

九曲河泵站流动特性数值模拟分析

蒋红樱¹, 李尚红², 顾 巍³, 焦伟轩⁴, 成 立^{4*}

(1. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省江都水利工程管理处, 江苏 扬州 225220; 3. 江苏省大丰区水利局, 江苏 盐城 224100; 4. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 在江苏沿江地区, 低扬程防洪减灾泵站分布较广。针对沿江九曲河泵站, 采用 CFD 数值模拟方法, 计算分析泵装置 3 个特征工况下内部流动特性。数值计算结果表明, 九曲河泵站采用双向流道形式较为复杂, 流道内存在盲端, 水流回流较大, 水力损失增加, 对泵装置整体效率略有影响。在大流量零扬程附近工况下, 内部流动特性较为特殊, 泵站运行过程中需多加关注。

关键词: 低扬程; 双向流道; 数值模拟; 泵站

中图分类号: TV675 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2018) 03-0001-05

Numerical simulation analysis of flow characteristics of Jiuqu River Pumping Station

JIANG Hongying¹, LI Shanghong², GU Wei³, JIAO Weixuan⁴, CHENG Li^{4*}

(1. *Hydraulic Engineering Science and Technology Consultation Limited Company of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu*; 2. *Jiangdu Hydraulic Project Management Division, Yangzhou 225200, Jiangsu*; 3. *Dafeng Water Conservancy Bureau, Yancheng 224100, Jiangsu*; 4. *School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu*)

Abstract: In Jiangsu along the Yangtze River, the low head flood control and disaster reduction pumping station is widely distributed. By using the CFD numerical method, the internal flow characteristics of the Jiuqu River Pumping Station under three characteristics conditions was calculated and analyzed. The numerical results show that the Jiuqu River Pump Station with two-way Passage is complicated. There are blind ends in the passage. The return flow is large, hydraulic loss increased, and the overall efficiency of the pump device is slightly influence. Under the condition of large flow, the internal flow characteristics are special. More attention should be paid to the special working condition in the operation of pumping station.

Key words: low lift; bi-directional flow; numerical simulation; pumping station

0 引言

在江苏沿江地区, 由于自然条件的影响, 为抗御

旱、涝、洪等灾害, 分布着近百座固定低扬程防洪减灾泵站, 总装机容量 100 万 kW。这些泵站在几十年的防洪减灾工作中发挥了不可替代的作用, 近年来,

收稿日期: 2017-12-02

基金项目: 江苏省水利科技项目(2016035)、江苏省优势学科、江苏省青蓝工程中青年学术带头人项目; 江苏省六大人才高峰计划

作者简介: 蒋红樱(1972-), 女, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程技术咨询工作。

通讯作者: 成立(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事调水工程研究。

随着经济的快速发展、农业结构的调整、工业的稳步增长,泵站越来越成为保障经济增长的重要的基础设施。同时,由于江苏沿江地区处于长江和淮河流域,降雨时空分布不均、旱涝交替发生,泵站须做到常备不懈。因此,沿江泵站超低扬程良好可靠运行对于抵御自然灾害,保证农业稳产高产,对江苏省国民经济稳定持续发展起巨大作用^[1]。

沿江泵站运行特点是扬程低、变幅大,特别是由于长江潮位的变化,使得泵站经常运行至超低扬程工况,甚至零扬程或负扬程,在此工况下,机组严重偏离设计工况,流量超出设计流量 20% ~ 30% 以上,极易引发异常水压力脉动,导致机组强烈振动,严重威胁泵站安全^[2-5]。

本文针对江苏沿江泵站不同运行工况,通过数值模拟,对泵装置不同特征工况下内部流动特性进行计算分析。

1 工程概况

九曲河水利枢纽是国家“治太”十大工程之一“湖西引排工程”的重要组成部分,也是“湖西引排工程”四大枢纽之一。工程作为九曲河入江控制口门,位于丹阳市后巷和新桥两镇之间的九曲河上,北距长江夹江 850 m。工程于 2002 年元月开工建设,2007 年 8 月通过竣工验收。

九曲河枢纽工程由节制闸、抽水站和套闸 3 座主要水工建筑物及相应的配套工程组成,工程等级为二等大(二)型。

具有双向抽排能力,装机 4 台(套),单机设计流量为 20 m³/s,抽水站水泵为立轴开敞式轴流泵,叶轮直径 2.50 m,主电机为同步电机,单机功率 1000 kW;主变压器为油浸式,容量为 5000 kVA;泵站每台机组进、出水流动道设钢闸门 4 扇,通过闸门控制抽水或排水方向。

