

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.12.012

# 对澳供水大型原水管道工程设计

谭庆俭<sup>1</sup>, 齐利华<sup>1</sup>, 付朝晖<sup>1</sup>, 祖士卿<sup>2</sup>, 郭丹丹<sup>1</sup>

(1. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519000; 2. 珠海市水务局, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 对澳原水系统洪湾段为输水明渠, 输水规模为 $45\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 因洪湾区域的开发建设, 为保障珠海、澳门供水安全, 对该段输水明渠段进行迁改。通过对洪湾区域地形、地质、输水规模、输水线位、输水形式、输水安全、经济性等关键影响因素进行多方位的比选和分析, 原水系统迁改方案推荐采用2-DN2 000管道压力输送, 长度4.67 km。工程方案重点解决大型双管布置、各类双管阀门井设计、过洪湾涌双顶管工艺设计、管道阴极保护防腐设计等技术难点, 同时考虑输水安全, 对下游泵站前池进行了扩容改造, 使应对事故的有效响应时间增加1倍。目前该工程已建成运行一年以上, 改造后的原水系统的可靠性和安全性得到验证。

**关键词:** 对澳供水; 大型原水管道; 阴极保护

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)12-0075-05

## Design of Large-scale Raw Water Pipeline Project for Water Supply to Macao

TAN Qing-jian<sup>1</sup>, QI Li-hua<sup>1</sup>, FU Zhao-hui<sup>1</sup>, ZU Shi-qing<sup>2</sup>, GUO Dan-dan<sup>1</sup>

(1. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519000, China; 2. Zhuhai Water Authority, Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** The Hongwan section belonged to the raw water system for water supply to Macao is an open channel with a water delivery scale of  $45\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ . Due to the development and construction of Hongwan area, this open channel section needs to be relocated and reconstructed to ensure the water supply safety of Zhuhai and Macao. Based on multi-dimensional comparison and analysis of the key influencing factors in Hongwan area such as topography, geology, water delivery scale, water delivery pipeline, water delivery form, water delivery safety and economy, the raw water system relocation and reconstruction plan is recommended to adopt two DN2 000 pipelines for pressure transmission, with a length of 4.67 km. The project plan focuses on solving technical difficulties such as large-scale double-pipe layout, design of all kinds of double-pipe valve well, process design of double-pipe jacking through Hongwan River and design of pipeline cathodic protection and anticorrosion. Meanwhile, considering the safety of water transmission, the front pool of the downstream pumping station is expanded and reconstructed to double the effective response time to accidents. At present, the project has been built and operated for more than one year, and the reliability and safety of the reconstructed raw water system have been verified.

**Key words:** water supply to Macao; large-scale raw water pipeline; cathodic protection

### 1 工程概况

原水, 其洪湾段起点为广昌泵站, 沿途经过挂铤角水闸、洪湾输水明渠, 下游穿过洪湾涌进入洪湾泵对澳供水系统主要对珠海主城区和澳门输送

站,现状输水规模为 $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。随着洪湾片区的开发建设,为保障珠海、澳门两地原水输送安全,政府启动该段原水系统改造工程。

### 1.1 地形地貌

现状输水明渠(见图1)自西向东横穿洪湾西片区,宽约15~100 m。项目实施前,洪湾西片区还未开发建设,现状多为鱼塘、藕塘和种植地,地形较平坦,竖向标高为-1.5~2.0 m,大部分标高低于0.5 m;北侧为有髻山,山脚有沿线村庄;东侧紧邻洪湾涌,涌宽度约130 m,输水明渠穿越洪湾涌即到达洪湾泵站。场地范围周边建筑物较少,交通不便利,无进场道路,建筑材料、大型设备进退场较难,工程环境条件较差。

