

CHANGSHU DUOJI BENGTZHAN
GONGCHENG SHEJI JI YOUHUAIJISHU

长输多级泵站 工程设计及优化技术

程鲁丰 沈全锋 张 涛 编著



化学工业出版社

CHANGSHU DUOJI BENGTZHAN
GONGCHENG SHEJI JI YOUHUAJISHU

长输多级泵站 工程设计及优化技术

程鲁丰 沈全锋 张涛 编著



化学工业出版社

北京·

本书以中国石油工程建设公司通过国际公开招标而获得的阿尔及利亚多级输水泵站工程项目为基础,全面、详细地介绍了长距离输水工程的一些关键技术,内容涵盖地质条件与工艺水池设计优化、长距离输水管道稳态水力计算和水锤数值计算、泵站内工艺逻辑控制与参数优化、泵站内参数模拟及优化、泵站间联运控制,以及管线材质及焊接工艺适应性研究等。全书汇总了“沙漠长距离输水工艺及控制优化技术研究”课题的研究成果,可以为沙漠、岩石、丘陵等具有类似气候地质条件地区的油气水输送管道工程及油气水混输管道工程设计提供参考。

本书可供管道工程、泵站设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

长输多级泵站工程设计及优化技术/程鲁丰,沈全锋,张涛
编著. —北京:化学工业出版社,2015.12

ISBN 978-7-122-25401-6

I. ①长… II. ①程…②沈…③张… III. ①多级泵-泵站-水利工程 IV. ①TV675

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 243056 号

责任编辑:张兴辉 曾 越

装帧设计:王晓宇

责任校对:宋 夏

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张11 字数287千字 2016年2月北京第1版第1次印刷

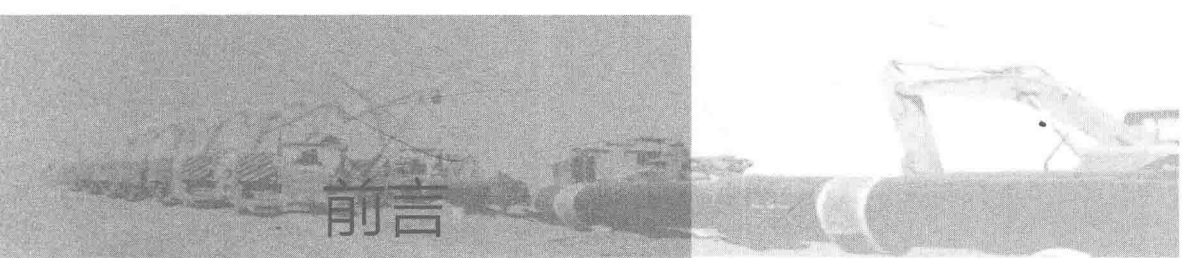
购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:69.00 元

版权所有 违者必究



前言

为满足撒哈拉沙漠腹地的重要城市塔曼拉塞特 (Tamanrasset) 日益增长的用水需求, 阿尔及利亚政府决定实施南部大型输水项目集。从因萨拉赫 (In Salah) 到塔曼拉塞特的长距离输水工程是阿尔及利亚总统的“政治民心工程”, 是关系到南部大马省 50 万居民饮水的民生工程。项目的高标准、高质量建设和顺利投产送水, 为改善当地居民的生活水平及稳定区域社会发挥了巨大的作用。

该工程分为地下水钻井、水源地集输管网及集水池、脱盐站、长输管线、泵站和计量站、终端水池 6 个标段。设计输水量 $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$, 全程 750km, 由海拔 305m 的因萨拉赫通过 6 个泵站及其间的双线输水管道将水分段提升至海拔 1450m 的塔曼拉塞特。该长输管线沿途无电力供应, 工程采用柴油天然气双燃料引擎作为动力驱动离心输水泵。各泵站蓄水池中的水经过离心泵提升进入下一级泵站的蓄水池。长输管道沿阿尔及利亚国家 1 号公路敷设, 根据水力计算设置沿程提升泵站。

中国石油工程建设公司通过国际公开招标获得阿尔及利亚水泵站工程项目, 是中国公司承担的第一个国际大型沙漠多级输水泵站项目。项目执行欧洲标准, 土建执行阿尔及利亚当地标准 (法国标准), 凸显项目为国际高端项目的特点。公司成立“沙漠长距离输水工艺及控制优化技术研究”课题组, 主要开展了以下工作: 进行了南部输水管线定向及泵站配置的优化过程; 针对干热、大温差的沙漠环境, 进行了水池结构设计及施工工艺优化过程; 采用水锤模拟软件瞬态计算确定防水锤设施及参数, 确保了各种工况下的管线安全; 探讨了重力流管道末端控制阀门的开闭速度对管线水击波动的影响; 比较了不同长度及走向的管道过渡态压力变化特性; 探讨了长距离输水泵站启停过程中设备参数的优化过程; 研究了站间联运控制中水池液位与泵转速的相互配置关系; 对泵机组振动问题进行了研究。同时, 课题组还对输水管线材质及焊接工艺适应性进行了研究, 通过焊接工艺、材质分析、电镜分析及旋转挂片试验探讨了不锈钢发生腐蚀的原因及应对措施。

本书汇总了“沙漠长距离输水工艺及控制优化技术研究”课题的研究成果, 可以为沙漠、岩石、丘陵等具有类似气候地质条件地区的油气水输送管道工程及油气水混输管道工程设计提供参考, 具有较大推广应用价值。

