

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0066

张校文,刘超,张重阳,等.双向超低扬程泵装置流动数值模拟[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):210-216,224.
ZHANG X W,LIU C,ZHANG C Y,et al.Numerical simulation of two-way ultra-low head pump[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(3):210-216,224.(in Chinese)

双向超低扬程泵装置流动数值模拟

张校文,刘超,张重阳,宋希杰,查智力

(扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏扬州225009)

摘要:针对可用于双向抽水的一种新型双向超低扬程泵装置,基于CFX软件对泵装置进行三维流动数值模拟,分析了泵装置的内部流动特性,并对泵装置的整体性能作出了预测。计算结果表明:在设计工况(流量 $Q=4.8\text{ m}^3/\text{s}$)与大流量工况(流量 $Q=5.4\text{ m}^3/\text{s}$)下,叶轮进口断面流速均匀度达到90%左右,叶轮进口断面流态良好,足以保证水泵的性能,扩散导叶出口断面流线较为平顺,扩散导叶对水流速度环量的回收较好。泵装置进水水力损失较小,出水水力损失较大。该装置在设计工况(流量 $Q=4.8\text{ m}^3/\text{s}$)下的效率最高,达到71.09%,对应的扬程为1.345 m,泵装置高效区运行的流量范围较大。新型双向超低扬程泵装置在自流引排水且实际扬程很低的沿江滨湖地区,是一种可取的方案。

关键词:双向;低扬程;泵装置;流动特性;数值模拟

中图分类号:TV131.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Numerical simulation of two-way ultra-low head pump

ZHANG Xiaowen,LIU Chao,ZHANG Chongyang,SONG Xijie,ZHA Zhili

(School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: For a new type of bi-directional ultra-low lift pump device which can be used for two-way pumping, the CFX software was used to perform three-dimensional flow numerical simulation. The internal flow characteristics of the pump device were analyzed and the overall performance of the pump device was predicted. The calculation results showed that under the designed condition (flow $Q=4.8\text{ m}^3/\text{s}$) and the large flow condition (flow $Q=5.4\text{ m}^3/\text{s}$), the flow velocity uniformity at the impeller inlet section reached about 90%. The flow pattern at the impeller inlet section was good enough to ensure the performance of the water pump. The flow line at the outlet section of the diffusion guide vane was smooth, and the recovery of the flow velocity circulation by the diffusion guide vane was good. The hydraulic loss of the inlet water of the pump device was small, while the hydraulic loss of the outlet water was large. The device had the highest efficiency (71.09%) under the designed working condition (flow $Q=4.8\text{ m}^3/\text{s}$), while the corresponding lift was 1.345 m. The flow range in the high-efficiency zone of the pump device was relatively large, and the highest efficiency exceeded the existing low-lift pump device of the same type by more than 5%. The new type of bi-directional ultra-low lift pump device was a desirable scheme in the riverside and lakeside areas along the river where gravity drainage and the actual lift was very low.

Key words: two-way; low lift; pump unit; flow characteristics; numerical simulation

收稿日期:2019-08-14 修回日期:2019-10-09 网络出版时间:2019-10-18

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191018.1210.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51279173);调水工程建设运行管理关键技术研究(SDSLKY201705);江苏省水利科技项目(2017031);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:张校文(1996—),男,江苏盐城人,主要从事水泵及水泵站工程理论与应用方面研究。E-mail:a1016468342@126.com

通信作者:刘超(1950—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,主要从事水泵及水泵站工程理论与应用方面研究。E-mail:ydcliu@126.com

随着经济建设的发展,沿江滨湖地区对低微扬程泵站的需求越来越大^[1-2]。此类泵站,多为双向抽水,且运行扬程经常在 1.0 m 左右的范围。目前已有的低微扬程泵站多配有双向流道,可正反双向抽水运行,但正向抽水与反向抽水的泵装置效率都较低,以江苏沿江某泵站为例,该低扬程双向流道泵站建设时曾做过模型试验^[3],装置的最高效率仅为 64%。由于双向低微扬程泵站结构与运行扬程较为特殊,立式泵装置的出水常常高于泵站出口水位,还会造成扬程浪费的问题。

目前对双向低扬程泵装置的研究较多,但多集中于对现有形式的泵装置的分析 and 优化等方面,而对于新型的低扬程双向立式泵装置的设计和开发较少。刘超^[4]在结合模型试验的基础上,对双向流道立式泵装置的出水室进行了优化设计,减少了泵装置的水力损失,提高了装置效率。杨帆^[5]介绍了低扬程泵装置的分类,并归纳了低扬程泵装置优化设计的主要研究方向。

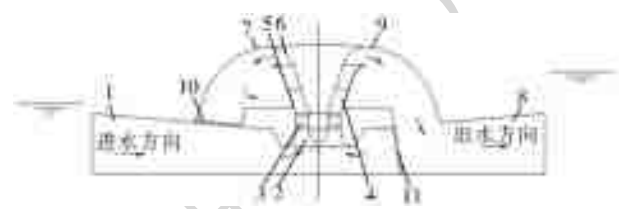
本文基于 CFX 软件,对一种适用于 1.0 m 左右范围的新型双向超低扬程泵装置^[6]进行三维流动数值模拟,分析了该泵装置的内部流动特性,并对泵装置的整体性能作出了预测,以期待改进双向超低扬程泵装置的结构、提升其水力性能。