九曲河自丹阳东南大运河至长江夹江,全长 27.6 km,流域面积 211 km²,同时还承担着通胜地区 574 km² 来水面积中约 64% 的入江洪水。九曲河枢纽实施后效益如下:

(1) 防洪除涝方面:可使湖西丹阳地区的防洪除涝能力由目前的 5 ~ 10 年一遇提高到 20 年一遇,洪涝时丹阳最高水位可由 7.17 m 下降为 6.14 m,入江排水量可达 2.514 亿 m³,净增 0.237 亿 m³。

(2) 供水方面:在遇保证率为 94% 的 1971 年型

设计干旱年,引江水量可达 11.32 亿 m³,净增 3.89 亿 m³。

(3) 环境方面:长江夹江常年保持Ⅱ类水质,引水量的增加,提高了九曲河及相关河道的水体自净能力,对湖西及太湖下游地区的水环境改善极为有利。

九曲河泵站特征扬程见表 1。

表 1 九曲河泵站特征扬程

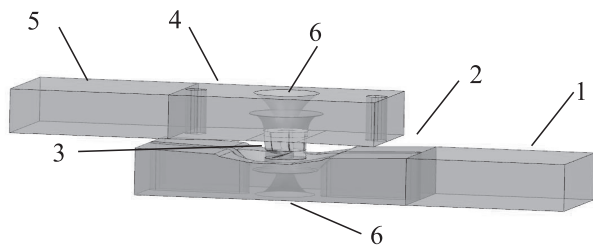
特征值	排涝	灌溉
最大扬程 (m)	4.09	2.60
设计扬程 (m)	2.61	1.89
平均扬程 (m)	2.06	1.57
最小扬程 (m)	-0.1	-0.3

2 计算模型及数值模拟

2.1 三维建模及控制参数

九曲河泵站泵型采用开敞式轴流泵型,型号为 2500ZLQ-20-2.5,比转速为 1250,水泵直径 2.50 m,单机流量 20 m³/s,配套电机 1000 kW。进、出水流动道为双层涵洞式双向流动道,进水流动道进口尺寸 7300 mm × 3200 mm (宽 × 高),出水流动道出口尺寸 7300 mm × 3000 mm,进、出水流动道内设隔墩厚 500 mm,水泵进口设喇叭管、导流锥。

计算区域包括进水延伸段、进水流动道、叶轮与导叶、出水流动道、出水延伸段 5 个部分,其实体造型图如图 1 所示。



注: 1. 进水延伸段 2. 进水流动道 3. 叶轮与导叶 4. 出水流动道 5. 出水延伸段 6. 导水锥

图 1 九曲河泵站装置三维建模示意图

2.2 数值计算方法及边界条件

泵站内部流动为非定常粘性流动,本文采用雷诺时均 Navier-Stokes 方程描述其流动规律。将紊流

各种特征变量分解成时均值和脉动值建立时均雷诺方程,再引入紊流粘性系数,建立紊流模型。

对于超低扬程泵装置来说,包含旋转的叶轮、静止的导叶和进、出水流动道,其中进水流道与叶轮、叶轮与导叶之间有相互流动耦合作用,动静交界面的处理对整个泵装置的计算正确与否起重要影响。本文采用多参考系模型处理动静交界面,以保证交界面的连续性。

采用原形装置作为计算装置,其中叶轮直径:2500 mm,转速:150 r/min,泵最佳效率点(BEP)流量 $Q_{\text{设}}=20 \text{ m}^3/\text{s}$ 。本文针对小流量工况 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 、设计工况 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 以及大流量工况 $28 \text{ m}^3/\text{s}$ 进行计算分析。

进口条件采用的是质量入口,给定进口边界上的质量流量。出口边界取在出水延伸段出口处,出流边界采用自由出流。在固体边壁处规定无滑移条件,在近壁区采用壁面函数。见图2。

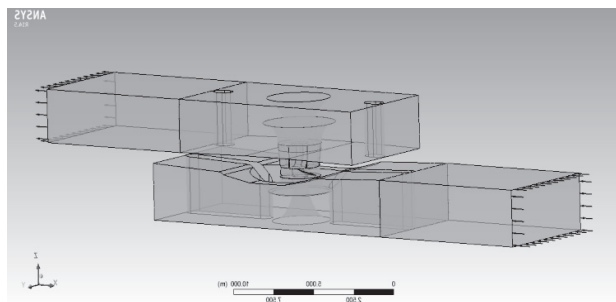


图2 九曲河泵站装置计算区域示意图

2.4 网格剖分

进出水箱是规则的六面体,采用结构化网格划分,而进水流道、出水流动道、叶轮及导叶部分,几何形状复杂,因此采用四面体单元的非结构化网格进行剖分^[6-8],计算总网格数为820万。见图3。

