

文章编号: 1007-2284(2020)03-0160-06

大型灌排泵站改造应用研究

李端明¹, 张 印², 肖若富³, 温鸿浦⁴, 李彦迪²

(1. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 2. 宁夏回族自治区固海扬水管理处, 宁夏 中宁 755100;
3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 4. 宁夏回族自治区水利厅灌排中心, 银川 751000)

摘要: 我国拥有数量庞大的灌排泵站, 近年来特别是大中型泵站的发展已经成为我国灌排水网络的骨干和支柱工程。但随着在建和新建大型泵站中水泵单机功率的不断提升, 能耗过高和运行稳定性的问题日益突出。单级双吸离心泵是我国灌排泵站的一种常见泵型, 以宁夏回族自治区固海扬水工程白府都泵站更新改造工程中的单级双吸离心泵为研究对象, 分析了该泵的运行中存在的问题, 并给出了改进的叶轮优化方案。结果表明相对于传统的双吸式离心泵, 采用交替加载与 V 形交错技术设计得到的双吸离心泵最明显的优势是具有高效区宽、压力脉动低的优点。本文丰富了单机双吸离心泵的改造设计方法, 对未来泵站改造双吸离心泵具有一定的借鉴意义。

关键词: 双吸离心泵; 叶轮优化; 交替加载

中图分类号: TV675 文献标识码: A

Research on the Application of Large-scale Irrigation and Drainage Pump Station

LI Duan-ming¹, ZHANG Yin², XIAO Ruo-fu³, WEN Hong-pu⁴, LI Yan-di²

(1. Chinese Irrigation Drainage Development Center, Beijing 100054, China;
2. Ningxia Guhai Yangshui Management Division, Zhongning 755100, Ningxia, China;
3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
4. Ningxia Water Conservancy Irrigation and Drainage Development Center
Irrigation Drainage Development Center, Yinchuan 751000, China)

Abstract: China has a large number of irrigation and drainage pump stations. In recent years, the development of large and medium-sized pumping stations has become the main part of China's irrigation and drainage networks. However, with the continuous improvement of the power of the pump in the large-scale pumping station under construction, the problem of excessive energy consumption and operational stability has become increasingly prominent. Single-stage double-suction centrifugal pump is a common pump type in irrigation and drainage pumping station. In this paper, a single-stage double-suction centrifugal pump is analyzed, which is used in the renovation project of Baifudu Pumping Station of Guhai Yangshui Project in Ningxia. Results show that the most obvious advantage of the double-suction centrifugal pump designed by blade loading distributions and V-shaped staggering technology compared to the traditional type is it has a wider high efficiency zone and lower pressure pulsation. The result also enriches the design and modification method of single-machine double-suction centrifugal pump, which has certain reference significance for the future pump station reconstruction double-suction centrifugal pump.

Key words: double-suction centrifugal pump; impeller optimization; blade loading distributions

0 引言

泵站工程是利用水泵机组及其配套建筑物将电能转化为水能进行灌排或者供水的综合性提水工程^[1]。灌溉泵站是提水对农田进行灌溉的泵站, 是农业生产、农民增收和区域环境改善的重要基础设施。新中国成立 60 多年来, 我国机电灌排事业获得了迅猛发展, 泵站比较集中的省份及地区, 已初步形

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 宁夏回族自治区水利科技项目资助。

作者简介: 李端明(1962-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事泵站改造技术研究。E-mail: ldam6262@163.com。

成了以大型泵站为骨干的抗旱灌溉、抗洪除涝及跨流域调水工程体系,及以中小型泵站为主导地位的地区性灌溉和除涝工程网络。目前全国机电灌溉排水面积约 4 267 万 hm^2 ,有力地提高了各地抗御自然灾害的能力,对保证农业稳产高产,保障国家粮食安全等起到了关键性的作用^[2]。

双吸离心泵流量大、扬程高,广泛应用于大型调水工程、农田灌溉和城镇供水等重要领域。如南水北调中线工程惠南庄泵站安装了 8 台国内单机功率最大的双吸离心泵,单机设计流量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、设计扬程 58.2 m、功率 7500 kW,泵站总装机功率达到 6 万 kW,由于泵站流量变幅 $10 \sim 60 \text{ m}^3/\text{s}$ 、扬程范围 $0 \sim 58.2 \text{ m}$,且年运行时间长,运行工况复杂,对机组运行稳定性的要求非常高^[3]。在大型灌溉排水泵站方面,据水利部统计,我国共有大型灌溉排水泵站 450 处,装机功率 563.57 万 kW,设计流量 $35 885 \text{ m}^3/\text{s}$,共安装水泵机组 24 540 台套,在大型灌溉泵站中,75%以上的泵型为双吸离心泵^[4]。在这些大型泵站中,大型双吸离心泵为农业灌溉和饮水工程发挥了关键作用。

