

牛栏江—滇池补水工程 高扬程大型离心泵研究与实践

游超 郭建平 覃大清 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

牛栏江—滇池补水工程 高扬程大型离心泵研究与实践

游超 郭建平 覃大清 等 著

牛栏江—滇池补水工程
高扬程大型离心泵研究与实践



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书阐述了高扬程大型立式单级离心泵的开发理论和数值分析方法,全面展示了水泵全流量范围内技术特性、泥沙磨损的研究及其试验验证成果,反映了离心泵研究理论与工程应用领域的前沿动态和最新成就,全面总结了在科研、设计、制造等方面的实践经验。主要包括:水泵水力开发优化、泥沙磨损与试验研究,水泵选型,水泵流量调节,水泵设计与制造,水泵机组安装与调试,水泵测试,厂房支撑结构振动和水泵小流量工况性能研究,简要介绍了水泵技术交流、电动机、变频装置和励磁系统,并对水泵性能进行了综合分析和评价。

本书可供水泵科研、设计、制造、试验和泵站设计、安装、运行等方面的技术人员阅读,也可供大中专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(C I P)数据

牛栏江—滇池补水工程高扬程大型离心泵研究与实践/
游超等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2017.9
ISBN 978-7-5170-5824-3

I. ①牛… II. ①游… III. ①滇池—流域—跨流域引
水—高扬程泵—离心泵—研究 IV. ①TH311

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第221636号

书 名	牛栏江—滇池补水工程高扬程大型离心泵研究与实践 NIULAN JIANG—DIANCHI BUSHUI GONGCHENG GAOYANGCHENG DAXING LIXINBENG YANJIU YU SHIJIAN
作 者	游 超 郭建平 覃大清 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.5印张 415千字
版 次	2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	88.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《牛栏江—滇池补水工程高扬程大型离心泵研究与实践》

作者名单

游 超	郭建平	覃大清	吴喜东	宫让勤
潘罗平	张立翔	邢海仙	闫黎黎	章 魏
徐宏光	钟 苏	马 凤	冯晓东	代艳芳
戴宏宇	余江成	童保林	曹登峰	蒋东兵
李令松	王建春	梅 伟	张天明	蔡云华
李耀辉	朱双良	潘立平	杨明珍	李海鹏
禹向东	孟立明	邱 华	何云虎	

滇池是我国六大淡水湖泊之一，在云南省经济发展中具有举足轻重的地位和作用，可谓“滇池清则昆明兴，昆明兴则云南兴”。云南省委、省政府按照国务院“三湖”水污染治理座谈会议精神，全面分析总结滇池治理成效，决定在实施底泥疏浚、环湖生态带、面源污染治理、入湖河道整治等综合治理措施的基础上，进一步实施环湖截污和外流域调水两项工程措施，从根本上解决滇池流域水资源严重短缺制约滇池水环境改善的“瓶颈”问题。

牛栏江—滇池补水工程作为外流域调水措施是滇池流域水环境综合治理六大工程措施中的关键性工程，是云南省优化配置水资源的一项重大措施，是实施“兴水强滇”战略、加快推进云南省水生态文明建设的一项重大行动，也是为云南服务和融入国家发展战略，成为面向南亚、东南亚辐射中心提供有力的水资源保障支撑的一项战略性工程。

无论是在建设规模、投资、调水量上，还是工程技术难度方面，牛栏江—滇池补水工程在云南省水利工程建设中都是空前的。工程于2008年年初开展前期工作，2013年年底建成通水，至2016年年底已向滇池补充优良水质近17亿 m^3 ，使滇池水体污染指数明显下降、水体透明度上升、水体富营养状态持续改善。自2016年1月起，滇池水质由劣V类转为V类，是近30年来首次出现的情况。另外，工程还为昆明市提供了可靠的应急备用水源，解决了城市的供水危机。