本书由程鲁丰、沈全锋、张涛编著, 编写过程中得到了罗双全、李昊、聂军、秦绪盛、谭红旗、于香利等同志的帮助, 在此一并表示感谢。

由于编者水平有限, 书中难免有疏漏之处, 恳请广大读者批评指正。

目录

第1章 沙漠长距离输水工程关键技术介绍	1
1.1 国内外长距离输水工程技术现状	2
1.1.1 长距离输水管道工程的重要性	2
1.1.2 国内长距离输水管道工程	2
1.1.3 国外长距离输水管道工程	3
1.1.4 长距离输水管道水锤问题	4
1.2 长距离泵站工程设计与优化研究	5
1.2.1 阿尔及利亚泵站工程设计总结	5
1.2.2 设计过程管理及教训	6
1.2.3 “沙漠长距离输水工艺及控制优化技术研究”主要内容	7
1.3 项目选用的柴油/天然气双燃料引擎	9
1.3.1 双燃料引擎目前存在的主要问题及发展方向	9
1.3.2 项目使用的双燃料引擎介绍	9
1.4 项目使用的大型离心泵	10
1.4.1 离心泵特点	10
1.4.2 项目使用的 HPDM 离心泵介绍	11
第2章 地质条件与工艺水池设计优化	13
2.1 概述	13
2.2 环境与地质条件	13
2.2.1 气候与气象	13
2.2.2 地貌与地质	14
2.2.3 地震	15
2.3 水池设计优化	15
2.3.1 设计分析与优化	15
2.3.2 高架水池支承选型	18
2.3.3 水池与阀室主体结构设计	20
2.3.4 屋盖支座	20
2.4 施工工艺优化	20
2.4.1 池壁构造	20
2.4.2 施工缝	21
2.4.3 裂缝与缺陷	21
2.4.4 外墙保温	22
2.4.5 后浇带	23
2.5 小结	23

第3章	长距离输水管道稳态水力计算和优化	24
3.1	概述	24
3.2	管线设计的基本原则	24
3.2.1	重力有压输水管道	24
3.2.2	加压输水管道	24
3.2.3	设计基本原则	24
3.3	初步设计情况	25
3.4	水力设计分析和方案优化	25
3.4.1	站间管线沿程水头损失	25
3.4.2	泵站内局部水头损失	26
3.4.3	校核原初步设计	26
3.4.4	方案优化	27
3.5	小结	28
第4章	长距离输水管道水锤数值计算	29
4.1	概述	29
4.2	基本模型	29
4.2.1	特征线法的基本原理	30
4.2.2	重力流下管道水锤计算	31
4.3	ST~SP1长输管线水锤计算	33
4.3.1	开阀水锤计算	34
4.3.2	关阀水锤计算	35
4.4	SP1~SP2长输管线水锤计算	36
4.4.1	停泵水锤计算	37
4.4.2	启泵水锤计算	42
4.4.3	小结	45
4.5	SP2~SP3长输管线水锤计算	45
4.5.1	停泵水锤计算	46
4.5.2	启泵水锤计算	52
4.5.3	小结	53
4.6	SP3~SP4长输管线水锤计算	54
4.6.1	停泵水锤计算	54
4.6.2	启泵水锤计算	63
4.6.3	小结	66
4.7	SP4~SP5长输管线水锤计算	67
4.7.1	停泵水锤计算	67
4.7.2	启泵水锤计算	75
4.7.3	小结	77
4.8	SP5~SP6长输管线水锤计算	77
4.8.1	停泵水锤计算	78
4.8.2	启泵水锤计算	84
4.8.3	小结	87
4.9	SP6~RT长输管线水锤计算	87
4.9.1	停泵水锤计算	88

4.9.2	启泵水锤计算	93
4.9.3	小结	95
第5章	泵站内工艺逻辑控制及工艺参数优化	96
5.1	泵站内工艺流程	96
5.1.1	泵的启闭过程及阀门加载工艺控制	97
5.1.2	泵运行方式	101
5.2	泵站内主要阀门的控制	101
5.2.1	Monovar 阀门	104
5.2.2	PCV 阀门	105
5.2.3	止回阀	106
5.2.4	水锤防护设备	110
5.3	小结	111
第6章	长距离输水泵站内控制参数模拟及优化研究	112
6.1	引擎泵组变速特性	112
6.1.1	引擎泵组变速调节	112
6.1.2	引擎泵组启动特性	114
6.2	SP1~SP6 引擎泵组控制参数匹配关系	116
6.2.1	引擎泵组联轴器扭矩传感器的原理	116
6.2.2	泵站内引擎泵组各参数匹配关系	118
6.3	引擎泵组泵轴过载振动有限元分析	121
6.3.1	泵轴偏心振动有限元分析	121
6.3.2	平行不对中泵轴动力学分析	125
6.4	小结	127
第7章	泵站间联运控制技术研究	128
7.1	蓄水池液位高低与泵参数的优化控制	128
7.1.1	PID 控制系统工作原理	128
7.1.2	水池液位高度与泵参数的优化控制	130
7.2	水池液位高度对泵进出口压力的影响	134
7.3	泵-管道系统参数的控制研究	134
7.4	小结	137
第8章	沙漠长距离输水管线材质及焊接工艺适应性研究	138
8.1	管道管材腐蚀适应性研究	138
8.2	不锈钢管的腐蚀现象	140
8.3	焊接工艺适应性研究	141
8.3.1	焊接材料的选择	142
8.3.2	焊接方法的选择	143
8.3.3	焊前准备	144
8.3.4	焊接工艺参数的选择	144
8.3.5	奥氏体不锈钢的焊后处理	146

8.4 水质分析及材质耐腐蚀性	146
8.4.1 水的腐蚀因子	146
8.4.2 现场水质分析	147
8.4.3 奥氏体不锈钢耐腐蚀机理分析	148
8.4.4 奥氏体不锈钢的腐蚀类型	149
8.4.5 奥氏体不锈钢腐蚀原因及影响腐蚀因素分析	151
8.5 管材腐蚀旋转挂片实验	153
8.5.1 仪器	153
8.5.2 试验条件	154
8.5.3 试验步骤	156
8.5.4 结果分析	156
8.6 管线材质焊缝腐蚀性电镜微观分析	158
8.6.1 光学金相分析	158
8.6.2 扫描电镜腐蚀表面分析	159
8.6.3 能谱分析	160
8.6.4 腐蚀处理建议	163