1 新型双向超低扬程泵装置

新型双向超低扬程泵装置主要由进出水流道、浮箱调向闸门、叶轮、导叶、曲线渐扩管、后导水锥,低驼峰虹吸式出水结构组成。泵装置采用长方体进出水流道,进出水流道的上中部设水平隔板,两块水平隔板上均设有下潜孔口,水泵布置于整个装置的中部,位于水泵的两侧的进出水流道均设调向闸孔,两侧的调向闸孔与下潜孔口的形状尺寸完全一致,两个浮箱调向闸门是两侧的下潜孔口和调向闸孔的共用闸门,浮箱调向闸门铰接在水平隔板上,调向闸门可绕门铰旋转,调向闸门绕门铰向上旋转,则打开调向闸孔,关闭下潜孔口,调向闸门绕门铰向下旋转,则打开下潜孔口,关闭调向闸孔,通过两侧浮箱调向闸门的旋转,可以实现进水流道与出水流道之间角色的互换,达到双向抽水的效果。泵装置设置有后导水锥,后导水锥与双向低驼峰虹吸式出水结构平滑连接,低驼峰虹吸式出水结构沿流出方向倾斜。低驼峰虹吸式出水结构的宽度与进出水流道的宽度一致,故低驼峰虹吸式出水结构与进出水流道上中部设置的两块水平隔板形成一个罩壳,两块水平隔板上的下潜孔口在罩壳的内部。低驼峰虹吸式

出水结构的顶部设置有通气孔接口,与真空破坏阀相连接。

当泵装置左侧的浮箱调向闸门向上旋转,右侧的浮箱调向闸门向下旋转,即装置左侧的调向闸孔打开,下潜孔口关闭,装置右侧的调向闸孔关闭,下潜孔口打开,此时泵装置的左侧成为进水流道,右侧成为下潜式出水流道,因新型双向超低扬程泵装置的正向运行(左侧进水,右侧出水)与反向运行(右侧进水,左侧出水),结构完全对称,泵装置的反向性能与正向运行时的性能相同,故本文选取正向运行(左侧进水,右侧出水)时的泵装置进行三维流动数值模拟该抽水方向的泵装置单线图见图 1。



1—进水流道;2—喇叭管;3—叶轮;4—扩散导叶;5—曲线渐扩管;
6—后导水锥;7—低驼峰虹吸式出水结构;8—出水流道直段;
9—通气孔位置;10—浮箱调向闸门;11—浮箱调向闸门。

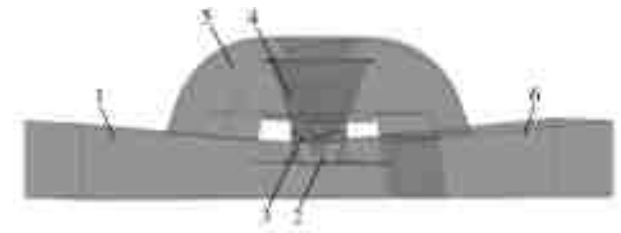
图 1 新型双向超低泵装置单线图

Fig. 1 Single line diagram of new bidirectional ultra-low pump unit

2 计算模型及边界条件

2.1 几何建模

对图 1 所示的泵装置进行三维建模。其中进水流道、喇叭管、出水结构、出水流道直段在三维建模软件 UG 中建模,叶轮、导叶体在 CFX Turbo-Grid 三维软件中进行建模。计算模型三维透视见图 2。



1—进水流道;2—喇叭管;3—叶轮;4—扩散导叶;5—出水结构;
6—出水流道直段。

图 2 泵装置三维透视图

Fig. 2 Three-dimensional perspective view of pump device

2.2 计算方法和边界条件

取新型双向超低扬程泵装置的进水流道进口到出水流道出口为计算域,采用雷诺平均 N-S 方程,计算域的湍流模型选用标准 k-ε 湍流模型。将新型双向超低扬程泵装置的进水流道进口设置为整个计算域的进口,进口边界条件设置为流量进口,从 3.6 m³/s 到 5.4 m³/s 每间隔 0.2 m³/s,取一个流量

工况进行计算;将新型双向超低扬程泵装置的出水流道出口设置为整个计算域的出口,出口边界条件设置为静压出口,大小为 1 个标准大气压。整个计算域由进水流道、喇叭管、叶轮、导叶、出水室、出水流道等六个部分组成,将叶轮设置为旋转域,导水锥壁面设置为旋转壁面,叶轮直径为 1.5 m,转速为 165 r/min,其余部分设置为静止区域,叶轮与喇叭管及叶轮与导叶的交界面设置为动静交界面 stage 模型,其余交界面设置为 none 交界面模型。计算域

