

# 辐条控制技术对竖井贯流泵马鞍区水力特性影响的数值模拟

刘晨钰,张睿,徐辉

(河海大学农业工程学院,江苏南京 210098)

**摘要:**基于非定常雷诺时均(URANS)方法,采用曲率修正的SST  $k-\omega$  湍流模型,对竖井贯流泵内部流场进行非定常计算,研究辐条控制技术对不同工况下竖井贯流泵水力性能以及水泵叶轮进口流场和压力脉动特性的影响。结果表明:在设计工况下,辐条控制技术对竖井贯流泵的水力性能和叶轮进口流场、压力脉动特性的影响不大;在马鞍区工况下,竖井贯流泵叶轮前进水流道的轴向速度降低,速度环量增大,并随着流量减小而产生大范围回旋流,造成进水流道堵塞,引起低频压力脉动幅值增大;辐条控制技术可有效抑制回旋流的强度,提高叶轮入流的均匀度,降低压力脉动幅值,有效改善竖井贯流泵马鞍区工况的水力性能。

**关键词:**竖井贯流泵;马鞍区;辐条控制技术;水力特性;数值模拟

**中图分类号:**TV136<sup>+</sup>.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2020)02-0023-06

**Numerical simulation of influence of groove control technique on saddle zone hydraulic characteristics for a shaft tubular pump**//LIU Chenyu, ZHANG Rui, XU Hui (College of Agriculture Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To investigate the hydraulic characteristics of a shaft tubular pump, the flow field and the pressure fluctuations at the impeller inlet, numerical simulation based on URANS method and a curvature corrected SST  $k-\omega$  turbulence model was used to simulate the unsteady internal flow field in a shaft tubular pump with and without the groove control technique. The results show that the groove control technique has little effect on the pump performance, the flow field and the pressure fluctuations under the design conditions. When the flow rate decreases to the saddle area, the axial velocity in the impeller inlet decreases and the velocity circulation increases. The backflow region is extended with a large scale, which causes blockage of the inlet and low frequency pressure fluctuations. The groove control technique can effectively suppress the backflow vortices, increase the flow velocity uniformity and decrease the amplitudes of pressure fluctuations, resulting in an efficient improvement for the hydraulic characteristic of a shaft tubular pump in the saddle zone working condition.

**Key words:** shaft tubular pump; saddle zone; groove control technique; hydraulic characteristic; numerical simulation

竖井贯流泵作为一种低扬程泵,与其他泵型相比具有流量大、效率高的特点,在城市排涝工程中发挥重要的作用<sup>[1]</sup>。但竖井贯流泵在小流量工况运行时会出现扬程骤降的现象,使流量-扬程曲线形成马鞍区,此时泵内流态紊乱,对机组的安全稳定运行造成严重影响<sup>[2]</sup>。

目前国内外学者采用数值模拟、试验研究等方法对低扬程、大流量泵站马鞍区运行工况下水泵内部流动特性进行了大量的研究。郑源等<sup>[3,4]</sup>发现轴流泵在50%~65%设计流量区域存在运行不稳定马鞍区,此时在转轮进出口均存在大范围的回流和

旋涡,引起泵装置无法稳定运行。杨华等<sup>[5]</sup>采用PIV技术对轴流泵叶轮进口轴面流场进行了二维流速测量,发现小流量工况下,叶轮进口靠近壁面处存在明显回流,且回流区域面积随流量的减小而增大,同时叶轮进口轴面内的湍流强度也随着流量的减小而增大,造成水泵效率降低。何乃昌等<sup>[6]</sup>对轴流泵马鞍区工况的压力脉动进行了试验测量,发现小流量工况下轴流泵叶轮进口处压力脉动幅值明显高于设计工况下,且伴随大量低频信号的出现,压力脉动频率成分较为复杂。为抑制小流量工况水泵内流态的不稳定性,Kurokawa<sup>[7]</sup>参照压缩机中扩大其稳定

