

设计经验

大型输水干渠的多功能系统性利用研究

王 健¹, 龙文波², 韦永平²

(1. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 南宁建宁水务投资集团有限责任公司, 广西 南宁 530031)

摘 要: 通过对广西南宁市18条内河现状调查分析,大部分内河河道上游天然来水不能满足河道生态及景观要求,因此考虑进行生态景观补水,利用邕江上游老口水库,建设大型重力输水干渠实现上游自流补水功能。工程建成后城市的水质全面提高,总体水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ~Ⅳ类水质标准。干渠工程建设总长为25.57 km。通过研究大型内河补水干渠的系统布局和工艺参数,创新性地提出在原有输水系统基础上进行多功能系统性利用的可行性。经过系统比较和针对性的结构安全、系统安全、水力工况计算后,大型输水干渠输水能力按照 $228 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 运行,兼顾了近期城市原水输水和内河补水需求,有望同时解决城市水源地建设以及城市河道黑臭问题。干渠段水力坡降约2 m,节约工程投资6亿多元,具有明显的经济效益和社会效益。

关键词: 输水干渠; 水生态环境; 原水; 内河补水; 系统性利用

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)22-0041-06

Multifunction Research of Large Water Transfer Tunnel

WANG Jian¹, LONG Wen-bo², WEI Yong-ping²

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Nanning Jianning Water Construction & Investment Co. Ltd., Nanning 530031, China)

Abstract: By analyzing the existing 18 river conditions of Nanning City, the natural water coming from the upper reaches of most inland rivers could not meet the river ecology environment and landscape rudiments. It was feasible to construct large water tunnel to transport Laokou upper zone reservoir water to supplement fresh water into city rivers. The water quality of inland rivers would be improved to Ⅲ-Ⅳ standard of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002) after 25.57 km tunnel project complement. By research on the design parameters and system layout of large river supplement tunnel, it was possible and reasonable to have raw water transfer system on existing large water tunnel. The running scale of the multifunctional tunnel was $228 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, which could meet both raw water needs for drinking water plant and river supplement requirements after proposal comparison and calculation of structure security, system safety and hydraulic conditions. As a result, the hydraulic slope in the main canal section was about 2 m, and the project investment was saved by more than 600 million yuan, which had obvious economic and social benefits.

Key words: water transfer tunnel; water ecology environment; raw water; river supplement; systematic utilization

1 背景介绍

在城市水源地进行水资源的合理开发利用并进行集中式保护,是近年来城市水源地建设规划的创新思路。邕江作为南宁市的主要河道,承担重要的水源地和景观水体等多种功能。通过建设大型长距离输水干渠进行优质水资源的输配,实现多功能系统性应用,对于解决城市水源地建设以及城市河道黑臭水质等方面问题具有重要意义,有利于推动社会文明快速发展。

1.1 引水干渠工程

通过对南宁市 18 条内河水平衡分析、水质水环境资料收集及现状调查分析,大部分内河河道上游天然来水不能满足河道生态及景观要求,因此考虑进行生态景观补水。工程利用邕江上游老口水库,建设大型重力输水干渠实现上游自流补水功能。工程建成后城市的水质全面提高,总体水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定的Ⅲ~Ⅳ类水质标准^[1]。

干渠工程建设总长为 25.57 km,建设规模利用上游老口水库在 75.00~75.50 m(库死水位~常水位间)能够满足或略大于生态补水流量 17.5 m³/s 的要求,远期可根据发展需求实现最大引水流量约 26.5 m³/s,一期工程引水流量为 9 m³/s。全程重力自流,渠道坡度为 0.01%,全程坡降为 2.3 m。

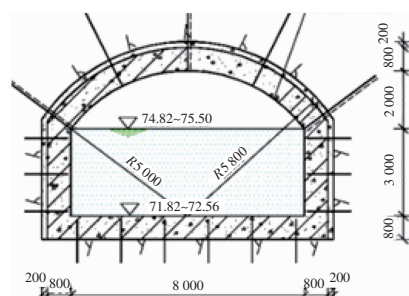
干渠工程设计取水口位于老口坝址上游 1.6 km 处,建设大型引水渠道,全程重力自流自西向东输水,补水点分别为石埠河、西明江右支、西明江左支和可利江;三处倒虹,分别为西明江右支、西明江左支和可利江等,工程已于 2018 年初全线建成具备通水条件。设计标准断面主要为双孔 4 m×4.5 m 暗渠、双孔 4 m×4 m 暗渠、单孔 8 m×5 m 直墙圆拱形隧洞和双孔 3 m×2.7 m 倒虹穿越部分城市内河河道。

