

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.011

小井沟水库副坝上游汇水 导流至主坝下游的可行性论证与效益分析

何本才¹, 苏艾丽², 何 牧², 高 丹², 沃琳红², 张立伟²

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120;
2. 小井沟水利工程环境与水土保持监理部, 四川 荣县 643000)

摘要:论证了从小井沟水库副坝上游汇水导流至主坝下游方案的技术和经济可行性, 分析了该方案的环境效益与供水水质保证效益。结果表明, 从小井沟水库副坝上游汇水导流至主坝下游的项目, 技术上可行, 并具有显著的经济效益与环境效益, 可显著提高城市供水取水水质。
关键词:导流; 副坝上游; 主坝下游; 水下管道; 城市供水; 效益分析; 可行性研究; 小井沟水库
中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)05-0053-05

Feasibility study and benefit analysis of catchment diversion from upstream of auxiliary dam of Xiaojingou Reservoir to downstream of its main dam

HE Bencai¹, SU Aili², HE Mu², GAO Dan², WO Linhong², ZHANG Liwei²

(1. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China;
2. Xiaojingou Water Conservancy Engineering Supervision Department for Environment, Soil and Water Conservation, Rong County 643000, China)

Abstract: This paper demonstrates the technical and economic feasibilities of the scheme for catchment diversion from upstream of the auxiliary dam of the Xiaojingou Reservoir to downstream of its main dam. The environmental benefits of this scheme and the quality of supplied water are analyzed. The results show that the scheme is technically feasible, it has noteworthy economic and environmental benefits, and the quality of water supplied to the urban area can be significantly improved.

Key words: diversion; upstream of auxiliary dam; downstream of main dam; underwater pipeline; urban water supply; benefit analysis; feasibility study; Xiaojingou Reservoir

1 研究背景

小井沟水利工程位于岷江一级支流越溪河上游的荣县保华镇红豆树村小井沟峡谷, 干流全长 232 km, 坝址控制流域面积 587 km², 工程主要由水库枢纽、输水工程和灌区渠系工程组成, 主坝坝型为混凝土面板堆石坝, 最大坝高 88.37 m, 正常蓄水位 429 m, 水库总库容 1.66 亿 m³, 兴利库容 1.11 亿 m³, 总干渠年引水量 1.1 亿 m³, 主干渠首过流能力 10 m³/s, 为二

等大(2)型工程, 估算总投资 26.59 亿元^[1]。工程建成后每年可以向自贡地区提供工业用水及生活用水 17 855 万 m³, 包括灌溉土地 0.97 万 hm², 解决灌区 23.35 万人的饮水安全问题。
小井沟水库担负自贡市城市供水 7 496 万 m³/a, 灌溉与农村人畜用水 5 126 m³/a。按环评批复, 非汛期以 0.86 m³/s (10% 的年均径流作为基流流量)、而汛期以 2.55 m³/s 的流量作为环境生态用水排往坝下, 生态环境用水 5 233 万 m³, 其中生态基流 2 712

作者简介:何本才(1963—),男,高级工程师,主要从事水利工程环境保护与水土保持监理工作。E-mail:hebencai@giwp.org.cn

万 m³,占了兴利库容 1.1 亿 m³ 较大的比例。

小井沟水库副坝以上流域 31.6 km^{2[2]},汇水量年均 3000 余万 m³,副坝上游 9km 有中型水库新店水库,汇水面积 19.5 km²,总库容 2 601 万 m³,有生态用水与洪水下泄;隄为县年平均降水量 1 141.3 mm,新店水库到副坝有汇水面积 12.1 km^{2[2]},水质相对较好,可直接供城市用水,但也需要按集中式生活饮用水水源地给予保护。如能把该汇水 1 000 余万 m³ 导流到大坝下游,就可以相应减少水库下泄的生态流量,增加城市供水,并可兼顾水能利用。初步设计为减少淹没而筑副坝改道穿分水岭排往乐山水系月波河。乐山市境内江河众多,年平均产水量 113.7 亿 m³,过境水 741.4 亿 m³,水资源总量 855 亿 m³,水能资源理论蕴藏量约 800 万 kW,经济可开发量约 750 万 kW,截至目前,乐山市水电开发装机 348.26 万 kW^[3]。