附录 符号和缩略词说明	165
--------------------------	------------

参考文献	166
-------------------	------------

沙漠长距离输水工程 关键技术介绍

阿尔及利亚南部输水项目站间最长的管道长达 168km, 单泵扬程高达 320m, 采用双燃料引擎驱动水泵, 技术参数远超出了国内标准的要求, 在国内外实属罕见。该工程分为地下水钻井、水源地集输管网及集水池、脱盐站、长输管线、泵站和计量站、终端水池 6 个标段。设计输水量 $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$, 全程 750km, 由海拔 305m 的因萨拉赫通过 6 个泵站及其间的双线输水管道将水分段提升至海拔 1450m 的塔曼拉塞特市, 如图 1-1 所示。

在详细设计、施工和试运阶段, 发现合同中有关初步设计的技术要求存在较多不合理的技术条款, 尤其是合同中双燃料引擎的一致性 & 工艺控制方面存在一些不尽完善的技术要求, 对后续的项目执行造成了很多障碍。“沙漠长距离输水工艺及控制优化技术研究”课题组通过稳态优化研究建议修改叶轮直径, 使水泵机组在通过设计流量时处于高效区。在保持引擎、泵壳、齿轮箱不变的情况下最大程度符合了合同规定引擎和输水离心泵的一致性要求, 避免了重新布局泵站或更换引擎。最终配置的系统满足计划任务书指标: ① 流量 $0.25 \sim 0.579 \text{ m}^3/\text{s}$; ② 扬程 $280 \sim 329 \text{ mLc}$ ($1 \text{ mLc} = 0.01 \text{ MPa}$, 下同); ③ 引擎转速 $525 \sim 750 \text{ r/min}$; ④ 引擎柴油消耗值 $\leq 194 \text{ g/kWh}$ 。

课题组基于计算机模拟, 得出了重力流管道 Monovar 阀门开闭的最佳时间, 由招标文件提出的 10min 延长至 60min, 得出了保证加压输水管道安全的防护措施及设备启停方案, 实现了泵组的正常启停, 避免了因设备超载而导致的非正常磨损及破坏。

课题组研究制定了水池液位与转速、流量的对应关系, 保证了站间联动 PID 精确平稳控制, 避免了系统振荡, 保证了自动联动运行状态下的液位-流量自动调整, 避免了干抽及溢流。

课题组研究了扭矩传感器的结构及原理, 解决了扭矩报警的问题。通过泵轴有限元分析、齿轮箱振动分析, 保证了泵轴强度适应各种工况, 找到了齿轮箱振动超标的根源, 避免了设备带病运转导致损坏。

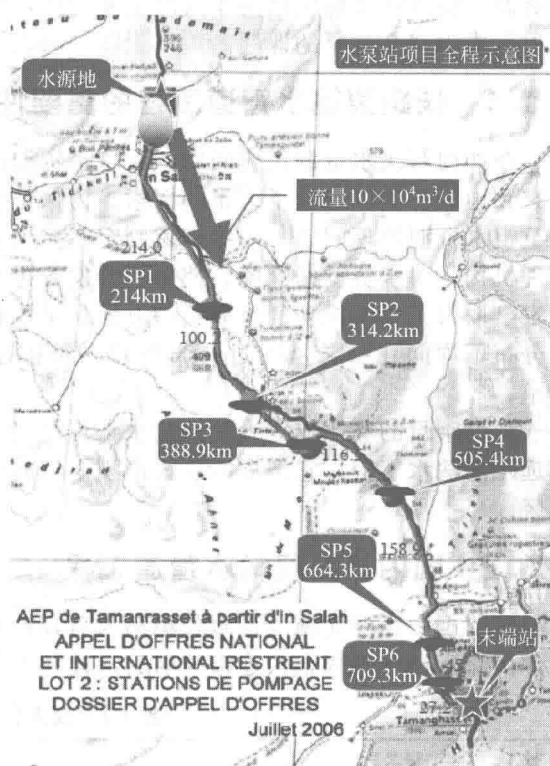


图 1-1 阿尔及利亚南部输水项目全程示意图

该课题研究获得的一些技术建议,可以作为沙漠、岩石、丘陵等具有类似气候地质条件地区的其它工程项目的直接参照,也可以为其它地区的类似工程提供参考,具有较大推广应用价值。

1.1 国内外长距离输水工程技术现状

由于水资源供给的稳定性和需求的不断增长,使水具有了越来越重要的战略地位。国外的一些专家指出,21世纪水对人类的重要性就像20世纪石油对人类的重要性一样。一个国家如何对待它的水资源将决定这个国家是继续发展还是衰落。

世界水资源特征主要表现为时空变化极大,分布极不均匀。部分经济发达地区仅凭流域内调水已难以满足其用水需求,迫切需要跨流域长距离调水。据不完全统计,世界已建、在建和拟建跨流域调水工程已达160多项,分布在24个国家,其经济效益和社会效益明显。

在距离城市较远的地区开发新水源,大规模、长距离、跨流域的调水成为人类重新分配水资源,缓解缺水地区供需矛盾的主要途径,引起了国际社会的广泛重视。因而长距离输水工程就成为一个重要的课题。

1.1.1 长距离输水管道工程的重要性

在如何解决水资源供应问题,保持水资源供给和需求之间的相对平衡方面,世界各缺水国家和地区长期以来做了大量的探索。为保证水资源的合理配置和有效利用,很多国家都十分重视水资源管理问题。一些国家制定了多项有关水资源管理的法律,成立了专门的水资源管理机构,对水资源的调配、使用、开发等进行全面的管理。一些发达国家或者比较发达的国家已取得了很多成功的经验:一方面是采取积极的措施,通过区域调水解决地区之间水资源分布不均问题;二是通过科学管理,维护水资源的供需平衡以及开发和使用各种节水技术。

