



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.030

叶鹏, 刘超, 许健, 等. 泵站钟形进水流道吸水室后壁形状的研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 195-201. YE Peng, LIU Chao, XU Jian, ZHA Zhi li, et al. The back wall shape of suction chamber of bell shaped inlet duct at pumping station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 195-201. (in Chinese)

泵站钟形进水流道吸水室后壁形状的研究

叶 鹏, 刘 超, 许 健, 查智力, 黄佳卫

(扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 基于三维不可压缩流体的雷诺平均 $N-S$ 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 对矩形、半圆形和“ ω ”吸水室后壁形状的钟形进水流道泵装置进行了三维紊流数值模拟, 并分析了钟形进水流道后壁形状对泵装置水力特性的影响。相同流量下, “ ω ”形吸水室进水流道流线分布最规则, 漩涡比其他形状的进水流道小, “ ω ”形吸水室进水流道水力损失比矩形吸水室进水流道小 1cm; 出口断面的流速均匀度达到 93%, 比矩形和半圆形吸水室进水流道高约 2 个百分点; 出口断面速度加权平均角度达到 83.5° , 比矩形吸水室进水流道高 0.6° , 比半圆形吸水室进水流道高 0.2° ; 泵装置运行高效区流量范围比半圆形的拓宽了 7.3%, 比矩形的拓宽了 30%。该研究对于完善泵站钟型进水流道吸水室优化设计具有一定意义。

关键词: 泵装置; 钟形进水流道; 后壁形状; 数值模拟; 优化设计

中图分类号: TV 131.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0195-07

The back wall shape of suction chamber of bell shaped inlet duct at pumping station

YE Peng, LIU Chao, XU Jian, ZHA Zhi li, HUANG Jia wei

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

Abstract: Based on the Reynolds averaged Navier Stokes equation for three dimensional incompressible fluid and the RNG k epsilon turbulence model, we conducted numerical simulation of three dimensional turbulent flow in bell shaped inlet ducts with a rectangular, a semicircular, and a ω shaped suction chamber, and analyzed the influence of wall shapes on the hydraulic characteristics of a pump device. Under the same flow rate, the inlet duct with a ω shaped suction chamber had the most regular streamline distribution and the smallest vortex among the three types of ducts. Its hydraulic loss was 1cm smaller than that of the rectangular suction chamber. Its velocity uniformity at the outlet section reached 93%, which was 2 percentage points higher than that of the rectangular and semicircular chambers. Its weighted average angle of velocity at the outlet reached 83.5° , which was 0.6° higher than that of the rectangular chamber duct and 0.2° higher than that of the semicircular chamber duct. Its flow range in the high efficiency area of pump operation was 7.3% wider than that of the semicircular chamber and 30% wider than that of the rectangular chamber. This research has certain significance for optimal design of the suction chamber of bell shaped inlet duct.

Key words: pump device; bell shaped inlet duct; back wall shape; numerical simulation; optimal design

进水流道是泵站前池和水泵的叶轮室之间的过渡段, 是整个泵装置的重要组成部分。进水流道的

主要作用是使水流加速和更好地转向, 为叶轮室进口提供良好的水力条件。故其出口流态对水泵的能

收稿日期: 2016-12-20 修回日期: 2017-03-24 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1924.012.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划重点项目(22015BAD20B01); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

Fund: “12th Five Year” Science and Technology Support Program(22015BAD20B01); A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

作者简介: 叶 鹏(1992), 男, 江苏南京人, 主要从事水泵及水泵站工程理论与应用方面研究。E-mail: 2207203984@qq.com

通讯作者: 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: liuchao@yzu.edu.cn

量性能、汽蚀性和安全性能有很大影响。

钟形进水水道是一种比较好的进水水道形式。它的显著特点是高度较小,水道宽度较大,可以减少泵站基础的挖深,从而降低土建工程投资。这对于某些站址地质较差的泵站,具有特别重要的意义^[14]。钟形进水水道的几何形状比肘形进水水道更为复杂,因此设计难度更高,而且现在也没有成熟的水力设计方法。钟形进水水道的后壁形状常见的有“ ω ”形,圆弧形,多边形和矩形,一般多采用前两者^[5]。