随着我国经济的快速发展,对大型双吸离心泵的需求将会越来越大^[5,6]。随着在建和新建大型泵站中水泵单机功率的不断提升,双吸离心泵应用面临的能耗过高和运行稳定性问题将更加突出。针对这一问题,本文结合宁夏白府都泵站更新改造工程,研究叶片载荷分布对双吸离心泵水力性能的影响,通过控制叶片载荷来提高双吸离心泵的效率 and 稳定运行性,具有重要的经济和社会效益。

1 研究对象及存在的问题分析

1.1 单级双吸离心泵基本参数

白府都泵站属于宁夏固海扬水工程的梯级提水泵站的其中一级,始建于 1984 年,控灌面积 $3 734 \text{ hm}^2$,泵站总扬程 48.8 m,设计流量 $10.04 \text{ m}^3/\text{s}$,采用 3 工 1 备的运行方式,为更好地提高该泵站双吸离心泵的运行稳定性,并降低其能耗。本文以白府都泵站所使用的 HS600-500-650A 型单级双吸离心泵为研究对象进行改进,该泵的主要参数如表 1 所示。

表 1 HS600-500-650A 型单级双吸离心泵设计参数

设计参数	符号	数值
进口直径/mm	D_1	600
出口直径/mm	D_2	500
叶轮直径/mm	D	650
工作转速/rpm	n	990
设计流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	Q	3 600
设计扬程/m	H	47
效率/%	η	88.5
比转速	n_s	142.3
汽蚀余量/m	$NPSH$	5.8

1.2 数值计算模型及方法

根据 HS600-500-650A 单级双吸离心泵的水力图尺寸,建立三维模型,如图 1 所示。

在该模型中,利用 ICEM CFD 软件对于进水流道(包含延

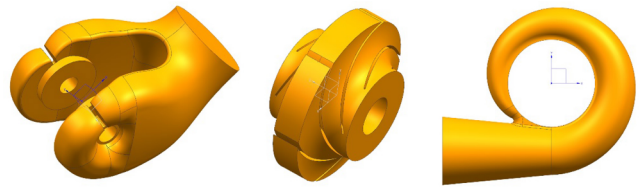


图 1 流体域三维图

伸段)、叶轮、出水流道(包含延伸段)进行网格划分,其均采用非结构化网格。全流道的网格节点总数为 1 096 833,总单元数为 5 725 942。各个流体域的网格、节点数如表 2 所示。网格如图 2 所示。

表 2 各个流体域参数

参数	进口延伸段	进水流道	叶轮	出水流道	出口延伸段
节点数	16 740	262 068	516 785	238 498	62 742
网格数	87 743	1 367 499	2 937 998	1 274 963	351 443

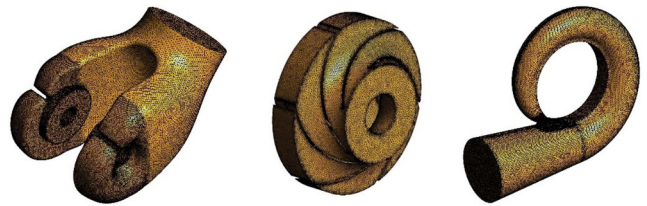


图 2 流道网格

采用 ANSYS CFX 软件对 HS600-500-650A 单级双吸离心泵进行数值模拟,选用 SST 湍流模型,在参数设置中流动介质为水,温度 $22 \text{ }^\circ\text{C}$,参考压力为 1 atm,转速为 990 r/min,计算步数为 1 000 步,收敛标准为 1×10^{-5} 。

对于边界条件的设定:①进口边界条件:将吸水延伸段进口设置为进口边界,给定各工况的质量流量;②出口边界条件:将蜗壳出口延伸段出口设置为出口边界,给定出口静压为 0;③其他边界条件:其余所有壁面都采用无滑移边界条件。对于交界面的设置,将进水流道出口和叶轮进口、叶轮出口和出水流道进口设置为固定-旋转交界面,将进水流道进口和进口延伸段出口处、出水流道出口和出口延伸段进口处设置为固定交界面。