的所有固体壁面均设置为无滑移的壁面条件。

2.3 网格划分

本文叶轮和导叶采用 Turbo-grid 软件进行网格剖分,其余各部件采用 ANSYS mesh 软件进行网格剖分。装置各部件的网格划分见图 3。选取设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)下的泵装置进行网格无关性分析。当网格总数大于 321 万时,再增加网格数对泵装置扬程影响微小,最终确定网格总数为 397 万。网格无关性分析见图 4。



图 3 网格划分
Fig. 3 Meshing

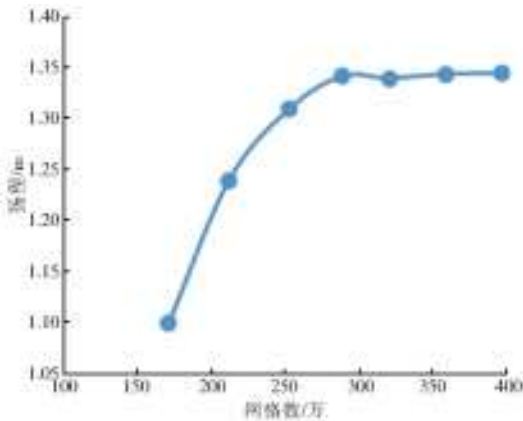


图 4 网格无关性分析
Fig. 4 Grid-independent analysis

3 泵装置流动特性分析

3.1 内部流态分析

通过数值模拟计算,得到了小流量工况下(流量 $Q=3.6 \text{ m}^3/\text{s}$)、设计工况下(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)、大流量工况下(流量 $Q=5.4 \text{ m}^3/\text{s}$)的泵装置水力特性。三种工况下的泵装置内部三维流线见图 5。

由图 5 可知,进水流道内流线平顺,流态良好,水流经喇叭管吸入转轮室,在转轮室内水流速度较大,通过叶轮的叶片旋转做功及扩散导叶回收环量,水流从扩散导叶的出口汇入曲线渐扩管,沿曲线渐

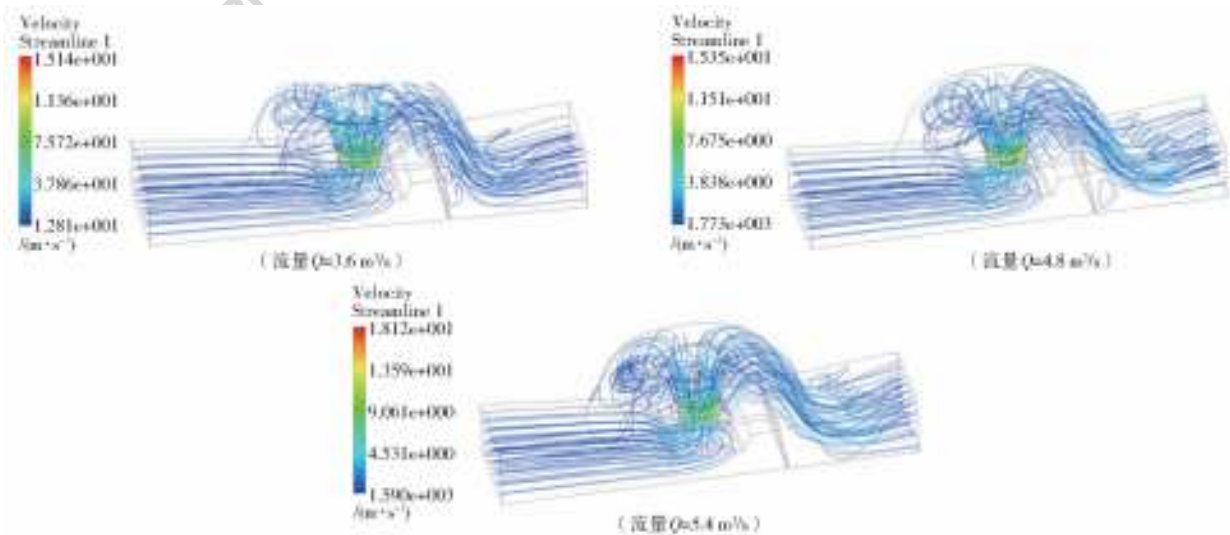


图 5 泵装置内部三维流线图
Fig. 5 Internal fluid state of pump device

扩管向四周出流,流入低驼峰虹吸式流道出口侧的水流,直接落入出水结构的出口,流入出水流道直段;流入低驼峰虹吸式流道盲端侧的水流,需绕过导叶与曲线渐扩管的外壁,与出水侧的水流汇合,再汇入出水流道直段。因此,低驼峰虹吸式流道盲端侧水流的流态变得非常紊乱,在出水结构中形成了漩涡。水流从出水结构流入到出水流道直段内后,中层和底层的水流流态良好,流线较为平顺,但上层水流在靠近泵装置的出口处,有一定尺度的回旋和翻滚,这是由于低驼峰虹吸式流道盲端侧的水流,需要与出水侧的水流,在出水流道直段中汇合,对出水流道直段内水流的流态造成了影响。