近年来,我国在钟形进水水道数值模拟与实验方面的研究越来越广泛^[6-12]。在优化钟形进水水道吸水室后壁形状方面,国内已有不少学者做了研究。刘超等在泵站节能技术改造中,将后壁形状为“ ω ”形的钟形进水水道用于圪工泵站,优化了进水流态,现场测试结果表明提高了泵装置运行效率^[13]。颜红勤等对不同钟形进水水道的优化方案进行了实验和数值模拟,认为“ ω ”形后壁吸水室钟形进水水道的水力性能良好,水力损失小^[14]。陶海坤等模拟计算了两种不同“ ω ”形后壁吸水室钟形进水水道,认

为采用公式 $V_u = const$ 来设计“ ω ”形吸水室较好,并且还研究了吸水室的后壁距^[15-17]。

上述研究主要是只针对钟形进水水道进行数值模拟分析^[13-17],不包括水泵,因此不能反映进水流道对水泵性能的影响。本文结合其他相关研究^[18-26],通过 CFX 对包括水泵在内的三种方案的泵装置进行全模拟,着重分析钟形进水水道不同截面的流线和速度分布、内部流态、水力损失以及其对泵装置性能的影响,为泵装置性能优化提供依据。

1 计算模型和网格

1.1 几何建模

本次研究的进水水道后壁形状有矩形(方案 1),圆弧形(方案 2),“ ω ”形(方案 3),其中“ ω ”形的后壁形状是平滑过渡的曲线形状,由两个大小圆弧组成,大圆弧的圆心与泵轴线重合,小圆弧圆心 O_2 在喇叭口圆周后侧垂直于流向的切线上。钟形进水水道各主要几何参数见图 1。本文采用轴流泵型号为 ZM6。

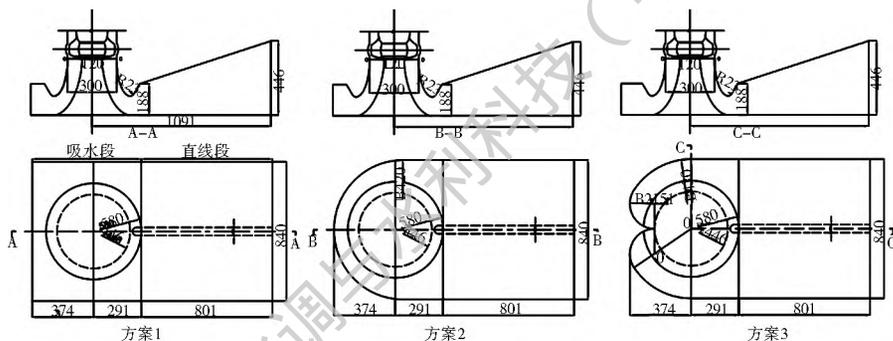


图 1 钟形进水水道尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of belt shaped inlet duct

本文研究的泵装置模型主要由钟形进水水道、叶轮、导叶及虹吸式出水水道组成,其中叶轮、导叶模型在 Turbogrid 软件中建立,进、出水水道在 UG 软件中建立。泵装置的三维模型见图 2。



图 2 泵装置模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pump device model

1.2 网格划分

由于该泵装置形式比较复杂且不规则区域较多,为了提高计算的精度,本文采用结构化网格。进、出水水道采用 ANSYS mesh 软件剖分,叶轮及导叶网格采用 Tuobogrid 软件中 H/J/L-Grid 拓扑结构剖分。本文不断调整网格数量并对不同网格数

量的泵装置效率进行计算,发现当网格增加到一定数量时,计算结果不再随着网格数量的增加而改变。在满足网格无关性要求时,取方案 1 泵装置网格总数 2 556 027(方案 2 为 2 548 004,方案 3 为 2 520 150),其中叶轮网格数 456 192,导叶网格数 1 012 662,进水水道网格数 349 190(方案 2 为 341 167,方案 3 为 313 313),出水水道网格数为 737 983。网格划分见图 3。

1.3 计算方法及边界条件设置

计算采用雷诺时均 $N-S$ 方程和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,该模型已经在前面很多研究中取得了较好的结果。