举世瞩目的利比亚大人工河输水工程是当今世界上输水管线最长、管径最大、投资最多的远距离输水工程,它把撒哈拉大沙漠丰富的地下水通过管道输送到北部地中海沿岸人口密集区。

1.1.2 国内长距离输水管道工程

目前国内已经实施了许多长距离大口径输水管道工程,其中大型长距离输水工程如天津市“引滦入津”工程,大连市“引碧入连”工程等,主要输水工程如表1-1所示。

表 1-1 国内长距离输水工程

序号	工程名称	工程简介
1	引滦入津工程	整个工程全长234km,于1982年5月开工,1983年9月建成通水。向引滦入津工程分水 $60\text{m}^3/\text{s}$,向引滦入唐工程分水 $80\text{m}^3/\text{s}$ (1)入津工程输水规模 $1.1\times 10^6\text{m}^3/\text{d}$ ($12.73\text{m}^3/\text{s}$),采用钢管 $DN2500\text{mm}$, $\delta=20\text{mm}$,长 10.67km ,工压 0.5MPa (2)入唐工程输水规模 $5.5\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$ ($6.37\text{m}^3/\text{s}$),采用钢管 $DN1800\text{mm}$, $\delta=16\text{mm}$,长 3.67km ,工压 0.3MPa
2	引碧入连工程	引碧入连三期工程输水规模定为 $6.7\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$,工作压力为 1.0MPa (1)洼子店至三道沟水厂,输水管总长 68.336km ,规模为 $2.7\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$ 。采用钢管 $DN1820\text{mm}$, $\delta=16\text{mm}$,长 46.9km ,工压 1.0MPa ;钢管 $DN1620\text{mm}$, $\delta=14\text{mm}$,长 21.42km (2)洼子店至长沙沟水厂,输水管总长 60.54km ,规模 $4\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$,工压 1.0MPa 。采用钢管 $DN2054\text{mm}$, $\delta=18\text{mm}$,长 43.6km ;钢管 $DN1820\text{mm}$, $\delta=16\text{mm}$,长 17km

续表

序号	工程名称	工程简介
3	邯郸市“引岳济邯”工程(二期)	岳城水库至铁西水厂,管道总长 56km(重力流),规模 $10^5\text{m}^3/\text{d}$,工压 0.4~0.5MPa,采用 DN200mm 预应力混凝土管 36km, DN1400mm 预应力混凝土管 20km。输水线路走向同一期
4	长治市辛安引水工程(二期)	辛安水源至长治水厂输水规模 $8.64\times 10^4\text{m}^3/\text{d}(1\text{m}^3/\text{s})$,采用 DN1000mm 钢管, $\delta=10\text{mm}$,工压 1.8MPa,长 12km; DN1000mm 预应力混凝土管,工压 0.6MPa,长 12km; DN900mm 预应力凝土管,工压 0.6MPa,长 12.17km
5	衡水市“引湖入衡”工程	衡水湖至衡水市水厂,规模 $10^5\text{m}^3/\text{d}$,工压 0.4MPa,采用 2 根 DN800mm 预应力混凝土管,管长 9.8km(其中穿越河道采用钢管)
6	呼和浩特市引黄供水工程	黄河蒲滩拐至金河水厂,总长 82.16km (1)二道洼水库上段,规模 $40\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$,采用两根 DN1600mm 球墨铸铁管,长 2.73km,工压 0.8MPa;采用 DN2000mmPCCP 管(预应力钢套筒混凝土管),长 62.96km,工压 0.6MPa (2)二道洼水库下段(重力流),规模 $2\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$,采用两根 DN2000mm 预应力混凝土管,工压 0.4MPa,长 16.47km
7	温州珊溪水库枢纽供水工程	岙泵站至浦东隧道,规模 $3.41\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$,工压 0.6MPa,采用 DN1800mm 钢管, $\delta=16\text{mm}$,长 12km(西线) 陈岙泵站至状元水厂规模 $3.96\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$,工压 0.6MPa,采用 DN2000mm 钢管, $\delta=18\text{mm}$,长 22km(东线)
8	唐山市陡河水库供水工程	陡河水库至唐山市水厂: 近期规模 $1.5\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$,采用 DN1400mm 预应力混凝土管,工压 0.6MPa,管道长 18.68km 近期规模 $10^5\text{m}^3/\text{d}$,工压 0.6MPa,采用 DN1200mm 预应力混凝土管,管道长 18.68km
9	大连庄河市朱隈书库供水工程	朱隈水库至水厂(重力流)规模 $10^5\text{m}^3/\text{d}$,工压 0.4MPa,采用两根 DN1000mm 预应力混凝土管,管道长 16km

1.1.3 国外长距离输水管道工程

利比亚南部沙漠地区蕴藏有丰富的地下淡水资源，其储量相当于尼罗河 200 年的总流量。为了解决人口饮水和工农业用水问题，发展农业生产，实现粮食自给，利比亚修建了大人工河，将撒哈拉大沙漠的地下淡水抽上来，再用累计全长 4000km、直径 4m 的巨型钢筋混凝土管道，输送到全国各地。大人工河所提供的日均 400 多万立方米的淡水已经成为利比亚的主要水源之一，所得地下水的 66%被用于农业灌溉，到 2002 年底为止，已经灌溉 14.5 万公顷的土地。

美国已建的跨流域调水工程有 10 多项，主要为灌溉和供水服务，兼顾防洪和发电，年调水总量达 200 多亿立方米。除加州最大的北水南调工程外，其他较重要的调水工程还有：科罗拉多-大汤普森工程、阿肯色河工程、中央河谷工程、中部亚利桑那工程等。