1.3 外特性分析

对表 3 中的情况进行模拟计算,分别计算出各工况下的扬程、效率并做出相应的水力特性曲线,如图 3。扬程曲线在设计工况和小流量工况下误差较小,其中,设计工况下,泵扬程的计算值为 47.97 m,略高于试验值,模拟结果较为准确。比较效

表 3 模拟计算时的工况

工况	流量值/ $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	流量值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
0.2 Q	200	720
0.4 Q	400	1 440
0.6 Q	600	2 160
0.8 Q	800	2 880
1.0 Q	1 000	3 600
1.2 Q	1 200	4 320
1.4 Q	1 400	5 040

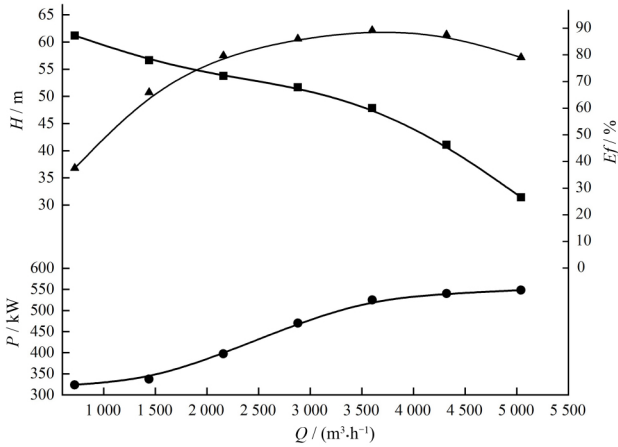


图3 HS600-500-650A 水力特性曲线

率对比图,可以看到效率曲线在实验结果和模拟结果整体上趋势一致。其中,在设计工况下,模拟结果与效率实验值误差为 0.73%。模拟结果较为准确。因此,从总体上来说,该泵的 CFD 计算结果与试验结果吻合良好,其计算结果可以作为我们优化设计的评判方法。

1.4 内部流动分析

叶轮流场分布结果如图 4 所示,在这里取了 $0.2Q$ 、 $0.4Q$ 、 $0.6Q$ 、 $0.8Q$ 、 $1.0Q$ 、 $1.2Q$ 、 $1.4Q$ 工况进行分析。可以明显看出,小流量工况下,叶轮出口处的流动及其不均匀,轮毂隔板两侧的水流在这里易发生相互碰撞。