进水池的进口设置为整个计算域的进口,采用质量流量进口条件;出水池的出口设置为整个计算域的出口,边界条件按压力条件给定:总压为一个标

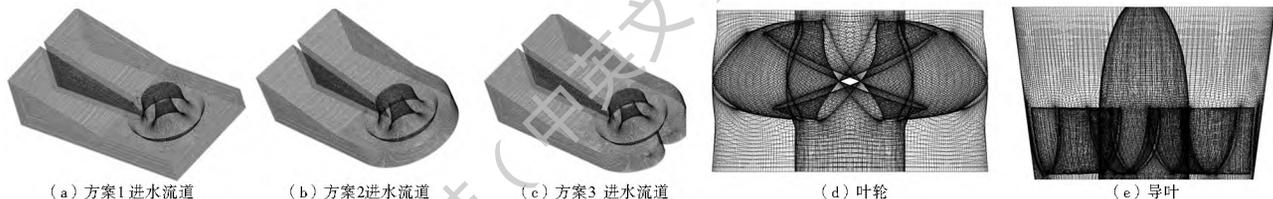


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh generation

准大气压。叶轮为旋转域,其他设置为静止域,叶轮转速为 1 450 r/min。固体边壁表面包括:轮毂表面,叶片表面,叶轮外壳的内表面等,壁面采用无滑移的壁面处理,进壁区域采用标准壁面边界函数边界条件。进水流道出口与叶轮进口、叶轮出口与导叶进口为动静交界面,采用 stage 模型。

2 计算结果及分析

通常认为评价进水流道的水力设计的标准包括以下三个方面的内容:第一,进水流道的流态是否良好,有没有产生有害漩涡(涡带);第二,流道出口断面的速度分布是否均匀;第三,进水流道的水力损失的大小。下面将根据数值计算得到的数据分别从进水流道的流态,流道出口断面速度分布,水力损失和泵装置的性能等方面对三种方案进行对比分析。

2.1 进水流道的流动基本特性

图4为计算得到的流态图(3D),由计算可知,钟形进水流道的水流运动过程可以分为三个阶段:水平收缩段,吸水室汇集段,喇叭管整流段。

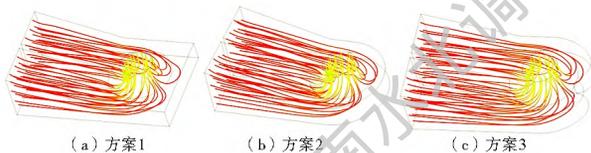


图4 钟形进水流道基本流态图(3D)

Fig. 4 Basic flow pattern diagram of bell shaped inlet duct (3D)

水平收缩段:在直线段,水流从流道进口通过不断收缩来调整流态,以便均匀的进入吸水室。水流受流道内部边界场的约束,流线都是平行于水平方向,但在水深方向出现不同程度的弯曲。

吸水室汇集段:水流分为三部分,一部分直接从喇叭管前部进入喇叭管,另外两部分绕至喇叭管侧面、后面进入喇叭管。吸水室段的流态非常复杂,若流态不好,容易出现范围很大的漩涡。

喇叭管整流段:水流在喇叭管内部急剧收缩,流速迅速增加但因为受到导流锥的影响水流流速分布得到较快调整^[6]。

为直观的反映流场特性,截取断面A(图5)为特征面来分析。数值表明,不同流量工况下的流线

分布大致相似,故只给出了设计工况下($Q = 320$ L/s)三种方案进水流道断面A(进水流道底部以上0.8 cm处水平剖面)的流线图。

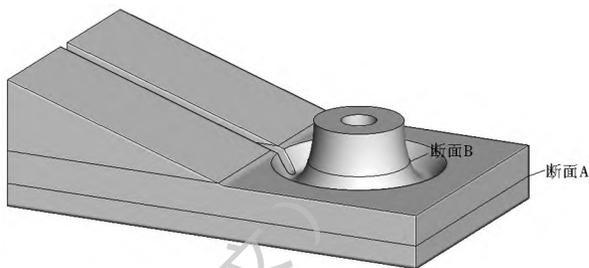


图5 流道各断面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cross sections of inlet duct

从图6可以看出以下结果。

(1) 当流量 $Q = 320$ L/s 时,三种方案的进水流道流线基本都是呈轴对称分布。方案1的流道后壁边角处流线非常紊乱且明显存在2个大漩涡和2个小漩涡;方案2的流道后壁处流线较不均匀,且有2个漩涡但范围相较于方案1明显缩小;相较于前两者,方案3的流道流线分布更规则,速度场更好,在后壁处出现2个范围很小的漩涡。

(2) 半圆形吸水室相当于在矩形吸水室设置了一个起导流作用的半圆形隔板,“ω”形吸水室相当于在半圆形吸水室后壁顶端设置了一个起导流作用的隔舌。故“ω”形吸水室的流线最规则,半圆形吸水室次之,矩形吸水室最差。