通过对比三个不同工况下泵装置内部的流场图,可以看出,低驼峰虹吸式流道盲端侧的水流,在设计工况下流态最好,流线最为平顺,在小流量与大

流量工况下流态较差,流线较为紊乱。低驼峰虹吸式流道两侧的水流在出水流道直段合流后,上层流线的波动现象随着流量的增大而更加明显,出水流道直段的上层水流流态也愈来愈紊乱。

出水结构是新型双向超低扬程泵装置结构的重要部分,改善出水结构的水流流态,可以减少水力损失,提高泵装置的水力性能。为了更加直观的分析新型双向超低扬程泵装置出水结构的内部流场,选取了泵装置中间纵剖面作为典型截面。

图6为典型截面在三种不同工况下的静压云图及流线图。由典型截面的压力分布图静压云图可知:在三种工况下,出水结构出口侧的压力均较低,而盲端侧的压力均较高,泵装置压力最高的区域位于出水结构的顶部,出口侧的压力分布均较为均匀,盲端侧出现了一个局部低压区,低压区内的压力分布较不均匀。

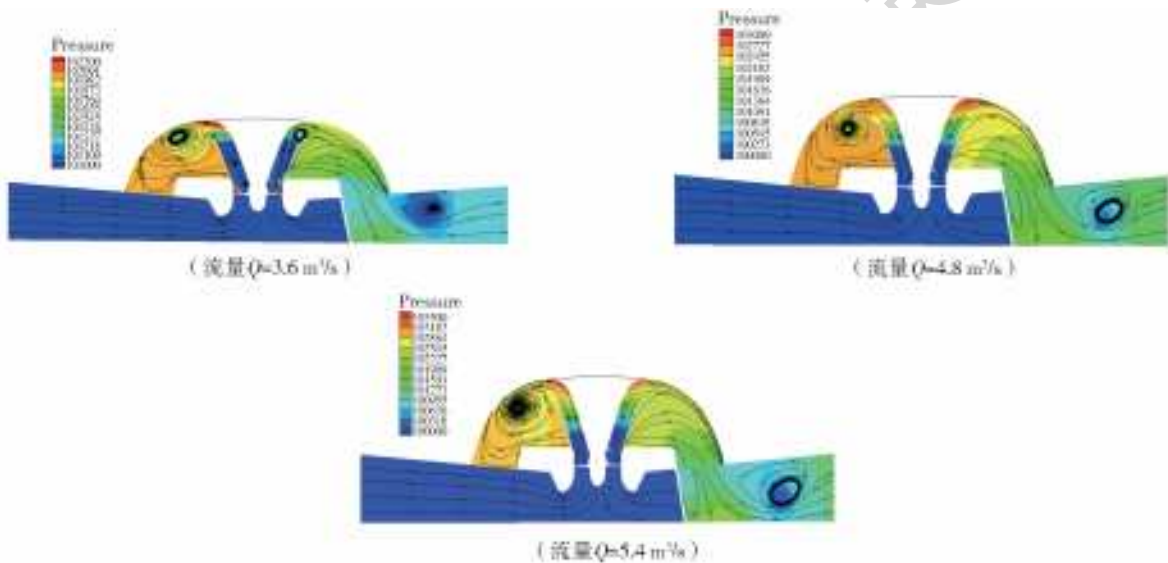


图6 典型截面的静压云图及流线图

Fig. 6 Static pressure nephogram and streamline chart of a typical section

对比三种不同工况下典型截面的流线图可知:在三种不同的工况下,低驼峰虹吸式流道出口侧的流线较为平顺,流态较好,盲端侧的流线较为紊乱,流态较差,且在不同工况下均出现了不同程度的漩涡,小流量工况和大流量工况下的漩涡区域较大,设计工况下的漩涡区域较小。在小流量工况下,低驼峰虹吸式流道出口侧出现了一个局部回流区,随着流量的增大,局部回流的现象消失。

3.2 叶轮进口断面流速均匀度

水泵的性能是决定泵装置效率的关键,而叶轮进口断面水流的流态的是影响水泵性能的重要因素。因此,有必要对新型双向超低扬程泵装置叶轮进口断面的水流流态进行评判。在此提出流速分布均匀度^[7]来评判泵装置叶轮进口断面的水流流态。

采用面积加权的叶轮进口断面流速均匀度的计算公式为

$$V_{\text{una}} = \left[1 - \frac{1}{\bar{v}_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{ai} - \bar{V}_a)^2 \Delta A_i}{A}} \right] \times 100\%$$

式中: V_{una} 为进口断面流速均匀度; \bar{v}_a 为进口断面平均轴向速度; Q 为流量; \bar{v}_{ai} 为进口断面第*i*个网格单元的轴向速度; ΔA_i 为进口断面第*i*个网格单元面积。从3.6 m³/s到5.4 m³/s每间隔0.2 m³/s,取一个流量工况计算新型双向超低扬程泵装置叶轮进口断面的流速均匀度。计算结果见图7。

由图7可以看出,在不同工况下,随着流量的逐渐增大,泵装置叶轮进口断面的流速均匀度也逐渐增加,当流量大于设计工况(流量 $Q=4.8$ m³/s)时,流速均匀度增加的趋势逐渐趋于平缓。泵装置在设

