

小流量引水隧洞优化设计

朱成冬¹，李勇¹

(中水珠江规划勘测设计有限公司，广东 广州 510610)

摘要：纳坝水库引水隧洞为小流量小断面隧洞，施工困难。为了降低施工难度，加快施工进度，控制工程投资，通过优化隧洞布置，取消了右岸引水隧洞，采用左岸由导流洞改建的泄洪洞中布置引水钢管的方式，创造性的把三条隧洞合而为一，工程取得了良好的效果，对其他类似工程的设计有借鉴作用。

关键词：引水隧洞；小流量隧洞；隧洞优化；三洞合一

中图分类号：TV672.1

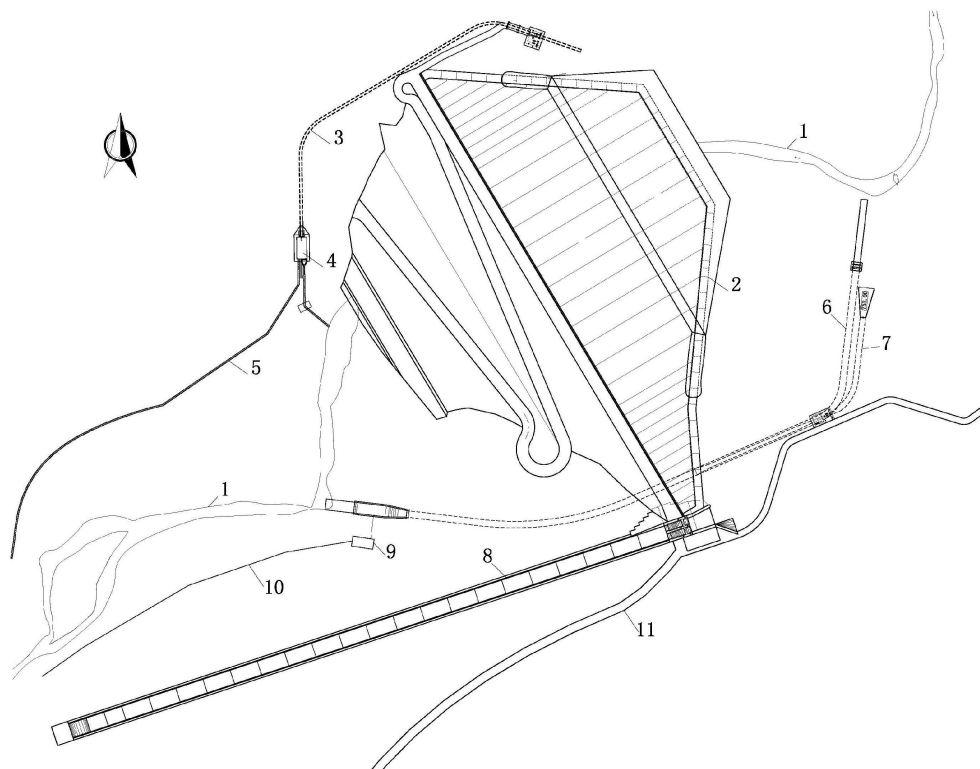
文献标识码：A

1 概述

我国西南地区受人口和地形限制，人口和灌面布置较分散，一般采用分散水源进行供水和灌溉，引水规模较小。当这些小流量引水工程取水建筑物采用隧洞型式时，隧洞的设计尺寸一般受最小施工断面控制。按最小施工断面控制的隧洞施工难度大，实际施工单价高，工程竣工决算容易超出初设概算。如何优化小流量引水隧洞的结构和布置，是关系到工程工期和投资的重要问题。本文依托贵州纳坝水库开展引水隧洞优化研究，为日后类似工程的设计提供参考。

纳坝水库工程位于贵州省黔西南州望谟县，望谟河的一级支流纳坝河上，坝址位于纳坝河与望谟河汇合口上游约 1km 处河段上，距望谟县城约 12km。纳坝水库工程的主要任务是防洪、供水和农田灌溉。工程规模为中型，大坝为 2 级建筑物，取水和泄洪等建筑物为 3 级建筑物。水库正常蓄水位 790m，死水位 759m。年城镇供水量 679 万 m³，年灌溉供水量 52.3 万 m³。引水隧洞最大引用流量为 0.425m³/s，其中供水灌溉流量 0.356 m³/s，生态流量 0.069 m³/s。