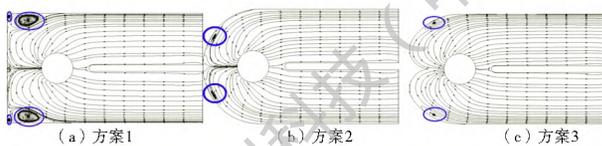


图6 断面A流线图

Fig. 6 Streamline chart of cross section A

2.2 进水流道出口断面流速分布

图7为三种不同流量时,断面B(进水流道出口断面以下1.4 cm断面,见图5)的流速分布图。可以看出以下规律。

(1) 在小流量至大流量各工况下进水流道出口断面流速分布并不均匀,在左右两侧流态基本对称,但是进水侧的流速明显大于后壁侧,呈月牙形分布,并

非四周均匀进水。分布特征与已有的实验结果较为吻合^[19], 这表明采用的计算模型和方法是可靠的。

(2) 小流量工况下, 三种方案的后壁内侧均出现一个类似矩形的低速区, 方案 1 低速区的范围较大, 方案 3 低速区的范围较小, 方案 2 的介于两者之间。大流量工况下, 三种方案的后壁内侧均出现两个对称的局部高速区。只有方案 1 的后壁内侧出现低速区, 但是低速区的范围与小流量工况相比小很多。

(3) 同一工况下, 三种方案的流场分布大致相似, 形态稳定。方案 1 的流速变化梯度明显最大, 方案 2 次之, 方案 3 最小, 这是流速均匀度差异的直观反映。同一工况, 方案 3 的流速均匀性最好, 方案 2 次之, 方案 1 的均匀性最差。

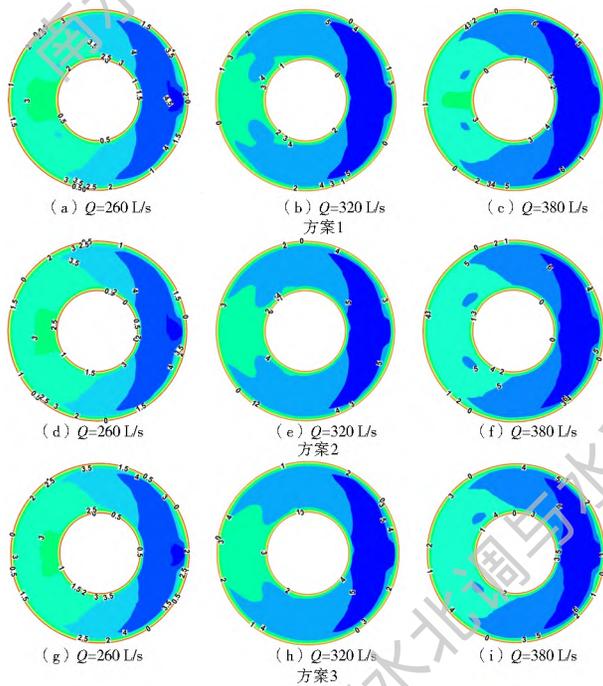


图 7 断面 B 流速分布

Fig. 7 Flow velocity distribution at cross section B

2.3 进水渠道出口断面轴向流速分布均匀度和速度加权平均角度

2.3.1 进水渠道出口断面轴向流速分布均匀度

进水渠道的出口就是叶轮室的进口, 进水渠道出口断面流速场是否均匀或者比较均匀会影响水泵运行性能。我们可以通过分析进水渠道出口断面轴向流速分布均匀度来分析进水渠道的设计质量。 V_{zu} 越大, 则表明进水渠道出口断面轴向流速分布越均匀, 计算公式(1)如下:

$$V_{zu} = 1 - \frac{1}{v_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2 \Delta A_i}{A}} \quad (1)$$

式中: V_{zu} 为进水渠道出口断面轴向分布流速均匀

度; \bar{v}_a 为叶轮进口断面平均轴向速度; v_{ai} 为叶轮进口第 i 个网格单元的轴向速度; A 为叶轮进口断面面积; ΔA_i 为叶轮进口第 i 个网格单元的面积。

