

大寨河闸站立式双向流道轴流泵 装置 CFD 分析

赵振江¹, 石磊¹, 蒋红樱², 汤方平³, 卜舸⁴

(1. 泗洪县水利局, 江苏 宿迁 223900; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029;
3. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 4. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009)

摘要:针对大寨河闸站双向流道泵装置进行 CFD 数值模拟计算。在设计流量工况下,对包括进水流道及延长段、叶轮、导叶,出水流道及延长段在内的泵装置全流道进行计算分析。计算结果表明,大寨河闸站双向流道泵装置整体性能较优,进水流道水力性能较好,入泵水流流态较好,出水流道内流态受到速度环量影响较大,需多加关注。

关键词:双向流道;轴流泵站;水力性能;流态;数值模拟

中图分类号:TV675 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2020)06-0065-05

CFD analysis of the vertical reversible passage axial flow pump unit in Dazhai River Gate Station

ZHAO Zhenjiang¹, SHI Lei¹, JIANG Hongying², TANG Fangping³, BU Ge⁴

(1. Sihong Water Conservancy Bureau, Suqian 223900, China;

2. Jiangsu Province Water Engineering Sci-tech Consulting Co., Ltd. Nanjing 210029, China;

3. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

4. Jiangsu Provincial Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract:CFD numerical simulation was carried out on the reversible passage axial flow pump unit in Dazhai River Gate Station. Under the design flow condition, the calculation and analysis of the whole flow passage of the pump device including the inlet passage and the extension section, the impeller, the guide vane, the outlet passage and the extension section were carried out. The calculation results showed that the overall performance of the reversible passage axial flow pump unit in Dazhai River Gate Station was better, the hydraulic performance of the inlet runner was better, the flow pattern of the inlet pump was better, and the flow pattern of the outlet runner was greatly affected by the velocity loop quantity, which required more attention.

Key words:reversible passage; axial flow pumping station; hydraulic performance; flow pattern; numerical simulation

水泵站作为我国水利设施的重要组成部分,在工农业生产生活中应用广泛。随着我国现代化建设的不断加快,针对我国水资源分布时空不均以及旱涝灾害频繁等特点,水泵站在跨区域调水、防洪

排涝以及改善生态环境等方面发挥着关键作用,为现代化建设做出巨大的贡献^[1-2]。

由于江苏地处于长江和淮河流域,降雨时空分布不均、旱涝交替发生,为保障农业生活生产,抵抗

收稿日期:2020-04-02

作者简介:赵振江(1974—),男,高级工程师,主要从事水利工程建设管理工作。

通信作者:蒋红樱(1972—),女,教授级高级工程师,主要从事水利工程技术咨询工作。

洪涝灾害以及促进经济快速发展在江苏境内分布着众多灌排泵站^[3-5]。这些泵站具有扬程低、流量大以及年利用小时数高等特点,所以多采用轴流泵站型式。箱涵式双向流道泵站是我国一种新型排灌结合的泵站型式。双向流道泵站具有双向抽水功能,既能满足灌溉需要也能满足排涝需求。

目前双向流道轴流泵站在江苏境内应用较为广泛,本文针对江苏境内大寨河大型立式双向流道轴流泵站开展内流及外特性分析,旨在为类似泵站工程实践提供参考。

1 工程概况

大寨河闸站工程位于新濉河右堤、大寨河入新濉河口门处,其主要功能是汛期向外河排涝,平时向内河引水用于改善城区水环境,因此需双向引排。大寨河闸站工程选用 4 台立式轴流泵机组,配 500 kW 立式异步电机 4 台套,主水泵叶轮直径 1 600 mm,转速 245 rpm,泵站引水工况设计流量为 $7.3 \text{ m}^3/\text{s}$,泵站排涝工况设计流量为 $29.1 \text{ m}^3/\text{s}$,总装机容量 2 000 kW。泵站的特征水位、特征扬程及规划设计流量见表 1。

