doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.002

轴流泵装置运行工况对肘形进水流道水力性能的影响

杨　帆[1]　谢传流[1]　刘　超[1]　袁　尧[2]　石丽建[1]

(1.扬州大学水利与能源动力工程学院,扬州 225127;2.江苏省水利科学研究院,扬州 225007)

摘要:为研究肘形进水流道的水力性能与泵装置运行工况的定量关系,采用 CFD(Computational fluid dynamic)方法对轴流泵装置进行全流道的数值计算,在考虑了轴流泵与肘形进水流道内流相干条件下定量地分析了肘形进水流道水力特性各参数与泵装置运行工况的关系,并给出了相应的数学模型,对比了物理模型试验与数值预测结果的差异性。结果表明:在高效工况范围内,流道出口流场水流稳定性及均匀性均较好;在大流量工况时,流道出口流场水流稳定性及均匀性较差。流道出口流场的偏流角受泵装置运行工况的影响较小,极差为 0.91°。肘形进水流道均化效率为 99.215%,流道断面的均匀性主要受弯肘段几何边界条件的约束,在弯肘段时压能与动能的转换率较高,对于肘形进水流道结构尺寸设计及优化的关键在于弯肘段。

关键词:轴流泵;肘形进水流道;水力性能;数值模拟

中图分类号:S277.1;TV136　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)02-0015-07

Influence of Axial-flow Pumping System Operating Conditions on Hydraulic Performance of Elbow Inlet Conduit

Yang Fan[1]　Xie Chuanliu[1]　Liu Chao[1]　Yuan Yao[2]　Shi Lijian[1]

(1. *School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou* 225127, *China*

2. *Water Resources Research Institute of Jiangsu Province, Yangzhou* 225007, *China*)

Abstract: In order to investigate the hydraulic performance of elbow inlet conduit, the three-dimensional fluid flow inside an axial-flow pumping system was simulated based on the Reynolds time-averaged Navier－Stokes equations, the RNG $k-\varepsilon$ turbulent flow model and the law of the wall. To verify the accuracy and reliability of the calculation results, a model test was conducted on the high-precision hydraulic machinery test bed. It was found that the calculated results agreed well with the measured results. The hydraulic performance parameters of elbow inlet conduit were analyzed quantitatively considering the hydraulic interaction of inlet conduit and impeller. The stability and uniformity of flow were analyzed by using static distortion index of outlet section in elbow inlet conduit. The mathematical model of static distortion index and flow rate coefficient was established with the method of regress analysis. The stability and uniformity of flow were good under the high efficiency conditions, while it was the worst under the large operating condition. The different operating conditions of pumping system had little effect on the velocity-weighted drift angle of outlet section. The maximum difference of velocity-weighted drift angle was 0.91°. The average static pressure ratio of linear contraction segment was 0.943, while the average static pressure ratio of elbow segment was 0.826. The average hydraulic efficiency was 99.215% for elbow inlet conduit. The uniformity of cross section was affected under the condition of boundary constraint. The conversion rate of pressure energy and kinetic energy was high in the elbow segment. The important technology of optimization design is elbow segment for elbow inlet conduit.

Key words: axial-flow pump; elbow inlet conduit; hydraulic performance; numerical simulation

收稿日期:2015－03－07　修回日期:2015－03－30

基金项目:国家自然科学基金项目(51279173)、江苏省自然科学基金项目(BK20150457)、江苏省高校自然科学研究项目(14KJB570003)、扬州大学科技创新培育基金项目(2015CXJ033)和江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介:杨帆(1985—),男,讲师,主要从事泵及泵装置水力特性及优化研究,E-mail:fanyang@yzu.edu.cn

引言

进水流道是泵站前池与水泵叶轮室的过渡段，具有进水池和吸水管的双重功能，是块基型泵站进水结构的主要形式。国内外学者对不同的流道结构形式均开展了相关研究工作，如：蜗形进水结构[1-2]，斜式进水流道[3-5]，竖井式进水流道[6-7]，矩形进水结构[8-9]和肘形进水流道[10-12]等。肘形进水流道是进水流道常用的结构形式之一，肘形进水流道的特点是高度较大而宽度较小，其形状与水轮机尾水管相近，在我国的大型泵站中应用最早且最为广泛。以前学者们常采用分解法独立地研究进水结构的内流场，近些年学者们把重点放在了流道结构与转轮的内流相干性等方面[9,13-16]，结果表明从工程实际角度考虑对泵装置进水流道内流的分析需考虑转轮的影响。