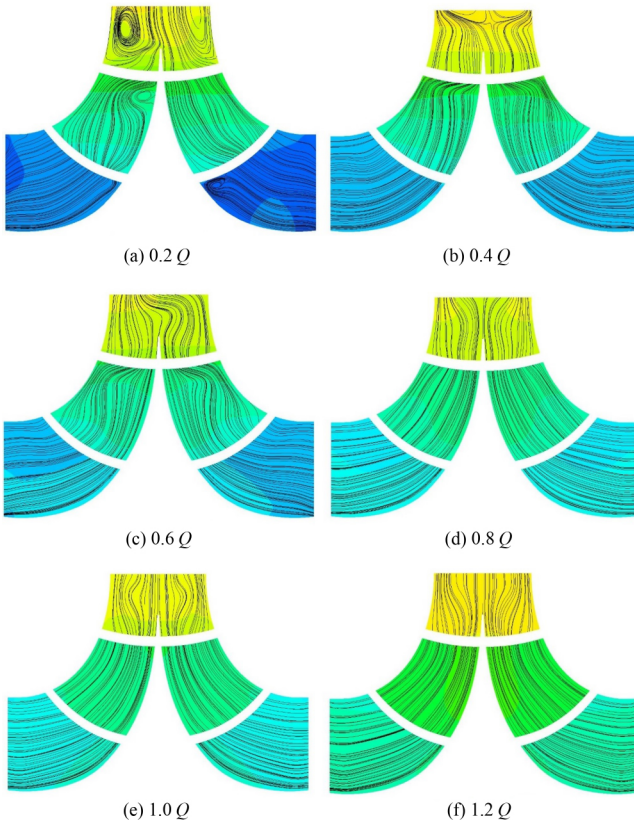


图4 叶轮流场分布

2 改进设计及结果分析

2.1 改进方案

针对上述问题,本文采用叶片交替加载技术设计理论对 HS600-500-650A 型号的双吸离心泵叶轮进行优化设计。该技术采用前后盖板交替加载的载荷分布方式,结合双侧叶片出口边倾斜呈“V”字型,并均匀交错双侧叶轮的方法对叶轮进行优化设计。其中优化后的叶轮在原始叶轮的基础上运用叶片交替加载技术进行再设计,在后盖板位置增加 8 mm 厚度的隔板,再均匀交错布置两侧叶轮。优化前后叶轮对比如图 5 所示。

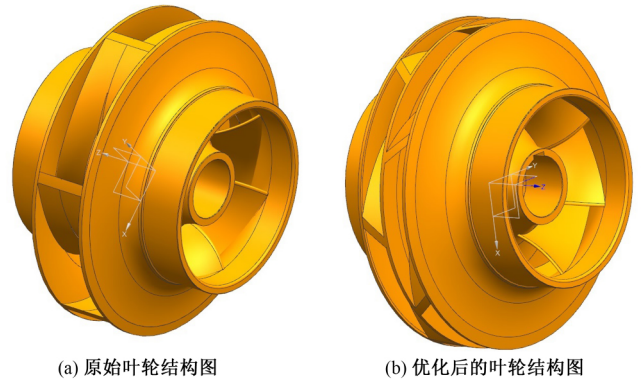


图5 优化前后叶轮的结构三维图

2.2 改进效果分析

通过 CFD 模拟计算分别计算出各工况下的扬程、效率并做出相应的外特性曲线,如图 6 所示。

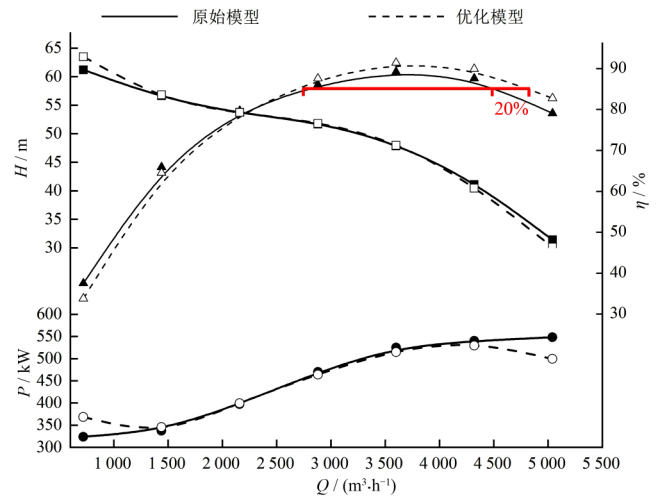


图6 重新设计叶轮后的外特性曲线与原始叶轮比较

通过对比发现,新的模型流量-扬程曲线与原始模型基本吻合,而新模型的流量-效率曲线得到明显改善,在小流量工况和大流量工况,其效率值均有明显提升,在设计流量下,效率值提高 2.1%,高效区大约拓宽 20% 左右。该水泵模型通过运用交替加载设计方法重新设计叶轮,水泵外特性得到明显优化。

采用交替加载技术后,在原始叶轮模型的出口处产生隔板,消除了水流在汇集到出口时产生的撞击,从而流态得到改善,以小流量工况下最为显著。

图 7 为 HS600-500-650A 的设计工况下叶轮改进前后出

口处的流速分布云图,叶轮旋转方向如箭头所示。可以看出,两侧叶轮经过交错布置后出口的流态均匀性得到明显提高,在原始方案中,呈现出明显的“射流-尾迹”区域,射流的高速区位于叶片的工作面,尾迹靠近相邻叶片的背面,高速区过于集中,速度梯度大。改进后的叶轮出口流速分布均匀,流速在18.4