表 1 大寨河闸站工程设计参数

运行工况		特征水位/m		特征扬程/m	规划设计流量/(m ³ ·s ⁻¹)
引水工况	设计	外河侧	11.3	2.7	7.0
		内河侧	14.0		
	最高	外河侧	11.3	3.2	
		内河侧	14.5		
排涝工况	设计	外河侧	16.9	2.9	29.1
		内河侧	14.0		
	最高	外河侧	17.3	3.8	
		内河侧	13.5		

大寨河泵站采用“X”型双层箱涵式进出水流道,其中 1#、2#机组为双向运行,3#、4#机组为单向运行,机组采用快速闸门断流方式。1#、2#机组站身结构图如图 1 所示。

2 数值模拟基本理论

泵叶轮内部流动是三维非定常紊流流动,但是在水泵稳定运行(转速恒定)后可认为叶轮相对运

行是定常流动。控制方程的离散采用基于有限元的有限体积法。扩散项和压力梯度采用有限元函数表示,对流项采用高分辨率格式(High Resolution Scheme)。流场的求解使用全隐式多重网格耦合方法,将动量方程和连续性方程耦合求解,克服了传统 SIMPLE 系列算法需要“假设压力项—求解—修正压力项”的反复迭代过程,同时引入代数多重网格技术,提高了求解的稳定性和计算速度。

3 计算模型及数值模拟

3.1 三维建模及控制参数

大闸河闸站泵站机组采用立式轴流泵型式,水泵型号为 1600ZLBK7.3-3.1,叶轮直径 1.60 m,转速 245 r/min,单机流量 $7.3 \text{ m}^3/\text{s}$,配套电机 500 kW。进、出水流道为双层箱涵式双向流道,其中,进水流道进口与出水流道出口尺寸一致,为 $5\,000 \text{ mm} \times 2\,400 \text{ mm}$ (宽×高);进水喇叭口直径为 2 480 mm,进水喇叭口悬空高为 1 230 mm;出水喇叭口直径为 2 760 mm,出水喇叭口距出水流道顶板距离为 600 mm。双向机组 1#和 2#之间设置隔墩分隔,隔墩厚 1 000 mm。

根据大寨河闸站的水位资料以及站身平、剖面图,建立进、水流道的三维实体模型,其中计算区域包括进水延伸段、进水流道、叶轮、导叶、出水流道、出水延伸段 6 个部分,大寨河闸站双向流道机组泵装置计算区域如图 2 所示。