计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)与大流量工况(流量 $Q=5.4 \text{ m}^3/\text{s}$)下,叶轮进口断面流速均匀度达到 90%左右,叶轮进口断面流态良好,足以保证水泵的性能。新型双向超低扬程泵装置叶轮进口断面流速均匀度较高,水力性能优良。

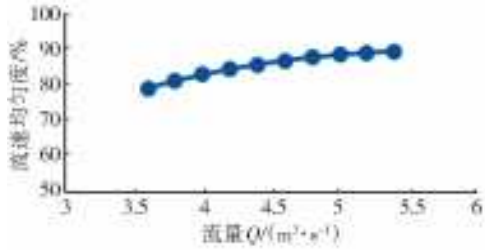


图 7 叶轮进口断面流速均匀度

Fig. 7 Velocity uniformity of impeller inlet section

3.3 扩散导叶出口断面总速度

扩散导叶是新型双向超低扬程泵装置区别于同

类型双向低微扬程泵装置的特征之一,经扩散导叶回收环量后的水流的流态是影响泵装置水力效率的重要因素^[8-11]。图 8 是扩散导叶在小流量工况(流量 $Q=3.6 \text{ m}^3/\text{s}$)、设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)、大流量工况(流量 $Q=5.4 \text{ m}^3/\text{s}$)下导叶出口断面的总速度云图与流线图。由于扩散导叶体配用了 7 片叶片,在三种不同的工况下,导叶出口断面的总速度云图分成了 7 块区域,在小流量工况下,水流剩余速度环量较大,导叶对水流速度环量的回收较差,在设计工况与大流量工况下,水流剩余速度环量较小,导叶对水流速度环量的回收较好。从导叶出口断面的流线图可以看出,在小流量工况下,流线较为紊乱,水流流态较差,在设计工况与大流量工况下,流线较为平顺,水流流态较好。因此,新型双向超低扬程泵装置的扩散导叶在设计工况与大流量工况下,整流效果较好,在小流量工况下,整流效果较差。

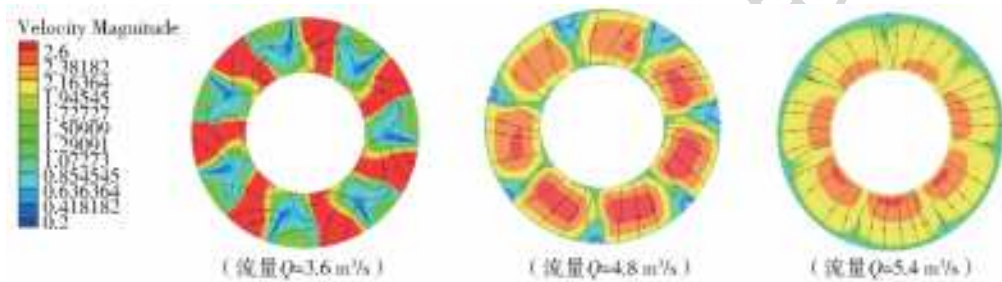


图 8 导叶出口断面总速度云图

Fig. 8 Cloud diagram for total velocity at guide vane outlet section

3.4 出水结构前后流量分布

以新型双向超低扬程泵装置的中间横剖面为界,定义 X 轴正向一侧(即低驼峰虹吸式流道出口侧)为前部,X 轴负向一侧(即低驼峰虹吸式流道盲端侧)为后部。根据前文泵装置内部流态分析,水流畅曲线扩散管出流后,低驼峰虹吸式流道出口侧的水流,直接落入出水结构的出口,流入出水流道直段,而盲端侧的水流,需绕过导叶与曲线渐扩管的外壁,才能从出水结构的出口流入出水流道直段。低驼峰虹吸式流道盲端侧的水流流线紊乱,流态较差,当盲端侧的水流占比较低时,有利于减少泵装置的水力损失,提高泵装置的水力性能。故对经曲线渐扩管向四周出流的水流进行流向的计算。计算得到小流量工况(流量 $Q=3.6 \text{ m}^3/\text{s}$)、设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)、大流量工况(流量 $Q=5.4 \text{ m}^3/\text{s}$)下的出水结构前后流量分布见图 9。

从图 9 出水结构前后流量分布图可以看出:在不同工况下,出水结构前部流量的占比均比后部流量的占比大,随着流量的增大,出水结构前部流量分布没有出现规律性的递增或递减的趋势。小流量

工况下的出水结构前部流量占比为 55.8%,后部流量占比为 44.2%,前后流量比为 1.26;设计工况下的出水结构前部流量占比为 55.2%,后部流量占比为 44.8%,前后流量比为 1.23;大流量工况下的出水结构前部流量占比为 56.9%,后部流量占比为 43.1%,前后流量比为 1.32。在三种不同工况下,