工程设计布置见图 1,设计断面见图 2、3。

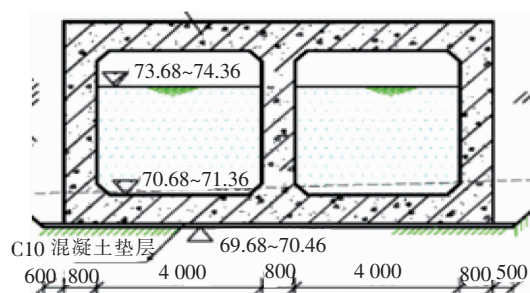


图1 内河补水设计概况

Fig. 1 Inland river supplement system layout



a. 隧洞断面



b. 暗渠断面

图2 输水干渠设计横断面(标准段)

Fig. 2 Design cross section of water transfer tunnel



图3 隧洞入口现场

Fig. 3 Site of tunnel entrance

1.2 邕江上游引水工程

南宁市城市供水水源对承担多重水功能的邕江具有很强的依赖性,大量的生产活动和建设开发与《南宁市饮用水水源保护条例》对水源保护区的保护要求产生较大的空间上的矛盾。且在城市中心下游约 20 km 正在建设邕宁梯级水利工程,建成后邕宁至老口段(城市中心区域段)水流流速变缓,水深增加,水质存在变差的风险。从供水的战略安全角度考虑,按照南宁市水功能区规划的目标,考虑将受影响区域水厂的取水口上移至邕江的老口水库上游,结合城市地理特点,可将南宁市单一邕江取水水源转变为左江、右江“两江并举”的双水源原水供水

系统。

邕江上游引水工程一期工程设计引水规模为 $17.36 \text{ m}^3/\text{s}$ ($150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 远期根据城市规划达到 $30.67 \text{ m}^3/\text{s}$ ($265 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。该工程考虑建设大型输水管渠系统, 实现自西向东的优质原水输配功能。

2 输水干渠多功能系统性方案

基于南宁市上述两项重大原水引水和内河补水工程的建设目标, 内河补水和城市原水水源地和输水配水方向总体来说按自西向东、从北向南布置。二者在输水性质上一致, 输水路由相近, 具有高度的相似性。引水干渠渠首老口至心圩江段设计路由在进入城区地域后横贯邕江北侧城市地块, 路由顺畅, 避免了新开挖管线对城市交通、建筑物等的影响, 是一条重要的城市输水通道。引水干渠的路由不仅对沿途河道有良好的辐射补水效应, 也极大地缩短了城市各水厂取水口上移后原水至城市主要水厂之间新建管道的长度, 避免反复征地拆迁、减少对社会不利影响, 以最少的时间成本和经济成本发挥干渠多重价值, 为未来地区的发展带来巨大的社会和经济效益。因此, 在系统方案设计中重点研究内河补水和城市原水多功能的集合利用可行性。

2.1 方案一: 多功能系统性利用

方案考虑把已经建成的引水干渠作为集合补水和原水的共用管涵, 方案包括建设上游三江口引水泵站、可利江泵站、心圩江泵站及附属管线工程等。工程系统布置见图 4。

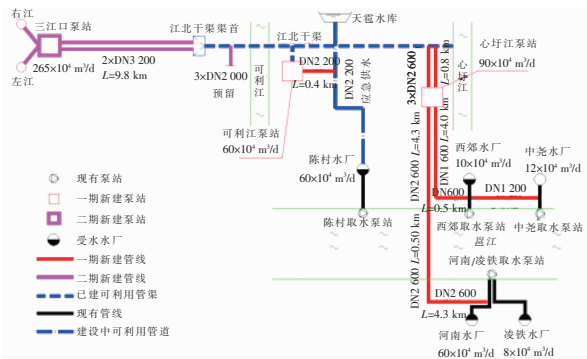


图 4 多功能系统利用干渠方案原理图

Fig. 4 Schematic diagram of multifunction system utilizing canal scheme

工程方案由以下部分组成:

① 三江口泵站工程: 取水规模为 $265 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 包括取水头部、自流管、三江口泵站及其他附属

属生产构筑物。

② 输水管线工程: 三江口泵站 ~ 江北干渠渠首, 采用 $2 \times \text{DN}3200$ 钢管。

③ 江北干渠利用工程, 利用干渠长度为 17 km 。

④ 可利江泵站及管线工程: 设计规模为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 包括 $\text{DN}2200$ 出站管线 ($L=0.4 \text{ km}$) 及调蓄水池等附属设施; 与天雹水库 - 陈村水厂原水输水管线连通。