在肘形进水流道里，来流能量的利用率直接影响着整个泵装置的水力效率。对于几何结构一定的肘形进水流道，弄清流道内部水力性能各参数与轴流泵装置运行工况的关系，将有益于来流的能量利用，从而对提高泵装置的水力效率起着重要的作用，本文以轴流泵装置整体为计算模型，采用定量分析方法重点分析不同轴流泵装置运行工况时肘形进水流道的水力性能参数。

1 泵装置计算模型及数值计算方法

1.1 泵装置计算模型

轴流泵装置由肘形进水流道、转轮、导叶体及虹吸式出水流道4个过流部件组成，转轮名义直径为0.30 m，转轮叶片数为4，导叶体叶片数为7，计算额定转速为1 450 r/min，共计算了流量系数 K_Q 在0.35~0.70范围内9个工况点的流量。计算区域包括进水段、肘形进水流道、转轮、导叶体、虹吸式出水流道及出水段共6部分，该立式轴流泵装置三维模型如图1所示。

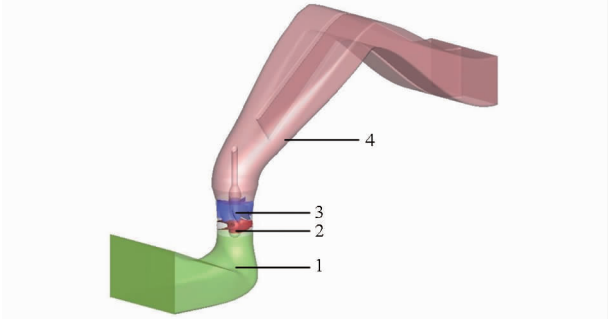

图1 轴流泵装置三维模型

Fig. 1 3D model of axial-flow pumping system

1. 肘形进水流道 2. 转轮 3. 导叶体 4. 虹吸式出水流道

本文研究的重点是肘形进水流道，肘形进水流道由线性渐进段和弯肘段2个部分组成，如图2所示。肘形进水流道的主要控制尺寸包括：上边线倾角 $\alpha=25°$，下边线倾角 $\beta=5°$，流道的水平投影长度 L，弯曲段水平长 L_X，进口断面高 H_{in}，进口断面宽 B_{in}，流道喉管高度 H_k，驼峰断面宽 B_{tf}，出口断面直径 D_{out}。以转轮名义直径 D 为基数，对其他各控制参数进行无量纲换算，则 $L=4.33D$，$L_X=1.11D$，$H_{in}=1.82D$，$B_{in}=2.37D$，$H_k=0.78D$。

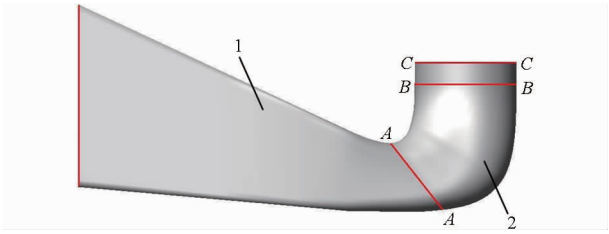

图2 肘形进水流道

Fig. 2 Elbow inlet conduit

1. 线性渐进段 2. 弯肘段

1.2 数值计算方法

轴流泵装置内部流动为不可压缩湍流流动，该流动可用雷诺时均N-S方程和连续性方程描述，RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对复杂的大曲率流动模拟效果较好，文献[17-21]采用该湍流模型对泵及泵装置进行三维数值模拟均取得了理想效果，本文采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型，以提高数值计算结果的准确性和可靠性。基于大型商用CFD软件ANSYS CFX的全隐式耦合多网格线性求解器，采用有限体积法对控制方程进行离散求解时，对所有变量整场联立求解，求解速度较快，可同时求解连续性方程和动量方程组。

转轮与导叶体采用ANSYS Turbo-grid进行网格剖分，网格剖分时考虑了叶片叶顶间隙，叶顶间隙设置为0.15 mm，轴流泵装置全流道计算区域的网格节点数为1 902 792，网格单元数为2 067 376，各物理量的残差收敛精度均低于 10^{-4}，并设置监测点监测扬程的变化，该监测点采用泵装置扬程的计算式进行设置。

