

一道桥水电站高压输水系统设计

袁涛¹, 王坤雷¹, 陈大明¹, 付越群²

(1. 四川省清源工程咨询有限公司, 四川 成都 610072; 2. 四川久隆水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:对于引水式电站来说,输水系统是整个工程的重要组成部分,在工程投资中占据极大的比重。常规输水系统包含引水隧洞、调压室以及压力管道三部分。一道桥水电站的特点为“高水头、小流量和长输水道”。对比分析了“低压输水”与“高压输水”方案的优劣,并阐述和论证了高压隧洞不衬砌与高压长输水系统取消调压室的可行性。一道桥水电站最终采用了“高压输水”方案,从而成为国内少有并具有特色的“高压长输水不衬砌隧洞并且无调压室”的高水头电站之一。

关键词:高压;隧洞;调压室;输水系统;支护;一道桥水电站

中图分类号:TV7;TV22;TV672

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2018)增2-0016-04

1 概述

一道桥水电站位于四川省甘孜藏族自治州九龙县境内,为九龙河支流铁厂河梯级开发自下而上的第一座梯级水电站。电站采用引水式开发,直接接上游梯级杉树坪电站尾水,修建底格栏栅坝引用区间水,通过左岸引水隧洞引水至九龙河右岸阶地上修建地面厂房发电。电站正常蓄水位高程为2 781.5 m,额定水头725 m,引用流量13.1 m³/s,装机容量为2×40 MW,多年平均发电量4.018亿kW·h。

电站输水建筑物由输水隧洞和压力管道组成。输水隧洞全长9 014.541 m,断面为城门洞形,底宽2.3~3.1 m,高2.65~2.9 m,主要采用“高压不衬砌”的支护方式。压力管道为地下埋藏式,采用联合供水布置方式,主管长965.262 m,管径为2.2~1.7 m。

2 输水系统的布置

输水系统布置的关键在于洞线的选择。通常在选择洞线时,需根据隧洞的用途及其特点综合考虑地形地质、环境影响、水土保持、枢纽总体布置、施工条件等各种因素后通过技术经济比选确定。

2.1 隧洞布置原则

根据隧洞相关规范,“有压隧洞,作为承担内水压力的结构主体,需要同时满足覆盖岩体不上抬、不发生水力劈裂和渗透失稳破坏。”通常采用以下原则进行控制。

(1) 最小覆盖层原则:

我国电力行业规范采用修正后的挪威准则确定岩体的最小覆盖厚度,最小覆盖厚度由式(1)确定:

$$C_{RM} = \frac{h_s \cdot \gamma_w \cdot F}{\gamma_R \cdot \cos\alpha} \quad (1)$$

式中 C_{RM} 为岩体最小覆盖厚度; h_s 为洞内静水压力水头(m); γ_w 为水的重度(N/m³); γ_R 为岩体的重度(N/m³); α 为河谷岸边边坡倾角(°); F 为经验系数,一般取1.3~1.5。

虽然满足岩体覆盖厚度的要求,但有时在完好的岩体中仍会发生水力劈裂,因此,对于高压隧洞,要求其围岩渗透水力梯度尚应满足渗透稳定要求。

(2) 地应力原则:

为避免水力劈裂,岩体中的最小主应力 σ_3 应大于输水隧洞内的静水压力,按式(2)确定。

$$\sigma_{\min} > F \cdot \gamma_w \cdot h_s \quad (2)$$

式中 σ_{\min} 为围岩最小主应力(MPa)。

2.2 洞线的选择

一道桥水电站引水隧洞沿线地形陡峻、山体雄厚,沟谷纵横,具中高山~高山峡谷地貌。出露地层有二迭系下统夹黄沟组(T1jh)中厚层状变质砂岩、变质石英砂岩、中厚层状~厚层状大理岩和燕山期二云母花岗岩,区内无大断层通过,具备良好的成洞条件。