加拿大已建调水工程的 80%主要用于水电。1974 年动工兴建的魁北克调水工程，引水流量 $1590\text{m}^3/\text{s}$ ，总装机容量达 1019 万千瓦，年发电量 678 亿千瓦时，工程还用于灌溉或为城市供水服务。该国其他著名调水工程有：丘吉尔河-阿尔逊河工程、奥果基河-尼比巩河工程等。

澳大利亚在 1949—1975 年期间修建了第一个调水工程——雪山工程。该工程位于澳大利亚东南部，运行范围包括澳大利亚东南部 2000km² 的地域，通过大坝水库和山涧隧道网，在雪山山脉的东坡建库蓄水，将东坡斯诺伊河的一部分多余水量引向西坡的需水地区。沿途利用落差发电供首都堪培拉及墨尔本、悉尼等市民用和工业用电，总装机 374 万千瓦，同

时可提供灌溉用水 74 亿立方米。该工程总投资 9 亿美元, 主要工程包括 16 座大坝, 7 座电站, 2 座抽水站, 80 公里的输水管道, 144 公里隧道。

法国为了满足灌溉、发电和供水需要, 于 1964 年动工兴建了迪朗斯-凡尔顿调水工程。工程于 1983 年建成, 设计灌溉面积 6 万公顷, 年发电量 5.75 亿度, 并供 150 万人饮水。此外, 法国还有勒斯特-加龙河等调水工程。

印度的调水始于灌溉调水, 已完成的有: 恒河区工程, 灌溉面积 24 万公顷; 北方邦拉姆刚加河拉姆刚加坝至南部各区工程, 灌溉面积 60 万公顷; 巴克拉至楠加尔工程, 灌溉面积 160 万公顷; 纳加尔米纳萨加尔工程, 灌溉面积 80 万公顷; 巴德拉工程, 灌溉面积 40 万公顷。

1.1.4 长距离输水管道水锤问题

在这类长距离输水工程中, 最常见又最突出的问题就是输水管线的安全问题。安全问题中, 水锤问题尤为重要, 一旦出现水锤, 它会以迅雷不及掩耳之势破坏生产设备, 给生产部门带来重大损失。在长距离输水工程中, 水锤是一个重要的技术问题, 也是造成工程事故的主要原因之一。

现阶段, 常用的水锤防护设备以及主要措施可归纳为以下几种类型。

(1) 调压塔

单向调压塔(池)一般设于输水管道容易产生负压和水柱分离的特异点, 如膝部、驼峰和主要高峰点, 是一种用于防止管道产生负压、水柱分离的可靠、经济的措施。相对于双向调压塔, 单向调压塔费用低廉。目前, 该措施是长距离输水工程中最常用的水锤防护措施之一。单向调压塔的装设位置、数量、容积、水位标高、注水管的尺寸及其水锤防护效果等, 都应经过计算机动态模拟计算, 经过比较才能最终确定。

(2) 空气阀

长距离输水管道在开始输水、停止输水和流量调节及事故停泵的不同工况下, 需将管内空气排出, 或将管外空气补进管内, 使压力管道系统不受气体、水锤负压等危害。空气阀以其结构简单、费用低、安装方便等优点, 目前, 在泵供水系统中已被广泛应用, 尤其是在长距离输水工程中。目前, 我国市场上常见的空气阀种类很多, 根据额定工作压力和进排气孔口尺寸大小, 可分为高压、低压和复合式空气阀; 根据其工作特性, 可分为进气阀、排气阀和进排气阀; 根据其结构形式, 可分为浮球(筒)式、浮球(筒)杠杆式、组合式和气缸式排气阀。

(3) 可控阀

阀控制是水锤防护最普遍、最常用的措施, 通常有液控蝶阀、缓闭逆止阀等。其中, 蝶阀是事故停泵中最主要的控制水力过渡过程的可控阀设备, 其原因在于它是目前比较容易控制关闭速度的一类阀门, 在水泵启动时能够先慢后快地自行开启; 当事故停泵时, 阀门可以按预定的程序和时间自动关闭。这样不论是在正常启闭水泵过程, 还是在事故断电过程, 既能减弱正压水锤, 又可限制倒流流量和倒转转速, 从而既具备泵出口控制阀门的作用, 又具有水锤阀和水锤防护的作用。

(4) 泄水降压型

泄水降压型水锤防护措施, 主要有水锤阀加旁通管、水锤消除器、防爆膜等几种。旁通管防护措施主要是在水柱分离段的末端布置一道止阀和旁通管, 减小水柱弥合的升压和减小下游其他部位的水力波动, 这是因为该阀和旁通管作为管路中的阻力部件, 一方面阻止了倒流流量, 削弱了水流对气穴的冲击, 从而减小了弥合升压; 另一方面, 通过倒流释放能量, 消减了关阀水锤压力的幅度。

水锤消除器是具有一定泄水能力、并适合于泵站停泵水锤压力变化过程的安全阀。在水泵断电后,管路中出现低压的短促时段内,水锤消除器阀门迅速动作,呈开启状态,待倒泄水流到达,管道压力突然升高的瞬间,迅速按照要求,释放管道中的一部分压力水,以缓冲压力上升,从而达到防止水锤出现的目的。

防爆膜是在需要保护的管道上用一支管连接,并在其端部用一塑料金属膜片密封,当管中升压超过预定值时,膜片爆破,泄掉一部分高压水,以保证主管道的安全,起到水锤防护的效果。

1.2 长距离泵站工程设计与优化研究

1.2.1 阿尔及利亚泵站工程设计总结

(1) 与厂家及业主技术交流很重要

明确供货商与设计分工界面,这一步也是保证货到现场安装不出问题的最关键环节,特别是厂家供货与设计选型的一致性。动设备和标准工艺设备在商讨技术协议时需要厂家配对法兰。