牛栏江—滇池补水工程的实施，在探索云南省跨流域（区域）统筹配置水资源项目建设新思路、新途径、新方式、技术创新等方面做了许多探索性和开创性工作，工程建设亮点纷呈，许多经验值得总结、提炼和推广，特别是干河泵站的水泵和变频电机实现了自主化。

干河泵站设计流量为 $23\text{m}^3/\text{s}$ ，装机4台，水泵机组单机功率为22.5MW，总装机容量为90MW，水泵最大提水扬程为233.3m。干河泵站水泵机组的主要参数指标在同类立式单级单吸离心水泵机组中极为少见，国内厂家没有可供借鉴的现成经验和类似业绩，国外有类似制造业绩的厂家也很少。为此，在工程可行性研究阶段，委托水利部水利水电规划设计总院开展了高扬程大

功率离心泵及调节方式研究工作。通过公开招标，真正意义上开创了中国企业在高扬程大型离心泵自主研发、制造和首次运用于工程的先河。研究过程中，研究人员兢兢业业，思路缜密，始终充满信心，遇到困难和压力毫不气馁，积极探索解决问题之道。牛栏江—滇池补水工程的运行成果表明，自主研制的高扬程大功率离心泵是非常成功的。

水泵研究技术团队根据干河泵站的功能要求及运行条件，提出了水泵总体技术要求及研究目标，开展了大量的理论分析、研究和试验工作，以及原型水泵的设计、制造、安装与调试和现场测试等。本书对高扬程大功率离心泵研制过程中开展的工作和积累的经验进行了全面地总结，从理论到实践，内涵丰富，可以为大型离心泵的研制提供良好的借鉴。

云南省水利厅副厅长
云南省牛栏江—滇池补水工程
协调领导小组办公室主任



2017年8月1日

序二

滇池是世界关注的高原湖泊，习近平总书记于2015年视察滇池时指出：“滇池是云南人民赖以生存的母亲湖，一定要把滇池治好”。为解决滇池水质严重下降、水体重度富营养化状态的问题，推进现代新昆明的建设和云南省经济社会的可持续发展，树立云南生态文明新形象，牛栏江—滇池补水工程作为滇池水污染治理六大工程措施之一起到了至关重要的作用。

目前，我国大型水力发电设备的设计、制造已经达到了国际领先水平，自主研制、输出功率达1000MW的巨型水轮发电机组将在金沙江白鹤滩水电站得到应用。与之形成鲜明对比的是，国内自主研制的大型离心泵很少，而且在技术性能、制造质量和运行可靠性上与国际先进水平的差距较大，形成了许多国内大型泵站关键设备被少数国际大公司垄断的局面。进口水泵设备高昂的价格和服务，导致了国内大型泵站在机电设备的高投入，而且运行成本也高，这与我国当前在重型装备领域所具备的技术研发能力及制造水平反差很大。

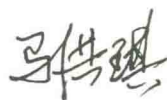
牛栏江—滇池补水工程干河泵站高扬程大功率离心泵设计扬程为223.32m，单泵设计流量为 $8.12\text{m}^3/\text{s}$ ，水泵单机配套功率为22.5MW，主要参数指标在同类单级单吸水泵机组中，居世界第二位，国内尚无自主研发和制造如此大型离心泵的先例，国外可供选择的专业制造商也屈指可数，因此项目前期设计时在水泵选型方面就遇到了难题。基于降低水泵设备投资、提高国内水泵行业研究水平的现实需求，以及积累研究经验、追求自主创新和突破的发展战略考虑，研究人员在前期设计阶段开展了牛栏江—滇池补水工程高扬程大功率离心泵及调节方式等研究工作，解决了水泵选型、水泵关键参数及设计、制造、安装等相关技术问题，三年多的运用实践表明，水泵运行正常，主要技术指标达到预期效果。

本书全面总结了大型立式离心泵的研究和实践经验，介绍了水泵选型和设计的新理念，展现了研究成果的科学性、针对性和实用性，充分反映了当前水泵设计领域的重要科研成果和最新技术水平，对促进我国水泵行业的技术进步、全面提高水泵技术水平和产品质量具有积极作用和重要价值。