运行工况范围的“机匣”原理,提出了“J-groove”的沟槽控制技术来改善马鞍区的水力性能。杨帆等<sup>[8-9]</sup>采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型研究贯流泵进口区流场的非定常特性,并分析了进出水流道水力性能受转速的影响规律。张睿等<sup>[10-11]</sup>基于 URANS 方法,采用滤波器湍流模型对基于辐条流动控制技术的轴流泵进行数值计算,研究表明辐条流动技术能减弱叶轮进口前的预旋,提高入流均匀性,同时降低了强烈的低频压力脉动,改善轴流泵的水力性能。冯建军等<sup>[12]</sup>采用进口段内壁轴向开槽的方法,有效提升了小流量工况下轴流泵的扬程,并发现沟槽数目越多,槽长越长,消除驼峰的能力越好。杨华等<sup>[13]</sup>研究了叶轮进口挡板对轴流泵非稳定工况性能的影响,结果表明挡板能有效抑制小流量工况水泵进口处的回流,并阻断其连续性,有效提高水泵扬程,挡板与叶轮进口的距离是影响小流量工况下水泵性能的主要因素。吴贤芳等<sup>[14]</sup>研究了不同叶片安放角对轴流泵马鞍区工况下能量特性的影响,结果表明随着叶片安放角的增大,轴流泵马鞍区的绝对位置逐渐向右上方偏移,而随着叶片安放角的减小,扬程逐渐增大,马鞍区驼峰特性有所改善。

辐条控制在轴流泵中的应用效果得到了初步的研究,但是目前关于其在竖井贯流泵中的应用研究鲜有报道。本文采用计算流体动力学(CFD)方法,探究辐条控制技术对竖井贯流泵水力性能及内部流动特性的影响规律,分析辐条控制技术对马鞍区工况下竖井贯流泵装置进水流态的改善效果,以期对竖井贯流泵的优化设计提供参考。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 计算模型与网格划分

竖井贯流泵的设计参数如下:叶轮转速  $n = 1\,248\text{ r/min}$ ,设计流量  $Q_{\text{Bep}} = 0.338\text{ m}^3/\text{s}$ ,设计扬程  $H_{\text{Bep}} = 4.78\text{ m}$ ,效率  $\eta_{\text{Bep}} = 77.9\%$ 。泵的主要结构参数如下:叶轮直径  $D = 300\text{ mm}$ ,叶顶间隙为  $0.25\text{ mm}$ ,轮毂比为  $0.45$ ,叶轮叶片数与配套导叶片数分别为  $4$  片和  $6$  片。数值模拟的计算区域包括进水流道、叶轮、导叶和出水流道,如图 1(a) 所示。在叶轮进

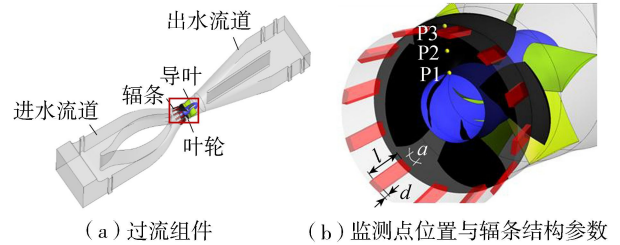


图1 贯流泵装置物理模型

口前的进水流道内壁上设置辐条,3 种不同辐条方案的结构尺寸参数取值见表 1。为便于后续进行压力脉动分析,沿叶轮进口截面从轮毂向轮缘处设置 3 个监测点(图 1(b)),其中 P1 靠近轮毂处,P2 位于半叶高位置,P3 接近轮缘处。

表 1 3 种辐条方案参数

| 辐条方案 | 辐条个数 | 分布角度<br>$\alpha/(\text{^\circ})$ | 长度<br>$l/\text{mm}$ | 厚度<br>$d/\text{mm}$ |
|------|------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| A    | 12   | 15                               | $0.3D$              | $0.03D$             |
| B    | 12   | 15                               | $0.3D$              | $0.02D$             |
| C    | 12   | 15                               | $0.2D$              | $0.03D$             |

为了保证网格具有较好的正交性和较高的质量,叶轮和导叶体区域分别建立其相应的结构化网格(图 2(a) 和图 2(b)),其中叶轮区域网格数为  $1\,725\,276$ ,导叶体区域网格数为  $927\,360$ 。对于进水流道采用自适应性较好的非结构网格进行划分,如图 2(c) 所示。经网格无关性分析,最终计算模型的网格数量为  $4\,273\,947$ 。