3.2 数值计算方法及边界条件

泵装置内部流动介质为水体,假设水体为三维不可压缩流体,其流动为三维非定常黏性流动,采

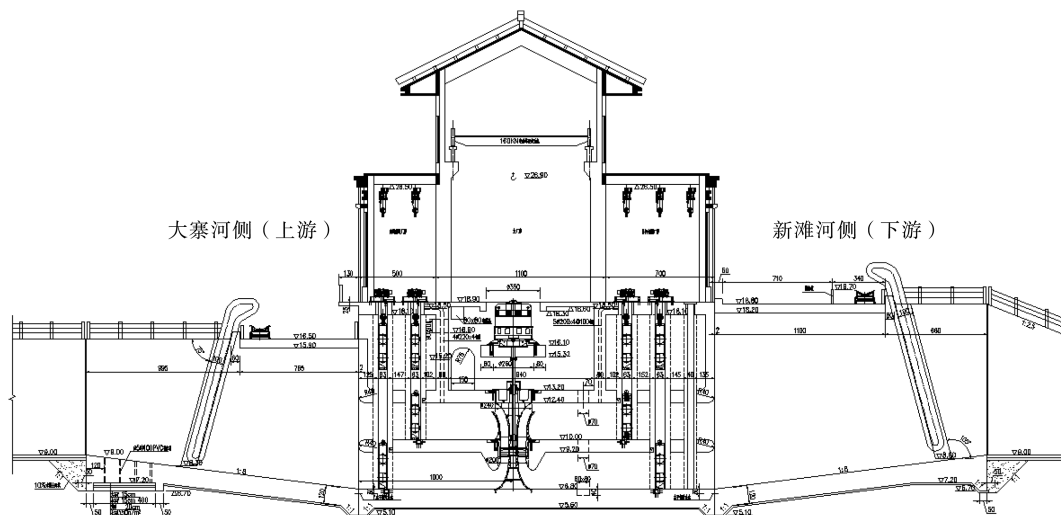
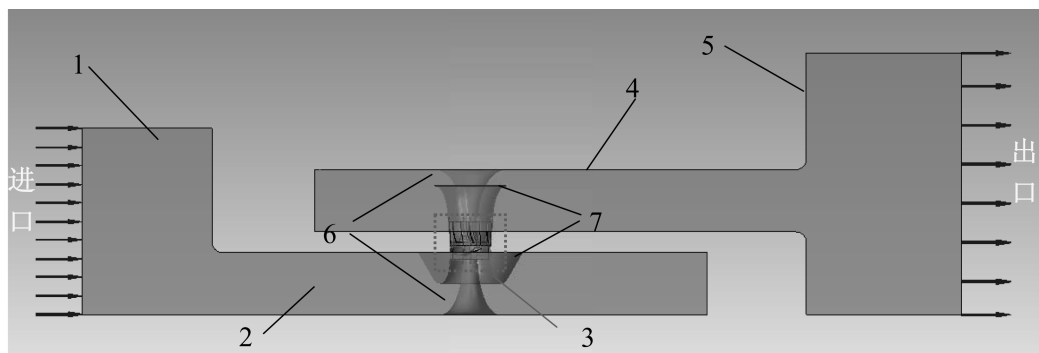


图1 大寨河闸站1#、2#机组(双向)站身结构示意图



注:1. 进水延伸段 2. 进水流道 3. 叶轮与导叶 4. 出水流道 5. 出水延伸段 6. 导水锥 7. 喇叭管

图2 大寨河闸站双向流道泵装置计算区域示意图

用雷诺时均 Navier-Stokes 方程描述其流动规律^[6-7]。为了解决 N-S 方程平均化过程中方程不封闭问题,引入湍流模型来简化计算、封闭方程是必要的。本文湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型,因为基于 SST 模型的 $k-\omega$ 方程考虑了湍流剪切应力的传输,可以精确地预测流动的分离和负压力梯度条件下流体的分离量^[8-9]。同时,SST 模型的最大优点就在于考虑了湍流剪切应力,从而不会对涡流黏度造成过度预测。

由于泵装置内部包含旋转的叶轮以及静止的导叶和进水流道,所以为了保证交界面的连续性,针对转动的叶轮与进水流道以及导叶的交接面采用多参考系模型处理动静交界面进行处理,其他界面均设置为静止壁面,采用无滑移边界条件,在近壁区采用壁面函数。

为了更好地模拟泵装置内部流动,在进水流道进口前加设一段延长段,以进水延长段进口作为整体计算域进口,采用总压进口条件,总压设置为 1 atm。同样地,在出水流道出水后加设一段延长

段,以出水延长段出口作为整体计算域的出口,出口边界条件设置为质量流出,给定出口边界上的体积流量为设计流量 $Q_d = 7.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.3 网格剖分

采用 ANSYS ICEM 软件对进水流道、出水流道进行网格剖分,采用 ANSYS TurboGrid 软件对叶轮和导叶体进行网格剖分。由于进水流道内部存在不规则的喇叭管和导水锥,所以进水流道内网格为混合网格,叶轮和导叶内网格为结构化六面体网格。最终,整体计算域网格为 453 万。大寨河闸站泵装置计算域网格划分如图 3 所示。