为了做好厂家与设计之间的分工界面技术澄清工作,要求生产厂家必须读懂设计所发的MR文件,对自己产品的参数与设计院所提供的数据表之间的一致性进行重点审核,并把参数和供货有偏离的部分做成技术偏离表,然后根据自己产品特点做出技术协议。在交流的过程中重点对偏离部分进行审查,确保不出现设计和厂家之间的界面盲区。

(2) 组织施工单位进行图纸会审是解决现场施工问题的有效方式

通过组织各专业图纸会审,将图纸中的漏项、错项一一明确,并对今后陆续将出的图纸进行统一修改。同时,利用专业技术人员和施工单位的施工经验,与设计人员进行沟通,在大宗材料的开料和安装图的合理性方面进行充分的讨论,从而尽量避免现场的缺料现象。

先由施工单位提出物资需用计划,结合设计的图纸实物量与施工单位的需求量进行平衡,最终确定大宗材料的申报量。这样既考虑到了设计的要求,也考虑了施工单位的施工习惯,可以尽量减少现场因为设计的习惯和施工单位的习惯不同所造成的材料浪费。通过组织研讨现场施工与设计图纸理想化之间差距的形式,确定设计的开料原则以及施工损耗和材料备用量,从而从源头上尽量减少在现场的材料增补。

(3) 协调好设备厂家资料返回确认工作是杜绝现场扯皮现象的有效手段

设备厂家资料的返回准确性,直接影响设计者出图的准确性,这也是最难控制的一项工作。由于厂家技术力量参差不齐,必须做好记录和确认,尤其对于资料的版本,必须做到及时更新,及时与设计院沟通。

(4) 设计管理要有国际化思维,沟通体现艺术性和专业性

在国际EPC(engineering procurement construction,设计采购施工)项目实施过程中,总承包商、供货商、业主、监理等项目关联方往往来自不同国家,不同的文化、标准、语言、习惯、思维、理念等交织在一个项目上,而这些特征往往具有隐藏性(多以一种含蓄的方式影响到项目实施)、广泛性(几乎涉及项目实施每个环节)、强势性(业主强势意识影响到项目沟通各环节),这些因素也成为国际EPC项目执行包括设计管理最困难的一个环节。要克服这些因素对项目执行的影响,项目管理不但要有国际化的思维,也要与项目所在地本土文化进行融合,讲究沟通的艺术性、专业性,在理解对方的基础上寻找切入点,方能推动项目的进展。

(5) 加强科研攻关, 解决项目执行中的关键技术难题

阿尔及利亚水泵站项目是首个系统外欧标项目, 其技术要求高, 所处环境恶劣, 执行难度大, 科研条件差, 但是通过该课题攻关, 有效地助推了项目成功达到性能考核指标要求, 起到了保驾护航的作用, 创造了显著的经济效益和社会效益。

该项目在设计阶段主要在以下几方面取得成果。

① 设备专业。

a. 泵房通风系统采取自动控制系统, 根据室内外温度自动调整送风机及排风机的转速, 保持送风机与排风机低速/高速同步运行。

b. 泡沫罐选用 2 个 10m^3 并联, 解决了单个 20m^3 泡沫罐市场采购不到的问题。

② 配管专业。

a. 消防系统地下管线采用铸铁内衬管, 虽然安装较麻烦, 但防腐蚀性性能好, 无后顾之忧。

b. 大口径阀门与管道之间增加可拆卸接头, 方便管线安装和拆卸。

c. 水池出口膨胀节口径大, 采用了橡胶材料, 不仅成本低、重量轻, 而且具有耐腐蚀、安装快等优点。

③ 电气专业。

a. 确定水泵站的接地方式及接地材料种类和规格。

b. 确定 30kV 外接电源的并网连接方案, 30kV 变电所的接线及安装形式。

④ 土建专业。

针对 SP1 存在石膏层情况, 采取深挖换土方案, 有效地控制了石膏层对建筑物的影响。为了满足水泵工艺要求, 1、2 号站水池采用框架加高处理。

1.2.2 设计过程管理及教训

在详细设计、施工和试运阶段, 发现合同中有关初步设计的技术要求存在较多不合理的技术条款, 尤其是合同中双燃料引擎的一致性 & 工艺控制方面存在一些不尽完善的技术要求, 对后续的项目执行造成了很多的障碍。从项目运行过程及一些细节上看, 设计工作还存在一些不足之处, 对项目执行产生了一定影响, 需要进一步改进和提高, 主要表现在以下几方面。

(1) 标准运用偏差

ITB (instructions to bidder, 招标文件) 中明确要求首先采用阿尔及利亚当地标准, 其次是 ISO/ 欧标, 再是业主批准的标准。因长期从事油气行业, 习惯使用美标, 因此在本工程中初期考虑采用美标, 报业主进行审批。因业主没有相应的技术人员, 监理又迟迟不到位, 致使采用的设计标准没有得到业主和监理的批复, 进而导致部分设备重新进行选型、询价及评标, 对工期造成一定的影响。

(2) WARTSILA 主水泵组

该主水泵为双燃料引擎拖动, 性能符合合同要求。但该引擎属于缸内直喷天然气型式, 所需的天然气压力高达 350bar ($1\text{bar}=0.1\text{MPa}$, 下同), 与常规缸外混合天然气引擎要求的天然气压力 (常规引擎要求的天然气压力为 $5\sim10\text{bar}$) 相差很大, 偏离合同要求。正因为该引擎的特殊要求, 造成管网供给的天然气需要进行增压, 而不是常规的减压, 给该项目带来了一系列的困难。因管网压力不确定, 天然气压缩机的工作无法开展, 大大制约了项目的进展。另外, 如此高的管线压力给后续的焊评工作、管线试压也带来诸多困难。为此, 就天然气压缩机事宜先后给业主写了十多封信, 最终还是将天然气压缩机工作从合同中扣除。