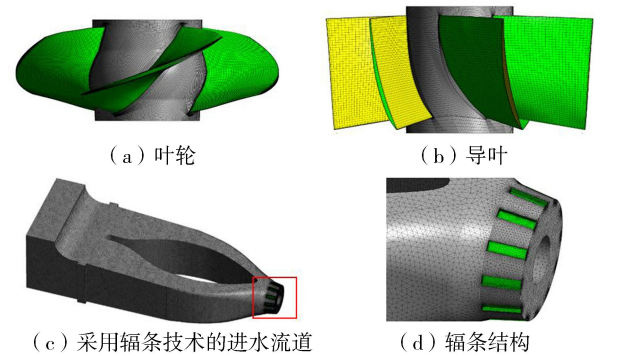


图 2 计算网格划分

### 1.2 计算方法与边界条件

采用 URANS 方法对竖井贯流泵模型内部流场进行数值求解,考虑贯流泵内部具有强烈的旋转曲率效应,湍流模型采用了带有旋转修正函数  $f_{\text{rot}}$  的 SST  $k-\omega$  模型<sup>[15-16]</sup>:

$$f_{\text{rot}} = (1 + c_{r1}) \frac{2r^*}{1 + r^*} [1 - c_{r3} \tan^{-1}(c_{r2} \tilde{r})] - c_{r1} \tag{1}$$

其中

$$r^* = \frac{S}{\Omega}$$

$$\tilde{r} = 2\Omega_{ik}S_{jk} \left[ \frac{dS_{ij}}{dt} + (\varepsilon_{in}S_{jn} + \varepsilon_{jn}S_{in})\Omega_{rot} \right] \frac{1}{\Omega f^3}$$

$$S^2 = 2S_{ij}S_{ji}$$

$$\Omega^2 = 2\Omega_{ij}\Omega_{ji}$$

$$F^2 = \max(S^2, 0.09w^2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + 2\varepsilon_{ji}\Omega_{rot} \right]$$

式中: $d\mathbf{S}_{ij}/dt$  为应变率张量的拉格朗日微分形式; $\mathbf{S}$  为应变率张量; $\mathbf{\Omega}$  为旋转率张量; $w$  为湍动频率; $\varepsilon$  为置换符号; $\mathbf{\Omega}_{rot}$  为系统旋转产生的旋转率张量; $r^*$ 、 $\tilde{r}$  为与旋转率及应变率张量有关的参数; $u$  为流体微团速度; $t$  为时间;经验常数  $c_{r1}=1$ 、 $c_{r2}=2$ 、 $c_{r3}=1$ 。

边界条件如下:进口给定流量,出口采用自由出流边界条件,将过流部件边壁设置为无滑移壁面。在非定常计算中,以定常计算的结果作为初始流场,时间步长取为  $2.671\times10^{-4}$  s,对应叶轮旋转  $2^\circ$ ,计算总时间为 15 个叶轮旋转周期,并选取后 5 个旋转周期的结果进行分析。

### 1.3 数值计算的可靠性验证

为了验证本文数值模拟方法的可靠性,选取初始方案(未设置辐条控制技术)的竖井贯流泵计算模型进行数值计算,得到设计工况点的计算扬程为 4.63 m,计算效率为 77.9%,可见竖井贯流泵扬程的数值模拟结果与实际值误差小于 3%,模拟的效率值与实际值相等,说明采用的数值模拟方法具有较好的计算准确性。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 辐条控制技术对竖井贯流泵水力性能的影响

为了探究辐条控制技术对竖井贯流泵马鞍区工况下水力性能的改善作用,选取流量  $Q=1.00Q_{Bep}$ 、 $0.80Q_{Bep}$ 、 $0.60Q_{Bep}$ 、 $0.59Q_{Bep}$ 、 $0.57Q_{Bep}$ 、 $0.52Q_{Bep}$ 、 $0.47Q_{Bep}$  共 7 个工况点进行数值模拟计算,得到不同工况下的扬程曲线如图 3 所示。