4 数值模拟结果及分析

4.1 大寨河闸站泵装置进水流道泵装置内流场分析

进水流道的作用是将进水池中的水流通过喇叭管平滑地引入水泵进口,为水泵提供良好的进水条件。通常采用轴向流速分布均匀度 V_u 以及加权平均角 $\bar{\theta}$ 来反映进水流道的优劣^[10-11]。轴向流速分布均匀度 V_u 以及加权平均角 $\bar{\theta}$ 计算公式如下:

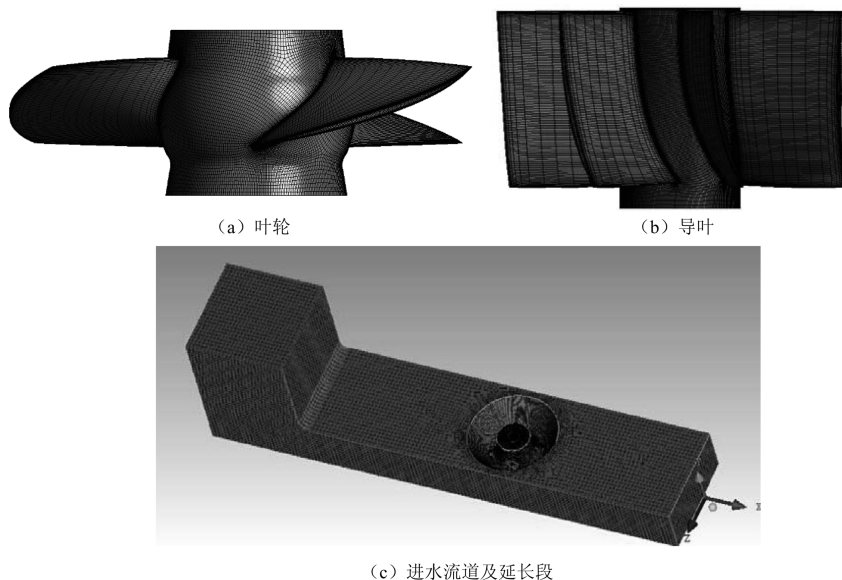


图3 大寨河闸站双向流道泵装置计算域网格划分示意图

$$V_u = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{\sum (u_{ai} - u_a)^2}{m}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: \bar{u}_a 为断面平均轴向速度; u_{ai} 为断面各单元轴向速度; m 为断面网格单元个数。

$$\bar{\theta} = \frac{\sum u_{ai} \left[90^\circ - \arctan \frac{u_{ti}}{u_{ai}} \right]}{\sum u_{ai}} \quad (2)$$

式中: u_{ti} 为断面各单元横向速度; u_{ai} 为断面各单元轴向速度。

通过计算可知,在设计流量工况下,大寨河闸站进水流道出口断面流速分布均匀度为 96.89%,加权平均角为 84.98°。通常,轴向流速分布均匀度 V_u 越接近 100%,加权平均角 $\bar{\theta}$ 越接近 90°时,水泵入流条件越好。所以,大寨河闸站进水流道设计较优,水泵入流条件较好。

图4为大寨河闸站双向流道泵装置进水流道纵剖面流线及静压云图。由图可知,进水流道进口

端流线较为平顺,纵剖面静压变化较为均匀。由于进水流道沿水流方向末端为封闭端,同时末端水流受到水泵吸水作用,所以进水流道末端存在较大的回流区。

4.2 大寨河闸站泵装置出水流道泵装置内流场分析

图5为大寨河闸站双向流道泵装置出水流道纵剖面流线及静压云图,图6为大寨河闸站双向流道泵装置出水流道水平剖面(距顶板 0.25 m)流线及静压云图。由图5、图6可知,水历经出水喇叭管后受到出水流道导水锥分流作用分别向出水流道两端流动。由于导叶对速度环量回收不完全,所以出水流道内水较紊乱,导水锥两侧均存在回流。从静压云图上看,除导水锥头部存在低压区外,出水流道内整体静压分布较均匀。