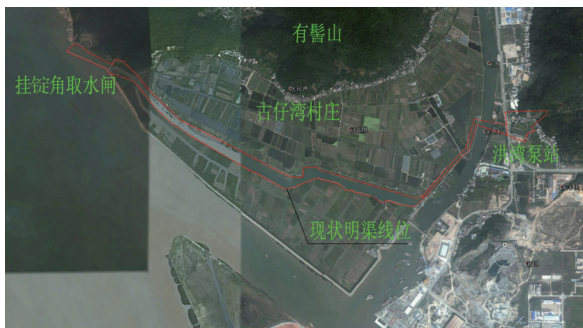


图1 洪湾段现状原水明渠

Fig.1 Current open channel of raw water in Hongwan

### 1.2 地质条件

根据工程地质勘测报告,场地内埋藏的地层依次主要有素填土层( $Q_{ml}$ )、第四系海陆交互相沉积层( $Q_{mc}$ )和残积( $Q_{el}$ )层,基岩为燕山期花岗岩( $\gamma_y$ )。其特征如下:①填土层( $Q_{ml}$ )。为新近堆填,主要由黏性土组成,该层分布广泛,除水上钻孔外,各钻孔均揭露该层,层厚0.70~6.10 m。②第四系海陆交互相沉积层( $Q_{mc}$ )。淤泥,流塑状态,含有机质及少量贝壳碎屑,局部含大量粉细砂。该层分布广泛,揭露层厚0.80~28.10 m。淤泥质粉砂,饱和、松散,主要成分为石英,含约10%~20%淤泥质黏粒,揭露层厚1.0~9.50 m。中砂:饱和、稍密,主要成分为石英,含约5%~10%的黏粒,局部夹粒径1~3 cm砾石,揭露层厚1.0~11.20 m。黏土:可塑,黏性好,韧性强,揭露层厚1.20~12.90 m。③第四系残积层( $Q_{el}$ )。砾质黏性土,可塑,系花岗岩风化残积产物,揭露层厚2.40~10.60 m。④燕山期( $\gamma_y$ )花岗岩,全风化花岗岩:大部分矿物已风化成黏土,岩芯呈硬

塑土柱状,揭露厚度0.80~11.0 m。强风化花岗岩:岩石显著风化,岩芯呈土夹碎块状,合金较难钻进,揭露层厚度1.30~2.80 m。中风化花岗岩:岩芯多呈碎块~短柱状,裂隙稍发育~较发育,裂面见铁质浸染,揭露层厚度0.30~3.50 m。

## 2 输水方案论证

因洪湾片区的开发建设,对现状输水明渠进行改造,从输水规模、输水形式、输水线路等三方面对工程方案进行论证。

### 2.1 输水规模

为进一步保障澳门原水供应,根据《粤澳2011年合作框架协议》,珠澳两地协作实施了对澳供水管道系统,洪湾段原水系统属于系统上游起端。本工程原水系统改造规模,在现状规模 $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 基础上,累加 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模;并依据《珠海市城市规划技术标准与准则》,从原水供水量需求和供水安全性考虑,为远期原水系统留有余地,因此本工程原水系统改造规模为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 2.2 输水形式

大型供水系统中常用输水方式有重力输水、加压输水、重力和加压组合输水等形式,对澳供水系统洪湾段现状为加压和重力输水组合模式。

因洪湾片区开发建设,从建设用地和水质保护方面考虑,不再适合明渠输水方式,因此对现状输水明渠进行改造,针对“暗渠重力输水”和“管道加压输水”两个备选方案进行详细论证。

① 暗渠重力输水方案:输水规模为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,暗渠采用钢架混凝土结构,粗糙系数取0.014,依据现状引水明渠坡度为1/6 000,暗渠坡度选用0.02%。可选择三种暗渠尺寸断面:2~5.0 m×2.0 m、2~5.0 m×1.6 m、2~4.0 m×2.0 m,分别对其进行过流能力计算和事故流量校核,经计算后推荐2~5.0 m×2.0 m暗渠断面规格。

② 管道加压输水方案:输水规模为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,管道管材选用卷板钢管。可选择三种管道尺寸断面:DN1 600、DN1 800、DN2 000,分别对其进行过流能力、水力坡降计算和事故流量校核,经计算后推荐2-DN2 000断面规格。

