

牛栏江—滇池补水工程关键技术综述

任恒钦^{1,2} 晏欣¹

- (1. 云南省调水中心, 云南 昆明 650051;
2. 云南省牛栏江—滇池补水工程建设指挥部, 云南 昆明 650051)

【摘要】 牛栏江-滇池补水工程是一项系统工程, 规模大、战线长、类型多、技术难度大, 开展了一系列科学试验及研究工作。对溢洪道阶梯消能工、高地震烈度区高坝抗震措施、大直径锥形消能阀、单级单吸高扬程大容量立轴离心泵、立轴大功率变频同步电机、大容量变频装置、泵站厂房结构振动控制设计、大跨度U形预应力渡槽、输水线路穿越小江活动性区域断裂方案等内容开展了深入研究, 为工程的顺利建设奠定坚实基础, 确保工程顺利建成, 运行安全可靠。

【关键词】 牛栏江—滇池补水工程; 关键技术; 研究

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2017)05-0024-04

Overview of key technology in Niulanjiang-Dianchi Water Compensation Project

REN Hengqin^{1,2}, YAN Xin¹

- (1. Yunnan Water Transfer Center, Kunming 650051, China;
2. Yunnan Niulanjiang Dianchi Water Compensation Project Construction Headquarters, Kunming 650051, China)

Abstract: Niulanjiang-Dianchi Water Compensation Project is a systematic project, which is characterized by large scale, long frontline, diversified categories and high technical difficulty. A series of scientific experiments and research are implemented. Spillway ladder energy dissipation work, high dam seismic measures in high earthquake intensity area, large diameter cone-shaped energy dissipation valve, single-stage single-suction high-lift large-capacity vertical shaft centrifugal pump, vertical-shaped high power frequency conversion synchronous motors, large capacity frequency converter, pump station workshop structure vibration control design, large-span U-shaped prestressed aqueduct, fracture plan of water diversion routes crossing through small river active region are studied deeply, thereby laying solid foundation for the smooth construction, and ensuring the successful completion of the project with safe and reliable operation.

Keywords: Niulanjiang-Dianchi Water Compensation Project; key technology; research

1 工程概况

牛栏江—滇池补水工程是滇池流域水环境综合治理六大工程措施的关键性工程, 在实施环湖截污、入湖河道整治等综合治理措施的基础上, 实施该工程可有效增加滇池水资源总量和提高水环境容量, 加快湖

泊水体循环和交换, 对于治理滇池水污染、改善滇池水环境具有十分重要的作用。工程主要任务为: 近期重点向滇池补水, 改善滇池水环境和水资源条件, 配合滇池水污染防治其他措施, 达到规划水质目标, 并具备为昆明市应急供水的能力; 远期(2030年)主要任务向曲靖市供水, 并与金沙江调水工程共同向滇池补水, 同时

作为昆明市的备用水源。

工程位于云南省曲靖市和昆明市境内,主要由德泽水库枢纽、干河泵站提水工程和输水线路工程组成,德泽水库蓄水经提水泵站至出水池通过输水线路自流至盘龙江进入滇池。工程多年平均设计引水量 5.72 亿 m^3 ,年补水量 5.66 亿 m^3 。工程总投资为 84.26 亿元,中央预算内投资定额补助 33 亿元,由云南省包干使用、超支不补,其余投资由云南省负责筹集落实。

2 工程布置及规模

2.1 德泽水库枢纽

德泽水库位于曲靖市沾益县境内的牛栏江干流上,距离昆明市 173km,水库正常蓄水位 1790.00m,水库设计洪水位为 1791.49m,校核洪水位 1793.91m,死水位 1752.00m,相应死库容 1.89 亿 m^3 ,总库容为 4.48 亿 m^3 。水库枢纽由德泽大坝、溢洪道、导流泄洪隧洞、发电放空隧洞、坝后电站、干河泵站组成。溢洪道布置在左岸,泄洪隧洞布置在右岸,以龙抬头和导流洞后段结合,发电放空隧洞布置于大坝左岸、溢洪道右侧山体中。