(3) 水处理橇

水处理橇的问题主要是橇出口条件没有确定好。在编制数据表及评标时应明确橇出口压力要求,但数据表却没有要求,在设计评标阶段也没有提出来,造成橇出口压力低,打不到高处的水塔,只好现场更换多级供水泵。

另外,该橇反渗透膜的压力容器采用钢质是厂家的错误选择。该水处理橇采用三段反渗透工艺,第二、三段的盐含量及氯离子含量很高,用钢质不能满足要求。实践证明,第二、三段压力容器使用半年就腐蚀穿孔,最终厂家只能现场更换水处理橇中所有的压力容器。

(4) 泵房通风

泵房的通风机虽然监理没有提出问题,但在实际使用过程中,泵房出现负压。究其原因是送风机安装在风箱内,风箱进风口采用的是折流结构的防沙坎,进风阻力大,导致进风量只有额定风量的一半,现场只好改成常固定式进风百叶窗,问题才得到解决。

另外,该风机的沙尘过滤网部分采用手工吹灰方式,过滤网清洗工作量大。大容量的风机应该采取自动吹灰方式,当过滤网两侧压差大时,应自动进行吹灰或自动更新滤网。

(5) 发电机容量

该项目发电机容量选取的是2台800kW柴油发电机组,从项目远期来看该选型没有问题,但近期实际运行负荷较低,为230kW左右,不利于设备正常运行。

虽然存在客观原因,比如现场无天然气压缩机运行、泵站内别墅区未全部入住、部分泵送设备未投用等,但对运行工况的描述不够全面,只考虑了合同描述的运行工况,造成发电机负荷率偏低。

(6) 不锈钢管道腐蚀

按照合同要求,主水泵引擎的冷却水管线采用了304不锈钢材质,因原水中氯离子含量超过 $600\mu\text{g/mL}$,造成管道腐蚀严重。这个问题在项目设计开始时就发现,经过与业主多次开会讨论,业主承诺在水源地设脱盐站,使原水达到WHO(world health organization,世界卫生组织)的饮用水标准。实际上业主根本没有实现承诺,水泵站项目投产时尚未承建脱盐站,造成了腐蚀问题。因此,业主对整个工程各标段的规划配套和建设统筹至关重要。

1.2.3 “沙漠长距离输水工艺及控制优化技术研究”主要内容

(1) 沙漠地区水池结构与施工工艺优化

水池设计优化包含设计分析与优化、高架水池支承选型、水池与阀室主体结构设计、屋盖支座;施工工艺优化包含池壁构造、施工缝、裂缝与缺陷、外墙保温、后浇带等技术研究。

FEED(front end engineering design,总体前端工程设计)方案为筑土高台,本工程优化为框架支撑。按照FEED原设计,水池为卧地式高台,本课题研究与项目详细设计紧密结合,综合考虑了工艺要求、地勘报告、总图设计、建筑平面、方案实施难易度等影响因素,发现FEED原方案对SP1和SP2并不适用,因此对原方案进行了优化。

从成本角度分析,经过初步计算,置换和回填土方量高达3万立方米,开挖土方量约1.5万立方米。考虑到长途运输、开挖、回填、夯实等诸多因素,成本过高。从施工角度,回填需要分层夯实,初步估算仅地基处理就需要花费10~12个月时间,工期影响非常大。综合分析,此方案不宜在SP1和SP2实施。

优化方案采用钢筋混凝土框架作为水池的支承体系,考虑到水池抬高高度约为5m,仅相当于水池主体高度的 $2/3$ 左右,绝对高度较小;另外,水池内部最大水深为5.525m,深度不大,因此,该方案理论可行。

第二种方案优势在于不需要进行专门的地基处理,柱下独立基础可直接置于符合要求的

地基土层上；结构建模时，可将支承结构、水池和阀室作为一个整体建立计算模型进行分析；土方回填满足一般性回填土夯实要求即可，而且回填土方量降低 60%；施工周期缩短，按照混凝土框架结构施工，缩短工期 5 个月；对于 SP1，下沉的电动阀室处理起来更为方便，避免了在回填土上深挖基坑进行施工的各种问题；另外，为了与第一方案进行工程量的对比，进行了详细的工程量概算。经过研究分析与优化，该方案最终获得了业主和监理的认可。

框架支撑方案中，虽然增加了更高强度等级的混凝土和钢筋，但是，按照当地市场情况进行成本分析后发现，采用框架支撑方案，可为业主节约直接工程投资高达 100 万欧元左右，经济效益非常显著。

针对沙漠水池处于沙漠、岩质、丘陵地带，气候干热、昼夜温差大、施工与使用环境恶劣的情况，通过对当地既有和在建水池结构开展实地调查研究，计算机建模计算分析等手段，对沙漠水池的结构设计与施工工艺进行了综合研究与优化，获得了一些技术要求与建议，也节省了项目成本。

(2) 沙漠长距离输水管道稳态水力计算和优化

完成了重力有压输水管道、加压输水管道设计的基本原则分析；初步设计内容分析；站间管线沿程水头损失、泵站内局部水头损失、校核原初步设计、方案优化等技术分析研究。

合同中 FEED 设计主要问题是 SP1、SP2 和 SP3 这 3 个泵站采用合同要求的统一扬程 320mLc 很难达到合同规定的流量。多方经过论证认同了原初步设计对各泵站的输水泵扬程统一限定为 320mLc 是既不合理也不经济的。要满足合同规定对各站输量的要求，必须优化 FEED 原设计中不合理的技术要求。最终业主和监理同意改变输水离心泵的叶轮直径，即叶轮切削。具体为在 320mLc 扬程对应叶轮的基础上，增大 SP1、SP2、SP3 水泵的叶轮直径，以提高其扬程；减小 SP4、SP5、SP6 水泵的叶轮直径以降低其扬程，减少扬程富余量。这是工程量变更最小，对项目执行影响最小，也是经济可行的解决方案。略微改变叶轮直径后，各方对引擎和离心泵进行了新一轮的技术评估，确保同一型号驱动设备的性能范围能满足不同叶轮直径水泵的需要。

