

# 复杂水环境下的小流量大落差引水隧洞优化设计

朱成冬，唐尧，董伟

(中水珠江规划勘测设计有限公司，广东 广州 510610)

**摘要：**白牛厂工程连通引水隧洞，为受复杂水环境影响的小流量、大落差、中远距离隧洞。由于不具备日常巡视检查条件，工程运行将存在结构安全风险和水质安全隐患。本文从进口结构、纵剖面坡比、平面转角、横断面体型和出口消能方式等多方面对原设计方案进行了优化，达到了稳定流态、消除库水内渗隐患和保障工期的目的，可为其他类似引水工程的设计提供参考。

**关键词：**无压引水隧洞；复杂水环境；水质安全；优化设计

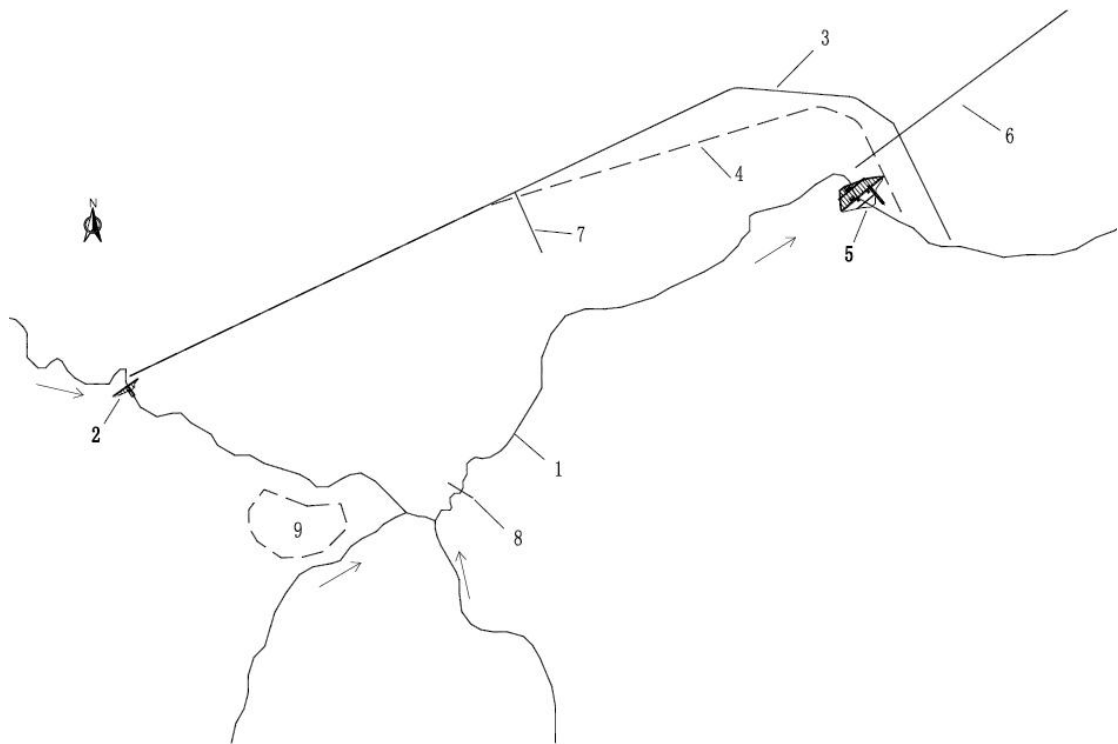
中图分类号：TV672.1

文献标识码：A

## 1 工程背景和概况

云南省德厚河流域白牛厂汇水外排工程（下简称“白牛厂工程”）位于盘龙河一级支流德厚河源头区，工程分布在文山和红河两州境内，是“172 重大水利项目”德厚水库的环保配套工程。白牛厂矿区位于德厚水库上游，矿区内土壤及水体重金属含量超标，将会严重威胁德厚水库水质安全，故实施白牛厂工程消除污染隐患。白牛厂工程总体布置可分为三部分：1) 首部拦截工程，包括牛作底坝和连通引水隧洞，负责拦截矿区上游清水并导排至德厚水库，牛作底坝为重力坝，坝高 35m，库容 25.5 万  $m^3$ ；2) 菲古水库工程，包括菲古坝和外排隧洞，负责拦蓄白牛厂矿区及区间汇水，菲古坝为面板堆石坝，最大坝高 50.5m，库容 294 万  $m^3$ ；3) 外排灌溉工程，包括干支管、泵站和高位水池等，负责将外排汇水用于农业灌溉。

