

高原复杂地形长距离引调水工程设计要点研究

夏军¹ 王文选²

1. 云南省水利水电勘测设计院有限公司, 中国·云南 昆明 650000

2. 西双版纳傣族自治州大型灌区管理中心, 中国·云南 西双版纳州 666110

摘要: 高原复杂地形长距离引调水工程面临三项系统性技术难题: 大高差地形引发的管道超压与水力失稳风险、高原低气压导致的水泵性能衰减与汽蚀隐患, 以及多年冻土冻融循环与腐蚀性地下水对管道的长期双重威胁。以青藏高原东缘某县域引调水工程为对象, 针对上述三项核心难点, 围绕输水方式比选、管材压力分级、高原修正水力计算、泵站参数设计及重力输水段压力控制等关键环节进行综合论证, 提出“梯级加压+分段分压”组合方案, 工程运行结果表明系统水力稳定性与供水保证率均满足设计要求, 文末提炼的五条关键设计要点可为同类高原引调水工程提供系统参考。

关键词: 高原复杂地形; 长距离引调水; 关键技术难点; 压力分区; 高程修正; 水锤防护

Study on Key Design Points of Long-Distance Water Diversion and Conveyance Projects in Complex Terrain of Plateau Areas

Xia Jun¹, Wang Wenxuan²

1. Yunnan Provincial Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., China Yunnan Kunming 650000

2. Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture Large Irrigation Area Management Center, China Yunnan Xishuangbanna Prefecture 666110

Abstract: Long-distance water diversion projects in complex terrain of the plateau face three systematic technical challenges: pipeline overpressure and hydraulic instability risks caused by large elevation differences, pump performance degradation and cavitation hazards due to low atmospheric pressure at high altitudes, and the long-term dual threats posed by permafrost thaw cycles and corrosive groundwater to pipelines. Taking a county-level water diversion project on the eastern edge of the Qinghai-Xizang Plateau as a case study, this paper systematically addresses these three core difficulties through comprehensive analysis focusing on key aspects including water conveyance method selection, pipe material pressure grading, altitude-corrected hydraulic calculations, pumping station parameter design, and pressure control in gravity sections. A combined solution of "staged pressurization + zonal pressure management" is proposed. Operational results demonstrate that both hydraulic stability and water supply reliability meet design requirements. Five key design principles summarized at the end provide systematic references for similar plateau water diversion projects.

Keywords: Complex plateau terrain; Long-distance water diversion; Key technical challenges; Pressure zoning; Elevation correction; Water hammer protection

0 引言

西部高原地区地形切割剧烈、水源与用水区空间错位突出, 长距离引调水工程已成为保障县域供水安全的核心手段。与平原工程相比, 高原引调水工程面临三项本质性技术难题: 一是大高差地形使重力输水段产生远超管道额定压力的超高内压, 阀门骤闭或停泵激发的水锤压力在长管线中衰减慢, 两类压力威胁须协同控制; 二是高原大气压显著低于标准值(海拔每升高 1 000 m 约下降 10%~12%), 水泵可用汽蚀余量(NPSHa)大幅收窄, 若

不专项修正将诱发汽蚀损伤; 三是多年冻土冻融差异位移与腐蚀性地下水叠合作用, 对埋管接口密封性与基础稳定性构成长期威胁。三项难题相互制约, 共同要求建立有别于平原工程的差异化设计技术体系。本文以青藏高原东缘某县域引调水工程为典型案例, 阐述各关键环节的难点应对逻辑, 并在结尾提炼可推广的设计要点^[1-3]。

1 工程概况

1.1 工程基本情况

工程取水口位于青藏高原东缘某山区河流, 取水口

高程 3 524 m，受水区净水厂高程 2 984 m，输水管线总长 63.2 km，设计引水规模 1.2 万 m³/d，工程等别Ⅲ等，供水保证率 95%，全线地埋管道有压输水。线路中段分水岭最高点高程 3 782 m，高于取水口 258 m，沿线最低点高程 2 876 m（见图 1）。全线划分为加压输水段（K0+000 至 K20+600，长 20.6 km）与重力输水段（K20+600 至 K63+200，长 42.6 km），重力段设 2 座分压调节站，分解为 3 个压力控制区间。