工程于 2013 年 6 月开工建设，2017 年 3 月下闸蓄水，2019 年完成竣工验收。



1-纳坝河, 2-大坝, 3-原设计引水隧洞, 4-原设计高位水池, 5-原设计输水管线, 6-导流洞, 7-泄洪洞, 8-溢洪道, 9-优化后高位水池, 10-优化后输水管线, 11-进场路

图 1 工程总体布置示意图

2 工程基本地质条件

2.1 引水隧洞地质条件 原引水隧洞布置于右岸, 设计进口底板高程为756m, 出口底板高程753.57m, 总长305.5m。

隧洞进出口均为斜向坡, 地形坡度 $25\sim 40^\circ$, 覆盖层厚 $1\sim 2\text{m}$, 为残坡积物砂质粘土夹碎石, 强风化厚度 $4\sim 7\text{m}$, 自然边坡及开挖边坡稳定。

洞室围岩依次为三叠系中统边阳组第二段 (T_2b^2) 青灰色中至厚层状细砂岩、粉砂岩夹泥页岩, 三叠系中统边阳组第一段 (T_2b^1) 泥质粉砂岩、粉砂质泥岩夹钙质砂岩, 三叠系下统罗楼组 (T_11) 浅灰、青灰色薄~中厚层状页岩夹少量粉砂质页岩, 洞线与岩层走向夹角 $20\sim 61^\circ$ 。洞室除进出口段处于强、弱风化外, 其余洞段处于新鲜岩体内。洞室最大埋深51m, 洞段基本位于地下水位之下, 围岩透水性小, 施工中地下水干扰较弱。

洞身III类围岩约占54.7%, IV类围岩约占24.7%, V类围岩约占20.6%。

2.2 泄洪放空兼导流洞工程地质条件 泄洪放空兼导流洞布置于左岸, 设计进口底板高程753m, 出口底板高程724.18m, 洞高为5.5m, 总长409m。

隧洞进口段位于2号变形体上，地形坡度 $20\sim 25^\circ$ ，为顺向坡，覆盖层为粘土夹块石，厚 $2\sim 8\text{m}$ ，强风化厚度 $3\sim 8\text{m}$ ，自然边坡及开挖边坡均不稳定，须将2号变形体清除，并对开挖边坡进行支护及排水处理，以确保施工安全。隧洞出口为斜向坡，地形坡度 $20\sim 27^\circ$ ，覆盖层厚 $3\sim 8\text{m}$ ，强风化厚度 $4\sim 5\text{m}$ ，自然边坡稳定性较好。

洞室围岩依次为三叠系中统边阳组第二段 (T_2b^2) 青灰色中至厚层状细砂岩、粉砂岩夹泥页岩，三叠系中统边阳组第一段 (T_2b^1) 泥质粉砂岩、粉砂质泥岩夹钙质砂岩，三叠系下统罗楼组 (T_1LL) 浅灰、青灰色薄~中厚层状页岩夹少量粉砂质页岩，洞线与岩层走向夹角 $10\sim 72^\circ$ 。隧洞最大埋深 63m ，隧洞段大部分位于地下水位之下，围岩透水性小，施工中受到地下水的干扰较弱。