连通引水隧洞的主要功能是配合牛作底坝使清水绕过菲古水库库区，将其引入德厚水库。隧洞全长约 4km，具有流量小、落差大及外围水环境复杂等特点，多年平均引水流量约为  $0.3m^3/s$ ，最大引水流量不小于  $20m^3/s$ ；隧洞进口与受水点高程落差约 145m；隧洞通过段的河床底泥和库水存在重金属超标风险。



1-德厚河，2-牛作底坝，3-连通引水隧洞（推荐方案），4-连通引水隧洞（可研方案），  
5-菲古坝，6-外排隧洞，7-施工支洞，8-一选厂回水坝，9-白牛厂矿区

图 1 工程总体布置示意图

## 2 工程环境条件

### 2.1 地形地貌

连通引水隧洞所处德厚河左岸，沿线地面高程为 1775m~2000m~1653m，为中山地形，无深切沟谷穿插，洞室沿线大部埋深为 150m~250m，只有两处稍浅为 30m~40m。地形坡度一般 20°~45°，局部基岩陡崖处坡度近 90°，库岸覆盖层较薄，植被一般，山坡冲沟多由北向南流入德厚河。

### 2.2 地质条件

连通引水隧洞进口段洞口一带地形坡度约 30°~42°，表层为残坡积碎石土，厚度 0.5~2.0m，基岩 D1p 粘土质粉砂岩节理较发育，岩体完整性差，风化程度以弱风化为主，岩层产状 335°/NE∠26°为逆向坡，天然边坡基本稳定。

线路经过地形相对平缓，未见大的滑坡、崩塌及深沟发育。大部分岩石属中硬岩，局部的页岩属较软岩，碳酸盐岩岩石白云岩由于是弱可溶岩、并与碎屑岩构成间互状岩溶含水类型，地表岩溶形态基本不发育，整体岩溶发育较弱。无高

地应力特征。岩体结构多为薄层~互层状和层状，进出口及断裂通过处为碎裂~镶嵌结构。连通引水隧洞地处鸣就 S 型构造带中段，隧洞前段与石洞冲断裂相交，交角约 75°，石洞冲断裂呈 NWW-SEE 向，倾向 SE，倾角 60°~70°，属右行平移断裂，断层破碎带宽度大于 20m，糜棱岩发育。隧洞区岩层倾角整体较为平缓。

出口段洞口地形坡度 20°~35°，洞脸边坡高处为残坡积碎石土，厚度约 2m，基岩岩性为泥盆系中统坡折落组（D2p）灰色、深灰色细砂岩、粉砂岩，节理较发育，岩体结构类型为碎裂~镶嵌结构，岩体完整程度为较破碎，风化程度以强风化为主，岩层产状 40°/SE∠30°，构成顺向坡，坡体汛期易产生滑塌。

### 2.3 环境现状<sup>[1]</sup>

水环境现状，项目工程所在区域的牛作底坝址下游 100m 地表水达标满足地表水Ⅲ类水标准；一选厂回水坝下游 100m 断面的铁、锰含量超标，其分别超过标准限值的 0.43 倍和 7.56 倍，不满足Ⅲ类水标准，需避免该段库水渗入引水隧洞。

地下水环境现状，工程区、汇水区以及相邻区域地下水环境质量现状良好，均满足地下水Ⅲ类标准。

河道底泥环境现状，菲古坝上游库区河道及坝下河道存在着重金属镉和砷含量超标，超过土壤环境三级标准，可能与当地土壤环境及白牛厂矿区多年下泄排水对河道底泥造成一定程度的污染有关。

## 3 可研方案

### 3.1 方案布置

连通引水隧洞进口布置在牛作底坝上游，出口布置在菲古坝下游，为减少投资及改善水力学条件，连通引水隧洞布置于左岸。工程可研阶段采用无闸门无压隧洞方案。连通引水隧洞由进口闸室段、洞身段、出口消能段组成，全长 3794m。布置如下：

进口闸室段顺水流向长 10m，进口底板顶高程 1786.6m，设一检修闸门；后接洞身段，洞身段为保证连通引水隧洞与外排隧洞交叉处足够围岩厚度，隧洞纵坡设两段，K3+437 前纵坡为 1：31.47，后为 1：13.44，洞身总长 3764m。引水