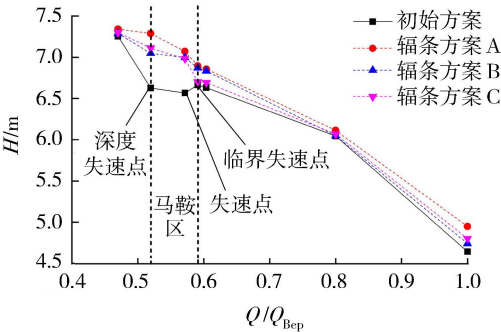


图 3 不同方案贯流泵装置的扬程曲线

由图 3 可知,初始方案的竖井贯流泵装置的扬程  $H$  随着流量的减小不断增大,当流量降低至临界失速工况( $Q=0.59Q_{Bep}$ )时,随着流量的减小,扬程突然下降 6%,在小流量工况下出现明显的马鞍区,此时竖井贯流泵发生失速,内部流动变得十分紊乱,所以也将马鞍区称为失速工况区,范围为  $0.52Q_{Bep} \sim 0.59Q_{Bep}$ 。采用添加辐条的方案后,随着流量降低,泵装置的扬程曲线随着流量的减小呈单调递增的趋势,马鞍区得到明显抑制。与辐条方案 B、C 相比,

辐条方案 A 的改善效果最明显,与初始方案相比,辐条方案 A 在失速工况( $Q=0.57Q_{Bep}$ )与深度失速工况( $Q=0.52Q_{Bep}$ )下扬程分别提升了 6% 和 10%。此外,在额定流量工况点,辐条方案 A 的水泵扬程相比初始方案增加了 6.5%,也优于辐条方案 B、C。由此可见,在叶轮进口前的进水流道壁面上设置辐条能改善竖井贯流泵在小流量工况下的水力性能,有效抑制马鞍区的形成。下面将辐条方案 A 作为改进方案,进一步对初始方案和改进方案的叶轮进口处的流场及压力脉动特性进行分析。

### 2.2 辐条控制技术对叶轮进口流场的影响

为了研究辐条控制技术对叶轮进口流场的影响,对典型流量工况下两种泵装置方案在叶轮进口处轴向速度和圆周速度环量进行了计算,结果见图 4 和图 5。其中, $R^*=(R-R_h)/(R_l-R_h)$ ,  $R^*$  为径向位置的相对坐标,  $R$  为该截面上任意一点处半径,  $R_l$ 、 $R_h$  分别为轮缘半径和轮毂半径; $v_m$  为截面上  $R^*$  对应的平均轴向速度; $u_{Bep}$  为  $Q=1.00Q_{Bep}$  工况下叶轮进口截面的平均轴向速度; $\Gamma^*=2\Gamma/(\pi\omega D^2)$ ,  $\Gamma$  为截面上  $R^*$  对应的速度环量, $\omega$  为叶轮旋转角速度。

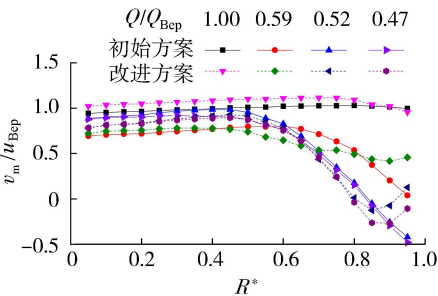


图 4 叶轮进口截面轴向速度分布

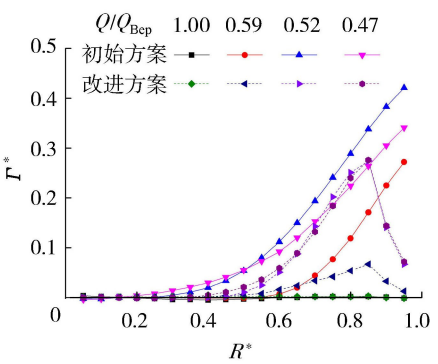


图 5 叶轮进口截面圆周速度环量分布

由图 4 可知,在最优工况附近,由于此时泵装置内部流动较为稳定,叶轮进口处的轴向速度分布整体较为均匀,改进方案的轴向速度略微大于初始方案,在轮缘处稍有下降且低于初始方案。随着运行流量的不断减小,贯流泵在叶轮进口处的轴向速度平均值随之减小,当进入临界失速工况( $Q=0.59Q_{Bep}$ )时,竖井贯流泵内部靠近轮缘处初始方案