4.3 大寨河闸站泵装置水力特性

图7为大寨河闸站双向流道泵装置内部流线图。由图可知,泵装置内部整体流态良好,不良流态主要存在于进出水流道的封闭端。由于进水流

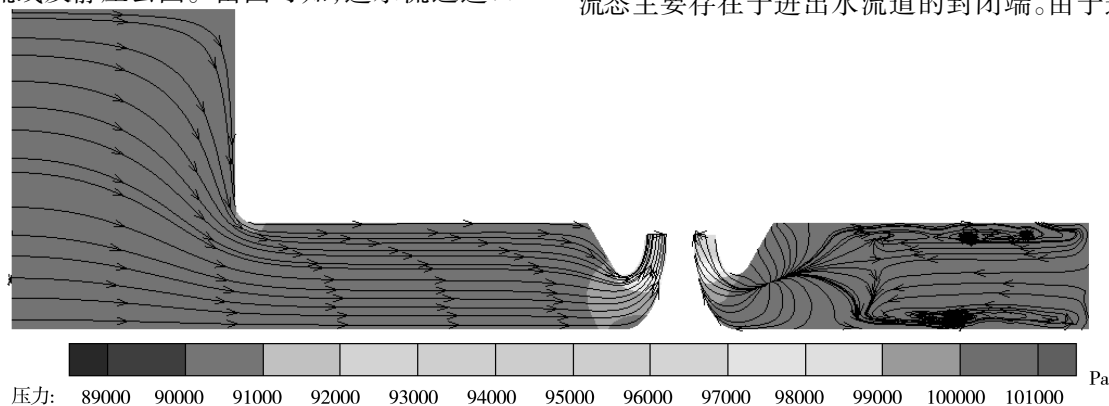


图4 大寨河闸站双向流道泵装置进水流道纵剖面流线及静压云图

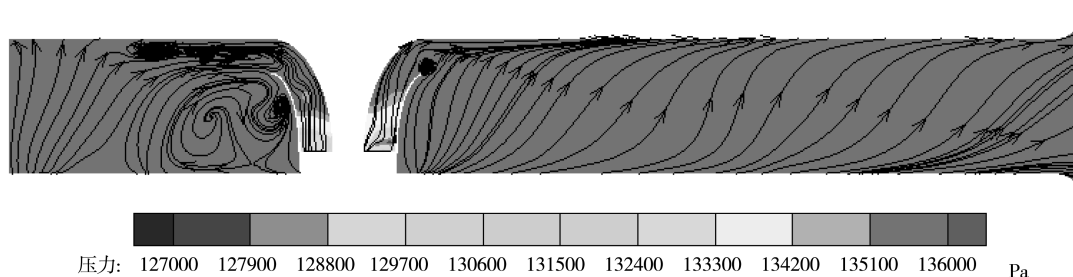


图5 大寨河闸站双向流道泵装置出水道纵剖面流线及静压云图

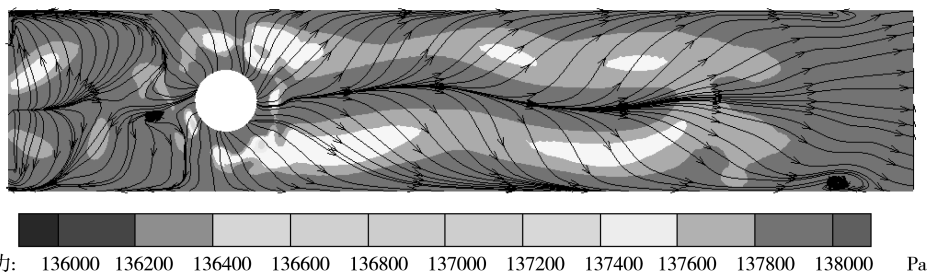


图6 大寨河闸站双向流道泵装置出水道水平剖面(距顶板 0.25 m)流线及静压云图

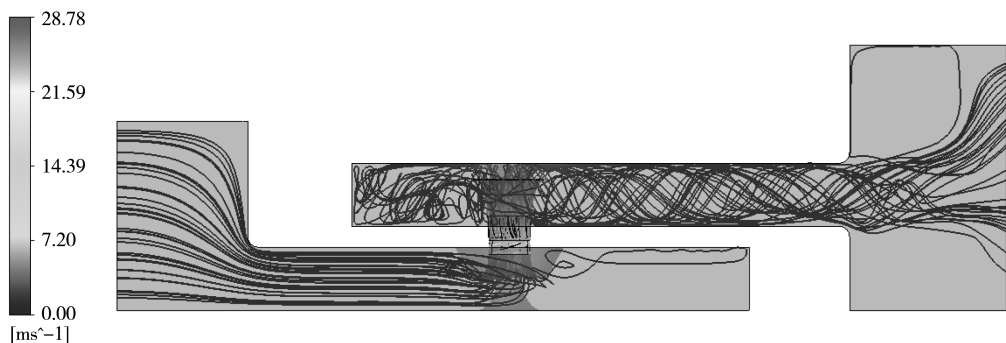


图7 大寨河闸站双向流道泵装置内部流线图

道喇叭管正下方设置导水锥,所以进水流道内水流受到导水锥整流作用明显,入泵水流流态较好。出水流道内出口端水流呈螺旋状,主要由于速度剩余环量的影响,但是出水流道出口端长度较长,所以对水流由很好整流作用。相较出口端水流流态,出水流道封闭端流态较紊乱。

