

前置导叶对轴流泵马鞍区工况回流涡特性的影响

程 千¹ 冯卫民¹ 周龙才¹ 李 娜²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054)

摘要: 基于 RANS 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型,对带前置导叶轴流泵进行三维非定常计算,研究了“马鞍区”工况进水流道回流涡的特性以及前置导叶对回流涡结构及压力脉动的影响,揭示了前置导叶提高轴流泵“马鞍区”工况扬程的机理。结果表明,小流量工况,轴流泵进水流道内形成大范围螺旋形回流,其与主流的剪切作用导致回流涡的产生,引起大量低频压力脉动,并造成能量损失,致使泵扬程下降,出现马鞍形;增设前置导叶可打破连续的回流涡,降低低频压力脉动幅值,提高轴流泵运行稳定性;同时,前置导叶可提高轴流泵扬程,消除扬程曲线马鞍形,且随着前置导叶位置不断靠近叶轮进口,泵扬程提高幅值不断增大;最后,前置导叶调角可进一步提高轴流泵扬程。

关键词: 轴流泵; 回流涡; 前置导叶; 数值模拟

中图分类号: TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0008-07

Effects of Inlet Guide Vane on Characteristics of Backflow Vortex in Hump Region of Axial Flow Pump

Cheng Qian¹ Feng Weimin¹ Zhou Longcai¹ Li Na²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China
2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China)

Abstract: The hump characteristic is one of the detrimental characteristics of axial flow pump. If the pump runs in the hump region, some unsteady flows will occur, such as stall, backflow, cavitation and so on, which will reduce the pump performance. In order to analyze the hump characteristics, numerical method based on the RANS equations and SST $k-\omega$ turbulence model was used to simulate the instability flows in the axial flow pump with and without inlet guide vane. The hexahedral meshing scheme was used for the whole computational domain, particularly with O-grid around blades. The characteristics of swirling backflow vortex were firstly investigated. The influences of different distances between inlet guide vane and impeller blade on the swirling backflow vortices and the pressure fluctuations were studied. The effects of variable angles of inlet guide vane on pump performance were also discussed. The results showed that the predicted results were in good agreement with the experimental data. When the flow rate decreased, the backflow region was extended upstream. During the development of the backflow, the swirling vortices occurred in the shear layer between the swirling backflow and the main flow, which caused a lot of low frequency pressure fluctuations and consumed energies, leading to pump head decrease and hump characteristic. The swirling backflow vortices can be broken by inlet guide vane, resulting in decrease of amplitudes of low frequency pressure fluctuations and increase of pump head due to less energy consumed by the swirling vortices. Thus, the hump characteristic of axial flow pump can be improved by inlet guide vane. With the reduction of the distance between inlet guide vane and impeller blade, pump head was increased continuously. In addition, pump head was increased at negative angle of

收稿日期: 2015-12-07 修回日期: 2016-01-28

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B03)

作者简介: 程千(1987—),男,博士生,主要从事流体机械与工程方面的研究,E-mail: qiangood526@126.com

通信作者: 冯卫民(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事流体机械与工程方面的研究,E-mail: wmfeng@whu.edu.cn

inlet guide vane, while it decreased at positive angle of inlet guide vane, which was resulted from the prewhirl regulation.

Key words: axial flow pump; backflow vortex; inlet guide vane; numerical simulation

引言

随着流量的减小,轴流泵运行存在“马鞍区”工况,流动极不稳定,出现叶片或导叶片失速、回流、空化等现象,造成扬程曲线出现马鞍形,机组振动噪声加剧,严重影响泵的安全稳定运行。目前,国内外已有大量文献研究了小流量工况机组内不稳定流动^[1-16]。其中,GOLTZ 等^[1]通过试验,研究了失速初生时回流区及叶顶间隙涡的变化。杨华等^[6]通过 PIV 进行轴流泵流场测量,发现小流量工况时回流造成进水流道堵塞,降低泵扬程。LIU 等^[13]通过数值模拟的方法,研究了小流量工况可逆式水轮机水泵工况空化特性。研究表明,轴流泵“马鞍区”的形成主要是由于叶轮进口前存在大范围回流,致使堵塞进水流道。然而回流发展过程中还会导致回流涡的形成^[17-18]。但回流涡的特征及其与轴流泵“马鞍区”的联系还少有研究。