2 技术可行性

2.1 技术路线

从 28.5 m 坝高的主副坝(副坝坝址河底海拔约 410 m,副坝外排洪渠进口海拔 409.5 m,副坝外可蓄水 416 m)用 PE 管在库内按设计坡比敷设大坝。卞家桥副坝到小井沟大坝最短折线里程 7.87 km,经生态环境基流下泄通道,或左岸调水取水口(海拔 396 m)与发电压力竖井,或右岸泄洪洞(海拔 380 m)到大坝下游坝脚(海拔 344 m),导流管道落差达 72 m,导流几乎射流而出。通过闸阀可以调节控制导流。导流管具有平直顺畅的特点,能量损失较小,导流管内流速可以在很大的范围内加以调节,为导流控制提供了极大的便利。

2.2 管线选择与铺设

2.2.1 选线与铺设原则

尽量选择直线贴地铺设,必要时人工结构支撑固定跨沟谷,以控制管线长度,节约水头损失,节约工程投资。8 km 导流耗用水头 44 m,导管坡降分布可参考最速管线,以克服设计流速管道内摩擦阻力、减少管道受力以及提高导流能力为原则。为利用较大的水头提高导流能力,导流管过主坝采用虹吸结构。铺设导流管时,整个管线分段,PE 管则采用段内电融热工艺接管,管线支撑与分段接头方式要考虑铺设与检修更换作业的安全与方便,保证管线铺设与维护在适当水库低水位时实施不难(死水位海拔 404 m),导管穿大坝、副坝并设控制阀不难实现。HDPE 管具有强耐磨性和优异的液压性,在埋地管道作业时无须外层保护,可用沉入法在江河底敷设。沉入法管道敷设在海上石油工程中常见,有关理论和设备工艺完备,实践案例也较多,大陆往海岛给水

也采用水下管道工程输水方式。

2.2.2 上游段的选线与铺设

从副坝到水库死水位的上游段,导流管道在原河槽中铺设,在副坝处、西家湾以及郭家湾 3 处裁弯取直,可以缩短 930 m。管段总长度 4 500 m,管段两端的高差 19 m,再加上副坝上游蓄水,可增加水头 6~7 m,这样上游区段导管可以保证每公里 5.5 m 水头并有富裕,保证以约 1.2 m/s 设计流速导流。该管段属于自流管段,管内外水位差小于 13 m,1.2 m/s 设计导流流速的管内压降为 0.007 3 kg/cm²,可规避或远离(直接)负水锤,设计流速(直接)正水锤 25.1 m,0.6 MPa 的 PE 管安全系数达 4,建议选用。

在铺管作业时需要死水位处往上游的 500 m 段于河槽内清挖管沟,在上游段有水坝阻断的地方应穿坝下部的底孔或成孔穿管,以保证管段落差基本均匀分布,减少水锤影响。

2.2.3 下游段的选线与铺设

死水位到大坝前段长 3 332 m,沿着铁山河右岸从 404 m 高程以每公里 5.5 m 落差选线,到坝前 500 m 处导管高程为 380 m,已经低于大坝最低取水泄排水口—右岸泄洪洞,在水库非流动库底水体过沟谷到坝前,以保证不受泄洪库内水流的影响。同样该 2 831 m 段为自流段,建议采用 0.6 MPa 的 PE 管。

坝前 500 m 段到大坝下游,建议经过 396 m 高程取水洞采用虹吸管过坝,出口高程应低至 372 m 以下,并安装节制开关。导管受到额外的虹吸负压力,每 10 m 水位差约 0.1 MPa,还考虑到(上游入口)阀门先关闭误操作的直接负水锤内水负压 25.1 m 水头,所以建议采用 1.0 MPa 的 PE 管。需要注意的是,流速大于设计流速时,虹吸管段即管内流体负压力段会延伸上移;反之亦然。