方案比选见表1。两方案相同点为均能满足原水输送要求,输送规模、供水安全性都可以采用有效措施进行保障。不同点在于暗渠重力输水方案

维持现有原水输水系统,本段明渠迁改对上下游系统(如泵站)影响不大;管道加压输水方案对原系统影响较大,特别是上游泵站需要改造,需提升泵站扬程和功率才能满足输水压力要求。

表 1 方案比选  
Tab.1 Scheme comparison and selection

项目	暗渠重力输水方案	管道加压输水方案
对系统运行工况影响	现状明渠改为暗渠,仍为重力输水,对系统运行工况不造成影响	重力流改为压力流,系统运行工况已发生变化,会对上游泵站和管道造成较大影响
风险分析	①渗漏风险:现浇钢筋混凝土渠道施工质量难以掌控,渗漏风险较大;②水质安全风险:渠道防渗问题难解决,外水可能渗入渠道,水质安全存在风险;③运行风险:运行风险较低,但需要调节库容;④场地淤泥层厚,对地基处理要求较高;⑤后期洪湾片区开发,场地填方会对暗渠及基础造成影响,存在安全风险	①渗漏风险:压力流,管道内压力较大,有原水外渗的风险;②水质安全风险:外水不易进入管道,但管道有腐蚀风险,影响水质;③运行风险:有水锤作用,存在爆管风险;④场地淤泥层厚,对管道地基处理要求高;⑤后期洪湾片区开发,场地填方会对管道及基础造成影响,存在较高安全风险
工程投资	渠道尺寸大,建设费用比输水管道方案高4 582.03万元	压力流管道尺寸小,投资较省
运行费用	节省能耗	需要水泵提升,运行费用比重力流多585.3万元/a
施工进度	箱涵需要分段浇筑施工,进度较慢	管道有成品购买,施工进度较快
运行管理	3~5年对渠道清洗1次,日常维护频率较低	需要定期监测,管养维护频率较高
工程占地	渠道尺寸为2~5.0 m×2.0 m,断面宽约11.0 m,占地较大,管位布置对周围建筑物及管线影响较大	管道尺寸为2-DN2 000,断面宽约5.5 m,占地相对较小,对周围建筑物及管线影响较小
结论	比选方案	推荐方案

综合方案比选,因本工程涉及对澳门供水,影响较大,需将水质保护、供水安全放在首位。借鉴珠海市以往工程经验,箱涵渠道等施工质量不易控制,渠道渗漏等问题无法完全解决,存在外水渗入渠道的风险,因此推荐2-DN2 000加压输水管道方案。

2.3 输水线路

洪湾西片区北侧为有髻山,南侧紧邻磨刀门水道,中部为鱼塘、藕塘和种植地等,区域地质从北向南逐渐变差,淤泥层厚度逐渐加大。

输水线路应选择起伏小、土石方工程量小、水利条件优越、工程造价经济合理、减少拆迁的方案;管位布置位置尽可能按道路规划管廊带布置,充分考虑与用地及其他管线的综合性。经分析论证后确定项目输水线路分为三段进行设计:①洪湾中心渔港段(挂锭角—南湾大道段),输水线路选择有髻山坡脚,其地质条件好,且为规划绿地,可节省工程投资和建设用地。②港平五路段(南湾大道—洪湾涌段),输水线位选择规划管位实施,同时兼顾用地、其他管线的综合性和减少征地拆迁。③洪湾涌段(洪湾涌—洪湾泵站前池段),输水线位重点考虑与泵站前池接驳,及与现状过洪湾涌输水管的施工安全间距。

3 工程设计

3.1 输水管道布置

两根大口径管道敷设时,需考虑占地、投资、施工、维护抢修间距、爆管水冲击影响等因素。因洪湾区域开发建设,要求本工程先行建设,管道布置时还要考虑管廊带内各类规划管线布置、输水管道穿越规划道路和规划排洪渠等需预留埋设深度,及后续市政管线施工建设对本工程输水管线安全影响。本工程在减少占地和节省工程投资的前提下,兼顾检修等因素,双管中心距离控制在4.5 m;纵向布置覆土控制在1.5~2.5 m,管道横断面见图2。