⑤ 心圩江泵站及管线工程: 设计规模为 $90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 包括原水管 $2 \times \text{DN}2600$, $\text{DN}2600 \sim \text{DN}1200$ 输配水管线及调蓄水池等工程, 实现向西郊、中尧、河南、凌铁水厂输配原水。

⑥ 补水口设置流量计和双重止回措施, 兼顾内河补水期的水质安全和调度运行要求。

2.2 方案二: 独立系统

本方案分别独立建设引水干渠和原水输水系统。原水系统方案包括建设三江口引水泵站、西郊泵站及附属管线工程等。引水干渠建设内容为大口径输水管涵系统, 工程系统布置见图 5。

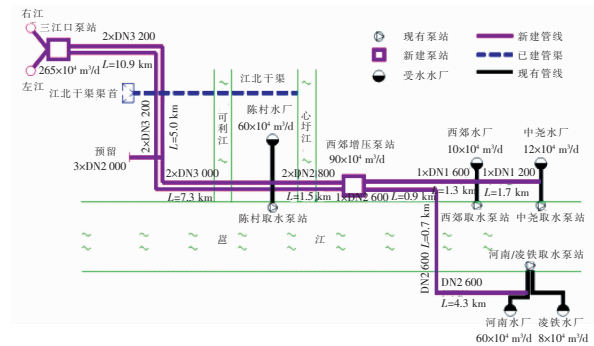


图 5 独立系统方案原理图

Fig. 5 Schematic diagram of independent system scheme

工程方案由以下部分组成:

① 三江口泵站工程: 取水规模为 $265 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 包括取水头部、自流管、三江口泵站及其他附属生产构筑物、建筑物。

② 西郊泵站工程: 设计规模为 $90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 包括西郊增压泵房、配电设施、管道接管井等附属工程; 泵站采用分压输水的方式, 其中 3 台 (2 用 1 备) 水泵专供西郊水厂, 其余 9 台 (7 用 2 备) 满足中尧、河南、凌铁水厂的输水要求。

③ 输水管线工程:

a. 三江口泵站 ~ 石埠分支点, 采用 $2 \times \text{DN}3200$

钢管,沿右江东岸敷至石埠分支点,本段管线敷设管中心高程约为90 m,采用顶管敷设。

b. 石埠分支点~陈村取水泵房,采用 $2 \times \text{DN } 3\,000$ 钢管。

c. 陈村水厂分支点~西郊泵站,采用 $2 \times \text{DN } 2\,800$ 钢管。

d. 西郊泵站~西郊取水泵房,采用 $\text{DN } 1\,600$ 管;管线出站后穿越心圩江,沿心圩江东侧敷设至江北大道,继续沿江北大道北侧向东敷设至西郊取水泵房。

e. 西郊取水泵房~中尧取水泵房,采用 $\text{DN } 1\,200$ 管,管线沿江北大道北侧敷设至中尧取水泵房。

f. 西郊泵站~河南水厂取水泵房,采用 $\text{DN } 2\,600$ 管;穿越心圩江后向南敷设至江北大道,穿越防洪堤后向南穿越邕江,后沿江南大道南侧敷设至河南水厂取水泵房。

④ 内河补水工程(已建成):建设总长为25.57 km的封闭式暗涵输水干渠,根据流量设置多种形式封闭断面,设计最大输水能力为 $26.44 \text{ m}^3/\text{s}$,渠底坡度为0.01%,在多个河道设有补水口,与原水引水成为独立的系统。

2.3 方案比较

上述两个系统方案的主要工程量差别体现在是否多功能系统性利用输水干渠、原水增压泵站数量、管线长度以及征地面积等方面。两个方案的工程投资、常年运行费用动态比较见表1。

表1 系统方案比较

Tab. 1 Comparison of system schemes 万元

项 目	集合利用方案	独立系统方案
主要优点	1. 建设难度小; 2. 双系统总投资低,重力流运行费用低	1. 系统独立,管理难度低; 2. 泵站数量少
主要缺点	1. 泵站数量多; 2. 多系统运行调度管理要求高	1. 城市内建设施工难度大; 2. 双系统总投资高,压力流运行费用高
第一部分费用	316 825.22	379 019.34
年运行费用	4 325.62	4 658.98
总投资	470 530.83	505 967.70

重力流渠道最大的优点在于输水能力强,水力坡度小,节能效果明显。本工程输水量大,距离长,集合利用现有已经建成的干渠进行大规模输水具有

十分理想的节能效果,并且对地下空间的占用影响也小于管道工程,从投资上也具有明显优势。多功能系统性利用方案节约了大量管道的投资和征地拆迁工程量,工程建设难度小,通过一定的技术措施可兼顾内河补水和原水输水的功能,且工程总投资及年运行费用均较低,对于充分利用现有水利设施,发挥其经济和社会价值有重要意义,因此设计推荐选用该方案。