为了改善水泵“马鞍区”工况,很多文献已提出了可行方法^[19-22]。其中,GOLTZ 等^[19]采用轴向凹槽减小了回流的旋转,改善叶轮进口流态。杨华等^[20]和牟介刚等^[21]均在叶轮前部设置挡板,分别消除了轴流泵和离心泵扬程曲线的马鞍形。然而,这些研究主要关注泵外特性改善和回流区定常流动特征。本文采用类似挡板结构的前置导叶改善轴流泵“马鞍区”工况性能,着重分析回流涡的非定常特性及前置导叶对其产生的影响。

1 物理模型及数值计算方法

1.1 几何模型

轴流泵水力模型参数:设计流量 $Q_d = 370.33 \text{ L/s}$,设计扬程 $H_d = 3.3 \text{ m}$,设计效率 $\eta_d = 83.69\%$,转速 $n = 1450 \text{ r/min}$,叶轮轮毂直径 $D_1 = 108 \text{ mm}$,轮缘直径 $D_2 = 300 \text{ mm}$,其中轮缘间隙 $\delta = 0.3 \text{ mm}$,前置导叶叶片数 $Z_i = 4$,叶轮叶片数 $Z_r = 3$,后置导叶叶片数 $Z_s = 5$ 。计算区域如图 1 所示, h 为前置导叶出口边与叶轮叶片进口边的轴向距离。

前置导叶叶片为直板结构,定义导叶片沿轴向时,安放角为 0° ;当导叶片出口倾斜方向与叶轮旋转方向一致时,安放角为正角度,相反为负角度^[23]。本文选取的前置导叶安放角分别为 -10° 、 0° 和 10° 。

计算域网格采用分块画法,叶轮与后置导叶采用 ANSYS TurboGrid 专用工具划分,其余部分采用

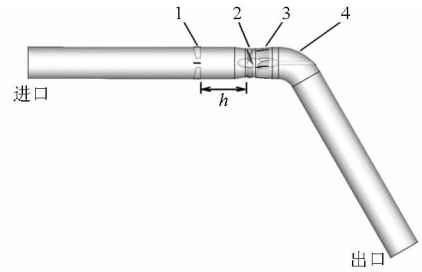


图 1 轴流泵物理模型

Fig. 1 Physical model of axial flow pump

1. 前置导叶 2. 叶轮 3. 后置导叶 4. 弯管

ICEM 软件划分。整个计算域均采用结构化六面体网格,由于叶片高度扭曲,在叶片附近采用“O”形网格环绕。参照文献[23]方法进行网格无关性验证,最终网格单元总数约 2.9×10^6 ,模型网格如图 2 所示。

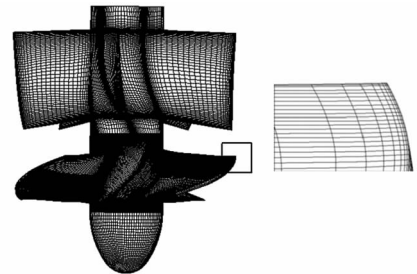


图 2 计算网格

Fig. 2 Computational mesh of model

1.2 计算方法

采用 ANSYS FLUENT 14.5 进行轴流泵内部流动三维非定常计算,模型采用粘性不可压缩雷诺时均 N-S 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型^[24]。基于有限体积法进行控制方程离散,压力-速度耦合求解采用 SIMPLEC 算法。