大坝为混凝土面板堆石坝,坝顶高程 1796.30m,最大坝高 142.4m,坝顶长 386.9m、坝顶宽 12m,上游坝坡 1:1.4、下游平均坝坡 1:1.55;发电放空隧洞进口底板高程 1680.00m,全长 898m,其中进口段长 21m,洞身长 740m,出口明管段长 137m,直径 2.8m,末端设 DN2800mm 锥型放空阀;溢洪道为开敞式实用堰,堰顶高程 1781.00m,堰宽 13m,闸门控制尺寸 13m \times 9.7m,总长 696.2m,最大泄量 $Q = 1148.0\text{m}^3/\text{s}$,底流消能;泄洪隧洞和导流洞以龙抬头结合,全长 659.0m,洞身长 426.2m,进口底板高程 1725.00m,5.6m \times 5.0m 弧形工作闸门控制泄流量,最大泄量 $Q = 872.0\text{m}^3/\text{s}$,底流消能。坝后电站总装机 2 \times 10MW,多年平均发电量 0.92 亿 kW \cdot h。

2.2 干河泵站

干河泵站位于曲靖市会泽县田坝乡和昆明市寻甸县河口乡交界处,布置在德泽水库库尾,距德泽水库坝址 17.7km,采取一级提水,安装 4 台泵组(三用一备),

水泵单机功率 22.5MW,总装机容量 90MW,设计流量 23 m^3/s ,最大提水扬程 233.30m,设计扬程 221.20m。泵组采用单级单吸立式离心泵,型号 PHLA1077—LJ—206,单泵设计流量 7.67 m^3/s ;立轴三相交流变频同步电动机,型号 TLBP22500—10,额定功率 22.5MW;电压源型变频器,型号 ACS6000,额定容量 23MW、额定电压 $\geq 3\text{kV}$ 。

2.3 输水线路

输水线路位于牛栏江左岸,起点为干河隧洞进口,末端为盘龙江 3km 处的瀑布公园。输水线路设计流量为 23 m^3/s ,底坡 $i = 1/2000$,总长度 115km,主要由隧洞、箱涵、倒虹吸、渡槽等组成,其中隧洞长 104.282km,占线路总长的 90.67%;渠道有 6 条,长 8.234km;倒虹吸有 2 座,长 1.426km;渡槽有 1 座,长 1.065km。线路首端干河隧洞进口底板高程 1973.18m,输水线路落点位于北京路桥涵西侧出口 130m(直线距离),落点高程 1911.30m。

3 工程技术研究

工程是跨区域、跨流域、多层面的水资源系统配置工程,工程特点大规模、长战线、多种建筑物类型、技术难度大,在可行性研究和初步设计阶段,依托设计技术力量同时,与国内知名院校、科研单位合作,开展工程技术重点及难点问题攻关。

3.1 溢洪道泄槽阶梯消能工

阶梯式消能工是一种新型消能技术,它改变了将水流能量输送至下游集中消除的传统消能方式,在溢流泄槽上专门设置系列阶梯,当水流流过阶梯时,阶梯角和水流之间形成一个横轴漩涡,漩滚消能,达到简化下游消能设施、节省工程投资目的,具有良好的经济效益。

对于溢洪道泄槽表面设置系列阶梯的型式,国内外已在水利水电工程中使用,但其水力参数比较小,消能水头多为 30~40m,下泄流量也多在 100 m^3/s 以下;超过 80m 以上水头,且流量较大的工程较为罕见。德泽水库溢洪道最大下泄水头 134.41m,最大下泄流量 1148 m^3/s ,最大下泄单宽流量 88.31 $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$,最大

泄洪功率 1500MW。如果采用常规的消力池消能,由于下泄动能较大,且工程所处地质条件较差,为粉砂岩、泥岩页岩互层,允许冲刷流速较小,消力池工程量及投资巨大。

通过设计论证、水工模型验证,采用溢洪道泄槽表面设置阶梯的型式,泄洪过程中,可消除部分或大部分动能,降低抗冲耐磨难度,缩短消力池长度,达到节约投资的目的。通过大量的系统模型试验和理论分析,并辅以数值模拟,获得不同体型参数,如:坡度、掺气设施型式、阶梯数、阶梯高度与水力要素之间的关系以及变化规律,提出掺气效果良好、抗空蚀性能优越的优化布置型式。通过原型观测,各项水力学指标均符合一般规律,溢洪道运行正常。