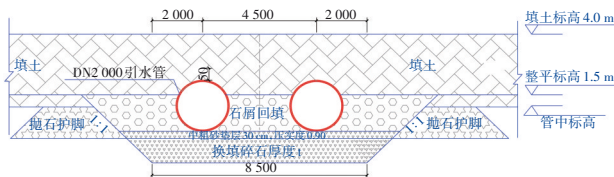


图2 管道横断面布置(标准段)

Fig.2 Cross section layout of pipeline (standard section)

3.2 相关大样图设计

因管道规模尺寸大,且是双管布置,其配套的阀门井无国家标准图集,从集约地下空间、运维方便、有效监控等方面考虑,设计大口径双输水管道阀门井(见图3)、排气阀井(见图4)、排泥阀井(见图5)等大样图,并获得了运营管理部门的认可。



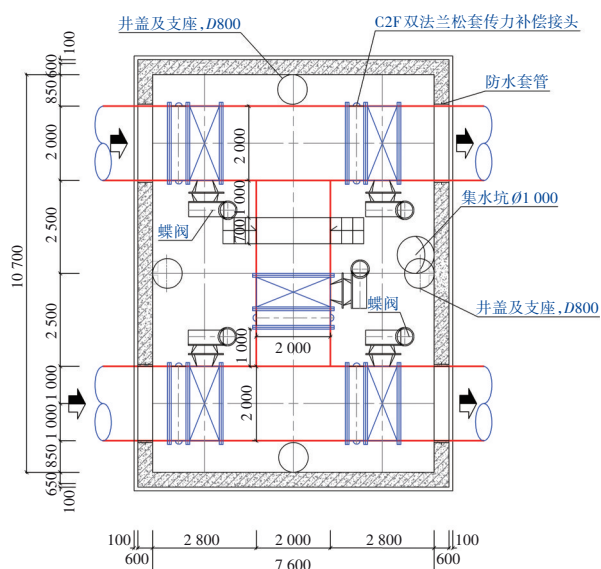


图 3 蝶阀井大样图

Fig.3 Detailed drawing of butterfly valve well

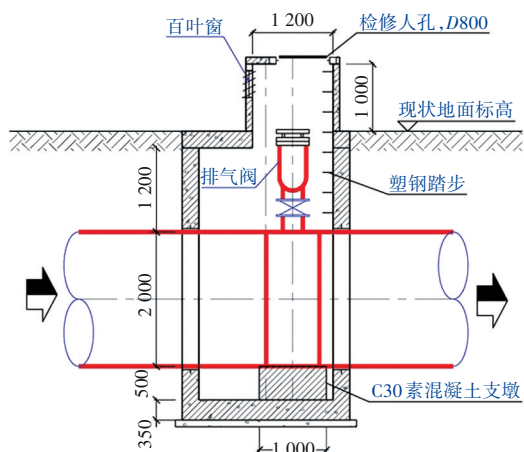


图 4 排气阀井大样图

Fig.4 Detailed drawing of exhaust valve well

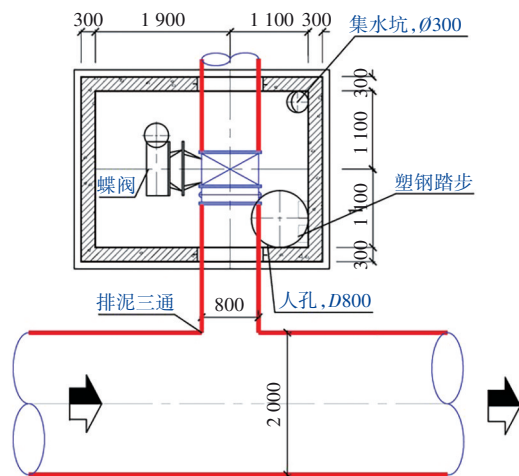


图 5 排泥阀井大样图

Fig.5 Detailed drawing of sludge discharge valve well

### 3.3 穿越洪湾涌双顶管工艺设计

管道过洪湾涌采用双顶管施工工艺,双管道间的相互影响是一个复杂的动态三维过程,受多种因素制约,包括相邻管道推近时附加荷载的增加、管道推过时土体的弹性恢复<sup>[1]</sup>。设计通过严格的计算确定顶管井尺寸、双顶管的横向间距、同步顶进错位纵距等;实施过程中实时关注相互干扰、轴线偏差控制和顶管出洞等关键问题。