2.3 水下管道的支撑、掩埋与保护

2.3.1 水下管道工程特点

由于管线在水库水下铺设,而 PE 管可以做成与水同比重,或通过配重导流管重力浮力抵消,竖向荷载为 0,因此,管线既可贴地面布设,又可跨沟谷走捷径(这一优势是海上石油管道工程难以企及的,另石油管道内径小,不及外径的 1/3,原油黏性大,管道内外压差高,皆为金属复合管,要求抗浮,抗压,以至保温,并严禁泄露);但水平管线方向因管内水流(稳定流与非稳定流)产生荷载,需要对管线分段镇墩控制,在转弯处要布置镇墩,直线段则可以少设置镇墩,全程支撑固定,以避免轴向力长距离作用于管道,避免破坏性水平(蛇行)串动。

2.4 节中设计工况下导流有 0.5% 坡降的水能损失,但能量都消耗在紊流层流里,在水力学上可以

表述为导管内流体剪切运动黏性阻力为管内水重 0.5% 水平,但管内稳定流作用在管内壁轴向的荷载是微分量。只有开启与关闭导流,以及其他水流速度突变情况下,对闸阀以及管道才会产生水锤作用。稳定流与非稳定流在管道转弯处产生冲击作用力与冲击力变化,可导致管线(蛇行)串动。

2.3.2 水下管道固定形式

管道工程的结构安全设计与铺设保护可以参照 CJJ101—2004《埋地聚乙烯给水管道技术规程》。水下管道支撑固定的方式可根据地形、地质、水文情况来定。

a. 下游区段(死水位以下段)的土质非基岩地基,作为导管分段处,导管段间用法兰盘连接,采用混凝土坐墩加卡扣,便于维修更换;或浇筑或埋设标准混凝土开口向上的 U 形管座或半圆形管座(按照水压力管道的术语,在承受各种力,包括水压力、管重、水重、温度力、地震力等条件下,完全固定管道使所在管段不发生移动的,叫镇墩;通过滚轴容许管道轴向串动的,叫支墩),法兰盘可直接把力传到管座。

b. 根据下游区段基岩地质情况,直接用金属基座固定到基岩上,或钻孔外套管加内套管卡扣,孔口外围浇筑混凝土,内外套管可以伸缩调节导管标高,作为支墩实现导管水头合理分配;

c. 在上游区段(死水位以上段),导管在原河槽中铺设,基岩地质可用 U 形扣,以膨胀螺栓入基岩固定,采取防划伤物理措施保护掩埋的管道并用土料与小粒径料埋管,必要时形成小的过水坝,使各管段整体始终浸没于水中而受到保护。

d. 在上游区段,导管在原河槽中铺设,非基岩地质可以浇筑混凝土半圆基座,或埋设预制基座,半圆卡扣固定。段内可以用 U 型或马蹄型混凝土块扣住管道,必要时辅以覆土以固定管道。

2.4 导管选型

2.4.1 选择 PE 管

导管可选择特制的 HDPE 管(理论上 0.96 密度 HDPE 工艺中再多添加 3% 左右的石粉;医用有 0.98 密度的 HDPE),或 HDPE 管增加法兰盘连接以及混凝土套管配重,以达到综合比重为 1 的效果,这样导管可以跨沟谷走捷径。管内径由导流流量、流速决定;对导管的耐压性要考虑大气压力、外部(大库)水压、导流内水(静态)水头以及内水最大流速压降。根据多次验算,按 0.28 m³/s 目标的导流能力(即年导流 1000 万 m³),可选择 600(或 560)mm 的管径;流速设计为 1.2 m/s(最大流速 1.32 m/s)时,8 km 导流损失 44(或 48)m 水头,72 m 总水头尚有 28(或 24)m 余量储备;库内导流管的抗压强度为 0.6MPa 即可,只有虹吸段与出大库水体段导流

管的抗压强度要求分别为 0.8 MPa 与 1.0 MPa。如若采购成品,宜按 0.56 m 直径选管,管径宁小勿大,以节约投资,且水源相对充裕,利于运行监控,此外,管道安全系数较大,水头富裕。PE 管还具有易回收使用,环境友好的优点。

2.4.2 低阻力涂层

船舶、军工等行业对低阻力涂层的研究较多,并富有成果。增加涂层的工艺简单,导管内壁可采用疏水涂层、水中低摩擦阻力涂层、纳米涂层,管壁阻力会极大地减小。纳米涂层的导流能力高,微纳米表面结构凸出与凹陷面积比远远小于 1,而在低速情况下水与气体的摩擦力相对于与固体的摩擦力可以忽略,液体微观尺度表现出的张力也是一种弹性力。摩擦损失包括水管内壁、层流与湍流的能量损失,在理论上可以极大地减小。