图 8 给出了不同工况下, 三种方案进水渠道的出口断面轴向流速分布均匀度。可以看出恒定转速下进水渠道出口断面轴向流速分布均匀度随着流量的增大而略有增加, 但是增加值非常小。在设计工况 ($Q = 320 \text{ L/s}$) 下, 轴向流速均匀度方案 1 为 91.13%, 方案 2 为 91.37%, 方案 3 为 93.36%。比较数据可以看出, 方案 3 的进水渠道出口断面流场最均匀, 方案 2 次之, 方案 1 最差。

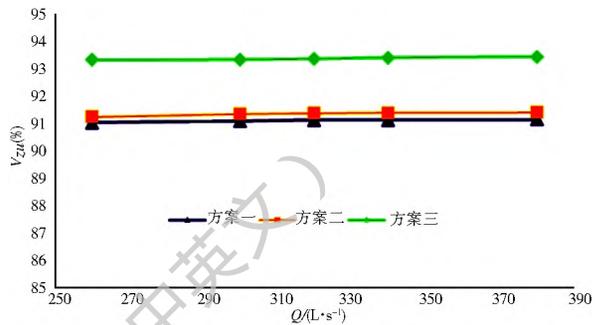


图 8 流速分布均匀度与流量关系曲线

Fig. 8 Relationship between velocity distribution uniformity and flow rate

2.3.2 进水渠道出口断面速度加权平均角度

进水渠道出口水流的入流方向性会影响水泵的能量特性和汽蚀特性, 我们可以通过分析进水渠道出口断面速度加权平均角度 θ 来衡量好坏。 θ 越大进水渠道出口水流的入流方向性越好。

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

式中: θ 为进水渠道出口断面速度加权平均角度; v_{ai} 为叶轮进口第 i 个网格单元的轴向速度; v_{ti} 为叶轮进口第 i 个网格单元的横向速度。

图 9 给出了不同工况下三种进水渠道出口断面速度加权平均角度, 计算结果表明流量 Q 在 260

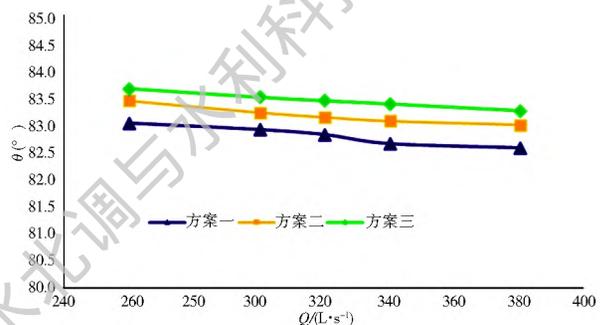


图 9 速度加权平均角度与流量关系曲线

Fig. 9 Relationship between weighted average angle of velocity and flow rate

L/s 到 380 L/s 时, 方案 3 的速度加权平均角度最大, 均处在 83° 以上, 方案 1 的速度加权平均角度最小, 比方案 2 低 0.4°, 比方案 3 低 0.6°, 这说明方案三的进水流道出口水流的入流方向性最好。进一步分析发现 θ 实际上随着流量的增加而减小, 但是幅度很小。

由此可知, 对于钟形进水流道来说, 其出口断面的流速均匀度和出口断面速度加权平均角度本身与进水流道吸水室后壁采用的具体形状有着非常密切的关系, 而流量的大小对二者的影响较小。

2.4 进水流道水力损失

轴流泵装置的特点是扬程低, 这就导致流道的水力损失占装置扬程比值较大, 对水泵装置效率的影响明显, 所以装置的水力损失直接影响到工程的实际经济效益。当液体处于运动状态时, 由于液体的粘滞性, 在流动过程中液体内部会产生内摩擦力来阻碍液体间的相对运动, 为克服这种阻力, 流体中的一部分机械能会转化为热能, 即产生水力损失。根据伯努利能量方程和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型计算得到的流速场和压力场来计算进水流道的水力损失, 计算公式 (3) - (5) 如下:

$$E_1 = \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad (4)$$

$$\Delta h = E_1 - E_2 = \left[\frac{P_2}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 - Z_2 \right] + \left[\frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} \right] \quad (5)$$

式中: E_1 为进水流道进口处的总能量; E_2 为进水流道出口处的总能量; Δh 为进水流道的水力损失。

选取了五种不同工况的流量: $Q = 260 \text{ L/s}$, $Q = 300 \text{ L/s}$, $Q = 320 \text{ L/s}$, $Q = 340 \text{ L/s}$, $Q = 380 \text{ L/s}$, 在上述五种工况的情况下, 三种方案的进水流道水力损失见图 10。