隧洞采用圆拱直墙横断面，尺寸净宽 2m，净高从 5.2m 渐变至 2.5m。洞身段在平面转弯 3 次，K1+862m 转角 14.5°，K3+088m 转角 37.8°，K3+252m 转角 37.1°。隧洞出口接底流消能消力池，消力池长 20m。

### 3.2 方案存在的问题

该方案存在以下不足：

1、进口无闸门控制且纵坡坡度较大，导致最大引水流量超 40 m<sup>3</sup>/s，洞内最大流速达 13.9m/s；平面布置转弯三次，最大转角 37.8°，立面纵坡变坡一次，导致洞内水流条件复杂，易发生气蚀等；隧洞长近 4km，不具备日常巡视检查条件，工程运行存在结构安全风险。

2、为满足无压隧洞净空要求，确保不出现明满流交替的情况，隧洞最大洞高达到 5.2m，高宽比达 2.6，衬砌结构受力不合理。

3、隧洞出口和菲古水库溢洪道出口距离较近，存在冲刷隐患，影响出口围岩及边坡的稳定。

4、隧洞后半段洞顶高程位于菲古水库正常蓄水位之下，存在库水内渗的风险。

## 4 方案优化

### 4.1 基本原则

针对可研方案存在的问题，提出了方案优化的基本原则：

- 1、根据工程任务和规模要求，隧洞最大过流能力不小于 20m<sup>3</sup>/s；
- 2、减小洞内流速，保证流态稳定和水流平顺；
- 3、避免洞内出现明满流交替工况；
- 4、与外排隧洞交叉处需满足围岩厚度要求，减少出口与其他建筑物运行的互相影响；
- 5、减小菲古水库库水内渗可能，降低水质污染的风险；
- 6、进口底板顶高程设在淤沙高程 1786.6m，牛作底坝和菲古坝工程布置保持不变。

### 4.2 方案一：有压隧洞方案

采用有压隧洞方案，可减小洞内流速，保证流态稳定，同时较高的洞内内压

可避免库水内渗。该方案的关键在于洞径的选择、洞线纵剖面布置及出口闸阀的选择等三方面。

#### 1) 洞径选择

拟定 1.8m、2m 和 2.5m 三个洞径方案进行技术经济比较。

从过流能力分析，上下游水头差约 145m，水头差较大，各洞径均能满足要求；从工程规模分析，根据最小淹没度要求和调洪演算结果，洞径越大，牛作底坝坝高越大，菲古坝坝高越小；从投资分析，洞径越小投资越少；从施工角度分析，洞径越小施工难度越大，施工工期延后的可能性越大。综合以上各方面因素，并考虑到工程的紧迫性，为满足 2019 年年底和德厚水库同步建成的要求，洞径选择 2.0m 方案。

表 1 洞径方案对比表

隧洞直径 (m)	1.8	2	2.5
牛作底坝坝高变化 (m)	0	1.6	2.5
菲古坝坝高变化 (m)	0	-0.06	-0.13
投资差额 (万元)	0	192	920

备注：以 1.8m 洞径方案为基准

#### 2) 洞线纵剖面布置

考虑到围岩覆盖厚度的要求，拟定竖井方案和斜洞方案进行比较。竖井方案，在 K2+800m 和 K3+400m 处分别设置一个竖井，高度分别为 90m 和 45m。斜洞方案考虑与外排隧洞交叉处考虑足够围岩厚度及末端围岩厚度因素，在 K3+364m 之前纵坡为 1: 26，之后为 1: 1000。

竖井方案的前段隧洞内、外水压力较小，所需的混凝土衬砌配筋小，但竖井段施工难度较大，为保证工期，还需在竖井附近增设一条施工支洞，总投资略高。相比之下，斜洞方案施工难度较小，总投资更优，因此选择斜洞方案。

#### 3) 出口闸阀选择

出口消能阀根据运行调度要求，选择排放型的液动固定锥形阀。拟定 DN1200 和 DN1400 两种尺寸。DN1200 阀门下泄最大流量时出口水流速度过大，不满足运行要求；DN1400 阀门虽价格较高，但运行流速能满足要求，故选择 DN1400 液动固定锥形阀。

#### 4) 有压隧洞方案推荐布置

有压隧洞方案由进口闸室段、洞身段、出口消能段组成，全长 3871m。其中，

进水口段闸室段顺水流向长 12m，设一拦污栅和一检修闸门。后接洞身段，隧洞纵剖面在 K3+364m 之前纵坡为 1: 26，之后为 1: 1000，洞身段总长 3839m。洞身段采用直径 2.0m 圆洞，末段 200m 设置钢衬，出口接 DN1400 消能阀和 20m 长消力池。