泵是伴随着工业发展而发展起来的，在国民经济各部门中有着重要的地位和作用。干河泵站水泵的成功投产，把我国泵行业的技术水平推上了一个全新的高度，表明我国完全有能力依靠自己的智慧和力量开发出性能优异的泵类产品。

随着国内长距离调水工程和海绵城市的建设呈现出水泵大型化的需求，水泵行业的发展面临着良好的机遇。衷心希望在牛栏江—滇池补水工程建设中积累的技术、经验能传承下去，并在继承中发展、发展中创新，不断提高，为推动我国水利水电事业和基础工业的新发展、加快社会主义现代化建设作出新的贡献。

中国工程院院士



2017年8月1日

前 言

随着我国经济和社会的高速发展，水资源的需求快速增长，长距离、跨流域调水工程的建设越来越多，大功率离心泵站也呈现出明显的增长。国外在大型离心泵研究方面起步早，经过不断地更新与发展，在水力开发与性能、设计制造等方面有较高的技术水平。我国大型离心泵的研究起步于农业灌溉工程，受市场需求、设计理念、技术储备、知识产权等因素的限制，水泵科研与应用实践未能实现完美结合，致使大型离心泵、特别是在高扬程领域与国外先进水平差距大。

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，干河泵站是其核心。在工程前期设计中，自主开展了水泵水力设计技术攻关、泥沙磨损和泥沙对水泵的性能影响等研究工作。3年来，水泵经受了各种运行工况的考验，均能安全、稳定运行，并经过现场测试，证明性能是优良的。作为我国目前单机容量最大的离心水泵机组，干河泵站水泵研制的成功，标志着我国大型离心泵的设计制造技术达到了世界领先水平，反映了离心泵研究理论与工程应用领域的前沿动态和最新成就。

本书致力于牛栏江—滇池补水工程干河泵站高扬程大功率离心水泵的水力模型开发与试验研究方法、泥沙磨损试验与数值分析方法的建立，变速调节性能研究，零流量和小流量工况的扬程特性研究以及结构设计、主要部件的刚强度分析，全面阐述了在科研、选型、设计、制造、安装到运行等方面的实践和经验，希望对大型离心泵的应用研究奠定坚实的基础并起到促进作用。

本书共分9章。第1章介绍了干河泵站的工程概况和设计条件，以及水泵过机泥沙的分析方法和成果；第2章以高扬程大功率立式离心泵的开发与试验研究为重点，建立了水力模型开发与试验研究、泥沙磨损试验与数值分析的方法，重点介绍了中低比转速离心泵的水力开发与优化和模型试验验证研究、材料磨损试验与磨损预估分析、泥沙含量对水泵性能影响的研究以及各项研究的主要结论，并对水泵零流量和小流量工况的扬程特性进行了理论研究和原型水泵造压试验成果分析；第3章介绍了泵站水力机械设计，主要包括水泵

型式、台数和主要参数选择，水泵变速调节及技术特性分析，水泵附属设备选型，泵站水力过渡过程分析，泵站辅助系统设计和泵站厂房布置等；第4章为水泵设计与制造，包括水泵结构设计、主要部件的刚强度分析，以及叶轮的制造工艺；第5章介绍了与水泵配套的变频电动机、变频装置和励磁系统；第6章主要介绍了水泵机组的安装与调试，包括安装流程、主要部件的安装工艺，水泵机组的调试与试运行，以及水泵机组现场调试的性能测试；第7章介绍了水泵测试，主要包括原型水泵效率和压力脉动测试方法、测试结果，水泵原型试验与模型试验结果对比以及测试结果分析；第8章介绍了泵站厂房支撑结构振动研究，主要包括泵站地下厂房结构建模、地下厂房结构动力优化设计方法、厂房振动控制标准和结构振动计算成果；第9章综合分析了水泵的技术性能，总结了研究的主要内容和经验。