m/s 以上的区域占出口面积的大部分,速度梯度小。由此可以证明,前盖板前加载,后盖板后加载的混合加载方式能够改善叶轮出口的“射流-尾迹”现象。

对于HS600-500-650A的叶片压力分布,可以看到,原始

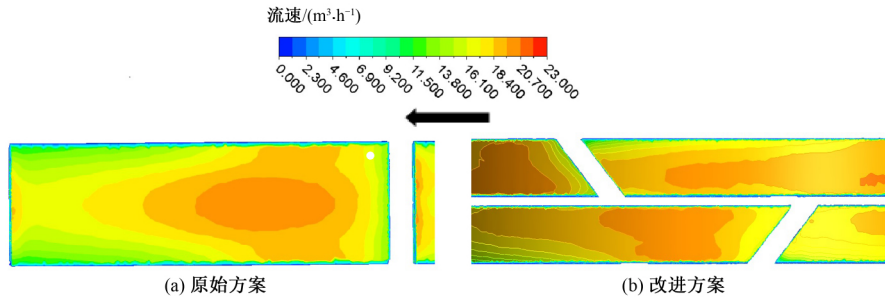


图7 HS600-500-650A 叶轮出口流速分布

的叶片虽然没有形成比较明显的进口低压区,但是压力梯度变化不均匀,从进口到出口的等压线均呈现出不同程度的弯曲,而改进后的叶片压力梯度变化均匀。总结发现,改进后的叶片压力分布较为均匀,这种叶片的混合加载形式能够有效避免因叶片前部过载或者后部过载造成的前后做功不均的弊端,从而改善了双吸离心泵的效率 and 压力脉动的水平。

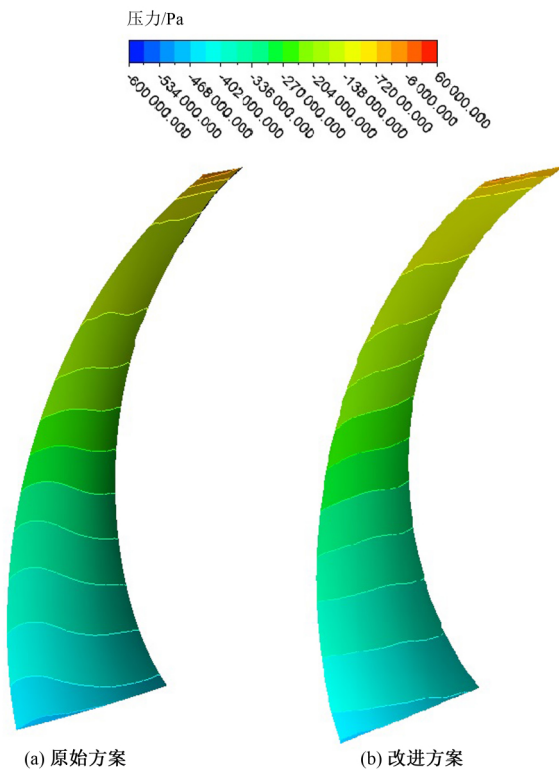


图8 HS600-500-650A 叶片工作面压力分布图

图9为原始方案和改进后方案的叶片前后盖板工作面和背面的压力分布图,原始方案的后盖板工作面受力处处都高于前盖板的工作面受力,改进后方案的前后盖板压力曲线吻合度较高。说明改进后的叶片不仅消除了原始叶片中沿流线方向上的载荷不均,也同时消除了原始叶片中前后盖板的受力不均。

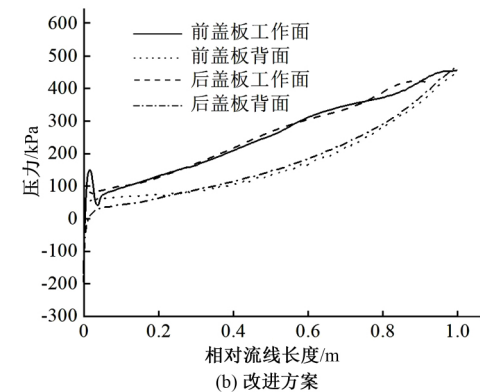
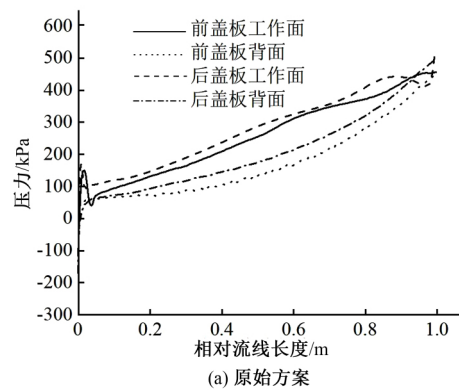