采用质量流量进口和静压力出口边界,固壁为无滑移边界条件。非定常计算时,以定常计算结果作为初始流场,在动静交界面采用滑移网格技术,时间步长 Δt 为 $3.5 \times 10^{-4} \text{ s}$,即每个时间步叶轮转动 3° 。

1.3 监测点设置

为了研究轴流泵进水流道内流场及压力脉动特性,在流道进口和叶轮进口之间依次设置 4 个监测面和 3 个监测点,如图 3 所示。

1.4 可靠性验证

非定常计算时,经过 4 个叶轮旋转周期后,泵内流场趋于稳定,故从该时刻开始采样,采样时间为

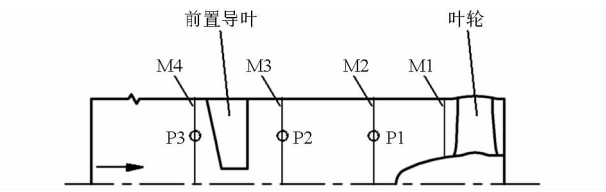


图 3 监测位置示意图

Fig.3 Sketch map of monitoring positions

8 个叶轮旋转周期。以压力采样值的平均值用于计算泵扬程,并与试验数据对比,验证计算方法可靠性,如图 4 所示。采用无量纲形式的流量系数 φ 、扬程系数 ψ 表示泵的运行参数,公式为

$$\varphi = \frac{Q}{nD_2^3} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{gH}{n^2 D_2^2} \tag{2}$$

式中 Q ——流量, m^3/s H ——扬程, m
 g ——重力加速度, m/s^2

由图 4 可知,泵扬程系数计算值与现有试验数据较为接近,说明本文采用的计算方法可靠。

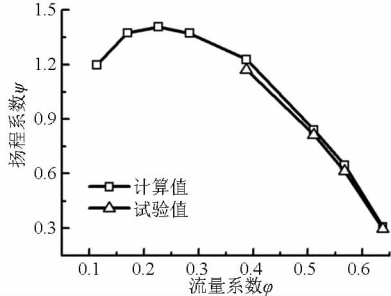


图 4 轴流泵扬程系数计算值与试验值对比

Fig.4 Comparison of simulated and tested head coefficients for axial flow pump

2 结果与分析

2.1 回流涡特性

随着流量的减小,叶轮进口处流体速度的轴面分速度减小,在叶片进口边形成较大冲角,叶片吸力面靠近进口边流线逐渐发生脱流,当流量减小到一定程度时,形成回流。受叶轮旋转作用,靠近轮缘处的流体具有较大的圆周速度分量,故回流呈现螺旋状,且旋转方向与叶轮一致。同时,由于叶顶间隙的存在,叶片压力面和吸力面的压差导致流量泄漏,形成间隙流。流量越小,间隙流的动量越大,对回流的形成有较大的促进作用^[7-9]。由图 4 可知,当 $\varphi < 0.23$ 时,扬程曲线出现马鞍形,轴流泵进入不稳定的“马鞍区”工况,本文主要对 $\varphi = 0.17$ 流量工况进行分析。