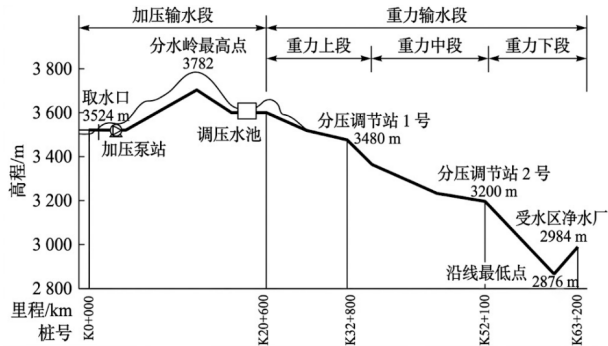


图1 工程输水线路纵断面示意图

1.2 地质与冻土条件及难点识别

沿线地下水对混凝土具有 SO₄²⁻ 中等腐蚀性，加压段最大冻土深度 2.6 m，分水岭附近多年冻土过渡带实测冻土深度达 4.5~6.2 m，全线基础采用砂砾石换填（厚度不小于 200 mm）。结合地形与地质条件，三项核心难点量化体现如下：重力段总高差 798 m，无分压措施时最低点静水压高达 7.82 MPa，远超 K9 级球墨铸铁管 4.2 MPa 额定压力；泵站高程 3 524 m 处实测大气压仅 63 800 Pa（标准大气压的 63.0%），不修正则 NPSHa 远低于安全值；多年冻土冻融位移叠加 SO₄²⁻ 腐蚀，管材须同时满足柔性变形与耐腐蚀双重约束。上述三项难点构成后续各章设计对策的直接依据。

2 输水方式与管材选择

本章应对大高差输水方式选型与冻融腐蚀环境管道耐久性两项复合难题。

2.1 输水方式比选

全线不具备纯重力输水条件，全程加压方案总扬程 660 m，装机规模与电费远超Ⅲ等工程定位。设计确定“加压越岭+重力分压”组合方式：泵站将水提升至分水岭前调压水池，此后 42.6 km（占全线 67.4%）利用天然高差重力输水，系统运行能耗约为全程加压方案的 39%，与工程等别经济性定位相匹配。

2.2 管材优选与压力等级确定

全线采用球墨铸铁管，柔性橡胶密封圈接口允许偏转

角不低于 5°，可有效适应冻融循环引起的不均匀位移，SO₄²⁻ 腐蚀环境下耐久性优于普通钢管^[4]。管道内壁衬水泥砂浆，外壁涂环氧煤沥青防腐。加压段与重力上段选用 K9 级（DN400，允许工作压力 4.2 MPa），重力下段选用 K8 级（DN400，允许工作压力 3.6 MPa），压力分级兼顾静水压力与水锤附加压力最不利叠加工况^[5]。

3 水力计算与管径优化

本章解决大高差长管线水力设计精度与管径经济性问题。大高差工程中管径偏小将同步提高水锤升压幅度，可能触发压力等级整体提升的连锁效应，须纳入全寿命期经济比较。

3.1 沿程水头损失计算

管道沿程水头损失采用海曾－威廉公式计算，公式如下：

h_f = \frac{10.67Q^{1.852}L}{C_h^{1.852}d_j^{4.87}} \tag{1}

式中：h_f 为沿程水头损失（m）；L 为管段长度（m）；Q 为设计流量（m³/s），取 0.139；C_h 为海曾－威廉系数，球墨铸铁管取 130；d_j 为管道计算内径（m），局部水头损失取沿程水头损失的 10%，总水头损失 h = 1.1hf，各管段水力计算成果见表 1。

表1 各管段水头损失计算成果表

管段	管径	流速/ (m·s ⁻¹)	管段长/km	hf/m	h/m
加压输水段	DN400	1.10	20.6	60.4	66.4
重力上段	DN400	1.10	12.2	35.7	39.3
重力中段	DN400	1.10	19.3	56.5	62.2
重力下段	DN400	1.10	11.1	32.5	35.8

3.2 管径比选优化

DN350 方案管内流速 1.44 m/s，沿程水头损失较 DN400 方案高约 61%，泵站扬程相应增加 18.2 m，20 年运行期额外能耗费用约 520 万元，而节省管材费用仅约 210 万元，全寿命期综合亏损约 310 万元。DN350 流速偏高还导致水锤升压幅度较 DN400 高约 15%，管道压力等级须整体提升一档，进一步增加造价。综合比选确定全线采用 DN400，管内流速 1.10 m/s，处于合理经济流速范围。