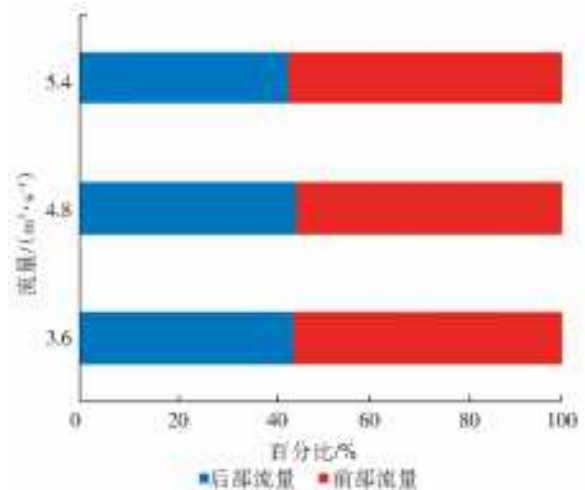


图 9 出水结构前后流量分布

Fig. 9 Flow distribution diagram before and after outlet structure

新型双向超低扬程泵装置出水结构前后流量分布变化较小,前后流量比的变化范围小于0.1。

3.5 水力损失分析

研究开发双向超低扬程泵装置泵装置的目的,就在于减少水力损失,提高泵装置的效率。分析新型双向超低扬程泵装置各过流部分的水力损失,可以为新型双向超低泵装置的进一步优化设计提供参考^[12-15]。根据伯努利方程,通过计算过流部件进口断面平均总压与出口断面平均总压的差值求解过流部件的水力损失,计算公式见式(2)。泵装置在小流量工况(流量 $Q=3.6 \text{ m}^3/\text{s}$)、设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)、大流量工况(流量 $Q=5.4 \text{ m}^3/\text{s}$)下各过流部件的水力损失见图 10。泵装置进水部件(进水流道、喇叭管)与出水部件(扩散导叶、曲线渐扩管、虹吸结构、出水流道直段)在选取的 5 个工况下的的水力损失见图 11。

$$\Delta h = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{\rho g} \quad (2)$$

式中: Δh 为水力部件水力损失; P_{out} 为水力部件出口总压; P_{in} 为水力部件进口总压; ρ 为液体密度; g 为重力加速度。

由图 10 和图 11 可知:在三种不同的工况下,进水部件(进水流道、喇叭管)的水力均损失较小,出水部件(扩散导叶、曲线渐扩管、低驼峰虹吸式出水结构、出水流道)的损失均较大。泵装置在设计工况下的进水水力损失为 0.0623 m,出水水力损失为 0.24 m,出水水力损失占流道水力损失的比为 79.5%,出水部件的水力性能是影响双向低扬程泵装置结构优化设计的主要因素。

随着流量的增大,进水部件与出水流道的水力损失逐渐增大,扩散导叶和曲线渐扩管的水力损失逐渐减小。小流量工况下,扩散导叶、曲线渐扩管的水力损失分别达到了 0.296 m 和 0.257 m,这对扬程只有 1.0 m 左右范围的泵装置是一个相当可观的数值,要改善泵装置在小流量工况下的性能,可以进一步优化泵装置的出水部件。

泵装置在小流量工况下的出水部件总水力损失最大,在设计工况下的出水部件总水力损失最小。这是由于装置在小流量工况下运行时,扩散导叶与曲线渐扩管的水力性能较差,造成的水力损失较大,在设计工况下运行时,各出流部件的水力性能均较好,造成的水力损失均较小。随着流量的增加,出水部件的总水力损失先减小再增大,当流量大于设计工况时,出水部件的总水力损失的增大趋势较缓,在偏大流量工况下的出水部件总水力损失较小。

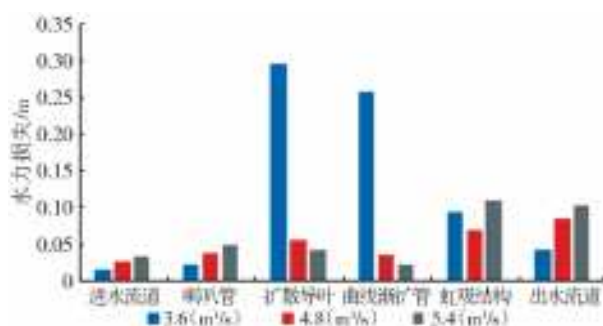


图 10 各过流部分的水力损失

Fig. 10 Hydraulic loss of each overcurrent part

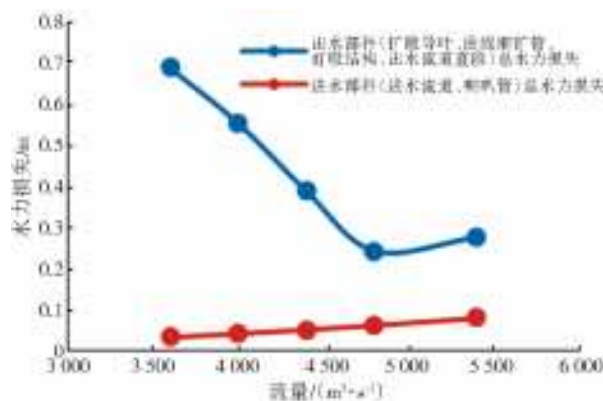


图 11 进水部件与出水部件的水力损失

Fig. 11 Hydraulic loss of inlet and outlet parts

4 泵装置性能预测和分析

基于 CFX 软件的数值模拟结果,对新型双向超低扬程泵装置的性能进行分析和预测。结果见图 12 和图 13。

由图 12 可知,新型双向超低扬程泵装置在设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)下效率最高,效率为 71.09%,对应的扬程为 1.345 m。随着流量从小到大变化,泵装置的效率逐渐升高,当流量大于设计工况时,效率又逐渐降低,泵装置效率降低的趋势较陡,新型双向超低扬程泵装置适用于偏小流量工况下运行。泵装置在设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)附近效率均较高,泵装置高效区运行的流量范围较大,