的轴向速度出现负值,改进方案的轴向速度仍保持稳定,表明辐条对轮缘处的回流有一定的抑制作用。当流量继续减小到深度失速点( $Q=0.52Q_{\text{Bep}}$ )时,初始方案叶轮进口截面上的轴向速度分布严重不均,随 $R^*$ 的不断增大,轴向速度先增大后减小并产生负值,此时轮缘处产生回流,而改进方案的轴向速度在轮缘处有回升趋势,不稳定流态下产生的回流现象得到抑制,说明采用辐条控制技术能有效减小马鞍区工况时水泵叶轮轮缘前的回流区域面积,提升叶轮进口主流的轴向速度。

如图5所示,叶轮进口截面圆周速度环量在不同流量工况下有较大差异。对于初始方案,当处于最优工况时,叶轮进口处速度环量沿径向均匀分布且趋于零,说明此时竖井贯流泵在叶轮进口截面处主流无径向偏移,水流均沿轴向进入叶轮室,进水条件好;当运行流量降低时,主流向轮缘处径向移动,导致轮缘处流速加快,圆周速度环量从轮毂到轮缘呈现单调上升趋势。改进方案在最优工况时与初始方案无明显区别,但在失速工况区,辐条有效减弱主流的径向偏移,使轮缘处的圆周速度环量有效降低,减弱竖井贯流泵叶轮进口处水流的旋转流动。

为了进一步研究辐条控制技术对竖井贯流泵装置在小流量工况下内部涡量结构的影响,本文引入正则化螺旋度 $H_n^{[17]}$ 来描述涡量,具体表达式为

$$H_n = \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{Y}}{|\mathbf{u}| |\mathbf{Y}|} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$ 是速度矢量; $\mathbf{Y}$ 是涡量矢量,为速度矢量的旋度。

如式(2)所示,螺旋度 $H_n$ 的取值范围在 $[-1,1]$ 之间,是速度矢量与涡量矢量(方向按右手螺旋法则判定)夹角的余弦值。当 $H_n$ 值为正,说明涡旋方向为逆时针方向,反之则为顺时针方向,且 $H_n$ 的绝对值越接近1,表明此处的旋涡越密集<sup>[18]</sup>。

由图6(a)可以看出,在深度失速工况( $Q=0.52Q_{\text{Bep}}$ )下,初始方案进水流道内部流场的螺旋度 $H_n$ 分布严重不均,存在明显的旋涡聚集区,外壁面附近 $H_n$ 值接近-1.0,说明此处产生的涡量矢量的方向与速度矢量方向相反,为反向旋涡区域。如图6(b)所示,与初始方案相比,改进方案靠近进水流道出口处的反向旋涡区域面积明显缩小,且流道内 $H_n$ 值趋于0的面积显著增大,说明受辐条影响的流道在失速工况下的反向旋涡得到抑制,不良流态得到有效改善。

由图6(c)(d)可知,初始方案在叶轮进口截面半叶高与轮缘区域有明显旋涡,参考图4中该工况下的轴向速度分布情况,可知改进方案在轮缘处受

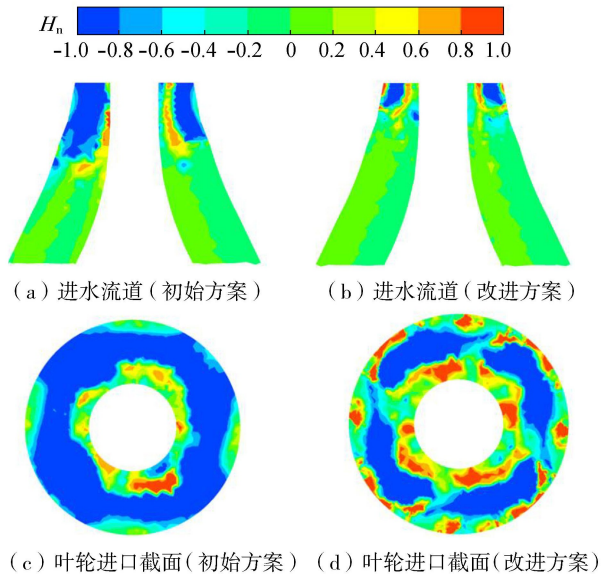


图6  $Q=0.52Q_{\text{Bep}}$  工况下贯流泵的正则化螺旋度 $H_n$ 分布

辐条影响轴向速度由负值转为正值,回流得到抑制,使半叶高附近 $H_n$ 趋于-1.0的范围减小,不稳定旋涡逐渐稳定最终衰减耗散,说明增设辐条能使内外壁附近连续的回流涡受阻并破碎,缩短回流涡的运动距离,使流态呈现轴向速度占主导的正向进流。