图9 HS600-500-650A 的叶片压力分布

2.3 优化前后压力脉动对比分析

为进一步研究优化前后的内部流态,对模型进行压力脉动监测。压力脉动测点设置在进水流道、叶轮和出水流道上。如图10所示,进水流道的进水口处上下各设置一个测点 SUC4、SUC5,进水流道最高点设置测点 SUC1,进水流道出口设置两个测点 SUC2、SUC3;叶轮叶片流道进口,叶片流道中间和叶片流道出口各设置一个测点,为 IPM1、IPM2、IPM3;出水流道的隔舌处,设置一个测点 VOL1,沿出水流道外壁,隔 90° 设置一个测点,为 VOL2、VOL3、VOL4、VOL5,出水流道出口处上下各设置一个测点,为 VOL6、VOL7。

针对设计流量 Q 进行非定常压力脉动计算的对比分析。

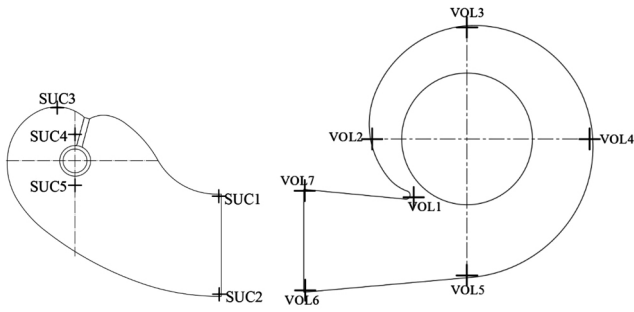


图 10 测点位置

非常压力脉动计算中以定常计算结果为初始条件,计算 10 个转轮周期,每个周期计算 180 个时间步长,同时监测压力随时间的变化。

将数值模拟计算得到的各个监测点压力值进行无量纲化处理,无量纲压力系数 C_p 的定义如下:

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho v_{ref}^2} \quad (1)$$

式中: P 为各个监测点压力值; P_{ref} 为参考位置压力值,采用进水流道进水口的压力值; ρ 为水的密度; v_{ref} 为参考位置速度,即进水流道进水口的速度值。

如图 11 至图 14 所示,为该型号双吸离心泵改进前后各监测点的时域图和频谱图。通过 HS600-500-650A 双吸离心泵的主要参数得知,该双吸离心泵的转速为 990 r/min,转频为 16.5 Hz,叶频为 99 Hz。

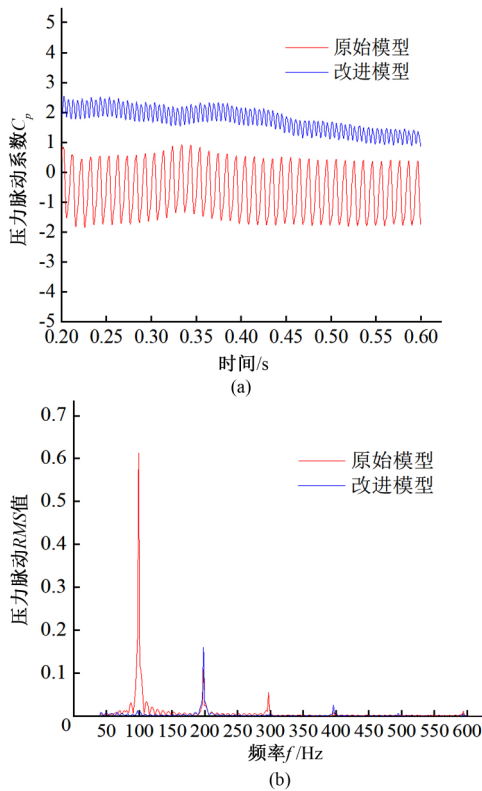


图 11 流量为 1.0 Q 时,测点 SUC1 的时域图、频域图(HS600-500-650A)