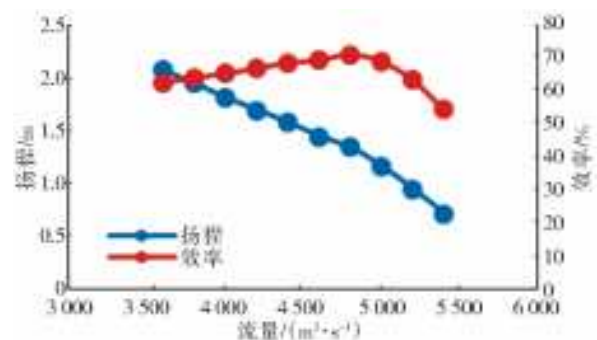


图 12 泵性能曲线

Fig. 12 Pump performance curve

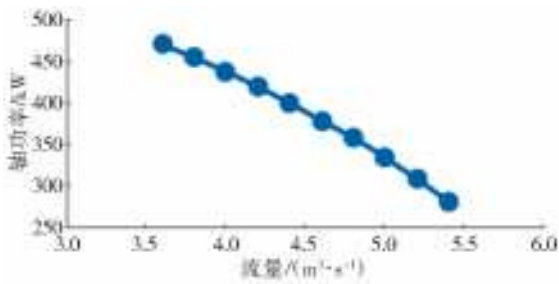


图 13 泵流量功率曲线

Fig. 13 Pump flow power curve

在扬程 1.0~1.5 m 范围内,泵装置的效率为 65%~71.09%,在扬程为 0.72~1.0 m 的范围内,泵装置的效率为 54.46%~65%。

由图 13 可以得出,随着流量的增加,新型双向超低扬程泵装置消耗的轴功率逐渐降低。在大流量工况下(流量 $Q=5.4 \text{ m}^3/\text{s}$),泵装置消耗的轴功率最低,为 278.8 kW,在小流量工况下(流量 $Q=3.6 \text{ m}^3/\text{s}$),泵装置消耗的轴功率最高,为 468.7 kW。

5 结 论

(1)新型双向超低扬程泵装置在设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)与大流量工况(流量 $Q=5.4 \text{ m}^3/\text{s}$)下,叶轮进口断面流速均匀度达到 90%左右,叶轮进口断面流态良好,足以保证水泵的性能,扩散导叶出口断面流线较为平顺,扩散导叶对水流速度环量的回收较好。不同工况下泵装置出水结构的前部流量均大于后部流量,前后流量比的变化范围小于 0.1。泵装置在设计工况下的进水水力损失为 0.0623 m,出水水力损失为 0.24 m,出水水力损失占渠道水力损失的比为 79.5%,出水部件的水力性能是双向低扬程泵装置结构优化设计的关键。

(2)新型双向超低扬程泵装置在设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)下效率最高,效率为 71.09%,对应的扬程为 1.345 m。泵装置在设计工况(流量 $Q=4.8 \text{ m}^3/\text{s}$)附近效率均较高,泵装置高效区运行的流量范围较大,在扬程 1.0~1.5 m 范围内,泵装置的效率在 65%~71.09%,在扬程为 0.72~1.0 m 的范围内,泵装置的效率为 54.46%~65%。

(3)新型双向超低扬程泵装置低驼峰虹吸式出水结构的断流方式更为可靠,操作简便,为低扬程双向抽水工程提供了一种新的泵装置形式,该泵装置的性能有待进一步试验验证。

参考文献(References):

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009:177. (LIU C, Pump and pumping station[M]. Beijing:

China Water & Power Press, 2009:177. (in Chinese))