顶管工作井净空尺寸为 $\varnothing 16.0\text{ m}$ (见图6),顶管接收井净空尺寸为 $\varnothing 11.0\text{ m}$ ,井深为 $15.1\text{ m}$ ,双管横向间距 $4.0\text{ m}$ ,工程顶管段最终顺利完成通水。

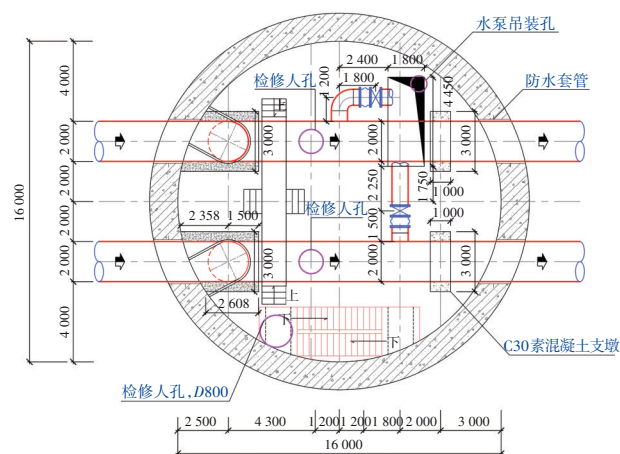


图 6 双顶管工作井大样图

Fig.6 Detailed drawing of double jacking working well

### 3.4 管道地基处理设计

工程管道沿途穿越山脚、现状水塘、河涌等,且地质复杂多变,为确保管道地基承载力和沉降满足要求,因地制宜、经济合理地确定地基处理方案。根据管底土层分布,分段采用了天然地基、换填垫层法人工地基、水泥土搅拌桩复合地基、管桩基础等。为协调不同处理方式的工后沉降差异,确保管道均匀受力和变形,在不同地基处理方式之间设置地基处理过渡段。

### 4 管道系统防腐设计

2-DN2 000 输水管道管材选用直缝卷板钢管, Q235;壁厚 $18\text{ mm}$ ,顶管段壁厚 $20\text{ mm}$ ,管道接口采用焊接。为保证钢管的使用寿命,提高对澳供水的安全性和保障性,输水管道采用覆盖层防腐设计和牺牲阳极阴极保护设计<sup>[2]</sup>。

#### ① 覆盖层防腐

根据珠海市《钢制管道防腐技术标准(试行)》

的要求,管道采用覆盖层防腐,其外防腐采用环氧煤沥青涂料,加强级,厚度 $\geq 400\ \mu\text{m}$ ;内防腐采用无毒饮水仓涂料,厚度 $\geq 200\ \mu\text{m}$ 。

## ② 牺牲阳极阴极保护

根据工程地质勘测报告,管道线位多位于填土层和淤泥层,地下水位较高,pH为6.5,采用等距离法测量现场的土壤电阻率,实测现场环境土壤电阻率为 $1.0\sim 33.9\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

依据实测的土壤电阻率,牺牲阳极选用镁合金牺牲阳极,其填包料配方为石膏粉:膨润土:工业硫酸钠=75:20:5(质量分数比);采用D型截面<sup>[2]</sup>,单支阳极质量为21.8 kg,多组布置。

管道自然电位 $-0.55\ \text{V}$ (相对于硫酸铜参比电极);管道保护电流密度 $100\ \mu\text{A}/\text{m}^2$ ;阳极有效电位差 $0.63\ \text{V}$ ;实际消耗率 $7.5\ \text{kg}/(\text{A}\cdot\text{a})$ ;设计寿命25年;备用系数2.5。