从表 4 可以看出,吸水室最高点压力脉动幅值由原泵的

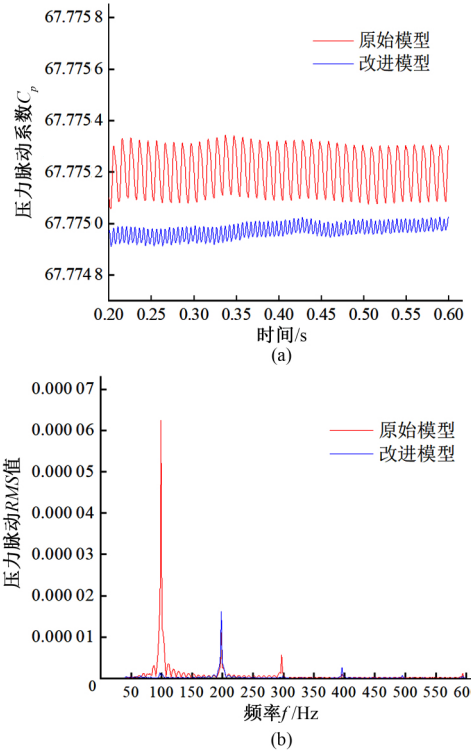


图 12 流量为 1.0 Q 时,测点 SUC4 的时域图、频域图(HS600-500-650A)

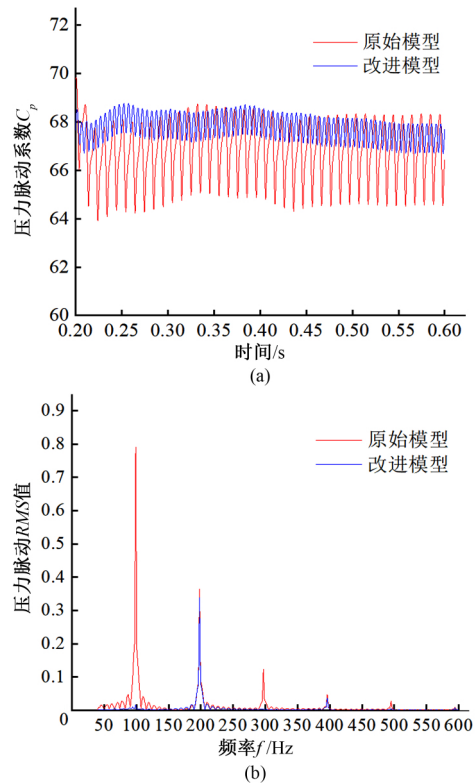


图 13 流量为 1.0 Q 时,测点 VOL1 的时域图、频域图(HS600-500-650A)

1.452 m 下降了 0.707 m,降低幅度为 48.6%,吸水室进口处的压力脉动幅值由原泵的 1.447 m 下降了 0.940 m,降低幅度为 65.0%左右,蜗壳隔舌处的压力脉动幅值由原泵的 2.451 m 下

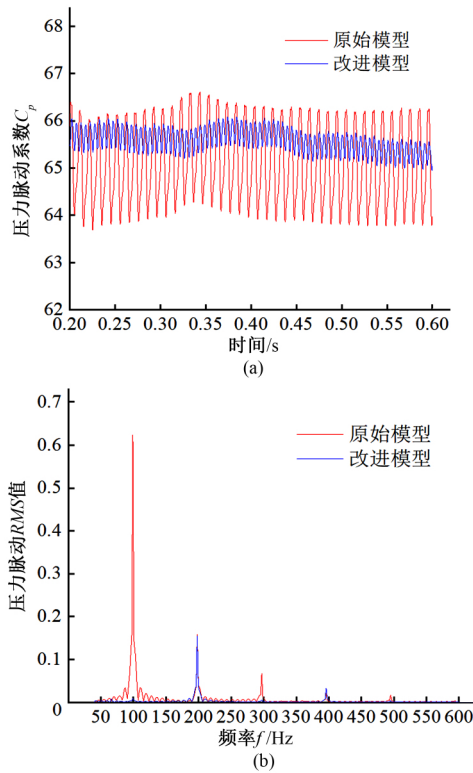


图 14 流量为 1.0 Q 时, 测点 VOL3 的时域图、频域图(HS600-500-650A)

表 4 改进前后各测点压力脉动峰峰值对比

测点	压力脉动峰峰值/m		相对压力脉动幅值/%		降低百分比/%
	原始模型	改进后模型	原始模型	改进后模型	
SUC1	1.452	0.745	3.03	1.55	48.6
SUC4	1.447	0.507	3.02	1.06	65.0
VOL1	2.451	0.942	5.11	1.96	61.6
VOL3	1.606	0.516	3.35	1.07	67.8