- [2] 泵站设计规范, GB/T 50265-2010[S]. (Design code for pumping station, GB/T 50265-2010[S]. (in Chinese))
- [3] 成立,刘超,颜红勤,等. 泵站水流运动特性及水力性能[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016:87. (CHENG L, LIU C, YAN H Q, et al. Flow movement characteristics and hydraulic performance of pumping station[M]. Beijing:China Water & Power Press,2016:87. (in Chinese))
- [4] 刘超,周济人,汤方平,等. 低扬程双向流道泵装置研究[J]. 农业机械学报,2001,32(1):49-51. (LIU C, ZHOU J R, TANG F P, et al. Study on a low-lift and two-way pumping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(1):49-51. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2001.01.013.
- [5] 杨帆,刘超. 低扬程泵装置的研究进展及展望[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(4):84-91. (YANG F, LIU C. Research progress and prospect of low head pump devices[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2012,10(4):84-91. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2012.04.021.
- [6] 扬州大学. Ω 形双向低微扬程抽水装置[P]. 中国:CN103790838A,2014.05.14. (Yangzhou University. Ω -shaped two-way low-head pumping device [P]. China:CN103790838A,2014.05.14. (in Chinese))
- [7] 刘超,梁豪杰,金燕,等. 立式轴流泵进水流场 PIV 测量[J]. 农业机械学报,2015,46(8):33-41. (LIU C, LIANG H J, JIN Y, et al. PIV measurements of intake flow field in axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8):33-41. (in Chinese)) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.006.
- [8] 冯旭松,金燕,刘超,等. 扩散导叶对贯流泵装置性能影响[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(4):345-348. (FENG X S, JIN Y, LIU C, et al. Effects of diffusion guide vane on performance of tubular pump system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4):345-348. (in Chinese))
- [9] 李忠,杨敏官,王晓坤. 导叶对轴流泵性能影响的试验[J]. 排灌机械,2009,27(1):15-18. (LI Z, YANG M G, WANG X K. Experimental study of guide vane influence on performance of axial-flow pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(1):15-18. (in Chinese))
- [10] 汤方平,刘超,谢伟东,等. 双向潜水贯流泵装置水力模型研究[J]. 农业机械学报,2004,35(5):74-77. (TANG F P, LIU C, XIE W D, et al. Experimental studies on hydraulic models for a reversible, tubular, and submersible axial-flow pump installation[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2004, 35(5):74-77. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2004.05.020.

(下转第 224 页)

- analyzing its underside morphology[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2007, 31(3): 189-192. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; WTYH. 0. 2007-03-000.
- [17] 曹晓卫, 李春江, 颜小飞, 等. 利用探地雷达探测黄河弯道及桥墩周围冰层厚度[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(6): 91-95. (CAO X W, LI C J, YAN X F, et al. Measuring ice thickness around the curve and piers in the Yellow River with ground penetrating radar [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6): 91-95. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 06. 016.
- [18] 刘之平, 付辉, 郭新蕾, 等. 冰水情一体化双频雷达测量系统[J]. *水利学报*, 2017, 48(11): 1341-1347. (LIU Z P, FU H, GUO X L, et al. Double frequency radar system for ice thickness and water depth measurement [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(11): 1341-1347. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170017.
- [19] 杨硕. 试论无人机航测在矿山测量中的应用[J]. *山东工业技术*, 2019(15): 73. (YANG S. Discussion on the application of aerial survey of unmanned aerial vehicles in mine surveying [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2019 (15): 73. (in Chinese)) DOI: 10. 16640/j. cnki. 37-1222/t. 2019. 15. 067.
- [20] 吴凯滨. 浅地层探地雷达合成孔径成像应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (WU K B. Application research on synthetic aperture imaging of shallow subsurface ground penetrating radar [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [21] LI Z J, JIA Q, ZHANG B S, et al. Influences of gas bubble and ice density on ice thickness measurement by GPR[J]. *Applied Geophysics*, 2010, 7(7): 105-113. DOI: 10. 1007/S11770-010-0234-4.
- [22] 崔华义, 郭纪捷. 相关技术在冰水界面测量中的应用[J]. *海洋技术*, 2004, 23(1): 35-37. (CUI H Y, GUO J J. The application of correlation in the measurement of ice-water interface [J]. *Ocean Technology*, 2004, 23 (1): 35-37. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-2029. 2004. 01. 008.
- [23] SL 59-2015, 河流冰情观测规范[S]. (SL 59-2015, Technical standard for observations of ice regime in open channels[S]. (in Chinese))
-
- (上接第 216 页)
- [11] 刘超, 周庆连, 钱均, 等. 双向流道立轴潜水泵系统流动特性研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 59-65, 58. (LIU C, ZHOU Q L, QIAN J, et al. Study on flow characteristics of vertical shaft submersible pump system with two-way flow passage [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2016, 47 (10): 59-65, 58. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 10. 008.
- [12] 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 49-59. (LIU C. Research and development of axial flow-pump system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2015, 46 (6): 49-59. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 06. 008.
- [13] 王梦成, 咸国盛, 李昕, 等. 基于 CFX 的三种不同形式的双向泵站在自引自排工况下过流特性对比[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(5): 36-41. (WANG M C, XIAN G S, LI X, et al. Flow characteristics comparison of three different types of two-way flow passage based on CFX under gravity flow condition [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(5): 36-41. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1144. 2018. 05. 006.
- [14] 李彦军, 颜红勤, 葛强, 等. 大型低扬程泵装置优化设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 144-148. (LI Y J, YAN H Q, GE Q, et al. Optimum hydraulic design and model test of large-scale low-lift pump devices [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (9): 144-148. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2010. 09. 024.
- [15] 查智力, 刘超, 严天序, 等. 井筒式泵装置水力特性数值模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 189-195. (ZHA Z L, LIU C, YAN T X, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of wellbore pump installation [J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2018, 16(2): 189-195. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0058.