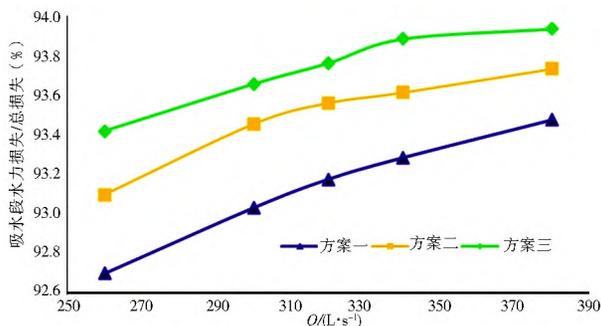


图 10 吸水段水力损失/总损失与流量关系曲线

Fig. 10 Relationship between hydraulic loss / total loss and flow rate at water absorption section

图 10 表明进水流道的水力损失主要为吸水段

水力损失, 并且吸水段水力损失占总水力损失的百分比随着流量的增加而增加, 故吸水段的尺寸和形状的合理设计对减少钟形进水流道水力损失具有重要意义。

图 11 表明流量 Q 在 260 L/s 到 380 L/s 时, 进水流道水力损失随流量的增大而增大。相同流量下, 方案 1 的进水流道水力损失最大, 方案 2 次之, 方案 3 的进水流道水力损失最小。方案 2 和方案 3 相当于在方案 1 的后避处添加了起导流作用的圆弧状隔板, 故方案 1 的水力损失比方案 2, 方案 3 大。方案 3 相当于在方案 2 的中间加了导流作用的隔舌, 隔舌可以截断水流的旋转, 故方案 3 的水力损失比方案 2 小。各方案中, 水力损失越小, 断面流速均匀度越高。这表明方案 3 的进水流态较好, 吸水室后壁形状设置合理。因此为了减少钟形进水流道进水流道的水力损失, 吸水室后壁形状应采用“ ω ”形。

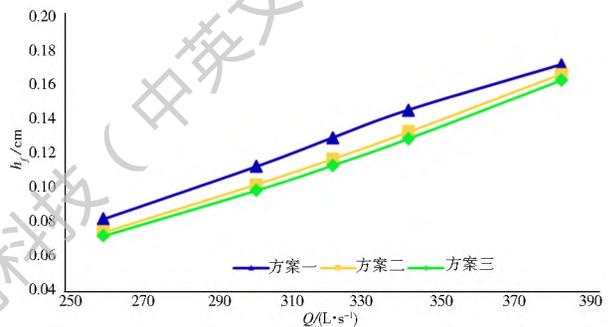


图 11 进水流道水力损失与流量关系曲线

Fig. 11 Relationship between hydraulic loss and flow rate

2.5 泵装置效率与流量关系曲线

泵装置效率与流量关系曲线见图 12, 由图 12 可以看出以下规律。

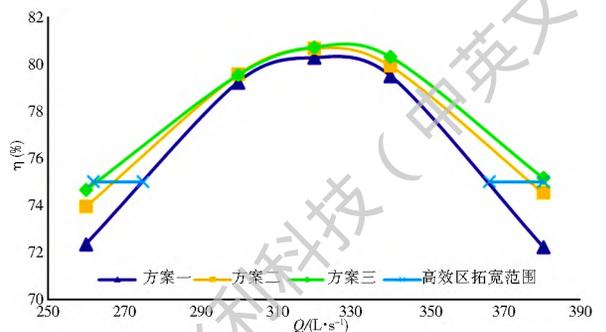


图 12 泵装置效率与流量关系曲线

Fig. 12 Relationship between pump efficiency and flow rate

(1) 相同流量下, 方案 3 的泵装置效率最高, 最高效率达到了 80.71%; 方案 2 次之, 最高效率为 80.66%; 方案 1 的泵装置效率最低, 最高效率为 80.26%。

(2) 三种方案的泵装置 $Q-\eta$ 曲线的变化趋势都是从最高效率点向两侧下降。大流量工况下, 方案

1的效率仅为72.22%，远远低于方案2和方案3，小流量工况亦是如此。高效区内，三种方案的效率较为接近。以方案3的最高效率点到75%为高效区。三种方案中，方案3的效率曲线变化最为平缓，高效区的流量范围较宽(262~380 L/s)；方案1的效率曲线变化最为陡峭，高效区的流量范围较窄(275~366 L/s)；方案2的效率曲线介于方案1和方案3之间，高效区流量范围适中(267~377 L/s)。方案3的高效区流量范围比方案2拓宽了7.3%，比方案1拓宽了30%。