降了 1.509 m,降低幅度为 61.6%,蜗壳最高点的压力脉动幅值由原泵的 1.606 m 下降了 1.090 m,降低幅度为 67.8%。同时从频谱图中可以看出,原始方案叶轮的条件下,各个测点的压力脉动其主频均为 99 Hz,即叶片通过频率;改进后,叶轮的通过频率(99 Hz)幅值大幅下降,蜗壳内的主频由原来的 99 Hz 改变为 2 倍叶频(198 Hz),其幅值也远低于原叶轮主频的幅值。

3 结 论

本文以宁夏回族自治区固海扬水工程白府都泵站更新改造工程的 HS600-500-650A 双吸离心泵为研究对象,研究叶片载荷分布对双吸离心泵水力性能的影响,通过控制叶片载荷来提高双吸离心泵的效率 and 稳定运行性。结果表明相对于传统的双吸式离心泵,采用交替加载与 V 形交错技术设计得到的双吸离心泵最明显的优势是其具有高效区宽,压力脉动低的优点。由于灌溉泵站的双吸泵普遍偏离设计点运行,因此具有高效区宽和低压力脉动特性的双吸离心泵可以明显地提高灌溉泵站的装置效率和机组运行的稳定性。本文丰富了单机双吸离心泵的改造设计方法,对未来泵站双吸离心泵改造具有一定的借鉴意义。 □

参考文献:

[1] 王福军. 水泵与水泵站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
 [2] 许建中, 李端明, 李 娜, 等. 大中型灌溉排水泵站现代化建设探讨[J]. 中国水利, 2018, 844(10): 36-39.
 [3] 戚兰英, 蒋 瑞, 石建杰. 惠南庄泵站-大型高扬程水泵机组选型设计与运行方案研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 200-203.
 [4] 李 琪, 许建中, 李端明, 等. 中国灌溉排水泵站的发展与展望[J]. 中国农村水利水电, 2015(12): 6-10.
 [5] 倪文进. 中国农村水利发展状况与科技需求[J]. 农业工程学报, 2010(3): 11-18.
 [6] 张 宇. 大型双吸式离心泵性能优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

(上接第 159 页)

[7] 朱呈浩, 夏军强, 陈 倩, 等. 基于 SWMM 模型的城市洪涝过程模拟及风险评估[J]. 灾害学, 2018(2): 224-230.
 [8] 王兆卫. 基于模糊评价法的城市洪涝灾害评估研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
 [9] LAI W L, WANG H R, WANG C, et al. Waterlogging risk assessment based on self-organizing map(SOM) artificial neural networks: a case study of an urban storm in Beijing [J]. Journal of Mountain Science. 2017(5): 781-792.
 [10] CHRISTIAN K, DAVID D. Adaptive and risk-based approaches to climate change and the management of uncertainty and institutional risk: The case of future flooding in England [J]. Global Environmental Change. 2016(5): 781-792.
 [11] LWE R, URICH C, STO DN, et al. Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations-A new generation of urban planning tools [J]. Journal of Hydrology. 2017(5): 781-792.
 [12] GLAS H, JONCKHEERE M, MANDAL A, et al. A GIS-based tool

for flood damage assessment and delineation of a methodology for future risk assessment: Case study for Annotto Bay, Jamaica [J]. Natural Hazards. 2017(5): 781-792.
 [13] SANNE M, BURAK G, BRENDEN J, et al. Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data [J]. Science of the Total Environment. 2015, 538: 445-457.
 [14] 姜蓝齐, 马艳敏, 张丽娟, 等. 基于 GIS 的黑龙江省洪涝灾害风险评估与区划[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 238-246.
 [15] 张乾元, 吴 晔. 经济社会发展与洪涝灾害的相关性分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(2): 115-117.
 [16] 练继建, 顾天娇, 徐 奎, 等. 基于暴雨潮位联合作用的沿海城市洪涝致灾因子风险评估[J]. 水电能源科学, 2015(10): 38-42.
 [17] 温欣岚, 罗占业, 樊美娜, 等. 链式风险评估方法研究及工程应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2019(3): 154-160.
 [18] 殷 杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 基于情景的上海台风风暴潮淹没模拟研究[J]. 地理科学, 2013, 33(1): 110-115.
 [19] 赵领娣, 王 亮. 风暴潮灾害经济预警指标体系研究[J]. 海洋预报, 2011, 28(6): 11-16.