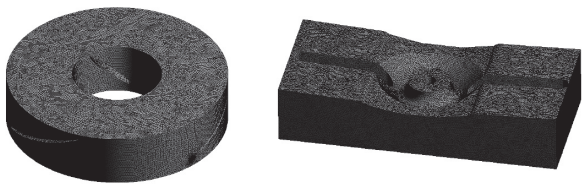


图3 网格划分

3 数值模拟结果及分析

3.1 装置外特性

九曲河泵站性能曲线见图4,由图可知,在小流量

$15 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下,效率为61.81%,扬程为3.64 m;在设计流量 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下,效率为66.48%,扬程为2.70 m;在大流量 $28 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下,扬程为0.01 m,在零扬程附近。

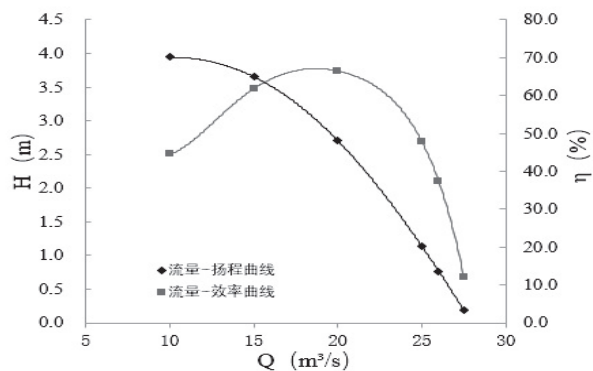
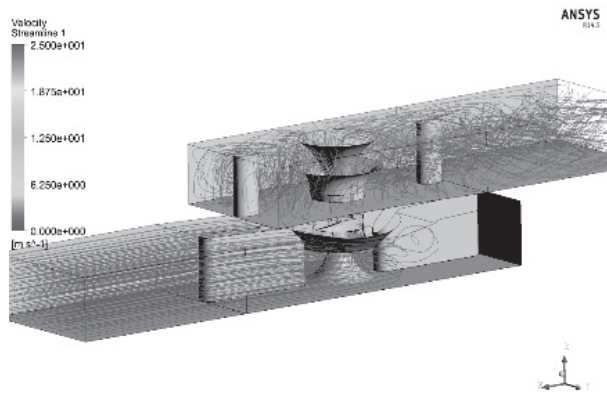


图4 九曲河泵站性能曲线图

3.2 装置内特性分析

对双向流动泵装置进行定常计算^[9-11],获得泵装置内的完整流场。泵装置内的流线图如图5所示。

图5为不同工况泵装置内流线图。由图可知,3个流量工况下,泵装置内流态变化不大,流线整体趋势较为一致。由于受到双向流动结构形式的影响,泵装置进出水流道内主流区流态较好,但是进出水流道盲端都存在较大的回流区。其中,出水流动道由于盲端较短,回流强度更大一些,从而导致出水流动道内水力损失更大。水流离开叶轮进入导叶体速度环量得到回收,但由于环量回收不完全,水流进入出水流动道前还存在一定的剩余环量,而且受到喇叭管扩散作用的影响,导致出水流动道内水流流线呈螺旋状。出水流动道内两侧设置隔墩,整流作用明显,特别是出水侧水流,分布较为对称。