根据以上水力分析和计算结果，合同中原设计采用的输水离心泵一致性的设计方案是不合理的，通过改变蓄水池高程和改变离心泵叶轮直径的方法，对 6 个泵站采用不同扬程、不同叶轮离心泵的设计方案，解决了全程静态水力计算问题。

增加 SP1、SP2 和 SP3 的叶轮直径，减少 SP4、SP5 和 SP6 的叶轮直径可以提高泵效，使水泵机组在设计流量时处于高效区。在保持引擎、泵壳、齿轮箱不变的情况下，最大程度符合了合同规定引擎和输水离心泵的一致性要求，避免了因重新布局泵站或更换引擎可能造成的重大经济损失。

(3) 沙漠长距离输水管道水锤数值计算

根据特征线法的基本原理建立了重力流下管道水锤计算的基本模型；完成了 ST~SP1 长输管线水锤计算、SP1~SP2 长输管线水锤计算、SP2~SP3 长输管线水锤计算、SP3~SP4 长输管线水锤计算、SP4~SP5 长输管线水锤计算、SP5~SP6 长输管线水锤计算、SP6~RT 长输管线水锤计算等技术研究。

(4) 泵站内工艺逻辑控制及工艺参数优化

完成了泵站内泵的启闭过程及阀门加载工艺控制、泵运行方式；泵站内主要阀门的控制包括 Monovar 阀门、PCV 阀门、止回阀、水锤防护设备等优化技术研究。

(5) 沙漠长距离输水泵站内控制参数模拟及优化研究

完成了引擎泵组变速调节、引擎泵组启动特性、引擎泵组变速特性研究；引擎泵组联轴器扭矩传感器的原理、泵站引擎泵组各参数匹配关系、SP1~SP6 引擎泵组控制参数匹配

研究；泵轴偏心振动有限元分析、平行不对中泵轴动力学分析、引擎泵组泵轴过载振动有限元分析研究。

(6) 泵站间联运控制技术研究

完成了蓄水池液位高度与泵参数的优化控制研究包括：PID 控制系统工作原理；水池液位高度对泵进出口压力的影响；泵-管道系统参数的控制研究等。

(7) 沙漠长距离输水管线材质及焊接工艺适应性研究

针对长距离输水管线工程中不锈钢焊缝处出现的腐蚀问题，开展了奥氏体不锈钢的焊接特性、焊接工艺和焊后处理的分析，进行了焊缝腐蚀光学金相分析、电镜微观研究、能谱分析等研究，指出了不锈钢焊缝出现点蚀坑的原因和影响因素，提出了抑制和缓解腐蚀问题的措施。一方面建议业主加快水源地脱盐站工程的实施以降低氯离子浓度，一方面创造性提出对出现腐蚀的点蚀坑采用高分子固化剂 Belnoza 材料进行修复的无损修补方案，为整个长距离输水工程项目的顺利进行提供了技术保障。

1.3 项目选用的柴油/天然气双燃料引擎

该项目工程处于社会依托条件极差的撒哈拉沙漠，无电力供应，因此采用柴油/天然气双燃料引擎作为动力驱动离心输水泵。本项目的引擎冷却水系统是根据业主合同要求，采用换热器冷却循环水的方式，而不是常规的风扇冷却系统，冷却水管道系统采用的是合同规定的不锈钢材质 SS1.4301（相当于 S304 或 0Cr18Ni9），冷却水为泵站所输送的水源地原水。按照合同规定在水源地设有脱盐处理站，对原水进行处理并达到 WHO 饮用水标准。但是，为达到全线通水的政治目标，在未建设水源地脱盐站的前提下，业主要求直接将地下原水接送至长距离输水管线和沿线泵站，然后连续泵送至末站终端水池。这样沿线泵站的冷却水系统就只能采用这种未经处理过的原水，原水中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量高于 WHO 标准 3 倍以上，对冷却水系统的不锈钢管道产生了一定的影响。

1.3.1 双燃料引擎目前存在的主要问题及发展方向

柴油/天然气双燃料发动机的研究和开发目前存在以下几个主要问题：天然气的替代率较低，热耗率较高，HC（hydrocarbon，碳氢化合物）排放随负荷的减小有增高的趋势等。尤其在中小负荷、低转速工况下，其主要的性能指标要达到原机的技术水平，还存在一定的距离。

目前，提高发动机功率和充气效率、提高热效率、进一步降低排放水平，以及实现整车的优化匹配技术是解决柴油/天然气双燃料发动机的关键技术问题。具体地说，如下几项关键技术是柴油/天然气双燃料发动机今后一段时间重点的发展方向：①电控喷气技术、喷油技术，这将是更为彻底解决双燃料发动机动力性、替代率、热效率和排放问题的较佳方案；②进行柴油/天然气双燃料发动机燃烧规律和燃烧特性的研究，侧重稀薄燃烧技术的应用研究，特别是中、小负荷燃烧恶化的问题；③针对排放试验中某些排放物和排放工况的排放量略高的问题，特别是 HC 排放量高的问题，研究双燃料发动机有关排放物形成规律及其控制，包括新型催化剂和催化技术、缸内燃烧技术等。

1.3.2 项目使用的双燃料引擎介绍

阿尔及利亚南部输水项目采用瓦锡兰双燃料引擎。瓦锡兰作为船舶行业领先的船舶动力系统集成商，已经将上述燃料技术延伸到较低功率范围的新型环保、先进的瓦锡兰 20DF 发动机上。瓦锡兰为操作者提供一种紧凑型装置，在辅助设备应用中发挥了燃油使用灵活的