3 系统利用研究

江北干渠最初设计功能为枯水期向内河提供生态补水水源。如利用作为城市水源原水管渠,除了具备输水工艺的基本功能外,还必须具备输水安全性、系统安全、水力工况满足调度运行等条件。

3.1 水质安全

① 干渠本体的水质安全

干渠本体采用混凝土为S6抗渗混凝土,限制裂缝0.2 mm,迎水面采用嵌缝材料,寿命长、耐候性、抗变形、拉伸强度高、延伸率大,对基层收缩和开裂变形适应性强,抗酸性、抗碱性、防腐防水性能优越,使用寿命在50年以上。

② 外界环境产生的水质安全

外界环境对干渠的影响主要来自隧洞渗入、沿线止水带渗入、补水口河道水渗漏、沿线其他排水管道等可能存在的污染源。根据现场采集的隧洞水质检测的结果除大肠菌群明显超标外,江北干渠的地下水渗入各项水质指标均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类水质,未发现有毒有害污染物的存在。内河补水或非补水期间,改造补水口设置双道闸门和浮箱拍门,可杜绝内河水倒灌。

3.2 线路安全

输水干渠用地基本为自然山岭和基本农田,基本无人为破坏和综合管线污染隐患,而进入主城区则建筑物密集,路由优先选择两侧建筑物较远、开发密度较低的地块进行布置,已最大程度地规避了污染隐患。线路主要的开发建设区域、地铁、城市燃气管、污水管等均距离干渠20 m以上,埋深3 m以上,可能产生的自然灾害影响、施工影响、开发建设破坏、人为破坏的威胁很小,足以保证日常输水的稳定可靠。而一旦干渠发生事故或停役检修,各水厂现状取水泵房仍可立即启用,原水输水安全不受影响。

3.3 系统安全

江北干渠由隧洞、暗渠等组成。由于干渠的隧

洞和暗渠连通处未设置有效的分隔阀门,因此江北干渠无法实现单孔通水的功能。且管线顶管沿线有较多的倒虹段,存在管道检修需要。为保障管渠运行安全,建议每隔一定运行时间后进行停役检修,对运行情况及时总结反馈。

国内大型引水工程如南水北调工程等均存在不定期的停产检修制度,沿线配套的水厂在南水北调工程停产、检修期间需各水厂切换原水源进行制水或设置调蓄水池用于原水调度。此外,类似如上海的青草沙水源地原水工程虽未明确停役检修,但允许工程在突发事故时采用如下系列措施确保原水供水安全:

- ① 加强对干渠的立法保护和日常巡检工作;
- ② 设定输水线路的检修计划和检修措施;
- ③ 启用现有各应急原水管线向水厂输水;
- ④ 设立清水管网的应急调度措施;

⑤ 如遇特别重大原水事故时,考虑向市政府申请启用现状取水泵站应急取水。为防止水质变差,在现有泵站设有投加粉末活性炭、高锰酸钾等原水预处理工艺。

3.4 水力工况核算

干渠整个沿线的尺寸变化较多,整体呈现起端断面大、后段断面小的设计,根据推荐方案,利用江北干渠作为内河补水与邕江上游引水工程共用的输水通道,水力计算考虑兼顾城市原水和内河补水的近远期输水能力复核,可以按照三个设计工况进行水力计算,详见表 2。在上述的水量情况下,逐段对渠道水头损失进行计算。分别按照明渠均匀流计算。计算时由于渠末端水量和断面尺寸倒推上游水位,对于矩形与城门洞型隧洞渐变段考虑水头损失和因流态变化产生的水跃或壅水造成水位变化^[2]。推算到渠道首部城门洞型时采用插值法确定水深,水力计算按照漏损和自用水系数 10% 计算。从表 2 来看,工况 A ($285 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 包含内河补水) 和工况 B ($265 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 不含内河补水) 总规模相差仅 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 但由于从西明江至心圩江这一段管渠长度为 8 660 m, 占整个干渠总长的 50% 以上, 该段暗涵的断面尺寸较小。工况 A 在该段合计输水量为 $258.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 工况 B 该段输水量为 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 过水量相差接近一倍, 使流态为满管非均匀流, 造成沿线的水头损失迅速增加 (占全部的 90%), 导致工况 A 的起始段水头损失增加十分明