洞身III类围岩约占 38.5% ，IV类围岩约占 43.7% ，V类围岩约占 17.8% 。

3 初设方案

3.1 方案布置 初步设计水库枢纽工程总体布置推荐方案为：河床布置混凝土面板堆石坝，左岸布置溢洪道及泄洪放空洞，右岸布置引水隧洞。

1) 引水隧洞工程布置

引水隧洞布置在大坝右岸，由进口段、闸门井段、洞身段和高位水池组成，总长 305.5m 。根据环评对取水水温的要求，进口采用分层取水方式，分两层取水，进口底板高程分别为 773m 、 756m 。 773m 高程以上闸门井段采用明挖方式，以下部分采用竖井开挖。 756m 高程进口前设有压圆型引水隧洞，长 28.0m ，洞径 2.5m 。两层进水口垂直水流方向平行布置，各设一扇 $2.5\text{m}\times 2.5\text{m}$ 拦污栅和 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 平板事故闸门。闸门井采用岸塔和竖井相结合的开挖方式，顶部高程 797.70m ，底部高程 754.50 ，高 43.2m ，与岸边用交通桥连接。洞身段总长 243.0m ，进口底板高程 756.0m ，出口底板高程 753.57m ，底坡 $i=0.01$ 。洞身段为有压取水隧洞，洞径 1.5m ，隧洞出口接锥形阀室，后设 300m^3 高位水池，池内布置有 $\text{DN}500$ 下放生态环境水管和 $\text{DN}500$ 输水管，输水管线总长 6.698km 。隧洞最大引用流量为 $0.425\text{m}^3/\text{s}$ ，其中供水灌溉流量 $0.356\text{m}^3/\text{s}$ ，生态流量 $0.069\text{m}^3/\text{s}$ 。

2) 泄洪放空隧洞工程布置

泄洪放空隧洞由导流洞改建而成，布置在大坝左岸，其型式为进口段设置有压短洞的无压泄洪隧洞，由进口有压洞段、闸门井段、“龙抬头”段和导流洞段组

成，总长约 409m。进口有压洞段长 75m，为圆形断面，洞径 3.0m。闸门井为矩形井筒式结构，高 46.7m，设一扇 1.5m×2.4m 平板事故闸门和一扇 1.5m×1.8m 弧形工作门。闸门井采用岸塔和竖井相结合的开挖方式，顶部高程 797.7m，与岸边用交通桥连接。“龙抬头”段长 80m，断面尺寸从 1.5m×2.5m 渐变到 2.5m×3.5m，再渐变到 4.6m×5.5m。龙抬头段后利用导流洞段总长 220，底坡 $i=0.03$ ，为无压泄水隧洞，断面尺寸 4.6m×5.5m，出口采用底流消能。泄洪放空洞下泄洪水时，设计洪水位最大泄量 $64\text{m}^3/\text{s}$ ，校核洪水位最大泄量 $67\text{m}^3/\text{s}$ 。

3.2 优化缘由 小直径隧洞需要优化的缘由主要从工期、投资及安全三方面考虑。

1、根据当地一般企业的施工能力，如此小的施工尺寸施工通风及出渣等均较难布置，机械化施工难度较大，工期没有保障，引水隧洞的施工工期存在由非关键线路变成制约工程进度的关键线路的较大风险。

2、随着社会发展和人工工资的上涨，小断面隧洞石方开挖、钢筋制安和混凝土浇筑等的实际发生单价均较概算定额^[1]的标准要高，若不进行优化设计，工程竣工决算势必会超出初设概算。

3、原设计的引水隧洞的洞径仅 1.5m，一般施工人员都无法直立工作，安全隐患很大，且与规范要求不符。旧隧洞设计规范^[2]规定的圆形断面内径不宜小于 1.8m，而新隧洞设计规范^[3]考虑我国生活水平的提高，人们的健康水平的改善，身体增高等因素，最小施工内径提高为 2.0m。

4 方案优化

4.1 优化原则 方案优化后不能改变工程的功能和规模，因此工程优化基本原则如下：

- 1、保持引水的规模和功能不变，满足引水流量和供水灌溉高程；
- 2、要满足环评对取水水温的要求，保持分层取水的结构布置不变；
- 3、不能影响泄洪建筑物的功能。

4.2 优化思路 工程最大引水流量仅 $0.425\text{m}^3/\text{s}$ ，若按一般管线的经济流速来考虑，一根小管就可以满足引水需求。从这点出发，优化的总体思路是用一根小直径的钢管代替引水隧洞，钢管结合现有泄洪放空洞进行布置。现从分层取水、泄洪影响、引水能力和运行管理等方面分析优化设计的可行性。

分层取水方面，泄洪洞有压洞段底板高程 753m，洞径 3m，顶高程与引水隧洞 2#进水口底高程 756m 相同，有优化合并的基础，增加 773m 高程进水口即可满足分层取水要求。