本书第1章由梅伟、张天明、蔡云华编写；第2章由游超、覃大清、吴喜东、宫让勤、余江成、郭建平编写；第3章由郭建平、游超、邢海仙、闫黎黎、童保林编写；第4章由覃大清、游超、徐宏光、钟苏、马凤编写；第5章由李耀辉、李海鹏、禹向东、孟立明、邱华、何云虎编写；第6章由游超、蒋东兵、李令松、冯晓东、朱双良、潘立平编写；第7章由游超、潘罗平、曹登峰、代艳芳、杨明珍编写；第8章由张立翔、郭建平、章魏、戴宏宇编写；第9章由游超、王建春、张天明编写。全书由游超统稿和审定。

由于作者的水平有限，加之时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请读者予以指正。

作者

2017年3月

目 录

序一	
序二	
前言	
第 1 章 概述	1
1.1 工程简介	1
1.2 泵站设计条件	4
1.3 水泵过机泥沙	5
1.4 泵站布置	9
1.5 工程特性表	12
第 2 章 高扬程大功率立式离心水泵开发与试验研究	20
2.1 研究缘由	20
2.2 高扬程大功率立式离心水泵研究内容和目标	21
2.3 水泵水力开发与优化	22
2.4 清水条件下水泵模型试验	52
2.5 泥沙磨损试验及预估分析	60
2.6 水泵浑水模型试验	74
2.7 水泵零流量和小流量工况的扬程特性研究	80
2.8 水泵开发与试验研究的主要结论	88
第 3 章 泵站水力机械设计	91
3.1 水泵机组主要参数选择	91
3.2 水泵流量调节	105
3.3 水泵进、出水阀门	110
3.4 泵站水力过渡过程	112
3.5 主厂房和检修球阀室起重设备	120
3.6 泵站辅助系统	120
3.7 地下泵房通风空调系统	129
3.8 泵站主要机电设备布置	132
第 4 章 水泵设计与制造	138
4.1 水泵主要参数	138

4.2	水泵结构设计	139
4.3	水泵主要部件刚强度分析	143
4.4	水泵叶轮工艺与制造	156
第5章	变频电动机、变频装置和励磁系统	164
5.1	变频电动机	164
5.2	变频装置	180
5.3	励磁装置	188
第6章	水泵电动机组的安装与调试	192
6.1	水泵安装	192
6.2	电动机安装	199
6.3	水泵机组的调试与试运行	204
6.4	水泵机组现场调试的性能测试	208
第7章	水泵测试	217
7.1	测试的目的和内容	217
7.2	测试方法	217
7.3	测试范围和条件	219
7.4	测试结果	222
7.5	水泵原型试验与模型试验结果对比	237
7.6	测试结果分析	243
第8章	泵站厂房支撑结构振动研究	246
8.1	研究背景	246
8.2	研究内容	246
8.3	地下厂房结构错频减振设计技术	246
8.4	泵站厂房支撑结构振动研究结论	264
第9章	综合分析 with 主要经验	265
9.1	综合分析	265
9.2	主要经验	266
	参考文献	268

第1章 概 述

1.1 工 程 简 介

1.1.1 工程概况

牛栏江—滇池补水工程位于云南省曲靖市和昆明市境内，是国家发展和改革委员会、环境保护部、水利部、住房和城乡建设部联合批复的《滇池流域水污染防治规划（2006—2010年）补充报告》（发改地区〔2009〕1188号）中确定的“十一五”期间建设项目之一，也是云南省政府批复的《牛栏江流域（云南省部分）水资源综合利用修编规划》（云政复〔2008〕82号）中确定的近期建设项目，是滇池流域水环境综合治理六大工程措施中的关键性工程。在实施环湖截污、湖泊底泥疏浚等治理措施的基础上，实施牛栏江—滇池补水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重要作用。工程近期任务是向滇池补水，并在昆明发生供水危机时提供城市生活用水及工业用水；远期任务是向曲靖市供水，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。