显, 水头超越洞顶形成满管流, 超出了原干渠的最大输水能力, 因此工况 A 不建议采用。工况 B 虽未出现明渠满流的情况, 但水位已经达到渠道顶部的泄水孔, 水位波动容易造成水量损失, 因此对系统的安全稳定运行有影响。工况 C 水量比工况 B 减少 $37 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 水力计算结果表明起始端的水深 3.526 m 与原设计水深 3.0 m 十分接近, 且经核算后仍处于安全的运行范围, 干渠的稳定运行不受影响, 可以作為一期工程的推荐调度运行模式。

表 2 水力工况核算

Tab. 2 Hydraulic calculations

工况概述		A: 总规模 $285 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 包含内河补水 $135 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (一期 $78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ + 二期 $57 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 和一期 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 城市原水	B: 总规模 $265 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (一期 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ + 二期 $115 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 城市原水	C: 总规模 $228 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, (一期 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 城市原水 + 一期 $78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 内河补水)
节点 水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	石灵河 1	12.96	0	12.96
	石埠河 2	12.96	0	12.96
	石埠泵站 2a	0	115	0
	西明江左支 3 (4#)	4.32	0	4.32
	西明江右支 3 (5#)	4.32	0	4.32
	可利江 4	25.92	0	25.92
	可利江泵站 4a	60	60	60
	心圩江 5	17.28	0	17.28
	心圩江泵站 5a	147.02	90	90
引渠起始端水深/m		6.837 超洞顶	3.979 超泄水孔底	3.526

通过上述不同工况对比可以看出, 选择合理的运行调度模式, 可以使干渠发挥多系统的功能性利用作用, 兼顾近期向受水水厂供水需求和一期内河河道补水能力, 使现有渠道系统功能得到有效的利用和发挥。

3.5 远期工况

对于远期出现的水量增长较多的情况, 干渠已经难以承担水量进一步增加的工况。但可以考虑首先满足输送城市原水的功能, 在非高峰日情况下干渠的剩余输水能力用于河道补水, 剩余补水缺口通

过多种形式予以补充。此外还考虑利用海绵城市、污水厂尾水回用等多种补水方式,多渠道多方式地进行内河补水规划实践。

4 工程设计

为了更好地利用干渠作为原水输水渠道,补水的同时防止外界污染,加强干渠的输水水质安全性和运维便利性,对输水干渠进行了改造,工程主要设计内容:

① 工艺改造:增设石埠泵站接管点;可利江、心圩江泵站接管点开孔接管分别与可利江、心圩江泵站连接。

② 防污染措施:内河补水口增设双层单向拍门及溢流井防止河水倒灌;对干渠沿线的检修车辆进入渠道进行混凝土墙植筋封堵,顶部另开设备孔。

③ 调度运行:对补水点设置自动流量监控设施,优化双系统调度运行。

④ 检修维护:对于常年运行可能存在的干渠底部污泥淤积的现象,干渠首段设置大型吊装孔,便于铲车进入渠道清扫。

⑤ 停役工况:事故或停役检修期间各水厂的现有取水泵房可作为应急取水口取水,保障水厂生产需要。

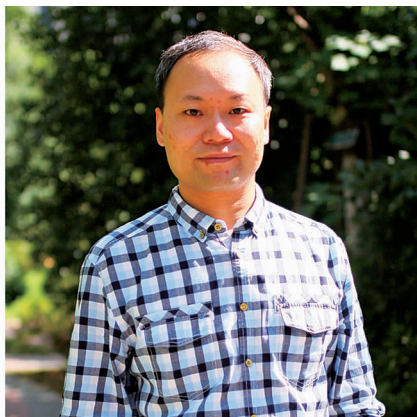
5 结语

大型原水输水干渠设计断面大,输水非满管流能耗低,具有一定的挖潜能力。通过对渠道原设计工况和多功能系统性工况的水质、线路、系统、水力等方面的参数论证和技术研究,创新地进行系统调度管理,为城市大型水源调水工程的设计、建设和运

营提供了新的思路。

参考文献:

- [1] GB 3838—2002,地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
GB 3838 - 2002, Environmental Quality Standards for Surface Water[S]. Beijing:China Environmental Science Press,2002(in Chinese).
- [2] 柯葵,朱立明,李嵘. 水力学[M]. 上海:同济大学出版社,2000.
Ke Kui, Zhu Liming, Li Rong. Hydraulics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2000(in Chinese).



作者简介:王健(1978 -), 男, 上海人, 硕士, 高级工程师, 担任上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司第二设计院工艺所所长, 从事市政给水工程设计和研究工作, 多次获得全国优秀工程勘察设计奖。

E-mail: wangjian5@smedi.com

收稿日期:2018-04-17

科学防御水旱灾害,有效促进人水和谐