3 结论

(1) 采用CFD数值模拟的方法，对包含了钟形进水水道，叶轮，导叶和虹吸式出水水道的全水道进行了数值模拟，反映了最为接近实际的泵装置流动情况。

(2) 钟形进水水道的水平收缩段水流流线较为规则，流速分布较为均匀，水流流态良好；吸水室段和喇叭管整流段的流线并不规则，出现了漩涡，且流速分布并不均匀，虽然在左右两侧流态基本对称，但是进水侧的流速明显大于后壁侧。

(3) 根据CFD性能预测的结果，当进水水道吸水室后壁形状采用“ ω ”形时，水力损失较小，水流流态较好，泵装置运行高效区流量范围比半圆形的拓宽了7.3%，比矩形的拓宽了30%。而矩形后壁吸水室和半圆形后壁吸水室内部的水流容易形成漩涡，增加进水水道水力损失，无法保证较好的进水条件，应该尽量避免采用。

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, 2012 (LIU Chao. Pump and pumping station[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012 (in Chinese))

[2] 唐祥盛. 泵站设计与施工[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010 (TANG Xiang-sheng. Pumping station design and construction[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010 (in Chinese))

[3] 严登丰. 泵站工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (YAN Deng-feng. Pump Station Engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005 (in Chinese))

[4] 泵站设计规范. GB/T 50265-97[S]. (Design code for pumping station. GB/T 50265-97[S]. (in Chinese))

[5] 陈莱洲. 坡头电排站大型轴流泵钟形进水水道的设计与运行[J]. 水利水电技术, 1991(7): 49-54. (CHEN Lai-zhou. Design and operation of bell like suction box of large axial pump of Potou power station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1991(7): 49-54. (in Chinese))

[6] 常景彩, 王志强, 李兴平, 等. 大型泵站新型钟形进水池流动特

性的研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 165-169, 178. (CHANG Jing-cai, WANG Zhi-qiang, LI Xing-ping, et al. Study on hydraulic characteristics of new bell suction duct in large scale pumping stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 165-169, 178. (in Chinese))

- [7] 杨帆, 罗祝北, 汤方平, 等. 大型低扬程泵站钟形进水水道水力特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 135-141. (YANG Fan, LUO Zhi-bei, TANG Fang-ping, et al. Research on hydraulic performance of bell like inlet passage for low-lift large pump stations[J]. China Rural Water Conservancy and hydropower. 2011(2): 135-141. (in Chinese))
- [8] 周正富, 何钟宇, 陈松山, 等. 大型低扬程泵站钟形进水水道高度研究[J]. 扬州大学学报, 2009, 12(1): 66-70. (ZHOU Zheng-fu, HE Zhong-yu, CHEN Song-shan, et al. Research on the bell inlet passage height of large low-head pumping station[J]. Journal of Yangzhou University. 2009, 12(1): 66-70. (in Chinese))
- [9] 李彦军, 颜红勤, 严登丰, 等. 非对称入流工况下钟形进水水道数值模拟试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008, 2: 70-73. (LI Yan-jun, YAN Hong-qin, YAN Deng-feng, et al. Numerical simulation and experimental study on bell-shaped suction box under non-symmetric inflow conditions[J]. China Rural Water Conservancy and hydropower. 2008, 2: 70-73. (in Chinese))
- [10] 何钟宇, 周正富, 陈松山, 等. 泵站钟形进水水道三维湍流数值模拟与试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 79-81. (HE Zhong-yu, ZHOU Zheng-fu, CHEN Song-shan, et al. 3D Turbulent numerical simulation and experiment study on bell-like suction box in pumping station[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(5): 79-81. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-3317.2007.05.021
- [11] 周正富, 陈松山, 葛强, 等. 大型泵站钟形进水水道三维紊流数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2006, 4: 61-64. (ZHOU Zheng-fu, CHEN Song-shan, GE Qiang, et al. Numerical simulation of 3D turbulent flow in campaniform inlet duct of large-sized pumping stations[J]. China Rural Water Conservancy and hydropower. 2006, 4: 61-64. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2006.04.023
- [12] 刘超. 大型泵站钟形进水水道流速场的试验研究[J]. 江苏农学院学报, 1985, 6(2): 41-47. (LIU Chao. Experimental research on flow yield of bell-like suction box[J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1985, 6(2): 41-47. (in Chinese))
- [13] 刘超, 曹志高, 严登丰, 等. 钟形进水水道在苏0型泵站中的应用[J]. 江苏农学院学报, 1988, 9(3): 47-51. (LIU Chao, CAO Zhi-gao, YAN Deng-feng, et al. Application of bell draft inlet casing in Jiangsu 0 type pump station[J]. Journal of Jiangsu Agricultural college, 1988, 9(3): 47-51. (in Chinese))
- [14] 颜红勤, 陈松山, 葛强, 等. 钟形进水水道试验及数值模拟[J]. 排灌机械, 2007, 25(5): 55-60. (YAN Hong-qin, CHEN Song-shan, GE Qiang, et al. Hydraulic experiment and numerical simulation of campaniform inlet duct[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(5): 55-60. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.2007.05.015
- [15] 陶海坤, 祝宝山, 曹树良, 等. 钟形进水水道吸水室后壁的优化