2.5 水能利用

要充分利用水能,则要加大导流管径,降低流速;采用低阻力涂层新技术,可减少管壁与水的摩擦力,减少导流水头损失。用流速与水头损失曲线,管径与导管成本曲线,水机水头与出力效率曲线,求解计算期扣除成本费用的水能产出净效益最大解。干渠首建节制闸,成巨型调压蓄水池。当大库发电时,停止导流发电,导流入干渠渠首段;大库停止发电时,可启动导流与渠首蓄水发电以保证生态下泄流量,实时 70% 导流能力发电出力水头可达 44 m,发电出力达 71.43 kW。当地 5 月初到 9 月底皆为汛期,4—10 月皆可导流发电,年发电 52.15 万 kW·h。

2.6 导流安全与流速控制

2.6.1 开启与关闭导流

开启导流。首先关闭通往大库水体的闸阀,导流入口控制闸阀先开,导流出口控制闸阀后开,开启导流没有惯性内水,不发生水锤。

关闭导流。缓慢关闭坝下出口闸阀,同时同步缓慢打开坝头前通往大库水体的闸阀(可设置在设计流速虹吸段最高处高程 396 m 处,比导流入口水位低 20 m),让惯性管道内水泄入大库,待导流上端入口水流趋于静止并在反向流前关闭入口闸阀。这样,水锤仅在出口闸阀与通往大库闸阀之间(以及出口闸阀以下)管段发生。

2.6.2 三通球阀完全消除关闭直接水锤

如把出口开关与坝前通往大库的开关合二为一,在坝前安装三通球阀开关,实现 B、C 状态的切换(图 1)。可研究改造 T 型球阀,不难实现切换中 T 球阀内入出通道不严重缩径(严禁通道切断, X、A 状态严禁出现),惯性内水泄入大库,则(除球阀出口以下段外)完全消除关闭导流较大的直接水锤。

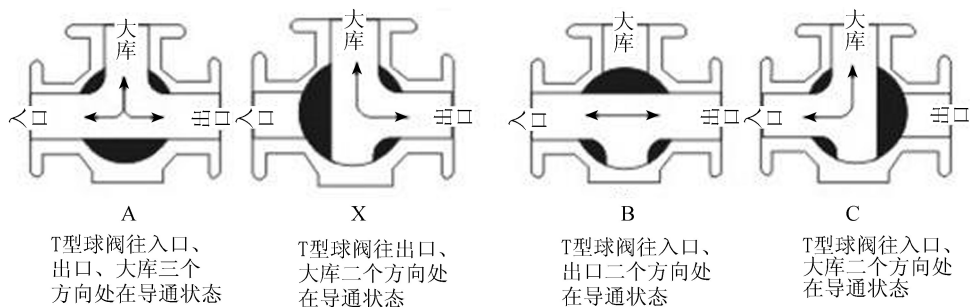


图1 三通 T 型球阀每转 1/4 周切断导通介质流向图

2.6.3 导流安全的其他问题

通过实验研究确定导流进水口最低安全水位,并采取措施,避免导流管进气与放空;一旦进口进气就关闭出口闸阀,再开启通往大库水体的闸阀,内水上行利于排气,排气毕关闭进口阀门,待恢复正常工况再次开启导流设施。在导流管道最上端第一段的中部,利用管段内进入的气体浮力与上升运动,自动打开连通大库的开关,并提前关闭出口,实现自动启动上述保护管道防浮力破坏的程序。

研究管道内水流因为导流开关非稳定流的对阀门、管道支撑固定的冲击力,研究确定在转弯处影响较大的敏感的管道固定支点采用减避震器,即允许非破坏性轴向与横向串动缓冲,以保护支撑固定结构,避免管道各固定结构连锁破坏。导流管道可研究设置增、减压阀。由于虹吸结构的原因,运行期调压池措施行不通。