(a) $15 \text{ m}^3/\text{s}$

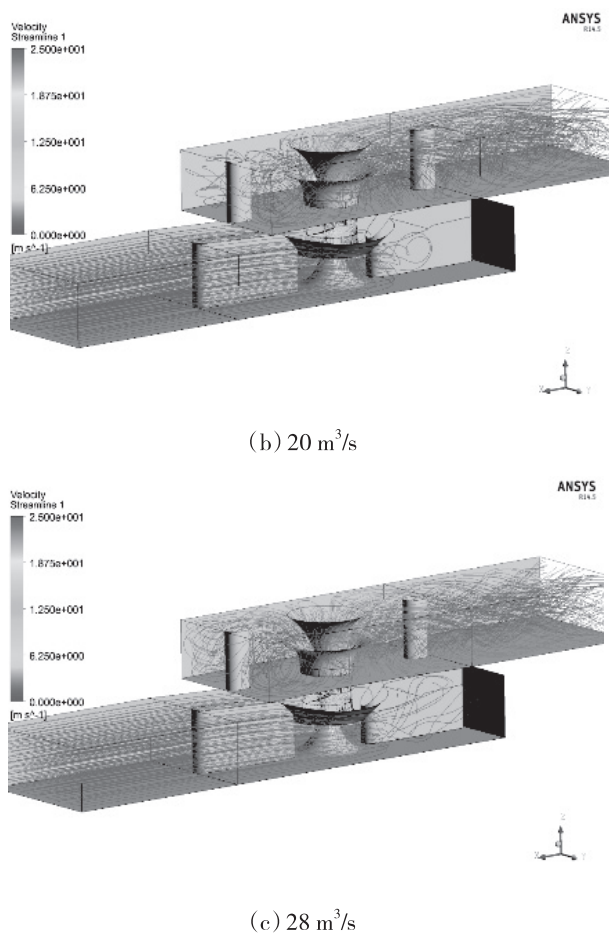


图5 不同工况泵装置内流线图

图6为不同工况泵装置内导叶体流线矢量图。由图可知,小流量工况下,导叶体内水流存在一定的回流。回流区的出现,对导叶体回收环量影响较大,导致导叶体水力损失增加。随着流量加大,回流现象得到有效缓解。大流量工况下,导叶体回收环量效果优于小流量工况。

图7为不同工况泵装置内叶片表面压力分布云图。由图可知,在压力面压力分布云图中可以看出,叶片进口边受到水流冲击作用,存在小范围的高压区。随着流量的增大,进口边处高压区逐渐缩小。对于 $28\text{ m}^3/\text{s}$ 零扬程附近工况,叶片面高压区向吸力面偏移。

图8为不同工况叶片Span0.95位置的静压分布。由图可知,叶片表面压力分布不均匀。其中,在小流量 $15\text{ m}^3/\text{s}$ 及设计流量 $20\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下叶片压力面静压值整体大于吸力面静压值。但在大流量 $28\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下,吸力面部分静压值大于压力面。

4 结语

(1) 通过数值模拟可以得出,九曲河双向流道泵装置由于结构形式特殊,进出水流道均存在盲端,导致水力损失增大,泵装置整体效率偏低。

(2) 九曲河泵站属于沿江低扬程泵站,流量变化

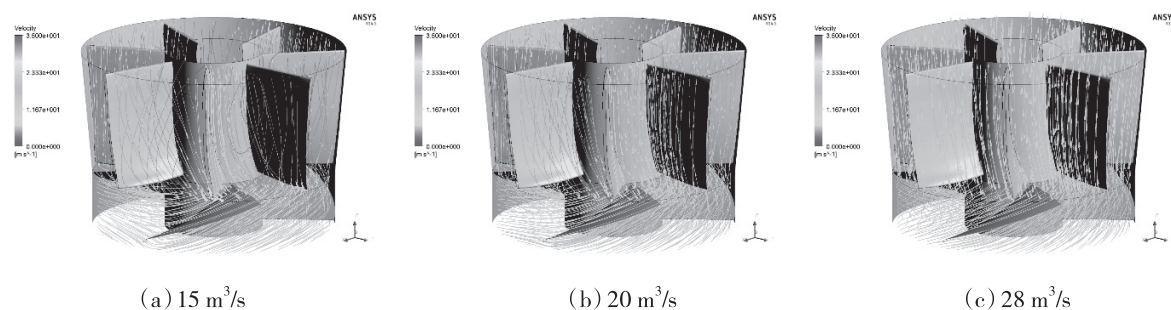
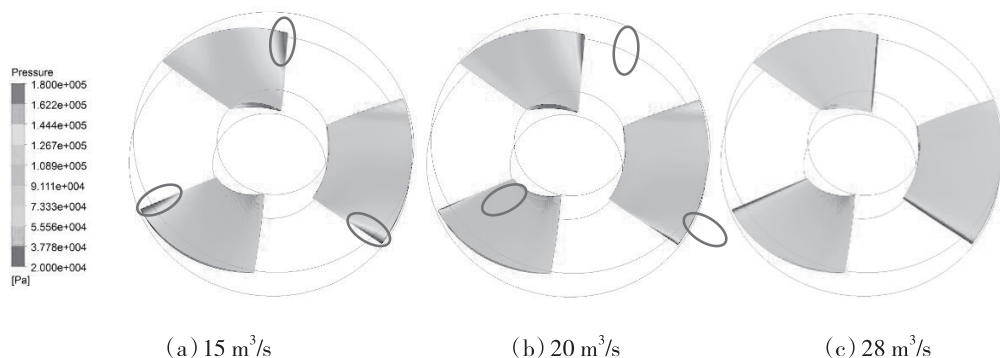