牛栏江—滇池补水工程在牛栏江干流德泽河段修建德泽水库，调蓄径流和壅高河道水位，在库区距坝17.37km处设干河泵站提水，通过隧洞等输水工程输水至滇池流域，在松华坝水库下游注入盘龙江，穿昆明城区后进入滇池。工程多年平均可引水量为5.72亿 m^3 ，其中枯季水量为2.45亿 m^3 ，汛期水量为3.27亿 m^3 ，水量汛枯比为57:43，扣除1%的输水损失，进入滇池的环境补水量为5.66亿 m^3 ；设计引水流量23 m^3/s 。工程由德泽水库枢纽、干河泵站及泵站至昆明的输水线路三大工程所组成。

1. 德泽水库枢纽

德泽水库枢纽位于曲靖市沾益县境内的牛栏江干流上，距离昆明173km，为大（2）型水库。水库枢纽混凝土面板堆石坝最大坝高142.4m，水库正常蓄水位1790.00m，死水位1752.00m，校核洪水位1793.91m，相应水库总库容为4.48亿 m^3 。

水库枢纽由大坝、溢洪道、导流泄洪隧洞、发电放空隧洞、坝后电站组成（图1.1-1）。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。水库泄洪建筑物由溢洪道与泄洪隧洞组成，采用联合泄洪方式，最大下泄流量2020 m^3/s 。溢洪道为开敞式，布置于左坝肩，采用阶梯消能方式，最大泄量1148 m^3/s 。泄洪隧洞和导流洞以龙抬头结合，布置于右岸，最大泄量872 m^3/s 。发电放空隧洞为圆形有压隧洞，布置于大坝左岸、溢洪道右侧山体中，主要功能是泄放下游生态流量，供坝后电站发电，其次为水库放空，长远兼顾曲靖供水；进口设置高低两个孔口，高孔为发电取水口，进口底板高程1741.00m，发电引用流量为21 m^3/s ；低孔为放空孔，进口底板

高程 1680.00m，末端设直径 2800mm 锥形放空阀，放空最大泄量为 $135.4\text{m}^3/\text{s}$ 。坝后电站位于大坝左岸坝脚处，主要利用下游生态补水量和弃水量发电；电站为地面式厂房，采用一洞双管、单管单机引水发电，电站装机 $2\times 10\text{MW}$ ，多年平均发电量 9270 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。



图 1.1-1 德泽水库枢纽布置及库区图

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的干河村附近，泵站取水口距德泽水库大坝 17.37km。泵站设计提水流量 $23\text{m}^3/\text{s}$ ，最高扬程 233.3m，为一级提水站，安装 4 台单吸单级立式离心水泵（含备用水泵 1 台），水泵配套电机的额定功率为 22.5MW，泵站装机容量为 90MW。干河泵站主要由进水建筑物（取水口、引水隧洞、调压室、进水压力管道）、厂区建筑物（地下主厂房、附属洞室、地面副厂房）、出水建筑物（出水压力管道、出水池）等组成。干河泵站三维总体布置及实景见图 1.1-2、图 1.1-3。