1.3 泵装置边界条件

边界条件的设置采用文献[4]中的方法，各边界条件设置如下：

(1)计算域进口采用速度进口条件，速度进口设置在与进水流道一定距离的前池进口断面上，进口速度按均匀分布给出。

(2)计算域出口采用平均静压条件，平均静压设置在与出水流道一定距离的出水池出口断面上。

(3)固体壁面采用无滑移边界条件，前池与出

水池的自由液面采用对称平面处理，转轮与导叶、进水流道的交界面采用动静交界面，其余区域间的拼接均采用静-静交界面。

1.4　数值计算有效性的验证

为了验证轴流泵装置数值计算结果的有效性，按尺寸比例 1∶1 制作了轴流泵装置物理模型，模型性能试验在江苏省水利动力工程重点实验室的高精度水力机械试验台上进行，该试验台为立式封闭循环系统，总长度为 60.0 m，管道直径分别为 0.50 m 和 0.40 m，试验台效率综合不确定度为 ±0.39%，符合 SL 140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》的精度要求，试验台示意图如图 3 所示。

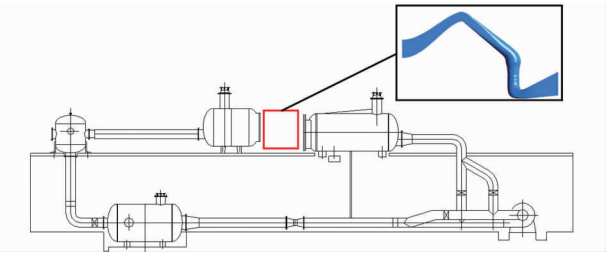

图 3　试验台

Fig. 3　Test bed

轴流泵装置数值预测的泵装置扬程、泵装置效率与物理模型测试结果对比如图 4 所示。对比结果表明：预测的扬程与试验值最大相对误差为 48.33%，最小相对误差为 0.93%，预测的效率与试验值最大相差 7.37%，最小相差 1.25%，预测的扬程、效率与试验值最大的差异均在流量系数 K_Q = 0.674 时，该流量系数是最优工况的 1.294 倍。预测的轴流泵装置流量-扬程曲线、流量-效率曲线均与试验曲线趋势相同。在流量系数 K_Q = 0.490 ~ 0.550 范围内，预测的扬程与试验值相对误差、预测的效率与试验效率的差值均在 3% 以内，偏离最优工况时轴流泵装置内流更加复杂，致使预测精度有所降低，但整体的预测值与试验值吻合度较好，可满足数值分析要求。

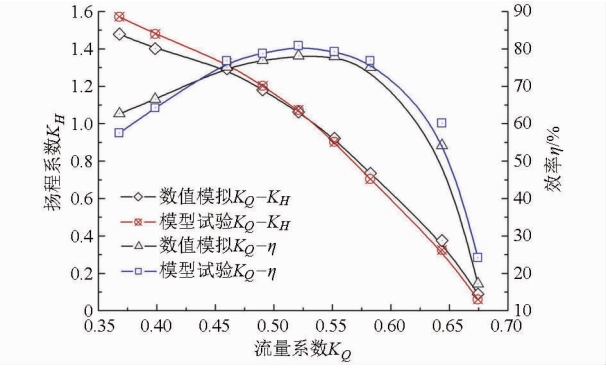

图 4　泵装置数值计算结果与试验比对

Fig. 4　Comparison of simulation and test results for pumping system

2　肘形进水流道内流机理分析

2.1　流道特征断面流速均匀性分析

肘形进水流道的出口面是转轮的进口面，为保证转轮工作的平稳和高效，要求进水流道出流尽可能流速均匀，为进一步明确肘形进水流道内部各断面的流速均匀性与泵装置流量的变化关系，引入流道特征断面的轴向速度分布均匀度，其计算式为

$$V_{u+}=\left[1-\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(v_{ai}-v_a)^2\Delta A_i\Big/\sum_{i=1}^{n}\Delta A_i}\Big/v_a\right]\times 100\% \tag{1}$$