3.2 高地震烈度区高坝抗震措施

德泽水库面板堆石坝最大坝高 142.2m,抗震设防类别为甲类,100 年超越概率 2% 的地表地震动峰值加速度为 0.417g,大坝地震设计烈度为 9 度。根据大坝三维非线性动力反应分析成果,为提高坝体抗震能力,结合国内工程经验,适当增加坝顶宽度;采用上部缓、下部陡的坝体断面;采用较高的压实标准,特别是减小次堆石区的孔隙率,以提高堆石体密度,主、次堆石孔隙率均按小于 20% 控制;垂直缝间设置复合橡胶板,以吸收地震力;在 1796.30 ~ 1766.30m 高程间、距坝顶 30m 范围内的下游坝坡护坡采用 0.5m 厚 M7.5 浆砌石衬砌;在离坝顶 23.2m 范围内的坝体中铺设土工格栅等工程抗震措施。在遭遇设计地震时,德泽水库混凝土面板堆石坝不会发生严重破坏引发次生灾害,在强震时有局部损坏,可修复使用。大坝震害会减轻,不会影响大坝的整体安全。

3.3 大直径锥形消能阀

德泽水库枢纽工程是整个工程的龙头,发电放空隧洞放空锥形阀水头高(超过 160m)、直径大(超过 2.5m),在中国属超高水头设备,设备运行中的振动、气蚀、冲刷、止水、支承等问题对以后工程实际运行的安全影响很大。从工程泄水放空设备选型入手,对比了弧形闸门和锥形阀的可靠性与经济性,得出锥形阀更适用于该工程;通过模型试验、CFD 数值模拟、现场

原型试验的方式,深入研究了 DN2800 锥形阀在运行中的气蚀、止水、振动、操控等问题,取得了以下研究成果:

a. 锥形阀现场运行时,当阀门开度增至 60% 时,过阀流量已达到工程设计所要求的泄水流量 $130\text{m}^3/\text{s}$,流速接近 22m/s,完全满足工程补水排放要求。

b. 锥形阀在大开度下的排放系数较高,排放性能较好;且阀门在大开度下运行时,阀体内部压力流场较均匀,不易发生空蚀,阀体振动较小。因此应尽量控制阀门在大开度下运行,提高阀门运行稳定性。

c. 模型试验中,配备导流罩的锥形阀排放性能明显优于配直管段锥形阀。从现场运行来看,为锥形阀配置导流罩,可提高消能效果,减小对下游的冲刷,有助于锥形阀的运行稳定。

d. 现场测试工况下,补气与否对锥形阀排放系数的影响不大,但补气能减小锥形阀运行时的阀体振动,表明补气抑制了气蚀的产生与破坏,更有利于锥形阀的运行安全。

3.4 单级单吸高扬程大容量立轴离心泵

干河泵站最高扬程 233.31m、设计引用流量 $23\text{m}^3/\text{s}$,单泵电机容量 22.5MW,采用单级单吸立式离心泵。目前中国尚无类似规模的大型泵组制造和运行业绩,国外同类水泵业绩也较少,水泵的选型设计、设备制造、运行维护在国内外均是难点。通过与日本日立公司、荏原公司及德国安德里茨公司、哈尔滨电机厂等知名企业技术交流,掌握各生产厂家的设计、研发、制造能力及工程投运情况,以万家寨引黄工程水泵的工程经验为依托,通过中国水科所、哈电研究所针对该工程所做的 CFD 模拟分析、转轮实验模型、水泵泥沙磨损试验及预估分析等技术咨询讨论分析,综合各方面因素后最终研究选定单级单吸离心泵。

通过选型设计、水力优化设计、模型试验研究等研发环节,设计了不同转速的多个试验模型水泵,制作了 8 个模型水泵作为研发优化研究对象,经多轮 CFD 优化设计和模型试验分析比较、修型研究以及全流道匹配优化设计,最终设计出满足泵站技术要求、具有最佳水力性能的优秀水泵模型。经模型水泵验收试验和水

力机械实验室 FP3 中立试验台复核试验后,开发设计出定型型号为 PHLA1077—LJ—206 的高扬程单吸单级立式离心泵,原型水泵最高效率达 93.27%,各项参数指标达到国际领先水平,填补了中国大型离心泵自主研发的技术空白,实现了自主研发及技术创新,显著提升了中国大型离心泵的研发制造水平,推动中国水泵行业的技术进步。