### 2.3 辐条控制技术对叶轮进口压力脉动特性的影响

在小流量工况运行时,竖井贯流泵装置内部流场出现的二次回流与旋涡等不良流态,造成压力脉动的剧烈变化,严重影响机组的安稳运行<sup>[19]</sup>。因此本文通过采集监测点处的压力变化情况,分析辐条控制技术对叶轮进口处压力脉动特性的影响。

图7给出了在竖井贯流泵设计工况与深度失速工况下,叶轮进口截面上初始方案与改进方案的压力脉动监测点上的压力脉动频域。其中,无量纲数 $C_p=(P_i-P_0)/P_0$ , $P_i$ 为测点处 $i$ 时刻的绝对压力, $P_0$ 为测点处绝对压力的时均值。

由图7(a)可知, $Q=1.00Q_{\text{Bep}}$ 工况时3个监测点(P1、P2、P3)的压力脉动主频率皆为4倍转频,即叶轮通过频率,说明该工况下叶轮进口处压力脉动主要受叶轮转动影响。将两种方案进行对比可知,设计工况下改进方案的压力脉动幅值受叶轮转动影响更为显著。

对于不稳定的深度失速工况( $Q=0.52Q_{\text{Bep}}$ ),叶轮进口压力脉动的频域分布如图7(b)所示,可知该工况下叶轮进口处压力脉动幅值自轮毂处向轮缘处不断增大,压力脉动主频虽仍为4倍叶轮转频,但由于竖井泵装置叶轮进口前存在回流,导致监测点P2与P3处的低频幅值增高,轮缘处的主频幅值是 $Q=1.00Q_{\text{Bep}}$ 工况下的3.02倍。通过对比两种方案在

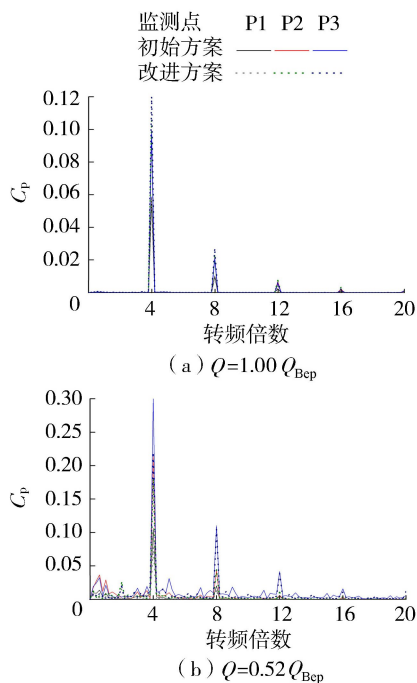


图7 压力脉动频域

P3 监测点的压力脉动幅值可知,改进方案在靠近轮缘处的压力脉动幅值明显低于初始方案,降幅 27.8%,且初始和改进方案的低频压力脉动幅值的峰值所在频率分别为 0.6 和 2 倍转频,改进方案低频区域的压力脉动幅值的峰值相比初始方案下降 38.1%,说明辐条控制技术可有效改善小流量工况下叶轮进口处的压力脉动特性,也进一步验证了辐条控制技术有助于改善竖井贯流泵马鞍区工况下的不稳定流动特性。

### 3 结 论

a. 竖井贯流泵在  $Q = 0.52 Q_{Bep} \sim 0.59 Q_{Bep}$  范围出现扬程突降而形成马鞍区,此时叶轮进口前进水流道的轴向速度降低,速度环量增大,叶轮处水流脱流现象严重,产生大量回旋流,造成流道堵塞,使泵装置无法稳定运行。

b. 辐条控制技术能够改善小流量工况下竖井贯流泵叶轮进口的流动特性,使回流涡受阻破碎,减少回旋流区域面积,改善轴向速度分布,减小速度环量,有效抑制马鞍区的形成。

c. 辐条控制技术能有效降低小流量工况下叶轮进口处的压力脉动幅值和抑制低频压力脉动的产生,在深度失速工况下可使轮缘处压力脉动幅值下降 27.8%,表明辐条控制技术有助于提高竖井贯流泵运行的安全稳定性。