### 4.3 方案二：无压隧洞方案

通过对进口结构、纵剖面坡比、平面转角、横断面体型和出口消能方式等方面进行优化，使无压隧洞方案满足减小流速、稳定流态、避免库水内渗、消除隐患和保障工期的要求。

#### 1) 进口结构

通过控制最大下泄流量可有效减小流速，因此在进口增设闸门，将最大过流流量控制为 20m<sup>3</sup>/s。运行调度规则为库水位超过 1790.3m 时控泄，低于该水位时敞泄。为减小闸门尺寸，闸室设置胸墙。该方案最大下泄流量 20m<sup>3</sup>/s，最大流速 7.42 m/s，最大水深 1.35m，掺气水深 1.74m。同时，运行调度水位 1790.3m 约为牛作底坝的五年一遇洪水位，故闸门的使用频率较低，不会增加运行调度难度。

#### 2) 纵剖面坡比选择

为避免变坡引起水流的不稳定，拟定 1/88、1/56、1/44.3、1/39 和 1/31 五个固定坡比方案进行比较。各方案均按过流 20m<sup>3</sup>/s 的运行工况进行计算分析<sup>[2]</sup>，各方案洞内最大流速和末端富余水头详见表 2。

表 2 无压隧洞各方案水力计算表

	单位	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	方案 E
纵坡		1/88	1/56	1/44.3	1/39	1/31.5
h0	m	1.77	1.48	1.35	1.30	1.18
v	m/s	5.65	6.77	7.42	7.72	8.45
富余水头	m	102	78	59	48	24

由表 2 可知，方案 A 和 B，流速较小，但末端富余水头较高，末端消能布置困难，部分洞段围岩厚度较薄，故不做选择。

方案 E 洞线在库水位（1696.18m）之下的长度仍然较多，故不做选择。

方案 C 和 D 都可以满足降低流速和避免库水内渗，综合考虑进场道路与出口泄槽的布置，最终选择方案 C 为无压隧洞方案的纵坡。

#### 3) 平面转角布置

隧洞进出口总夹角为 89°，经过平面优化，将转弯段布置在流态较稳定的

隧洞末端，各转角角度尽量平均分配，避免个别转角较大。隧洞在 K2+750m、K3+275m 和 K3+425m 转弯三次，转角分别为 30°、30°和 29°，转弯半径均为 100m。该布置下弯道处内、外侧横向水面高差小于 10cm，水流流态稳定。

#### 4) 横断面体型设计

无压隧洞横断面设计涉及型式、尺寸、净空高度和净空面积等<sup>[3]</sup>。考虑到工期紧张，受前段 1.9 公里无法加设施工支洞影响，为加快施工进度，隧洞净宽定为 2m。考虑隧洞较长，通气条件较差，将最小净空度从规范<sup>[4]</sup>要求的 15%提高到 25%，以保障水流稳定。在该净空度下，K0+063m 之前洞高由 3.5m 渐变为 2.5m，之后洞高为 2.5m。现方案洞线均布置在菲古水库常水位之上，可设置排水孔，大幅降低衬砌外水压力<sup>[5]</sup>，优化衬砌结构和配筋。

#### 5) 消能方式选择

隧洞消能可采用底流消能或挑流消能，在下泄 20m<sup>3</sup>/s 工况下，若采用挑流消能方案，挑距为 73m，冲坑深度为 11.32m，结合泄槽下游河道走向及两岸岸坡情况，该方案冲坑两侧及对岸岸坡易产生滑坡；若采用底流消能，消力池采用扩散消能，两侧扩散角度 5°，消力池长 22m，池深 2.8m，该方案对边坡影响较小，故选择底流消能方式。

为验证底流消能效果，采用 CFD 数值模拟软件，选用 RNG  $k-\varepsilon$  紊流模型和 VOF 法对泄槽段至消力池段的水力特性进行了三维数值模拟计算。验证 20m<sup>3</sup>/s 下泄流量工况，设置计算初始化时间步长为 10<sup>-5</sup>s，最小时间步长为 10<sup>-7</sup>s。计算求解采用有限体积法，压力-速度耦合采用压力校正法，离散方程求解采用 GMRES 法，时间差分采用全隐格式。