铁厂河沿线谷坡陡峻,沿河有简易林场公路相通,引水线路工程地质条件较好,围岩以Ⅱ、Ⅲ类围岩为主,有条件采用高压不衬砌隧洞。而常

规布置的低压输水系统施工支洞的上山道路修建难度大,对环境破坏严重。为此,对高、低压输水方案进行了研究比较。

低压方案采用常规布置,纵坡为 3‰。为避免压力管道上平段出现负压,按常规设置了调压室

室,压力管道采用明管布置。

高压方案引水隧洞在立面上采用 5 个水平倾角为 50°的斜井“台阶”布置方式,压力管道采用埋藏式。其比较情况见图 1、2。

由图 1、2 可以看出:洞线布置主要受出龙沟

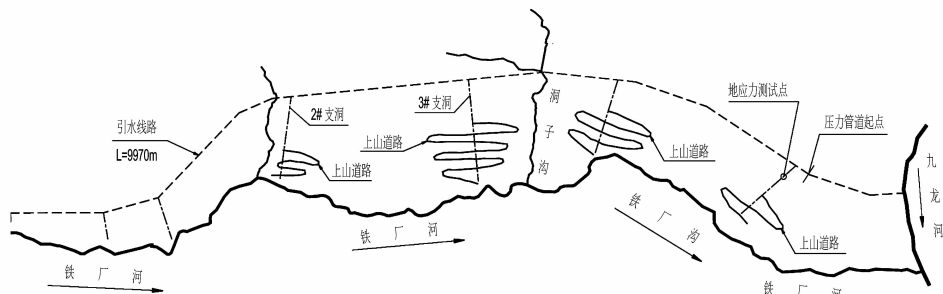


图 1 引水方案平面布置图

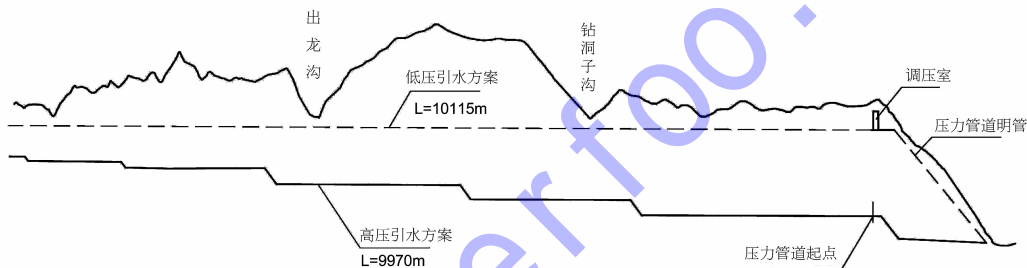


图 2 高低压引水方案对比图

和钻洞子沟两条支沟控制,线路布置上采用绕沟方式,使隧洞从沟谷下部基岩通过。高压方案过沟段的埋深控制措施为:

(1) 出龙沟埋深控制。

隧洞过出龙沟高程约 2 539.67 m,静水压力约 2.42 MPa,根据最小覆盖层原则及公式(1),取岩体重度为 2.5 t/m³,河谷岸边边坡倾角为 12°42',弱风化高程约 2 715 m,隧洞埋深 176 m,满足不衬砌隧洞的埋深要求(表 1)。

(2) 钻洞子沟埋深控制。

隧洞过钻洞子沟高程约 2 432.35 m,静水压力约 3.5 MPa。根据最小覆盖层原则及公式(1),取岩体重度为 2.5 t/m³,河谷岸边边坡倾角为 22°30',弱风化高程约 2 673 m,隧洞埋深大于 223 m,满足不衬砌隧洞的埋深要求(表 1)。

低压引水和高压引水方案的特性对比情况见表 2。

表 1 引水隧洞围岩岩体最小覆盖系数表

项 目	出龙沟	钻洞子沟
最大静水压力水头 h_s/m	242	350
岩体最小覆盖厚度 C_{RM}/m	176	223
岩体最小覆盖系数 F'	1.77	1.47
经验系数 F	1.3~1.5	1.3~1.5

表 2 低压、高压引水方案特性对比表

项目	单位	低压引水方案	高压引水方案	对比 (高压-低压)
隧洞长度	m	8 916.22	9 004.54	88.32
管道长度	m	1 198.8	965.26	-233.54
线路总长	m	10 115.02	9 969.8	-145.22
调压井高	m	48.5		-48.5
隧洞最大水头	m	51	680	629

从表 2 可以看出,高压方案洞长增加了 88 m,管长减少了 233 m,总体减短了 145 m。此外,采用高压引水方案可以减少压力管道的施工难度,避免了压力管道管槽开挖对厂房施工的干扰及对厂房的威胁。高压方案施工支洞总长 4.45

km, 较低压方案增加了 2.75 km, 但相对减少了 11.95 km 的施工道路。根据当年对施工公路的单价测算, 施工道路将差 2 800 万元以上, 其经济效益显著。