式中　v_{ai}——第 i 个网格单元的轴向速度

v_a——过流断面的平均轴向流速

ΔA_i——第 i 个网格单元的面积

n——过流断面的网格单元总数

选 3 个特征断面，各特征断面的位置如图 2 所示，分别为弯肘段进口断面 $A-A$、弯肘段出口断面 $B-B$ 和流道出口断面 $C-C$。3 个特征断面的轴向速度分布均匀度计算结果如图 5 所示。不同工况时，肘形进水流道各断面的轴向速度分布均匀度差异性较小，水流经肘形进水流道边界条件的约束，从断面 $A-A$ 至断面 $C-C$ 的轴向速度分布均匀度不断提高，达到了改善出流流速分布的目的，至断面 $C-C$ 时轴向速度分布均匀度已高于 90%，可满足转轮对进水条件的要求。经计算，断面 $A-A$ 的轴向速度分布均匀度均值为 51.29%，断面 $B-B$ 的轴向速度分布均匀度均值为 85.98%，断面 $C-C$ 的轴向速度分布均匀度均值为 94.58%，从断面 $A-A$ 至断面 $B-B$ 的轴向速度分布均匀度提高了 34.69%，增幅达 67.64%；从断面 $B-B$ 至断面 $C-C$ 的轴向速度分布均匀度提高了 8.6%，增幅仅为 10%，由此可知：对于肘形进水流道结构尺寸设计及优化的关键在于弯肘段。

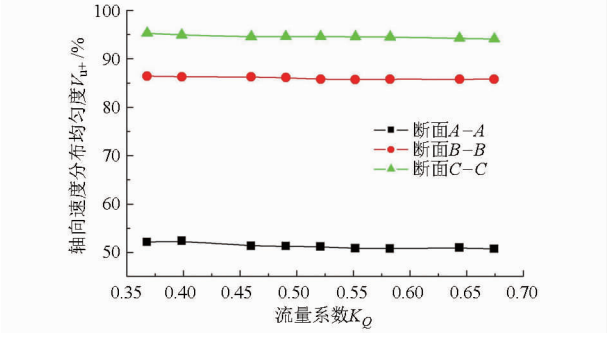

图 5　各特征断面的轴向速度分布均匀度

Fig. 5　Axial velocity distribution uniformity of different cross sections

进水流道均化效率定义为不同工况时进水流道水力效率的平均值，进水流道水力效率定义为流道

出口断面总能量与进口断面总能量之比,计算式为

$$\eta_{av}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\eta_i}{m} \tag{2}$$

其中 $$\eta_i=\frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}\times 100\%$$

式中 η_{av}——进水流道均化效率

m——计算工况总数

E_{out}——进水流道出口断面总能量

E_{in}——进水流道进口断面总能量

η_i——各工况时进水流道水力效率

下标 i 代表不同的计算工况,$i=1,2,\cdots,m$。

不同工况时肘形进水流道水力效率计算结果如表 1 所示。各工况时肘形进水流道水力效率均在 98.95% 以上,肘形进水流道均化效率为 99.215%,流道的水力效率优异。

表 1 不同工况时肘形进水流道水力效率

Tab.1 Hydraulic efficiency of elbow inlet conduit under different operating conditions

流量系数 K_Q	流道效率/%	流量系数 K_Q	流道效率/%
0.368	99.372	0.398	99.361
0.460	99.218	0.490	99.193
0.521	99.206	0.552	99.163
0.582	99.242	0.644	99.225
0.674	98.952		

采用速度加权偏流角对肘形进水流道出流流速方向与出口的垂直度进行定量评估,速度加权偏流角计算式为

$$\theta=\frac{\sum_{i=1}^{m}v_{ai}\arctan\dfrac{v_{ti}}{v_{ai}}}{\sum_{i=1}^{m}v_{ai}} \tag{3}$$

式中 v_{ti}——第 i 个网格单元的横向速度

不同工况时肘形进水流道出口速度加权偏流角计算结果如图 6 所示。在计算工况 $K_Q=0.35\sim0.70$ 范围内,速度加权偏流角随流量的增大而略微减小,最大差值仅为 0.91°,表明肘形进水流道出口流场的偏流角受轴流泵装置运行工况的影响较小,肘形进水流道断面的均匀性主要受肘形进水流道弯肘段几何边界条件的约束较大。

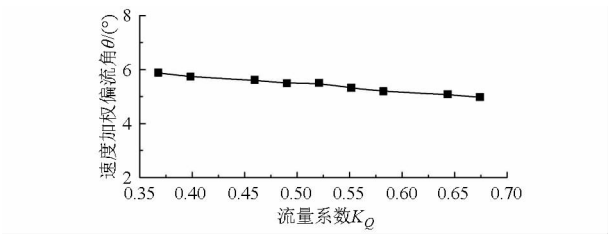

图 6 不同工况时流道出口速度加权偏流角

Fig.6 Velocity-weighted drift angle of outlet section under different operating conditions