泄洪影响方面，导流洞段断面为 4.6m×5.5m 的城门洞型，下泄最大洪水时，水面线最大掺气水深不足 1.5m，远低于 3.2m 高的直墙，适当缩窄后不会影响泄洪规模，泄洪方面具备优化条件。

引水能力方面，死水位为 759m，原高位水池水位为 752m，总长度约 450m。若选择 DN600 钢管，管线总水头损失不到 5m，具备优化条件。

运行管理方面，优化后取消了右岸引水隧洞及配套的闸门井和交通桥，由左岸钢管代替，引水系统改到左岸后下游管线不用跨河布置，布置更顺畅，优化后主要建筑物均集中在左岸，有利于后期运行管理。

4.3 优化方案 优化方案取消右岸引水隧洞，增设引水管道与左岸泄洪放空洞相结合。

1) 管径设计

综合考虑引水管线和输水管线的管径及高位水池水位以保证供水灌溉规模不变是方案优化设计的关键之一。引水钢管分闸门井前后两段考虑。闸门井之前钢管长约 75m，钢管尺寸主要考虑因素是有压洞段衬砌结构、事故闸门的尺寸和进口拦污栅的过栅流速。最终确定进口段钢管尺寸为 DN800 壁厚 8mm，事故闸门尺寸 0.8m×0.8m，拦污栅尺寸 1.0m×1.0m。闸门井之后段钢管长约 300m，钢管尺寸主要考虑因素是线路水头衔接、泄洪洞流态及钢管与导流洞段的结合。钢管直径越大占用导流洞段空间越大，钢管施工布置越难，泄洪流态越不易控制，出口消力池所需尺寸越大；钢管直径越小，水头损失越大，与下游输水线路水力衔接越难。最终选择 DN450 钢管，壁厚 8mm，该尺寸布置较易，泄洪洞剩余尺寸满足泄洪消能要求，仅水头损失略大。经计算^[4]，总水头损失达 15.86m，上游最低库水位为 759m，故高位水池水位需调整到 742.0m。工程通过扩大部分供水管线尺寸以减小线路水头损失，弥补高位水池调整带来的影响，以保持线路供水能力不变。经复核，前 1.6km 管线由 DN500 扩大为 DN630 可满足要求。

2) 钢管和隧洞结合设计

钢管和隧洞结合设计包括进口段、龙抬头段和导流洞段。

(1) 进口段长约 75m，DN800 压力钢管布置在隧洞左上角衬砌内，洞口中心线高程 756.0m，可保证进水口高程与原方案基本一致；

(2) 龙抬头段长约 80m，为减少对龙抬头段的影响，便于与导流洞段衔接，DN450 压力钢管布置在隧洞左下角衬砌内，左下角开挖断面适当加大；

(3) 导流洞段长约 220m，DN450 压力钢管布置在隧洞左侧，外包二期混凝土，二期混凝土宽 0.8m，高 1~2.5m。

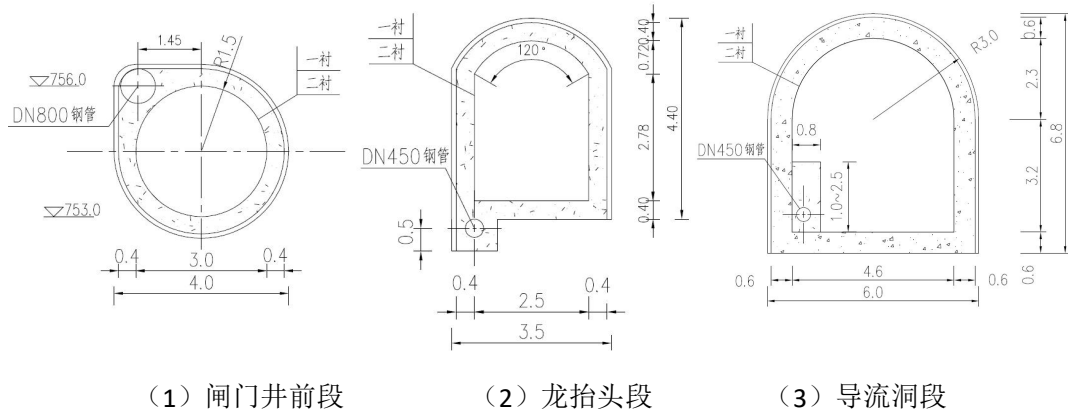


图 2 钢管布置图 (单位: m)