4 加压泵站设计

本章集中应对高原低气压下泵组汽蚀风险与冬季低温运行两项约束。

4.1 泵组参数与高原性能修正

泵站高程 3 524 m，设计流量 500 m³/h，设计扬程克服高差 258 m 与加压段水头损失 66.4 m 并留 5 m 富余，取

330 m。设置多级立式离心泵 3 套（2 用 1 备），单机流量 250 m³/h，变频调速，主要参数见表 2。

水泵可用汽蚀余量须按高原实际大气压核算：

$$NPSHa = \frac{p_a - p_v}{\rho \cdot g} + H_s - h_w \tag{2}$$

式中： p_a 为当地大气压（Pa），取 63 800； p_v 为水温 5℃时的饱和蒸气压（Pa），取 872； ρ 为水的密度（kg/m³），取 1 000； g 为重力加速度（m/s²），取 9.81； H_s 为水泵安装高度（m），取 -1.5（安装于集水池水面以下 1.5 m 处）； h_w 为吸水管路水头损失（m），取 1.2，代入计算得 $NPSHa = 3.7$ m，所选泵型在高原工况下的必需汽蚀余量 $NPSHr$ （含 0.5 m 安全裕量）为 3.3 m， $NPSHa$ 大于 $NPSHr$ ，满足高原运行防汽蚀安全要求。

4.2 泵站附属设施

泵站新建集水前池 1 座，有效容积 800 m³，地下钢筋混凝土结构，池顶覆土 500 mm。因原水含 SO₄²⁻ 及 Cl⁻，内壁依据 GB/T 50046—2018 选用耐酸碱高性能涂料。每台泵进口设 DN250 电动半球阀，出口设 DN200 轴流式止回阀及检修蝶阀，配置 SQL1000 型气压罐应对停泵压降。泵室与气压罐室均设电热采暖，室内温度不低于 10℃，保障高原冬季设备正常运行^[6]。

5 重力输水段压力控制设计

本章针对重力段大高差超压控制这一最突出的水力安全难题。分压调节站须以“各区间静水压与水锤附加压之和不超过管道额定压力”为刚性约束逐步论证，不得依等高差均分原则机械布置。

5.1 分压调节站布设

重力段总高差 798 m，无分压措施时最低点静水压高达 7.82 MPa，远超 K9 级管道 4.2 MPa 额定压力。以各区间最大设计内压不超过对应管道额定压力为约束：在高程 3 480 m 处（K32+800）设 1 号分压调节站（调压水池 400 m³），在高程 3 200 m 处（K52+100）设 2 号分压调节站（调压水池 300 m³），将重力段分解为 3 个区间，各区间高差不超过 302 m，各段参数见表 3。

5.2 水锤防护措施

泵站事故停机与阀门快速关闭是诱发水锤的两类主要工况。DN400 球墨铸铁管水锤波速约 1 150 m/s，最大水锤升压幅度计算如下：

$$\Delta h = \frac{a \cdot V}{g} \tag{3}$$

式中： a 为水锤波速（m/s），取 1 150； V 为管内设计流速（m/s），取 1.10； g 为重力加速度（m/s²），取 9.81，代入计算得 $\Delta h = 128.8$ m（约 1.27 MPa），经水锤数值分析，缓闭蝶阀关闭时间设定不小于 30 s，实际水锤附加压力降至 0.90 MPa，各段最大设计内压均在允许范围内（见表 3）。重力段各高点布设自动补排气阀防止负压水柱分离，泵站出口液控单向阀与气压罐协同抑制停泵水锤，从水锤产生、传播与消减三个环节构建完整防护体系。

6 关键难点与设计要点提炼

在前述论证基础上，提炼三项核心难点应对逻辑与五条关键设计要点，供同类工程参照。

难点一（大高差超压）的根本在于势能分段消减不

表2 泵站主要设计参数表

项目	参数
泵站地面高程/m	3 524
设计流量/（m ³ ·h ⁻¹ ）	500
单机流量/（m ³ ·h ⁻¹ ）	250
设计扬程/m	330
机组数量/套	3（2用1备）
水泵类型	多级立式离心泵
调速方式	变频调速
配套电机功率/kW	315
NPSHa（高原修正）/m	3.7
NPSHr（含安全裕量）/m	3.3