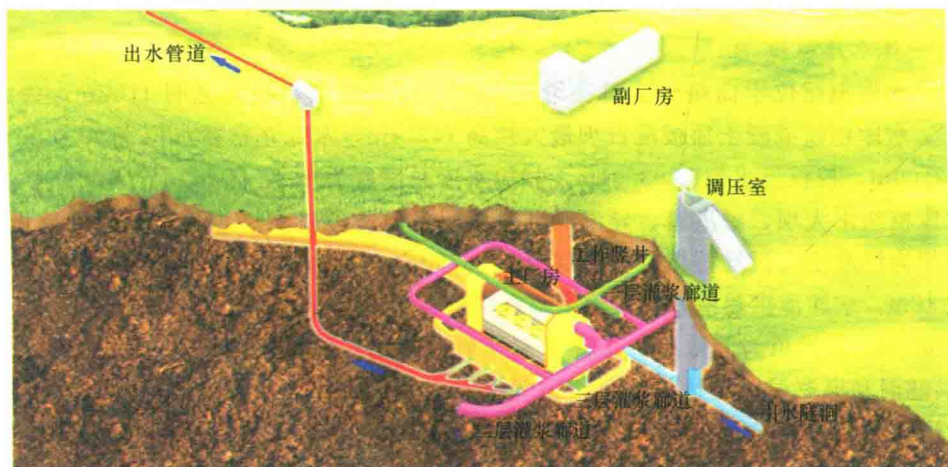


图 1.1-2 干河泵站三维总体布置图



图 1.1-3 干河泵站地下厂房和出水池实景图

3. 输水线路

输水线路布置于牛栏江左岸，总体走向西南，线路起点为干河隧洞进口，末端为松华坝下游盘龙江。输水线路设计流量 $23\text{m}^3/\text{s}$ ，总长 115.85km ，主要由隧洞、箱涵及明渠、倒虹吸、渡槽等组成，其中隧洞有 10 条，长 104.52km ，占线路总长的 90.23% ；渡槽 2 座，长 1.05km ；倒虹吸 3 座，长 1.52km ；渠道 6 条，长 8.75km ；退水建筑物 5 座。干河隧洞进口高程 1973.18m ，输水线路末端底高程 1902.95m 。在输水线路出水口利用增氧曝气预留的 9m 落差建造了亚洲最大的人工瀑布（图 1.1-4），为建设绿色城市增添了魅力。

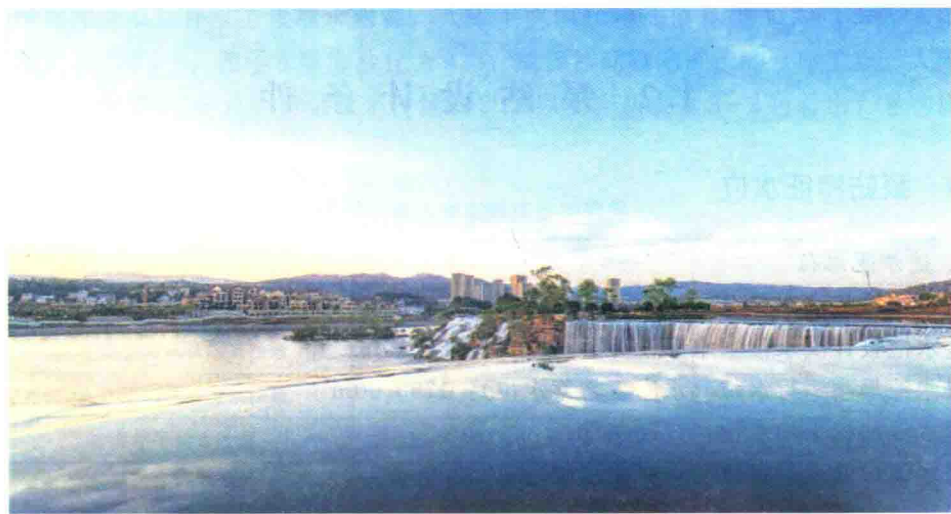


图 1.1-4 牛栏江—滇池补水工程出水口实景图

1.1.2 工程建设情况

牛栏江—滇池补水工程于 2008 年 12 月开工建设，2012 年 9 月德泽水库开始下闸蓄水，2013 年 5 月坝后电站首台机组并网发电，2013 年 9 月底工程试通水成功，2013 年 12



月工程正式通水运行。

干河泵站是牛栏江—滇池补水工程的“心脏”，于2010年2月4日开始动工建设，2010年9月21日地下主厂房动工建设，2011年9月30日开挖完成，2012年4月14日具备泵组安装条件，2013年4月9日地下主厂房衬砌完成。