2.2 流道出口静态畸变指数与流量关系

引入进水流道出口流场的静态畸变指数 D_C,静态畸变指数 D_C 是衡量进水流道出口流场水流稳定性的指标,计算公式为

$$D_C=\frac{p_{\max}-p_{\min}}{p_{av}} \tag{4}$$

式中 $p_{\max}$——流道出口断面总压的最大值

$p_{\min}$——流道出口断面总压的最小值

p_{av}——流道出口断面总压的平均值

不同工况时肘形进水流道出口的静态畸变指数 D_C 的计算结果如图 7 所示,随着流量系数的增大,流道出口断面的静态畸变指数也不断增大。在流量系数 $K_Q=0.52\sim0.59$ 范围内流道出口的静态畸变指数差异性较小,静态畸变指数 D_C 在 0.162 左右变动,进水流道出口流场水流稳定性及均匀性均较好,且该流量范围为高效区范围;在流量系数 K_Q 小于 0.52 时,静态畸变指数逐渐减小,但降幅较大;在流量系数 K_Q 大于 0.59 时,静态畸变指数逐渐增大,但增幅较小,在大流量工况时,进水流道出口流场水流稳定性最差。

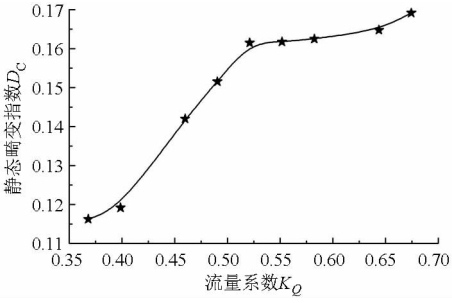

图 7 不同工况时流道出口的静态畸变指数

Fig.7 Static distortion index of outlet section under different operating conditions

为明确流量系数 K_Q 与静态畸变指数 D_C 的数学关系式,定义流量系数 K_Q 为自变量 x,静态畸变指数 D_C 为变量 y,则数学模型为

$$y=14.179-\frac{34.279}{x}+\frac{33.034}{x^2}-\frac{15.659}{x^3}+\frac{3.649}{x^4}-\frac{0.335}{x^5} \tag{5}$$

该五阶逆多项式决定系数 R^2 为 0.995,表明通过数值分析方法获取的五阶逆多项式能较好地基于泵装置运行工况预测肘形进水流道出口断面的静态畸变,为分析进水流道出口流场水流的稳定性和均匀性提供参考。

肘形进水流道的出口断面平均流速与流量系数的关系如图 8 所示。流道出口断面平均流速与流量

系数满足线性关系，表明不同流量时，流道出口断面的流速受转轮旋转的影响非常小，对进水流道的水力性能及流速场的分析可忽略转轮旋转的影响。

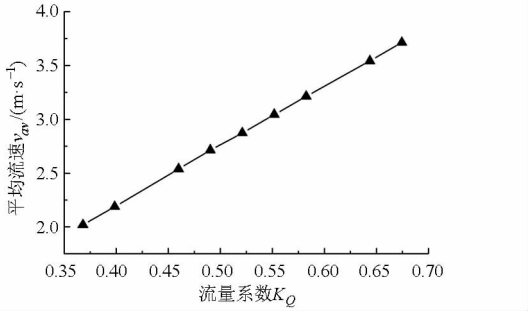

图 8　不同工况时弯肘段进口断面平均流速

Fig. 8　Average velocity of inlet section under different operating conditions

2.3　流道壁面压力分布

肘形进水流道线性渐进段的静压比为 δ_1，弯肘段的静压比为 δ_2，流道的静压比 δ 的计算式为

$$\delta = \frac{p_{out}}{p_{in}} \tag{6}$$

式中　p_{in}——流道段进口面的静压

p_{out}——流道段出口面的静压

不同工况时，肘形进水流道各段的静压比计算结果如图 9 所示。不同工况时，线性渐进段的静压比均高于弯肘段，线性渐进段的平均静压比为 0.943，弯肘段的平均静压比为 0.826。在肘形进水流道线性渐进段，动能与压能的转换率较小，而在弯肘段时，压能与动能的转换率较高，表明在弯肘段时水力损失也较大。