图6 不同工况泵装置内导叶体流线矢量图



(1) 叶片压力面

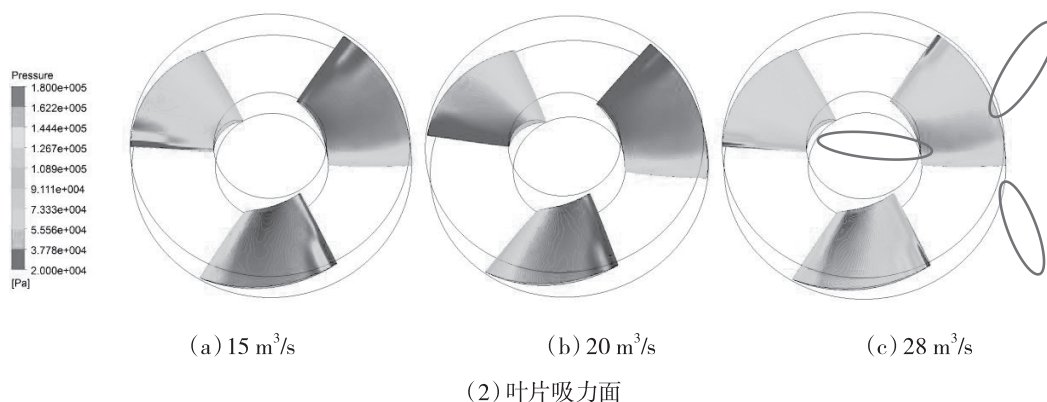


图7 不同工况泵装置内叶片表面压力分布云图

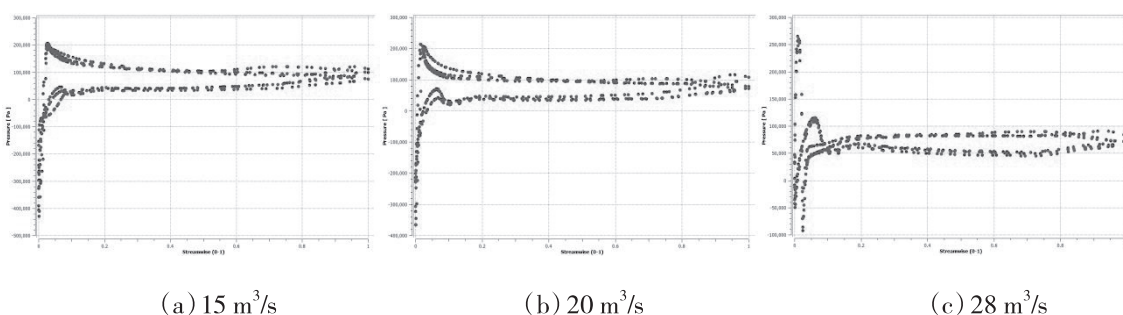


图8 不同工况叶片 Span0.95 位置的静压分布

大,经常运行至零扬程附近。零扬程工况下,泵装置内流动特性较为特殊,而且相关研究还较少,需要关注。

参考文献:

- [1] 刘超,金燕.双向流道泵装置内三维流动数值模拟[J].农业机械学报,2011,42(09):74-78.
- [2] 成立,刘超,van ESCH B P M,等.泵站开敞式进水池流动特性数值模拟[J].扬州大学学报(自然科学版),2009,12(02):58-61.
- [3] 汤方平,张丽萍,付建国,等.轴流泵内部压力脉动数值预测及分析[J/OL].排灌机械工程学报,2013,31(10):835-840.
- [4] 孟凡,李彦军,邵勇,等.流固耦合作用对双向流道泵装置流场影响[J].中国农村水利水电,2017(01):175-179.
- [5] 张德胜,耿琳琳,施卫东,等.轴流泵水力模型压力脉动和振动特性试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(06):66-72.
- [6] 成立,刘超,周济人,等.大型立式泵站双向进水流道三维紊流数值模拟[J].农业机械学报,2004(03):61-64.
- [7] 刘超,金燕,周济人,等.箱型双向流道轴流泵装置内部流动的数值模拟和试验研究[J].水力发电学报,2011,30(05):192-198.
- [8] 杨帆,刘超,汤方平,等.S形轴伸贯流泵装置时变湍流场的脉动特性分析[J].水力发电学报,2015,34(02):175-180.
- [9] 陈松山,葛强,周正富,等.大型泵站双向进水流道三维紊流数值模拟[J].江苏大学学报(自然科学版),2005(02):102-105.
- [10] 王林锁,陈松山,葛强,等.望虞河双向流道泵站泵装置特性试验研究[J].水泵技术,2000(06):32-36.
- [11] 张德胜,耿琳琳,施卫东,等.轴流泵水力模型压力脉动和振动特性试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(06):66-72.