从环境效益看, 低压引水方案施工道路沿线地形陡峭, 植被茂盛, 即使按照路面最低通行要求进行设计, 平均开挖边坡在 10 m 以上, 植被坡面积达 10.2 万 m^2 , 且高山植被一旦破坏不易恢复。即使对开挖边坡采取一定的工程支护措施, 仍可能在雨季引发泥石流等次生灾害。相对而言, 高压引水方案由于加大了隧洞埋深, 可利用沿岸交通公路开挖施工支洞的措施, 有效规避了以上风险。由于少了盘山公路, 对植被的破坏减少将是非常直接的, 其环境效益显著, 故最终推荐高压引水方案。

3 高压输水隧洞的支护

一道桥引水隧洞围岩前段主要由中厚层变质砂岩、变质石英砂岩夹薄层状云母片岩及厚~巨厚层大理岩组成, 后段为二云母花岗岩, 沿线无大断层通过, 岩体总体完整性较好。II 类围岩约占 55%, III 类围岩约占 35%, IV 类、V 类围岩约占 10%。

3.1 隧洞支护原则

鉴于一道桥输水隧洞围岩地质条件较好, 围岩类别以 II、III 类为主, 支护设计的理念是将围岩视为主要承担内水压力的承载结构, 已超越常规设计理论, 其原则为:

- (1) 保证施工期隧洞开挖围岩能够稳定;
- (2) 运行期在内水压力的作用下围岩渗透能够稳定, 渗漏量能够接受, 不影响发电量;
- (3) 放空检修时, 在外水压力作用下, 围岩能够稳定。

3.2 地应力测试

一道桥水电站在引水隧洞主洞开挖前, 技术人员在 5#支洞靠近主洞(主洞桩号 8+857) 约 130 m 的位置进行了地应力测试, 成果如下:

- (1) 水压致裂地应力测量岩体最大主应力数值为 16.39 MPa, 方位 327° , 倾角 51° ; 中间主应力数值为 9.88 MPa, 方位 142° , 倾角 39° ; 最小主应力数值为 7.46 MPa, 方位 234° , 倾角 3° , 近水平。
- (2) 高压压水试验结果表明: 测点 3 个钻孔的 6 个高压压水试验段最高压力一般均能升至 7

~8 MPa; 在最高压力点各测段的透水量不大, 吕荣值集中在 0.1~0.4, 表明测点附近的岩体在高水头作用下渗透性较弱。

地应力测试表明: 一道桥水电站引水隧洞布置满足地应力原则, 且在高压工况下不会产生水力劈裂与渗透破坏。

3.3 渗透稳定性分析

目前已投入运行的广蓄电站高压隧洞承受的内水压力为 0.95~7.24 MPa, 其输水隧洞运行情况较好, 没有发生水力劈裂及输水隧洞大量漏水事故。

根据广蓄工程经验, 当裂隙无充填物时, 为防止产生水力劈裂, 有压洞至临近洞室或透水构造的水力梯度应小于临界梯度 $J = 13.3$; 天荒坪抽蓄工程曾进行过专门的压水试验, 节理中方解石充填物渗透的临界水力梯度为 $J = 15$ 。

一道桥水电站引水隧洞高压段最大静水压力为 5.3 MPa, 垂直基岩埋深 126~996 m, 隧洞高压段主要受出龙沟与钻洞子沟段埋深影响。其中, 出龙沟最大渗透水力坡降 $J = 1.38$, 钻洞子沟最大渗透水力坡降 $J = 1.81$ 。根据上述文献资料及工程实践经验, 一道桥水电站引水隧洞高压段最大渗透水力坡降远小于渗透的临界水力梯度, 因此可以判断: 在内水压力作用下围岩渗透能够稳定。

3.4 隧洞支护措施

根据上述支护原则, 结合工程地质条件, 采用工程类比法, 主要参考已建工程及有关规程规范中的“锚喷支护和设计参数表”确定的支护参数为: II 类围岩洞段边、顶拱不衬砌。为减小糙率、保持水流平顺, 底板采用素混凝土衬砌; III 类围岩洞段考虑永临结合支护方式, 边、顶拱采用挂网喷混凝土+锚杆支护, 底板采用素混凝土衬砌; IV 类、V 类围岩由于所占比例较小, 分别采用单、双层钢筋混凝土衬砌。

4 取消调压室的研究

4.1 初步判别

(1) 常规公式法判别:

一道桥水电站具有高水头、小流量和长输水道的特点, 设置上游调压室的条件可按式(3)和式(4)作初步判别:

$$T_w > [T_w] \quad (3)$$

$$T_w = \frac{\sum L_i \sim V_i}{g \cdot H_p} \quad (4)$$

式中 T_w 为压力水道中水流惯性时间常数, s; L_i 为压力水道各分段的长度, m; V_i 为各分段相应的流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; H_p 为设计水头, m; $[T_w]$ 为 T_w 的允许值(2~4 s)。

一道桥水电站设计水头为 725 m, 发电引用流量为 13.1 m³/s, 输水隧洞长约 9 015 m, 压力管道主管长约 965 m, 经计算 $T_w = 2.697$ s, 在 T_w 的允许值(2~4 s)范围内且本电站供电范围为四川电网, 在电力系统中所占的比重很小, 因此, 初步判别本电站可不设置上游调压室。

(2) 机电资料分析。

一道桥水电站装机容量为 2×40 MW, 选用 4 喷嘴的水斗式水轮发电机组, 水轮机额定出力为 41.45 MW, 发电机额定效率为 97.62%, 额定转速为 600 r/min, 飞轮力矩 GD^2 为 220 t·m², 机组加速时间常数 T_a 按式(5)计算:

$$T_a = \frac{GD^2 - N^2}{365 \cdot P} \quad (5)$$

式中 T_a 为机组加速时间常数, s; GD^2 为机组的飞轮力矩, kg·m²; N 为机组的额定转速, r/min; P 为机组的额定出力, W。

经计算, $T_a = 5.369$ s, $T_w/T_a = 0.502$ 。对于占电力系统比重较小的一道桥水电站, 其机组调速性能是能够满足要求的, 因此可取消本电站上游调压室。

4.2 专题研究结论

一道桥水电站水轮机采用四喷四折冲击式机组, 当机组负荷骤减或甩负荷时, 具有双重调节功能的水轮机调速器一方面操作喷针接力器使之慢慢向关闭方向移动, 同时又操作折向器快速投入, 迅速减小冲向转轮的射流。这样实施既解决了因针阀快速关闭而在引水压力钢管中产生的较大水锤压力, 又解决了因针阀不能及时关闭而使机组转速上升过高的问题。水力过渡过程计算结果表明:

(1) 喷针接力器采用两段关闭规律, 喷针接力器最短关闭时间 $T_f = 45$ s, 最短开启时间 $T_g >$

45 s。调速器参数整定值为 $T_n = 1.8$ s, $T_d = 11$ s, $b_i = 1$ 。

(2) 在运行过程中, 应尽量避免两台机同时快速增负荷操作, 如果严格遵照上述开机、关机规律(应严禁直线关机和 2 台机同时快速开机带负荷), 本电站不设调压室的设计方案是可行的。

经过初步判别、机电资料分析及专题研究, 一道桥水电站最终取消了调压室。

5 结 语

(1) 一道桥水电站引水隧洞在立面上采用“台阶”式布置, 增加了 2.75 km 长的施工支洞, 但减少了 11.95 km 长的上山道路, 避免了高边坡的开挖与支护, 节约投资并有效避免了对生态植被的破坏, 环保效益显著。

(2) 隧洞承受的最大静水压力为 5.3 MPa, 机组甩负荷时, 内水压力达 6.8 MPa。在支护上超越常规设计理念, 视围岩为主要承载结构, 主要采用“不衬砌”支护, 是国内已建工程中为数不多的高压不衬砌隧洞。电站经过多年的运行检验, 整个输水系统运行正常, 说明结合地形地质条件, 采用高压输水隧洞的布置、支护设计原则和支护参数是合理且成功的。

(3) 一道桥水电站自 2009 年 6 月建成发电以来运行正常, 是国内第一座长有压输水道而无调压室的输水式电站。电站经过多年安全可靠的运行, 证明取消设置调压室的决策是合理、可行的。

参考文献:

- [1] DL/T5195-2004, 水工隧洞设计规范[S].
- [2] DL/T5058-1996, 水电站调压室设计规范[S].

作者简介:

袁 涛(1988-), 男, 四川雅安人, 工程师, 从事水利水电工程设计工作;

王坤雷(1987-), 女, 河北石家庄人, 助理工程师, 从事水利水电工程设计工作;

陈大明(1984-), 男, 四川内江人, 工程师, 从事水利水电工程设计工作;

付越群(1972-), 男, 湖北英山人, 厂长, 工程师, 从事机电工程和水力发电技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)