- 设计[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 228-231. (TAO Haikun, ZHU Baoshan, CAO Shuliang, et al. Hydraulic experiment and numerical simulation of campaniform inlet duct[J]. Journal of Jiangsu University, 2007, 28(3): 228-231(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2007.03.012
- [16] 陶海坤, 祝宝山, 曹树良, 等. 钟形进水流道吸水室的后壁距研究[J]. 流体机械, 2008, 36(3): 15-18. (TAO Haikun, ZHU Baoshan, CAO Shuliang, et al. Research on the distance of back wall of bell-like inlet passage of mixed flow pump[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(3): 15-18. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2008.03.004
- [17] 陶海坤, 曹树良, 桂绍波, 等. 钟形进水流道蜗形吸水室的设计方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(11): 1949-1952. (TAO Haikun, CAO Shuliang, GUI Shaobo, et al. Design of volute suction with a bell-like inlet passage in a mixed flow pump[J]. J. of Tsinghua Univ.: Sci. & Tech., 2008, 48(11): 1949-1952. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2008.11.019
- [18] 谢荣盛, 吴忠, 何勇, 等. 双向竖井贯流泵进水流道优化研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 68-74. (XIE Rongsheng, WU Zhong, HE Yong, et al. Optimization research on passage of bidirectional shaft tubular pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 68-74. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.011
- [19] 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 Chao, LIANG Haojie, JIN Yan, et al. PIV measurements of intake flow field in axial flow pump[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 33-41. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.006
- [20] 杨帆, 刘超, 汤方平, 等. 箱涵式进水流道的立式轴流泵装置水动力特性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 62-69. (YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Analysis of hydraulic performance for vertical axial flow pumping system with cube type inlet passage[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 62-69. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.04.009
- [21] 张仁田, 岳修斌, 朱红耕, 等. 基于 CFD 的泵装置性能预测方法比较[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 85-90. (ZHANG Ren Tian, YUE Xiubin, ZHU Honggeng, et al. Comparison on performance prediction methodologies of low-head pump systems based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 85-90. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2011.03.016
- [22] 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 Yanjun, YAN Hongqin, Ge Qiang, 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
- [23] 成立, 刘超, 薛坚, 等. 基于 CFD 流动分析的泵站肘形进水流道水力特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(6): 891-899. (CHENG Li, LIU Chao, XUE Jian, et al. Hydraulic performance study on the flow of elbow inlet passage by numerical simulation of CFD[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(6): 891-899. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2008.06.014
- [24] 刘军, 邓东升, 马志华, 等. 宝应泵站流道优化计算与模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(2): 22-25. (LIU Jun, DENG Dongsheng, MA Zhizhua, et al. Optimization by numerical calculation & model test for inlet & outlet conduit of Baoying pumping station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(2): 22-25. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2005.02.008
- [25] 刘超, 成立, 周济人, 等. 水泵站开敞进水池三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 53-55. (LIU Chao, CHENG Li, ZHOU Jiren, et al. Numerical simulation of three dimensional turbulent flow for opening pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 53-55. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2002.06.016
- [26] 成立, 刘超, 汤方平, 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, (3): 61-64. (CHENG Li, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Numerical simulation of three dimensional flow inside suction box of reversible pumping station[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004, (3): 61-64. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2004.03.017