表3 重力输水段压力分区控制参数表

分区	高程范围/m	高差/m	最大静水压/MPa	水锤附加压/MPa	最大设计内压/MPa	管道级别	允许工作压力/MPa
重力上段	3 782~3 480	302	2.96	0.90	3.86	K9	4.2
重力中段	3 480~3 200	280	2.75	0.90	3.65	K9	4.2
重力下段	3 200~2 984	216	2.12	0.90	3.02	K8	3.6

足,分压节点须由各区间压力约束反推确定,水锤附加压须经数值分析确定,两者均不可简化处理。

难点二(高原汽蚀)的根本在于大气压亏损导致 $NPSH_a$ 边界根本性收窄,高程修正核算不可省略,变频调速仅为辅助手段,不能替代汽蚀余量专项核算。

难点三(冻融腐蚀耦合)的根本在于两种劣化机制空间重叠、相互放大,须从管材选型、接口型式、埋深、基础和防腐五个维度整体应对,任何单一措施均不充分。

五条关键设计要点如下:

要点一:优先论证“加压越岭+重力分压”组合输水方式。重力段比例越高、全寿命期能耗越低,本工程重力段占 67.4%,能耗仅为全程加压方案的 39%,应作为方案比选首要目标。

要点二:管径优选须以全寿命期经济分析为判据,将运行能耗差值与水锤压力等级连锁影响一并量化,不得仅以建安直接费用取舍。本工程 DN350 方案全寿命期综合亏损约 310 万元即为明证。

要点三:高原泵站须以实测当地大气压代入式(2)进行 $NPSH_a$ 专项核算, $NPSH_a$ 须大于 $NPSH_r$ 并保留不小于 0.5 m 安全裕量;优先倒灌安装;泵室温度维持不低于 10℃。

要点四:重力段分压调节站以各区间最大设计内压(静水压+水锤附加压)不超过管道额定压力为刚性约束逐步论证;缓闭阀关闭时间须经数值分析优化确定,本工程不小于 30 s,附加压降至 0.90 MPa。

要点五:冻土地区埋管须同时满足:管顶埋深超过最大冻土深度不小于 0.5 m;采用允许偏转角不小于 5° 的柔性接口管材;砂砾石换填基础厚度不小于 200 mm;内壁衬砂浆+外壁涂防腐层复合防腐,与结构防护措施统筹实施。

7 结语

高原复杂地形长距离引调水工程的设计难点集中于大高差水力控制、高原低气压泵组适配与多年冻土管道防护三个核心层面,三者相互制约,须整体构建差异化技术体系。本工程采用“梯级加压+分段分压”方案,系统能耗降至全程加压方案的 39%;高原 $NPSH_a$ 修正核算保障泵组安全运行;2 座分压调节站将 798 m 总高差分解为 3 个压力可控区间,结合缓闭阀水锤控制,各段管道内压均在额定范围内。以“难点识别驱动设计决策”为主线提炼的五条关键设计要点,经工程验证,可直接指导同类高原复杂地形引调水工程的规划论证与初步设计。

参考文献:

- [1] 杨启贵,张传健,颜天佑等.长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用[J].岩土工程学报,2022,44(7): 1188-1210.
- [2] 欧阳林,张世强,任恒钦等.深埋长大隧洞穿越活动断裂带关键技术研究及应用——以云南滇中引水工程狮子山隧洞为例[J].中国水利,2025(17): 57-65.
- [3] 李保虎.跨流域引调水工程输水线路施工规划方案优选分析[J].水利科学与寒区工程,2023,6(9): 87-90.
- [4] 李均,樊金江,朱宇等.高原深埋隧道长距离反坡排水系统能耗优化模型研究[J].建筑机械,2025(12): 266-269.
- [5] 唐先权,陈哲,王家良.川西高原地区山区河流取水工程形式选择的思考[J].四川建筑,2024,44(5): 273-274+277.

作者简介:夏军(1985.08-),男,汉族,陕西渭南,高级工程师,大学本科,研究方向:水利水电工程设计。