### 参考文献:

[1] 石丽建,刘新泉,汤方平,等.双向竖井贯流泵装置优化

设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(12):85-91. (SHI Lijian, LIU Xinquan, TANG Fangping, et al. Design optimization and experimental analysis of bidirectional shaft tubular pump device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (12):85-91. (in Chinese))

[2] 戴景,戴启璠,梁豪杰,等.后置灯泡贯流泵装置“马鞍”区数值模拟[J].人民长江,2017,48(10):83-88. (DAI Jing, DAI Qifan, LIANG Haojie, et al. Numerical simulation of saddle interval of post-positional bulb tubular pump [J]. Yangtze River, 2017, 48 (10): 83-88. (in Chinese))

[3] 郑源,茅媛婷,周大庆,等.低扬程大流量泵装置马鞍区的流动特性[J].排灌机械工程学报,2011,29(5):369-373. (ZHENG Yuan, MAO Yuanling, ZHOU Daqing, et al. Flow characteristics of low-lift and large flow rate pump installation in saddle zone [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29 (5): 369-373. (in Chinese))

[4] 郑源,陈宇杰,张睿,等.轴流泵失速工况下非定常流动特性研究[J].农业机械学报,2017,48(7):127-135. (ZHENG Yuan, CHEN Yujie, ZHANG Rui, et al. Analysis on unsteady stall flow characteristics of axial-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (7): 127-135. (in Chinese))

[5] 杨华,孙丹丹,汤方平,等.轴流泵非稳定工况下叶轮进口流场试验研究[J].排灌机械工程学报,2011,29(5):406-410. (YANG Hua, SUN Dandan, TANG Fangping, et al. Experiment research on inlet flow field for axial-flow pump at unsteady operating condition [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29 (5): 406-410. (in Chinese))

[6] 何乃昌,谈明高,刘厚林,等.轴流泵马鞍区水力性能与压力脉动测试与分析[J].排灌机械工程学报,2018,36(2):118-123. (HE Naichang, TAN Minggao, LIU Houlin, et al. Test and analysis on pressure pulsation and hydraulic performance of saddle zone in axial flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36 (2): 118-123. (in Chinese))

[7] KUROKAWA J. J-groove technique for suppressing various anomalous flow phenomena in turbomachines [J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2010, 1 (4): 1-13.

[8] 杨帆,高慧,刘超,等.转速对贯流泵装置流道水力参数影响的数值分析[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):551-557. (YANG Fan, GAO Hui, LIU Chao, et al. Numerical analysis of the effect of rotational speed on the hydraulic parameters for flow conduits of shaft extension tubular pumping system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (6): 551-557. (in Chinese))

[9] 杨帆,陈世杰,刘超,等.贯流泵装置出水流道进口区压力及速度场分析[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):360-365. (YANG Fan, CHEN Shijie, LIU Chao, et al. Analysis on the unsteady pressure and velocity in the inlet region of outlet conduit of a tubular

pumping system[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2018,46(4):360-365. (in Chinese))

[10] 张睿,陈红勋.改善失速工况下轴流泵水力性能的研究[J].水力发电学报,2014,33(3):292-298. (ZHANG Rui, CHEN Hongxun. Study on the improvement of hydrodynamic performance of axial-flow pump at stall condition[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2014, 33(3):292-298. (in Chinese))

[11] 张睿.轴流泵失速和空化流动特性及其性能改善研究[D].上海:上海大学,2014.

[12] 冯建军,杨寇帆,朱国俊,等.进口管壁面轴向开槽消除轴流泵特性曲线驼峰[J].农业工程学报,2018,34(13):105-112. (FENG Jianjun, YANG Koufan, ZHU Guojun, et al. Elimination of hump in axial pump characteristic curve by adopting axial grooves on wall of inlet pipe [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 ( 13 ): 105-112. ( in Chinese ))

[13] 杨华,孙丹丹,汤方平,等.叶轮进口挡板改善轴流泵非稳定工况性能研究[J].农业机械学报,2012,43(11):138-141. (YANG Hua, SUN Dandan, TANG Fangping, et al. Research on the performance improvement of axial-flow pump under unstable condition using CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(11):138-141. (in Chinese))

[14] 吴贤芳,陆友东,谈明高,等.叶片安放角对轴流泵马鞍区运行特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):46-53. (WU Xianfang, LU Youdong, TAN Minggao, et al. Effect of vane angle on axial flow pump running characteristics in saddle zone [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 ( 17 ): 46-53. ( in Chinese ))

[15] SPALART P R, SHUR M. On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature[J]. Aerospace Science and Technology, 1997, 1(5):297-302.