空化分析可根据进水流道壁面上的压力分布进行，采用无量纲压力系数 C_P 对肘形进水流道内壁面上的压力分布进行量化，压力系数 C_P 的计算式为

$$C_P = \frac{p - p_{ref}}{0.5\rho v_0^2} \tag{7}$$

式中　p——流道内壁面上的压力

p_{ref}——参考压力　　ρ——水密度

v_0——与流道进口一段距离的来流速度

选取 3 个特征工况进行肘形进水流道纵断面

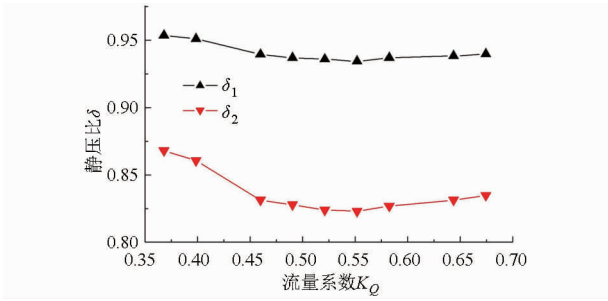

图 9　不同工况时肘形进水流道各段的静压比

Fig. 9　Static pressure ratio of each segment under different operating conditions

上、下壁面的压力系数分析，3 个工况为小流量工况 K_Q = 0.398，高效工况 K_Q = 0.521，大流量工况 K_Q = 0.582，不同工况时流道纵断面的压力系数分布如图 10 所示。在 3 个不同工况时，肘形进水流道纵断面的压力系数变化趋势相同。无量纲距离 l^* 在 0 ~ 0.9 之间时，下壁面的压力系数均低于上壁面，上壁面的压力变化幅值均高于下壁面，当 l^* 大于 0.9 时，下壁面的压力变化幅度小于上壁面。

为分析各工况时进水流道内壁面是否有空化现象出现，引入临界空化压力系数 C_{cav}，临界空化压力系数 C_{cav} 的计算式为

$$C_{cav} = \frac{p_{cav} - p_{ref}}{0.5\rho v_0^2} \tag{8}$$

式中　p_{cav}——临界空化压力

轴流泵装置内流介质为常温 298.15 K 时的清水，依据 SL 140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》中该温度时水的临界空化压力 p_{cav} 为 3 175.39 Pa，并选取小流量工况和大流量工况为分析工况计算临界空化压力系数，在小流量工况（K_Q = 0.398）时临界空化压力对应的临界空化压力系数 C_{cav} 为 −178.42，在大流量工况（K_Q = 0.582）时临界空化压力对应的临界空化压力系数 C_{cav} 为 −150.14，由计算可知，不同工况时肘形进水流道内均未有空化产生。

2.4　流道内部流动特性分析与比较

肘形进水流道为单向收缩性进水流动，线性渐

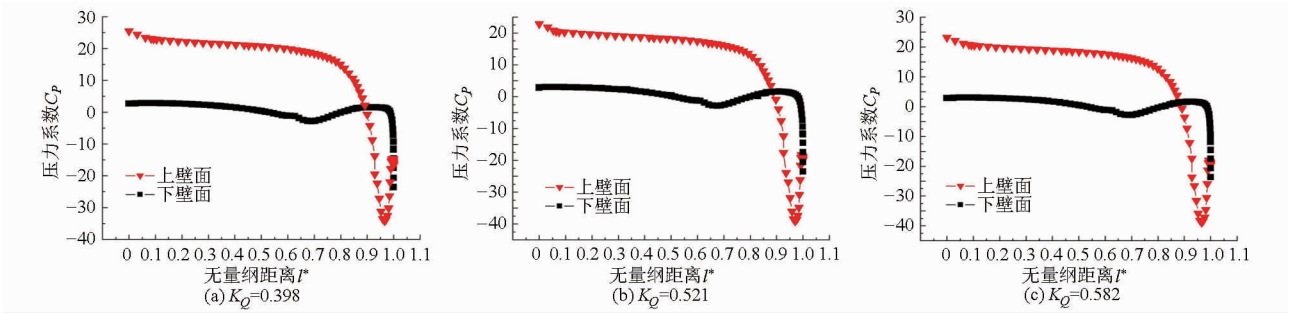

图 10　不同工况时流道纵断面的压力系数分布

Fig. 10　Distribution of pressure coefficient in vertical section for inlet passage under different operating conditions