3) 金属结构设计

泄洪放空洞的进口事故闸门和工作闸门、1#进水口的拦污栅和隔水事故闸门以及出口工作阀均维持不变。仅 2#进水口的拦污栅和事故闸门等配合引水钢管进行了优化设计。

2#进水口的拦污栅为粗格直栅，预埋螺栓固定，不设专门清污设备。拦污栅孔口尺寸为 1.0m×1.0m，设计水头为 4.0m。事故闸门为潜孔平面滑动钢闸门，下游止水，利用水柱动水闭门，小开度提门充水平压启门，由 1 台 250kN 固定卷扬机配拉杆操作。事故闸门孔口尺寸为 0.8×0.8m，设计水头为 40.0m。在消力池末端管线最低处增设一个排污口，排污口设偏心半球阀作为工作阀。

4) 闸门井设计

引水洞和泄洪洞两闸门井功能合并到泄洪洞闸门井内，闸门井采用上大下小的结构型式，771m 高程之下的尺寸受 2#进水口和泄洪洞的金属结构设备影响，断面尺寸为 14.5m×9.3m，771m 高程之上的尺寸受 1#进水口、2#进水口和泄洪洞的金属结构设备影响，断面尺寸为 14.5m×12.5m。在闸门井内 1#进水口在事故门之后渐变到 DN450 压力钢管，压力钢管沿闸门井侧墙向下布置，在 756m 高

程与 2#进水压力钢管通过三通管连接。

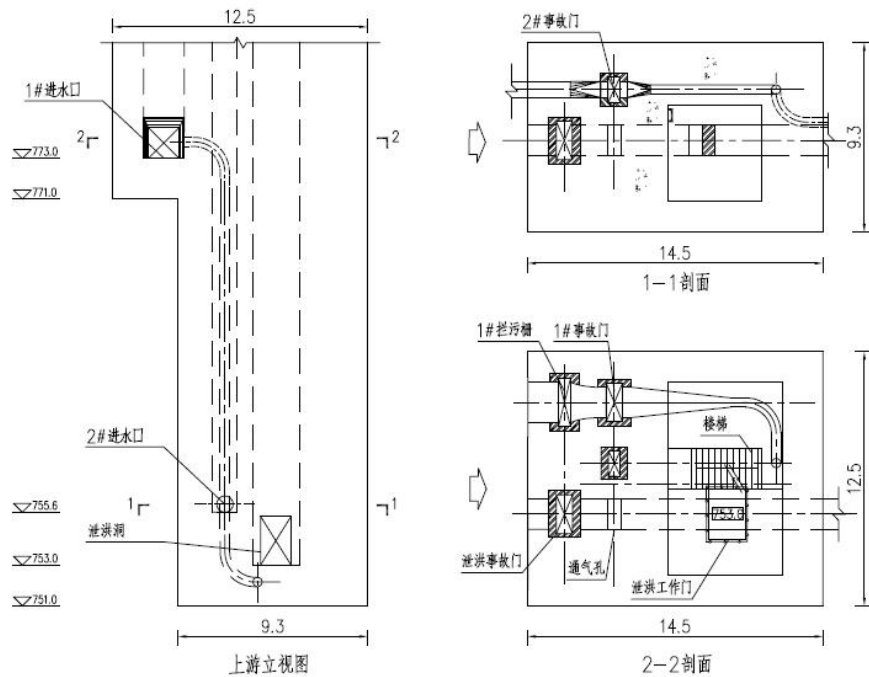


图 3 闸门井结构图（单位：m）

5) 泄洪放空洞优化设计

泄洪放空洞进口段、平板事故门和弧形工作门的布置和尺寸均维持不变，仅龙抬头末端及导流洞段的过流宽度由原来的 4.6m 变为 3.8m，泄洪放空洞的泄流能力不变，变窄后水深增加，最大掺气水深位于转弯段中点，高度由 1.49m 增加到 1.92m，满足规范^[3]要求。