图 5(图中 L 表示回流区上游边界与叶轮进口轴向距离)为回流区上游边界与叶轮进口轴向距离

无量纲值随流量系数变化曲线。由图可知,随着流量的减小,轴向距离不断增大,说明回流向上游发展,区域逐渐扩大。

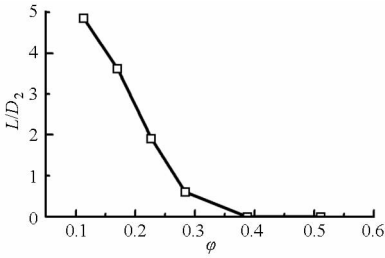


图 5 回流区上游边界与叶轮进口轴向距离无量纲值随流量系数变化曲线

Fig.5 Axial distancebetween upstream edge of backflow and impeller inlet

图 6 为进水流道不同径向位置圆柱截面速度矢量图及流体湍流强度分布图。 $\varphi = 0.17$ 时,回流区域较大,进水流道内的流动存在流道中心区域的轴向入流、流道壁附近的回流以及 2 种流动相互作用下的流动,为了更好地反映进水流道内的流动,所取的 3 个圆柱截面轴向位置也不同。由图可知,在靠近流道壁的圆柱截面位置($d/D_2 = 0.98$, d 表示圆柱截面直径),由于受叶轮旋转影响,回流同时具有较大的圆周速度,方向与叶轮旋转方向一致,流体呈螺旋状回流;在流道中心区域圆柱截面位置($d/D_2 = 0.33$),流体沿轴向入流;位于中间圆柱截面位置($d/D_2 = 0.67$),由于流体粘性的存在,轴向入流受螺旋状回流的粘附作用而获得圆周速度,方向与叶轮旋转方向一致,流体呈螺旋状入流。由湍流强度分布可知,回流在叶片进口外缘附近形成,从叶轮获得能量,流动紊乱,湍流强度大;回流向上游发展并与轴向入流发生剪切运动,在 2 种流动的接触区域湍流强度也较大;随着回流不断向上游运动,湍流强

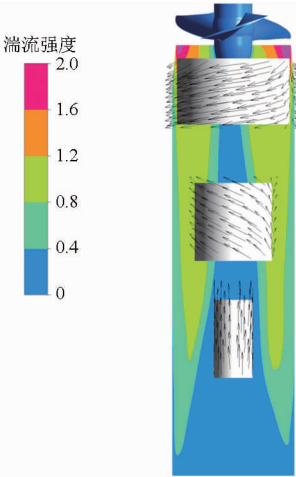


图 6 不同圆柱截面速度矢量及湍流强度分布

Fig.6 Distribution of velocity vectors for different cylindrical surfaces and turbulence intensity

度逐渐减小。

图7为进水流道回流涡结构及不同截面位置动压系数分布图,截面位置为图3中M1~M4,回流涡采用 λ_2 准则判断, λ_2 为对称张量 $\mathbf{G}$ 的第2个实特征值($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$),其中 $\mathbf{G}$ 计算公式为

$$\mathbf{G} = \boldsymbol{\Omega}_{ij}^2 + \mathbf{e}_{ij}^2 \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{\Omega}_{ij}$ ——涡量张量

$\mathbf{e}_{ij}$ ——应变速率张量

其中,下标 i, j 表示维数,这里 $i, j = 1, 2, 3$ 。在复杂流动中涡轴一般是弯曲的,在与涡轴垂直的横截面内,涡心处压力有极小值,因此可用来确定涡轴的位置,若 $\lambda_2 < 0$,则满足涡诱导的断面压力极小的条件^[25]。为了更好地表示回流涡的结构,取 $\lambda_2 = -2500 \text{ s}^{-2}$ 。结合图6、7发现,螺旋形回流与轴向入流产生的剪切作用不仅使湍流强度增大而且导致涡的产生。M1截面中,流道壁附近动压系数较大,区域形状受叶片旋转影响而扭曲,说明回流形成时,从叶轮处获得较多能量,动能较大,且回流径向区域也较大,回流涡集中;由M1截面到M4截面,管壁附近动压系数逐渐减小,厚度逐渐变薄,说明随着回流向上游发展,由于粘性作用,能量逐步耗散,动能减小,回流径向区域也逐渐减小,回流涡主体发生分离,形成多个小涡。