入口出口皆关闭后,库内导流管可开启通往库内水体的控制开关,使导流管处于不承压状态,以延长导流设施使用寿命。在坝头紧临出口闸阀处,或导管在副坝下游处与死水位处,可设置兼具水锤泄水与城市供水取水功能的闸阀。

2.7 防止淤塞

利用大库清水或副坝外建清水池,每当导流浑浊洪水后,在保证导流设施安全的前提下,适量利用部分水头余量储备高速导流清水,置换清水越冬,防止泥沙长期滞留附着管道。

2.8 管线监控

管线间隔重点地安装压力传感器,监测管内压力。若发现压力过大,管道破损,反向导流内水上行间歇注入压缩空气沿线找出气冒泡点,或利用特殊软套套管拖行力传感探测,以及水下摄像查找,标记并 GPS 定位,适时维护(外压大于内压利于外粘贴,有水下蛋白黏合剂报道);但若发现压力过小,应立即关闭管道出口,开启通往大库的开关,排气后关闭入口闸阀,并保护管道,待解除异常情况(即管道入口外水位过低,出现了放空进气的情况),再次开启导流^[69]。

2.9 副坝选型

原副坝泥岩心墙土石坝也考虑了两面迎水,但两面迎水高程以下坝体应严格控制上坝石料足够耐水并保证强度。

其他技术问题,如管道外部可能的风浪、水流、地震的荷载需要研究规避和采取的结构措施,如可研究特别设置低强度螺栓法兰接管。

本研究突破完全消除关闭的直接水锤三通球阀技术,以及运用两自由度缓冲滑轨支撑结构,利用库水为介质的液压阻尼器,镇墩、支墩的设计施工,加速导流取水等是该管道工程关键技术与创新之处。

总的来说,在项目特殊工况下,导流设施较大直接水锤问题可以得到根本的消除和规避,在这一关系管道系统安全与造价的问题上,其他管道系统难以企及,非常难得。

3 经济可行性

3.1 新增经济产出

如果年导流 932 万 m^3 ,相应增加等量调水并入自来水管网,而业主公司产业链涵盖了水源、输水、自来水水厂与管网业务,故可按现行 1.825 元/ m^3 单价计算,则增加年经济产出约 1701 万元。在新增计算口径上仅考虑导流。

3.2 新增经济投入

从大坝到副坝管线长 7.87 km。2015 年 4 月询价的结果是:560 mm 管径(流速 1.20 m/s 左右,年导流 932 万 m^3),0.6 MPa 抗压强度,519 元/m,7070 m(设计自流段);0.8 MPa,636 元/m,500 m(包括自流虹吸过渡段与较小虹吸压力段);1.0 MPa,777 元/m,300 m(较大虹吸压力段),则 PE 管材投资计约 422.043 万元。

经估算,阀门 3 台计 10 万元;上游段郭家湾、西家弯以及副坝下游河槽裁弯取直可缩短 930 m,成沟埋管工程约 100 万元;支撑固定砣结构、金属结构建安费计 120 万元。

副坝原设计就两面迎水,在排洪隧洞入口保留并改造围堰成滚水坝,并建闸,即可成三岔型河道水

库,长3 000余m,宽均50~10m,库容近50万m³,水深达7~5m,水位可达416m以上,这几乎不增加投资。调水与水处理等也几乎不新增加投入。

瓦淅排洪渠工程从4#副坝上游约400m处卞家桥起,沿学堂头沟逆流而上,通过隧洞穿张家坳分水岭,汇入月波河,流经三江汇口入月溪河。排洪渠线总长8 610.88m,其中,渠道长923.3m,隧洞总长1 305.58m,连接段长290.54m,河道改造段长5 930.22m。概算投资分为:排洪洞工程1 870.99万元,排洪渠工程921.85万元^[1]。如导流则大部被分流,可对排洪渠护坡与月波河疏浚调整。纯新增经济投入预计632万~850万元(工料对半估算则850万元,未计上述设计调整)。

3.3 效益指标

导流10年计算期增量效益费用比达26(而管道使用寿命50年),新增投资回收期(1个汛期)1年。可见,新增方案经济可行。相对小井沟水利工程27亿元投资开发利用2.7亿m³水资源,新增不到1 000万元投资导流副坝库外水源,可获得1 000万m³的水资源开发利用效益,无疑经济指标优越。

