谷，第四纪冰后期海浸淹没河谷变成现状海湾形态。南三岛与东海岛间峡口宽约 2.5~4km，海水最大深度约 50m，海底地形总体较平缓。前期物探揭示：在峡口东海岛侧海底存在一个平台和 F2 陡坎（图 2-2），F2 疑为断层错断所致，因此，有必要