3.5 立轴大功率变频同步电机

工程采用自主研发的中国最大功率的立轴变频调速同步电机。通过改变电机的通风方式、磁极绕组加散热匝、风叶形式特殊设计等措施,有效解决电机散热问题。为了消除变频电源运行中产生的谐波对系统稳定运行的影响,对电机定子结构、电气及机械性能进行了动力优化设计,提出了新的定子整数槽绕组的结构形式,解决了分数槽绕组磁动势分数次谐波和主极磁场相互干扰的关键技术问题。匹配了电机定子与机座结构的固有频率,降低了电机的风阻,改善了电机的通风条件,有效控制了电机产生的机械、电磁振动对系统的影响。

该电机解决了大功率变频电动机散热、绝缘、电磁设计、高效率、结构设计等关键技术难题,填补了中国泵用立轴大功率变频调速同步电机技术的空白。

3.6 大容量变频装置

根据水泵运行工况的要求,水泵采用变频调速运行,电机单机容量达 22.5MW,目前超过 20MW 的大容量变频器及驱动电动机在提水泵站中的应用中国尚属首次,国外亦不多见,主要集中在冶金行业和军工企业内。大容量中高压变频器价格昂贵,在工程投资中占有不小比重,且结构复杂,包含输入变压器、滤波器、功率柜、可控硅等,制造技术和工艺要求高。目前中国制造并已投运的变频装置容量最大仅达 10MW,20MW 以上大容量变频器中国尚处于研制阶段,无成熟的运用经验

通过与国外多家知名企业多次技术交流,掌握主要厂家的设备性能、特点及结构型式,借鉴万家寨引黄工程水泵变频运行经验,以及国内冶金、化工和军工企业 20MW 以上大功率变频调速运行经验,邀请国内专

家进行技术咨询,最终通过招标选定瑞士某公司生产的 ACS6000 电压源型变频器。

3.7 泵站厂房结构振动控制设计

干河泵站属于大型泵站,从水力系统到厂房结构动力设计均尚无国家规程、规范或标准可依,参照中国已投入运行的抽水蓄能电站的运行情况,其机组或厂房结构在机组工况变迁的过程中,均不同程度存在振动问题。泵站泵组转速高、轴系长、运行水头变幅大、运行工况复杂,为预测和评价水泵在不同运行工况对厂房结构可能带来的安全隐患和不稳定因素,避免厂房结构在工况变迁过程中发生超常规振动,创新性地提出了复杂厂房结构的“错频减振”控制技术,即通过结构动力优化设计,错开结构主要自振优势频率与机组暂态过程的脉动优势频率,从而达到削减或控制结构振动峰值的目的。

3.8 高地震烈度区软土地基大型渡槽结构方案

普沙渡槽位于昆明市嵩明县主城区规划区内,因而要求渡槽跨度能尽量大且槽身结构型式尽量轻盈美观,从而符合城市景观的要求;同时,横跨普沙河古河道内,地基较为软弱,且该区域处于高地震烈度区,其场地地震设计加速度为 0.338g。普沙渡槽采用跨度为 25m,槽壁厚为 30cm,槽身为“U”形预应力结构,减少了混凝土结构尺寸,单位长度自重很轻,大幅度提高了渡槽跨度,满足城市景观、跨越普沙河段跨度以及普沙河边现状道路和规划公路等要求,结构受力条件和抗震性能较好,施工方便。

3.9 输水线路穿越小江活动性区域断裂方案

工程穿越小江活动断裂带中段的东支和西支,两断裂均为全新世活动断裂,构造变形量大、地震烈度高。区域活动性断裂带具有规模大、蠕滑变形、突发地震变形等特点,变形量较大,带来结构较高的变形适应性要求。为适应区域活动性断裂带变形隧洞采用锚杆+挂网喷混凝土+钢拱架的全断面二次衬砌支护方式,倒虹吸跨越主断裂带不设置镇墩,双向聚氟乙烯双向滑动支座,固定支座及适应能力较强复式万向型波纹管伸缩节(每个可适应变形 100mm)配套协调布置。

(下转第 35 页)