4号泵组于2012年4月15日开始安装，2012年12月25日安装完成，2013年6月7日无水调试及相关试验完成，2013年7月30日带水调试及相关试验完成，2013年9月7日完成72h带负荷连续试运行。

3号泵组于2012年4月20日开始安装，2013年3月25日安装完成，2013年7月10日无水调试及相关试验完成，2013年8月3日带水调试及相关试验完成，2013年9月2日完成72h带负荷连续试运行。

2号泵组于2012年5月4日开始安装，2012年11月15日安装完成，2013年11月29日无水调试及相关试验完成，2013年12月1日带水调试及相关试验完成，2013年12月5日完成72h带负荷连续试运行。

1号泵组于2012年5月2日开始安装，2013年9月20日安装完成，2013年9月30日无水调试及相关试验完成，2013年10月26日带水调试及相关试验完成，2013年10月30日完成72h带负荷连续试运行。

通过各参建单位的艰苦努力，工程建设各项工作扎实有效推进，干河泵站四台水泵机组均一次性启动成功。截至2016年12月底，已累计向滇池补水17亿 m^3 、向昆明市供水1.2亿 m^3 。牛栏江—滇池补水工程的建成，对增加滇池流域水资源量、提高水资源承载能力、改善水环境质量、保障城市应急供水等方面发挥了重要作用，创造了显著的社会效益和生态效益。

1.2 泵站设计条件

1.2.1 泵站特征水位

1. 进水池水位

进水池校核洪水位（水库校核洪水位）：1793.09m

进水池设计洪水位（水库设计洪水位）：1791.49m

进水池最高运行水位（水库正常蓄水位）：1790.00m

进水池加权平均水位：1778.61m

进水池最低运行水位（水库死水位）：1752.00m

2. 出水池水位

出水池设计运行水位（ $Q=23\text{m}^3/\text{s}$ ）：1976.80m

出水池最低运行水位（ $Q=7.67\text{m}^3/\text{s}$ ）：1974.80m

1.2.2 泵站流量

设计流量：23 m^3/s

最高扬程下引用流量：20m³/s（相应单机：6.67m³/s）

1.2.3 特征扬程、水力损失

水泵扬程损失：0.01606805Q²

最高扬程 $H_{\max}$ ：233.3m

设计扬程 H_F ：223.32m^①

最低扬程 $H_{\min}$ ：185.51m

1.2.4 水泵安装高程

水泵安装高程（固定导叶中心平面）：1725.00m

1.2.5 泵站动能指标

泵站多年平均供水量：5.72 亿 m³

工作水泵年运行时间：6908h

1.3 水泵过机泥沙

1.3.1 入库泥沙

德泽水库为滇池补水工程取水水源，入库主要泥沙特征值见表 1.3-1，悬移质泥沙颗粒级配见表 1.3-2。德泽水库库沙比为 413，属泥沙问题不严重的水库工程。入库泥沙主要集中在主汛期 6—9 月，占全年来沙量的 90%以上。从表 1.3-2 可看出，悬移质中值粒径 d_{50} 为 0.008mm。

表 1.3-1 德泽水库入库主要泥沙特征值

编号	项 目	单位	特征值	备 注
1	多年平均来沙量	万 t	133.1	
2	多年平均悬移质来沙量	万 t	121	
3	多年平均推移质来沙量	万 t	12.1	按悬移质的 10%计
4	多年平均含沙量	kg/m ³	0.726	
5	悬移质泥沙平均粒径	mm	0.027	大沙店水文站实测资料
6	悬移质泥沙中值粒径	mm	0.008	
7	河床质泥沙平均粒径	mm	31.44	
8	河床质泥沙中值粒径	mm	8.4	

① 工程可行性研究阶段和水泵科研时确定的泵站设计扬程为 219.3m。出于泥沙磨损对水泵性能的影响，水泵招标时将设计扬程提高至 221.2m。水泵第二次设计联络会上最终确定的设计扬程为 223.32m。