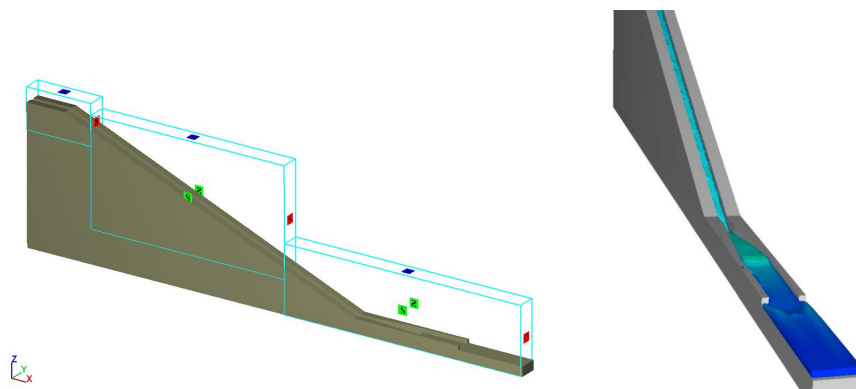


图2 计算域网格划分及边界条件示意图

图3 泄槽流态图

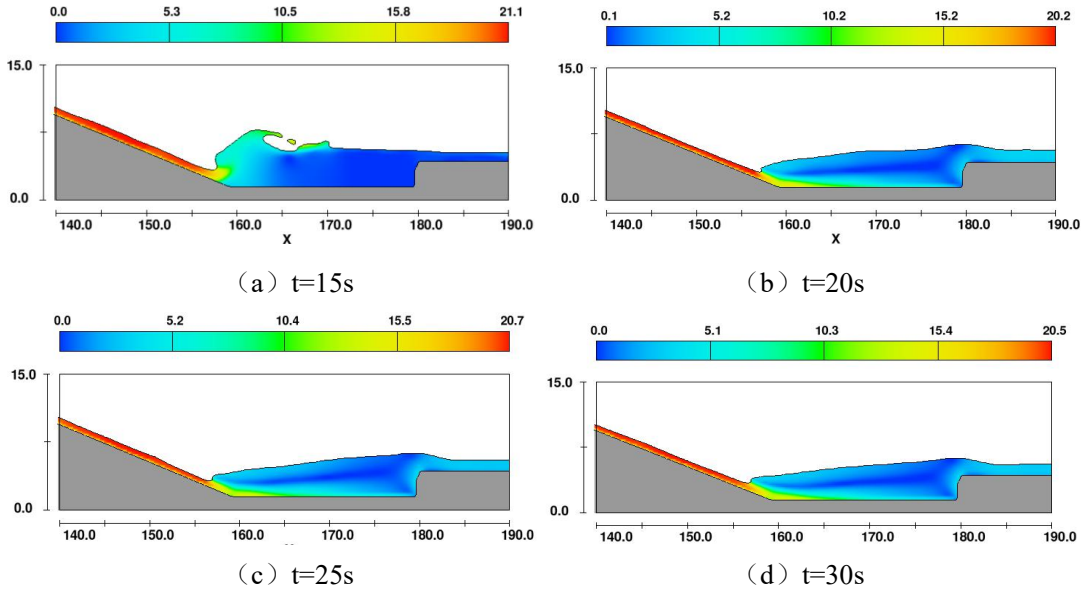


图4 中线剖面流速分布云图 (m/s)

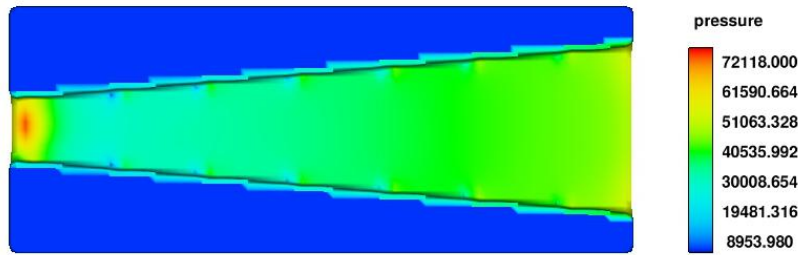


图5 消力池底板压力分布云图 (Pa)

计算结果表明，水流进入消力池时最大流速可达 21m/s，水流在消力池内形成形态稳定的水跃，跃长约 23m，跃前水深 1.94m，跃后水深约 4.7m。消力池最大压力位于消力池前端，约为 72kPa，其余部位压力分布均匀。经水跃消能后，水体流速急剧减小，消力池末端水流流速约为 5m/s，说明消能效果良好。消力池两侧未产生旋涡、脱空等不利工况。