分别成型 150mm × 150mm × 150mm 立方体抗压试件,试件成型过程中配重并置于振动台振动 80 ~ 90s 后抹平置于标养室养护 28d。

3.3 砂率与抗压强度关系曲线

按不同砂率的胶凝砂砾石试件经 28d 标准养护后,进行了抗压强度的测试,砂率与抗压强度的关系曲线见图 3。从图中可以看出,当砂砾石的砂率大于 30%,试件的抗压强度呈现明显下降的趋势。由于胶凝砂砾石的胶凝材料只有 90kg/m³,当砂率大于 30%后,由用水量、水泥用量、掺合料用量所组成的灰浆浆体已开始无法完全填满砂的所有空隙,造成了抗压强度的下降。

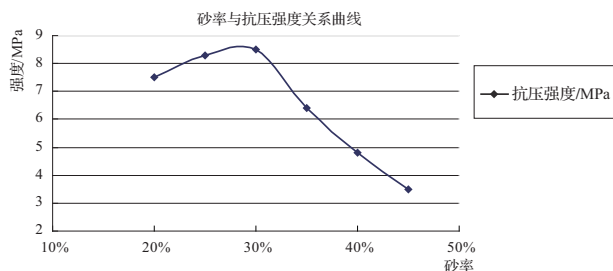


图 3 胶凝砂砾石砂率与强度关系曲线

(上接第 27 页)

4 结 语

开工建设后,针对工程建设过程中遇到技术重点及难点,参建单位也开展了一系列科学试验与研究。如:大坝混凝土面板施工、水库帷幕灌浆试验、坝料碾压复核试验、深斜井混凝土运输方式。为提高重大技术问题决策能力,聘请国内、省内从事水利水电工程建设的各相关专业资深技术专家,组建专家委员会,并委托专业咨询中心进行专项技术咨询,组织开展了溢洪道高边坡支护方案、泵站地下主厂房帷幕灌浆、引水隧洞通过暗河涌水带、输水线路不良地质洞段(浅埋、涌水、突泥等)处理方案、新增支洞方案等重大技术问题攻关。这些关键技术问题的解决,有效控制了工程质量、进度及投资,提供强有力的技术支撑,确保工程顺利建成,运行安全可靠。工程于 2013 年 12 月 28 日正

4 结 语

守口堡水库坝址砂砾石料场 25 组砂砾石样的筛分试验结果表明:该料场的砂砾石颗粒级配中,5 ~ 40mm 粒径的石料含量偏低,剔除 150mm 粒径大石后,小于 5mm 粒径的砂料含量则偏多;但添加 25% 的 5 ~ 40mm 粒径的石料不仅提高了 5 ~ 40mm 粒径的石料含量,还可有效降低砂料的含量,从砂砾石颗粒级配包络线上可以看出,上下包络线之间的面积变小,说明颗粒级配的变化范围变窄了,从施工过程中的配合比控制来说,更便于施工控制。从砂率与抗压强度的关系曲线可以看出,砂砾石砂率大于 30% 的胶凝砂砾石强度呈快速下降趋势,随着砂率的增加对灰浆的需求量增加,砂的空隙不能被灰浆完全填满,引起强度的快速下降;同时,如果砂率过低则石子的空隙也无法被砂浆有效填充,骨料分离同样引起强度的降低。砂砾石的砂率在 20% ~ 30% 之间比较有利,由于胶料的用量较少,所以在保障强度的前提下,较少的砂率更有利于灰浆填满砂的所有空隙,对胶凝砂砾石的质量更有利。◆

式投产运行,截至 2016 年 9 月底,已累计补水滇池 15.1 亿 m³,工程运行良好,通过向滇池补充稳定优质水源,配合昆明市已经实施的环湖截污、入湖河道整治等综合治理措施,滇池水体污染指数明显下降,水质得到显著改善,生态补水效益明显。同时,牛栏江水通过盘龙江河道汇入滇池,清澈的上游来水极大程度地净化了盘龙江,对昆明市的市容建设与生态环境改善都产生了积极作用,社会反映良好。◆

参考文献

- [1] 刘加喜. 实施牛栏江—滇池补水工程让高原明珠重现光彩[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 1-4.
- [2] 梅伟, 郑铭. 德泽水库溢洪道阶梯式消能设计[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 14-16.
- [3] 李云, 何伟, 朱国金. 输水线路关键技术问题初探[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 31-36.
- [4] 李云, 何伟, 朱国金. 牛栏江—滇池补水工程技术管理探悉[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 95-98.