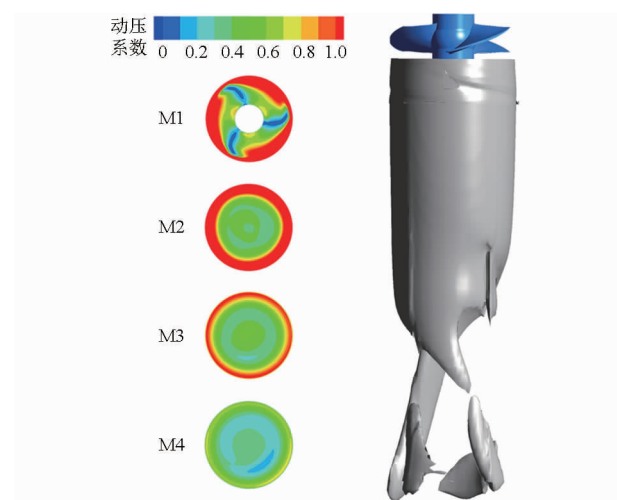


图7 进水流道回流涡结构及动压系数分布图

Fig.7 Structure of backflow vortex and dynamic pressure coefficient distribution at inlet passage

2.2 前置导叶不同位置影响

为提高轴流泵“马鞍区”工况性能,在进水流道增设前置导叶以改善回流涡特性。前置导叶出口边与叶片进口边的轴向距离 h 逐渐减小,分别为 $1.67D_2$ 、 $0.67D_2$ 和 $0.12D_2$ 。图8为前置导叶不同安放位置泵扬程系数曲线图。由图可知, $\varphi \geq 0.4$ 时,水泵运行稳定,扬程系数曲线基本重合,说明增设前

置导叶引起的水力损失较小; $\varphi < 0.4$ 时,回流开始产生并逐渐发展,水泵运行不稳定,扬程曲线出现马鞍形;增设前置导叶后,扬程增加,曲线马鞍形消失,且随着 h 的减小,泵扬程增加幅值不断增大。说明前置导叶可提高小流量工况泵扬程,消除轴流泵“马鞍区”。

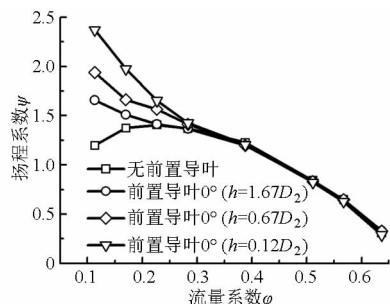


图8 前置导叶不同位置泵扬程系数曲线

Fig.8 Pump head coefficient curves at various locations of inlet guide vane

图9为前置导叶不同安放位置进水流道回流涡结构及不同截面位置动压系数分布图,截面位置及涡判断标准与图7一致。图9a中,前置导叶位于截面M3与M4之间;图9b中,前置导叶位于截面M2与M3之间;图9c中,前置导叶位于截面M1与M2之间。对比图7、9可知,回流到达前置导叶安放位置之前,涡结构和动压系数变化较小;通过前置导叶之后,连续的涡结构受阻隔而破碎,且动压系数大幅下降。前置导叶位靠近叶轮进口时,位于回流形成的始端,能更早地降低回流区的动压系数,减小回流的能量损失,使泵扬程有较大幅度增加。

在进水流道内部设置监测点P1~P3,进行压力脉动频谱分析。为更好地识别不同涡的压力脉动频率信息,对 $\varphi = 0.17$ 流量工况延长采样时间,使采样频率分辨率达到1 Hz,利用快速傅里叶变换(FFT)进行压力脉动频谱分析。采用压力系数表征监测点压力脉动,压力系数公式为