缩段内各过流断面均匀收缩,水流平顺,压力和速度变化均匀,当水流经线性渐缩段后进入弯肘段,在弯肘段内实现由水平变为铅垂流动,在离心力作用下,弯肘内侧压力低、流速高,弯肘外侧压力高、流速低,主流集中于弯肘段内侧,在弯肘内圆侧易产生流动分离现象。

流动分离会严重影响进水流道的流动性能,进水流道设计过程要尽量避免流动分离现象。流道壁面上发生流动分离时,涡旋往往也相伴而生,流动分离越严重的区域涡旋往往也越明显。为分析该肘形进水流道内部流动分离的情况,以纵断面为例,3 个特征工况时肘形进水流道纵断面的流线如图 11 所示,3 个工况时在弯肘段出口处水流的流速方向并未全部垂直于转轮进口断面,在小流量工况时水流的偏角较大,这与流道出口速度加权偏流角分析结果相同。不同工况时,肘形进水流道内部流态较好,流线平顺,无漩涡、脱流等不良流态出现,主要因流道弯肘段型线过渡平顺。

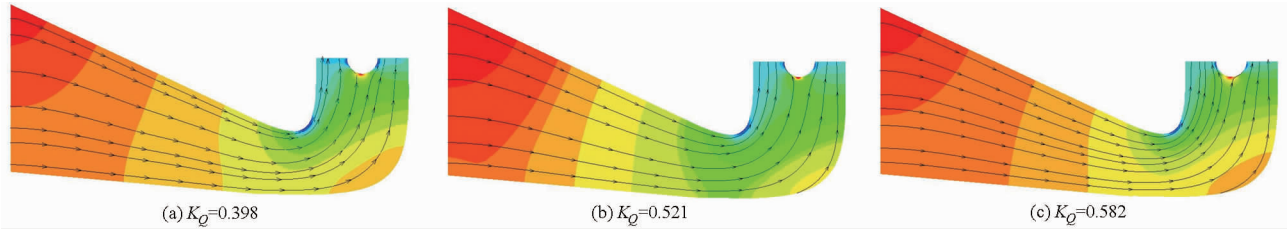

图 11 不同工况时流道纵断面的流线图

Fig. 11 Streamline of vertical section under different operating conditions

3 结论

(1)不同工况时,肘形进水流道各断面的轴向速度分布均匀度差异性较小,流道轴向速度分布均匀度增幅较大的阶段在弯肘段,对于肘形进水流道结构尺寸设计及优化的关键在于弯肘段。肘形进水流道的均化效率为 99.215%,流道的水力效率优异。

(2)引入静态畸变指数评价进水流道出口流场水流稳定性及均匀性,在高效工况范围内进水流道出口流场水流稳定性及均匀性较好,在大流量工况时进水流道出口流场水流稳定性及均匀性较差。

(3)在肘形进水流道线性渐进段,动能与压能的转换率较小,而在弯肘段时,压能与动能的转换率较高,弯肘段占肘形进水流道的水力损失较大。不同工况时流道纵断面的压力系数变化趋势相同,无量纲距离 l^* 在 0 ~ 0.9 时,下壁面的压力系数低于上壁面,上壁面的压力变化幅值高于下壁面,不同工况时肘形进水流道未有空化产生。

参 考 文 献

1 刘厚林,周孝华,王凯,等. 泵站装置蜗形进水池流态与水力性能分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2013,41(11):12 - 16.
Liu Houlin, Zhou Xiaohua, Wang Kai, et al. Analyzing flow patterns and hydraulic performance of volute intake sump for pump station[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(11): 12 - 16. (in Chinese)

2 常景彩,王志强,李兴平,等. 大型泵站新型钟形进水流道流动特性的研究[J]. 水力发电学报,2011,30(1):165 - 169,179.
Chang Jingcai, Wang Zhiqiang, Li Xingping, 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, 179. (in Chinese)

3 Wang Zhengwei, Peng Guangjie, Zhou Lingjiu, et al. Hydraulic performance of a large slanted axial-flow pump[J]. Engineering Computations, 2010, 27(2): 243 - 256.