数值模拟计算结果同理论计算结果相近，水面线略高，最大流速略小，均可作为结构设计的依据。

#### 6) 无压隧洞方案推荐布置

无压隧洞方案由进口闸室段、洞身段、泄槽段和消力池段组成，全长 4028m。进水口段闸室段顺水流向长 10m，闸室设胸墙和工作闸门，胸墙底高程 1790.3m。闸室后接洞身段，洞身段采用圆拱直墙横断面，纵坡 1:44.3，长 3844m，平面转

弯 3 次。洞身段末端接采用抛物线连接泄槽段，泄槽段为 U 型结构，坡比 1:2.42，长 152m，后接 22m 长消力池。

#### 4.4 方案比较及结论

将优化后的有压隧洞方案和无压隧洞方案进行对比，如表 3 所示。

项目	有压方案	无压方案	比较
工程规模	牛作底坝顶高程 1796.4m，隧洞长 3871m，2m 圆洞	牛作底坝顶高程 1794m，隧洞长 4028m，2m×2.5m 城门洞	无压方案牛作底坝工程量较多，隧洞工程量较少，基本相当
流态及结构	最大流速约 6.4m/s，最小淹没水深 1.5m，流态稳定	无压流，最大流速约 7.5m/s，最小净空 25%，无明满流交替	圆洞受力更优水流较稳，有压方案优
水质污染	洞内内压较大，无内渗风险	布置在库水位之上，无内渗风险	均无污染风险，基本相当
金属结构	设置拦污栅、检修闸门、液动固定锥形阀和压力钢管	设置工作闸门	无压方案金结设施较少，无压方案优
投资（万元）	隧洞土建 5534，金结 560，牛作底坝 2540	隧洞土建 6082，金结 53，牛作底坝 2229	无压隧洞方案节省约 270 万元，无压方案优
运行调度	长期锥形阀控制	洪水控泄，平时敞泄	锥形阀长期小开度运行，对闸阀不利，无压闸门启用频率低约五年一次，运行管理方便，无压方案优

经过综合比较，优化后的无压隧洞方案解决了原可研方案水流条件差、库水内渗污染隐患，在运行调度和投资等方面也较有压隧洞方案更优，因此选用优化后的无压隧洞方案作为推荐方案。

## 5 结语

1、小流量、大落差、中长距离隧洞，缺少日常巡视检查条件，运行存在结构安全隐患，需要进行优化以提高工程可靠度。可采用进口设置闸门，减小洞身纵坡，洞尾集中消能等方式降低最大下泄流量及洞身流速，消除安全隐患。

2、隧洞受复杂水环境影响时，可从增加内压和调整布置两方面对方案进行优化，本工程通过调整布置，使隧洞在蓄水位之上通过，避免了库水内渗的风险。

3、小洞径隧洞尺寸宜在规范要求最小尺寸基础上适当增加，以减少对施工进度制约。

4、经过实际验证，工程结构布置未制约工程进度，隧洞实现了提前贯通。隧洞运行和消能效果还有待运行后进一步验证。

**参考文献:**

- [1] 珠江水利科学研究院.云南省文山州德厚河流域白牛厂汇水外排工程环境影响报告书, 2016: 380-381.
- [2] 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.
- [3] 杨仕全.关于丘陵地区无压隧洞设计中几个问题的探讨[S].四川水利, 2000 (6): 20-21.
- [4] 水工隧洞设计规范 SL279-2016 [S].北京: 中国水利水电出版社, 2016: 11-12.
- [5] 张有天.论水工隧洞的外水荷载[A].地下工程经验交流会论文选集[C] : 65-76.

## Optimal Design of Diversion Tunnel with Small Flow and Large Drop in Complex Water Environment

Zhu Chengdong, Tang Yao, Dong Wei  
( China Water Resources Pearl River Planning, Surveying and Designing Co., Ltd.,  
Guangdong Guangzhou 510610)

**Abstract:** The diversion tunnel of BaiNiuchang, which is a small flow, great drop, middle-long distance tunnel affected by the complex water environment. Due to the lack of daily inspection conditions, there will be structural safety risk and water quality security risk in the operation of the project. In this paper, the original design scheme is optimized from inlet structure, longitudinal section slope ratio, plane angle, cross section shape and outlet energy dissipating mode. The optimization renders better flow pattern, less security risk and shorter construction period. It can provide

reference for other similar diversion projects.

**Key words:** Free-flow diversion tunnel; Complex water environment; Water quality security; Optimal design

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 房；

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

[421343309@qq.com](mailto:421343309@qq.com)。