图8为大寨河闸站双向流道泵装置性能曲线图。由图可知,大寨河闸站双向流道泵装置整体效率较优,叶片角度为 0° 时,设计流量($Q_d = 7.3 \text{ m}^3/\text{s}$)工况下,泵装置效率为73.5%,装置扬程为3.75 m。

4 结 语

(1)通过数值模拟结果可知,大寨河闸站进水流道水力性能较优,水泵入流条件较好;出水流道内水流流态受到速度环量影响,呈螺旋状;进出水流道内流态整体较好,在流道封闭端流态稍紊乱。

(2)大寨河闸站双向流道泵装置性能较优,叶片角度为 0° 时,设计流量工况下,泵装置效率为73.5%,装置扬程为3.75 m,满足泵站设计要求。

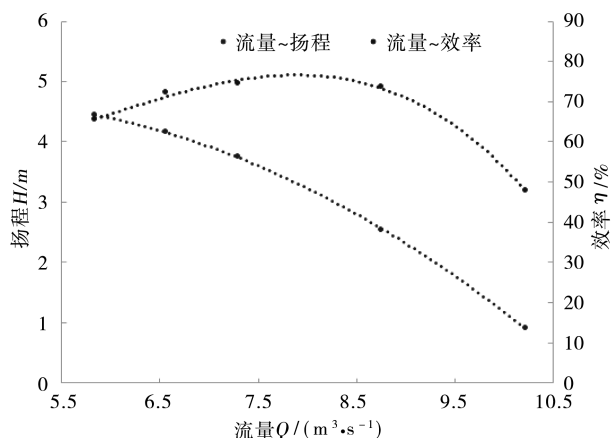


图8 大寨河闸站双向流道泵装置性能曲线图

参考文献:

- [1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 陆林广. 高性能大型低扬程泵装置优化水力设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.