4 环境效益与供水水质保证效益

4.1 有利于下游水生态保护,增加饮用水源

导流向坝下补水,较水库水下泄更有利于下游水生态保护,因为导流水具有河道水质和原河道水环境的周期性,使生态补水更可靠,更有保证;同时也减少了对月波河原生态的影响。鉴于现在新店水库水中氯化物偏高,如作为集中式生活饮用水地表水源地应予相应的治理和保护,在治理达标前,新店水库水下泄期间可导流供生态利用。另新店水库下游现有1个盐厂废水排入赵家河,需要关闭取缔排放。

4.2 取水水质不达标的风险防范

鉴于水库水质保护面临长山镇生活污水特别是上游(自贡境外)工业排放较严峻局面,长山镇污水处理厂不满足原设计A²O处理工艺,对新建的污水处理厂拟按照Ⅳ类水质出水要求,采用膜生物法等新工艺,实现提标排放一步到位,然而其300万m³/a的Ⅴ类排放转为Ⅳ类水排放,对劣Ⅲ类干流2亿m³/a径流水质改善的效果不会显著^[10]。大坝发电取水用水不进开阔库区而是到坝前左岸干渠取水口,干流补水直抵坝前,右岸支流铁山河开阔库区相对优质水难以或者说根本就不能自流抵近干流左岸取水口,深水河道自然净化能力差,净化时间较短,因此,存在一定取水水质不达标的风险。如必要可利用导流设施伸入水库3km的水库中西部(如观音桥、金山岛附近)实现从Ⅱ类水质水体^[2]取水,年取水量

可达1 398万m³,伸入水库1km,改用0.63m管,则可年取水3 243.9万m³,铁山河产水约6 000万m³/a。可研究采用(大库)水机与(导流)水泵轴传动技术,内外管同轴轴流泵技术(内管段旋转,内管内外皆有泵叶片而外叶片可调节,外管与内管间的大库水流直接推动内管的导流水流),利用大库取水洞水流(对喇叭口放大降速的导流水)负压抽吸作用,或枯水期外来动力,加速导流取水入干渠。

4.3 时分取水调水,节约人工净化成本

由于Ⅱ类水质取水量与城市居民供水量可比,因此可显著提高城市供水取水水质,并可以适当降低越溪河上游污水处理厂的负荷与出水水质要求^[10],污水处理厂仅进行A²O工艺处理。干流水主要供发电灌溉利用,采用时分取水、调水、供水技术,城市用水尽量利用开阔库区具有自然净化能力的铁山河产水,这样可减轻自来水厂的水处理负荷,节约自来水厂水质净化处理的成本费用。

小井沟水源保护区的划分应根据水库蓄水试运行情况进一步论证,按照法定程序,组织一类、二类与准保护区划分的科学论证,保证调水取水达到Ⅲ类水质的目标,并做好干渠污染防治与水质保护,充分利用30km干渠自然净化的能力,争取调水到达调节水库时达Ⅱ类水质(据监测资料,调节水库荣县双溪水库除总氮、偶总磷指标为Ⅲ类或略超外,其余指标基本达到Ⅰ类标准;而越溪河荣县入境断面Ⅴ类水质经30km河道到入库断面时,水质可自然净化到Ⅲ类)。

5 结 语

从小井沟水库副坝上游汇水导流至主坝下游的导流项目,技术上是可行的,并具有显著的经济效益与环境效益。如果城市供水市场成为现实,并且同时满足区域水资源配置规划、分配控制指标等条件,即可对导流项目开展进一步的工程研究设计并付诸实施。

参考文献:

[1] 四川省水利水电设计院. 小井沟水利工程初步设计报告[R]. 成都:四川省水利水电设计院,2011.
[2] 王中敏,阮娅,许秀贞,等. 长江水文水资源研究所. 小井沟水利工程环境保护评价[R]. 武汉:长江水文水资源研究所,2009.
[3] 但强. 水上旅游开发构想初探[J]. 扬州大学学报(人文社科版),2011(1):80-82. (DAN Qiang. Thinking about aquatic tourism development[J]. Journal of Yangzhou University(Humanities and Social Sciences Edition),2011(1):80-82. (in Chinese))