通过计算,镁合金阳极采用大分散、小集中的方式布置,即每隔约110 m布置3组牺牲阳极,每组采用2支预包装镁合金牺牲阳极,共布置252支,立面布置见图7。牺牲阳极通过沿线设置的测试桩和管道进行连接。阳极采用立式安装,与管道外壁距离为 $2.0\sim 5.0\ \text{m}$ ,阳极间距为 $3.0\ \text{m}$ 。

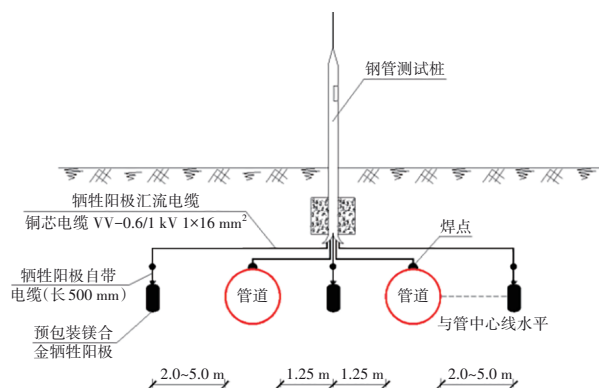


图7 牺牲阳极立面图

Fig.7 Sacrificial anode vertical view

## 5 洪湾泵站前池扩容

原水系统洪湾段现状输水明渠宽 $15\sim 100\ \text{m}$ ,兼有原水输送和储蓄调节功能,确保供水安全。输水明渠改造采用管道输送后,规模扩增至 $80\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ ,且原水储蓄调节功能大大减弱。为应对输水规模扩大、调蓄功能减弱等问题,从调蓄、安全、节能等方面考虑,对下游洪湾泵站前池进行扩容处理。

洪湾泵站前池两侧用地为防护林地和绿化,因此考虑在泵站红线用地范围内,对前池部分岸线进行扩容,增大有效容积。洪湾泵站前池设计最低水位为 $-2.57\ \text{m}$ ,最高水位为 $0.40\ \text{m}$ ,设计平均水位为 $-1.27\ \text{m}$ ,现状前池原水有效调节容积约为 $2.34\times 10^4\ \text{m}^3$ ,改造后的前池有效调节容积为 $4.70\times 10^4\ \text{m}^3$ 。经计算,洪湾泵站前池扩容后,在应对上游泵站突发事件时有效储蓄容积扩增约1倍,应对事故的有效响应时间由42 min延长至84 min,较大幅度增强了原水系统的安全保障能力。

## 6 工程效果

本工程于2020年12月完成竣工验收和通水,截至目前已稳定运行一年以上,改造后的原水系统的可靠性和安全性得到验证,运行效果达到设计预期。

## 7 结语

珠海对澳门已实现“双路”供水,总供水能力达到 $70\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。洪湾段原水系统作为“双路”供水的上游保障系统,对其改造后输水规模达到 $80\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ ,大幅提高了珠海和澳门供水保证率、水源抗风险能力和安全保障能力。

## 参考文献:

- [1] 张传安. 软土地区双排大口径顶管施工技术[J]. 铁道标准设计, 2009(3): 98-100.  
ZHANG Chuan'an. Double row large diameter pipe jacking construction technology in soft soil area [J]. Railway Standard Design, 2009 (3): 98-100 (in Chinese).
- [2] 徐晓明, 齐利华, 付朝晖, 等. 大口径原水管道阴极保护工程设计[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 45-47, 51.  
XU Xiaoming, QI Lihua, FU Zhaohui, et al. Cathodic protection engineering design of large diameter raw water pipelines [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (22): 45-47, 51 (in Chinese).

作者简介:谭庆俭(1979—),男,广西钦州人,本科,高级工程师,从事市政给排水设计研究工作。

E-mail:24059951@qq.com

收稿日期:2022-09-14

修回日期:2022-09-19

(编辑:孔红春)