6) 优化对比

方案优化前后，工程结构主要变化对比详见下表。

表 1 结构变化对比表

项目	优化前	优化后
引水洞 1#进水口	开敞式进水口	直径 2m 隧洞，长 38m
引水洞 2#进水口	直径 2.5m 隧洞，长 28m	DN800 钢管，长 75m
引水洞洞身段	直径 1.5m 隧洞，长 243m	DN450 钢管，长 300m
泄洪洞洞身段	4.6m×5.5m 城门洞，长 220m	3.8m×5.5m 城门洞，长 220m
闸门井（长×宽×高） (m×m×m)	引水洞闸门井 11×10×43.2， 泄洪洞闸门井 14×9×46.7	闸门井下部 14.5×9.3×20， 闸门井上部 14.5×12.5×26.7
2#进水口拦污栅 (m×m-m)	2.5×2.5-4.0	1.0×1.0-4.0
2#进水口事故门 (m×m-m)	1.5×1.5-40.0	0.8×0.8-40.0
高位水池水位 (m)	752.0	742.0

输水管管径	全线管径 DN500	前 1.6km 管径 DN630
-------	------------	------------------

工程优化后, 节省投资约 53 万元, 泄洪放空系统和引水系统互相独立互不影响各自的功能和使用, 泄洪放空系统泄流规模不变, 引水系统的引水能力不变, 分层取水功能不变。

4.4 施工运行情况 三洞合一变更于2014年4月11日获得批复; 同年5月5日, 隧洞进水口开始洞挖; 同年10月5日闸门井开始开挖; 2015年2月26日, 开始钢管安装; 17年2月, 引水钢管通过第三方平行检测。工程于2017年3月下旬蓄水, 2018年1月5日开始向水厂供水, 2019年顺利通过竣工验收。工程按期完工, 施工期间未发生安全事故, 安全和工期得到了保障。工程运行至今, 已为望谟县城镇人口提供了超千万方的应急供水保障; 同时还为该县高车、李子园、平郎和甘莱等易地扶贫搬迁安置点4374户18942人搬迁群众提供饮水安全保障; 2017年9月6日, 通过了一次强台风和大暴雨考验, 工程运行良好。

5 结语

1、当引水流量较小时, 采用钢管代替隧洞是一种可选的设计方案。充分利用其他隧洞的支护结构和多余空间布置钢管, 使各建筑物功能互不干扰, 是优化设计的关键。

2、纳坝水库通过把引水、泄洪放空和导流三种功能合而为一, 优化了工程布置, 能降低了施工难度和安全隐患, 节省了工程投资, 保障了施工工期。

3、引水隧洞优化后对工程的规模、功能、运行和生态环境等无不利影响, 运行至今, 工程防洪度汛、供水和灌溉等运行状况良好。

参考文献:

- [1] 水利建筑工程概算定额 2002 [S].河南: 黄河水利出版社, 2002.
- [2] 水工隧洞设计规范 SL279-2002 [S].北京: 中国水利水电出版社, 2002: 18-19.
- [3] 水工隧洞设计规范 SL279-2016 [S].北京: 中国水利水电出版社, 2016: 14-15.
- [4] 李炜.水力计算手册[M].2版.北京: 中国水利水电出版社, 2006: 33-35.

Optimal design of small flow diversion tunnel

Zhu Chengdong¹, Li Yong¹

(1. China Water Resources Pearl River Planning, Surveying and Designing Co., Ltd., Guangdong Guangzhou 510610)

Abstract: The diversion tunnel of Naba reservoir is a tunnel with small flow and small section. In order to reduce the construction difficulty, to speed up the construction progress, control engineering investment, through optimizing tunnel arrangement, and cancelled the right bank diversion tunnel, using the diversion tunnel in the left bank of the layout of diversion pipe in the tunnel, the way of the renovation, creativity becomes one of the three tunnels, construction has obtained the good effect, can be used for reference for other similar engineering design.

Key words: Diversion tunnel; Small flow tunnel; Tunnel optimization; Three holes in one

作者简介：朱成冬，男，高级工程师，主要从事水工结构设计工作。

通讯地址：广东省广州市天河区天寿路沾益直街 19 号中水珠江设计大厦 402 室；

电话：020-87117134；传真：020-38810724；手机号：15814851117；电子邮件：

421343309@qq.com。