4 杨帆,刘超,汤方平,等. 斜轴伸泵装置水动力数值计算与模型试验[J]. 机械工程学报,2012,48(18):152 - 159.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Numerical simulation on the hydraulic performance and model test of slanted axial pumping system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 152 - 159. (in Chinese)

5 黄健勇,张飞珍,张浩,等. 斜式轴流泵装置进水流道的正交优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(9):741 - 746.
Huang Jianyong, Zhang Feizhen, Zhang Hao, et al. Design optimization of inlet conduit in slanted axial-flow pump installation by orthogonal array experiment[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(9): 741 - 746. (in Chinese)

6 陈松山,颜红勤,周正富,等. 泵站前置竖井进水流道三维湍流数值模拟与模型试验[J]. 农业工程学报,2014,30(2):63 - 71.
Chen Songshan, Yan Hongqin, Zhou Zhengfu, et al. Three-dimensional turbulent numerical simulation and model test of front-shaft tubular inlet conduit of pumping station[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 63 - 71. (in Chinese)

7 杨帆,刘超,汤方平,等. 竖井型线演变及对泵装置水力性能的影响分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22(1):129 – 138.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Shaft shape evolution and analysis of its effect on the pumping system hydraulic performance[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(1): 129 – 138. (in Chinese)

8 Matahel Ansar, Tatsuaki Nakato. Experimental study of 3D pump-intake flows with and without cross flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(10): 825 – 834.

9 欧鸣雄,施卫东,田飞,等. 立式循环泵进水流道的内部流场研究[J]. 农业机械学报,2013,44(3):55 – 58,63.
Ou Mingxiong, Shi Weidong, Tian Fei, et al. Flow field analysis of inlet sump in vertical circulation pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 55 – 58, 63. (in Chinese)

10 陈晓强,郑源,曹婷,等. 出口段长度及弯肘段半径对肘形进水流道水力特性的影响[J]. 水电能源科学,2013,31(12): 217 – 220.
Chen Xiaoqiang, Zheng Yuan, Cao Ting, et al. Influence of outlet section length and elbow section's radius on hydraulic characteristics of elbow inlet conduit[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 217 – 220. (in Chinese)

11 Zheng Yifan, Werth David. Optimize pump intake design with formed suction inlets[C]// Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008, 2008.

12 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)

13 Bing Hao, Cao Shuliang. Experimental study of the influence of flow passage subtle variation on mixed-flow pump performance [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 615 – 621.

14 燕浩,刘梅清,梁兴,等. 进水均匀性对大型轴流泵装置空化特性的影响[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2014, 42(10):108 – 112,118.
Yan Hao, Liu Meiqing, Liang Xing, et al. Influence on cavitation characteristics of a large axial-flow pumping unit by uniformity of conduit flow[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(10): 108 – 112, 118. (in Chinese)

15 Lu Weigang, Dong Lei, Wang Zhaofei, et al. Cross influence of discharge and circulation on head loss of conduit of pump system with low head[J]. Applied Mathematics and Mechanics: English Edition, 2012, 33(12): 1533 – 1544.

16 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(9):74 – 78.
Liu Chao, Jin Yan. Numerical simulation on three dimensional flow in two-way reversible pumping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 74 – 78. (in Chinese)

17 Shi Weidong, Zhang Desheng, Guan Xingfan, et al. Numerical and experimental investigation of high-efficiency axial-flow pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1): 38 – 44.

18 Zhan Jiemin, Wang Bencheng, Yu Linghui. Numerical investigation of flow patterns in different pump intake systems[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2012, 24(6): 873 – 882.

19 王玉川,谭磊,曹树良,等. 离心泵叶轮区瞬态流动及压力脉动特性[J]. 机械工程学报,2014,50(10):163 – 169.
Wang Yuchuan, Tan Lei, Cao Shuliang, et al. Characteristics of transient flow and pressure fluctuation in impeller for centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(10): 163 – 169. (in Chinese)

20 唐学林,黄微,王福军,等. 灯泡式贯流泵空化流的数值研究和性能预测[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(3):185 – 189,199.
Tang Xuelin, Huang Wei, Wang Fujun, et al. Numerical investigation of cavitating flows in bulb tubular pump and its performance prediction[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 185 – 189, 199. (in Chinese)

21 杨帆,刘超,汤方平,等. 悬空高对泵装置流道内流特性的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(2):40 – 45.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Effect of bottom clearance on flow characteristics of pumping system by CFD and PIV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(2):40 – 45. (in Chinese)