[16] 吴晨晖,汤方平,杨帆,等.空化对轴流泵叶轮能量转化特性的影响[J].水利水电科技进展,2019,39(4):49-55. (WU Chenhui, TANG Fangping, YANG Fan, et al. Numerical simulation analysis of cavitation impact on energy conversion characteristics of an axial flow pump impeller [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(4):49-55. (in Chinese))

[17] LEVY Y, DEGANI D, SEGNER A. Graphical visualization of vortical flows by means of helicity [J]. AIAA Journal,1990,28(8):1347-1352.

[18] 王勇,何乃昌,吴贤芳,等.轴流泵马鞍区内流特性分析[J].中国农村水利水电,2017(11):164-167. (WANG Yong, HE Naichang, WU Xianfang, et al. Inner flow characteristics analysis of axial flow pump in the saddle zone [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017 (11):164-167. (in Chinese))

[19] 吴晨晖,汤方平,石丽建,等.导叶相对距离对S形轴伸式贯流泵压力脉动特性的影响[J].水利水电科技进展,2019,39(1):63-69. (WU Chenhui, TANG Fangping, SHI Lijian, et al. Effect of relative position of guide vanes on pressure pulsation characteristics of a S-shaped extension tubular pumping system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 ( 1 ): 63-69. ( in Chinese ))

(收稿日期:2019-06-23 编辑:雷燕)

---

(上接第5页)

[20] 王偲,窦明,张润庆,等.基于“三条红线”约束的滨海区多水源联合调度模型[J].水利水电科技进展,2012,32(6):6-10. (WANG Si, DOU Ming, ZHANG Runqing, et al. Multiple-water source dispatching under constraints of “Three Red Lines”[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(6):6-10. (in Chinese))

[21] 李伟恒.以新思路治水 促可持续发展[N].人民日报,2015-06-11(7).

[22] 柳长顺,杜丽娟,张春玲.灌溉用水确权到户有关问题的思考[J].水利经济,2019,37(4):17-19. (LIU Changshun, DU Lijuan, ZHANG Chunling. Thoughts on issues related to allocation of irrigation water right to farmers [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019,37(4):17-19. (in Chinese))

[23] 王亚杰,张瑞美.水资源资产化管理制度框架及实现路径[J].水利经济,2019,37(4):27-31. (WANG Yajie, ZHANG Ruimei. Institutional framework and implementation path of asset management of water resources [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019,37(4):27-31. (in Chinese))

[24] 刘革,刘波,季叶飞,等.阜阳市农灌区浅层地下水安全开采量评价[J].水利水电科技进展,2015,35(4):70-74. (LIU Ge, LIU Bo, JI Yefei, et al. Research on safe exploitation quantity of shallow groundwater in agricultural irrigation area of Fuyang City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(4):70-74. (in Chinese))

[25] 秦品瑞.济南岩溶水系统数值模拟与保泉供水开采方案[J].水资源保护,2018,34(3):30-36. (QIN Pinrui. Numerical simulation of Ji’nan karst water system and groundwater exploitation scheme of keeping spring spurting and water supply [J]. Water Resources Protection,2018, 34(3):30-36. (in Chinese))

[26] 汪志农,王密侠,尚虎君,等.灌区基层管理体制改革:用水户参与管理[J].水利水电科技进展,2009,29(1):69-73. (WANG Zhinong, WANG Mixia, SHANG Hujun, et al. Basic level management system reform in an irrigation district: water users participate in management [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(1):69-73. (in Chinese))

[27] 彭世彰,刘笑吟,杨士红,等.灌区水综合管理的研究动态与发展方向[J].水利水电科技进展,2013,33(6):1-9. (PENG Shizhang, LIU Xiaoyin, YANG Shihong, et al. Advances in research and development on integrated water management of irrigation district [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(6):1-9. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-28 编辑:雷燕)