(下转第72页)

降低较快,说明承插口密封性能不好,需要重新安装、再打压检测,确保整个管道系统总体试压成功^[2]。

(5)玻璃钢夹砂管道现场糊制。对于地质复杂地段定制管件不满足安装条件,可采取现场接口糊制法。现场测量切割需要管道长度,专业技术人员现场糊口连接。制定玻璃钢管现场糊制工艺技术要求。同时精细选取原材料不饱和聚脂树脂、固化剂、玻璃纤维、促进剂及作业工具等,规范操作现场糊口计划糊补厚度、层数、树脂用量、配料程序等,熟练按施工技术、工艺等进行糊制^[3]。

3.4 沟槽回填

管道承插口试压合格后,及时排除管区积水、清除沟槽杂物、回填土方。本工程管线沿途部分地段多为丘陵山地,沟槽开挖料出现碎石岩土,直接回填土容易造成玻璃钢管道管身伤害。首先垫层料回填中粗砂,管道顶 50 cm 至管底回填中粗砂。施工时先把管道两侧腋下的三角区回填夯实,再玻璃管管两侧对称回填夯实到管顶以上 50 cm 处。管顶每层 300 mm 回填,夯实满足设计达到的密实度。

3.5 水压试验

水压试验是对管线安装是否满足设计、使用功能进行检验,管线完成验收合格覆盖后,分段系统进行水压试验。水压试验专项施工方案经监理审批后方可进行。管道水压试验检测频率应按照国家及设计要求进行,水压试验多采用水压试验法,试验压力为工作压力的 1.5 倍。试压段长度取为

1 000 m,也可根据现场情况调整。试压前管道应首先在不大于工作压力下充分浸泡,浸泡时间不小于 24 h。先排出管道内的气体,再将管道内压力升至试验压力后稳定 15 min,然后降至工作压力稳定 30 min,且压力降在容许范围不出现渗漏水为合格。

4 结 语

新沂河尾水通道导流工程规模为 $1.61 \text{ m}^3/\text{s}$,采用双管道输水方案,管道单排总长约 26.81 km,管道间距 2.4 m;玻璃钢夹砂管、钢管及管件互相连接而成,玻璃钢管道管径为 DN1200、DN400,钢管主管道管径为 DN1020 × 12。管道工作压力为 0.6 MPa,试验压力为 0.9 MPa。

新沂市尾水截污导流工程为玻璃钢管道施工积累丰富经验。玻璃钢管道综合性能良好,经济实用性强,值得推广其应用领域和范围将会不断的扩大。同时本工程的实施使排入新沂河的尾水和污水顺利入海,减少新沂河两岸污染,改善治理区生态环境。

参考文献:

- [1] 孟玉生. 玻璃钢夹砂管在小型水电站工程的研究与应用[J]. 水利水电技术, 2010, 41(2):72-74, 79.
- [2] 范多强. 浅谈市政给排水玻璃钢管道的施工[J]. 江西建材, 2014(13):73.
- [3] 乔书阳. 烟台河引水工程玻璃钢管道施工常见问题及对策[J]. 吉林水利, 2008(3):55-56.
- [3] 成立, 汤方平, 仇宝云, 等. 某双向灌排泵站现场测试及改造思路[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2005(3):67-69.
- [4] 戴启璠. 大型低扬程泵装置现状及发展方向[J]. 江苏水利, 2018(6):54-58.
- [5] 王朝飞, 汤方平, 石丽建, 等. 箱涵式轴流泵装置进出水流道优化设计[J]. 中国农村水利水电, 2019(7):182-188.
- [6] 王福军, 唐学林, 陈鑫, 等. 泵站内部流动分析方法研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1):47-61, 71.
- [7] 焦伟轩, 成立, 颜红勤, 等. 超低扬程双向流道泵装置压力脉动特性研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(6):101-112.
- [8] 张德胜, 吴苏青, 施卫东, 等. 不同湍流模型在轴流泵叶顶泄漏涡模拟中的应用与验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13):46-53.
- [9] 邴浩, 曹树良, 王玉川. 湍流模型对混流泵性能预测的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11):42-47.
- [10] 杨敏官, 孟宇, 李忠, 等. 轴流泵叶轮导水锥型式设计及其流道水力特性模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11):81-88.
- [11] 顾巍, 成立, 蒋红樱, 等. 立式轴流泵装置虹吸式出水流道水力特性 CFD 研究[J]. 江苏水利, 2018(1):7-15.

(上接第 69 页)