$$C_p = \frac{p - \bar{p}}{0.5\rho U_{tip}^2} \quad (4)$$

式中 p ——监测点压力, Pa

$\bar{p}$ ——采样时间内监测点平均压力, Pa

ρ ——流体密度, kg/m^3

U_{tip} ——叶轮叶顶圆周速度, m/s

采用叶频倍数 f/f_n 表示频率无量纲参数,其中叶片通过频率为

$$f_n = \frac{Z_r n}{60} \quad (5)$$

图10为前置导叶不同位置时监测点P1~P3的压力脉动频域图。由图10a可知,在监测点P1位置,受叶轮转动影响,频率以叶片通过频率为主,且

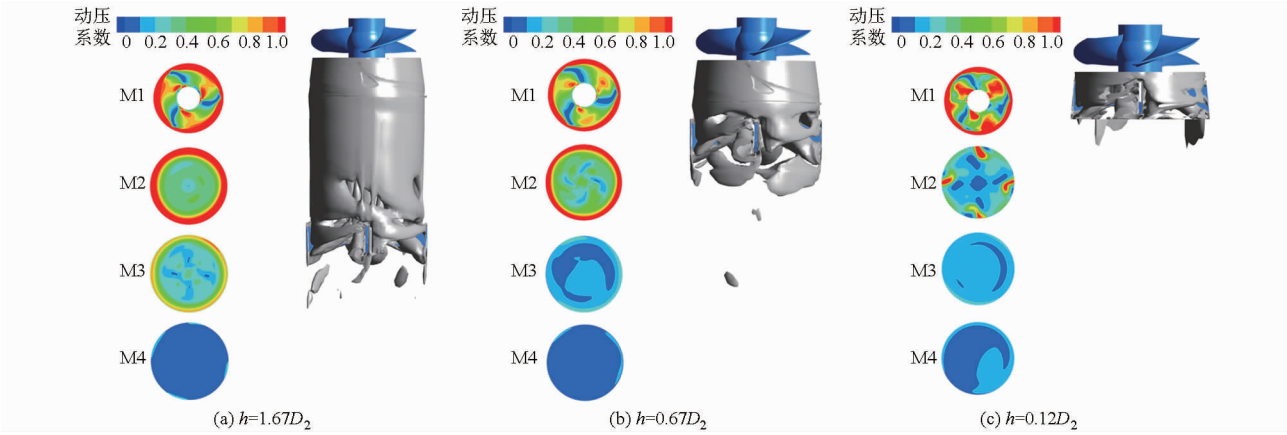


图 9 前置导叶不同位置进水流道回流涡结构及动压系数分布图

Fig. 9 Structures of backflow vortices and dynamic pressure coefficient distributions at inlet passage for various locations of inlet guide vane

出现低频信息;监测点 P2、P3 离叶轮较远,受叶轮转动影响较小,频率以低频信息为主。对比发现,回流向上游发展时,由于回流涡主体的运动和不断分离,压力脉动峰值个数增多,幅值较大并不断变化,从图 7 中也可发现,在监测点 P3 附近,回流涡分离成 4 个小涡,涡的大小和强度不同,与频谱图中压力脉动峰值个数一致。

图 10b 中,与无前置导叶对比,回流涡通过前置导叶后,监测点 P1 位置压力脉动峰值个数减少,幅值略有降低;P2、P3 位置压力脉动峰值个数未增加,幅值略有增加。这是因为回流涡形成时具有较大能量,前置导叶虽然破坏了回流涡的连续性,但回流涡破碎后仍会有涡向上游运动并发展。

图 10c 中的监测点 P1 和图 10d 中的监测点

P2,现有低频压力脉动峰值个数不变,幅值略有变化,但出现更多的低频压力脉动峰值,且其对应频率稍大。图 10c 中监测点 P2、P3 和图 10d 中监测点 P3,所有低频压力脉动幅值大为降低。这是因为,回流涡通过前置导叶时,受阻断发生破碎,形成多个小涡并随主流运动,因此,在前置导叶出口边附近出现更多的低频压力脉动峰值,而在经过前置导叶的上游回流涡基本消失,低频压力脉动幅值大大降低。

图 11(图中 V_c 表示圆周速度, x 表示径向 x 轴正方向坐标值)为前置导叶进口圆周速度无量纲值沿径向变化曲线(前置导叶 $h = 0.12D_2$)。由图可知,无前置导叶时,由进水流道中心位置到外壁,圆周速度幅值逐渐增大,且为负值,说明越靠近流道外壁,

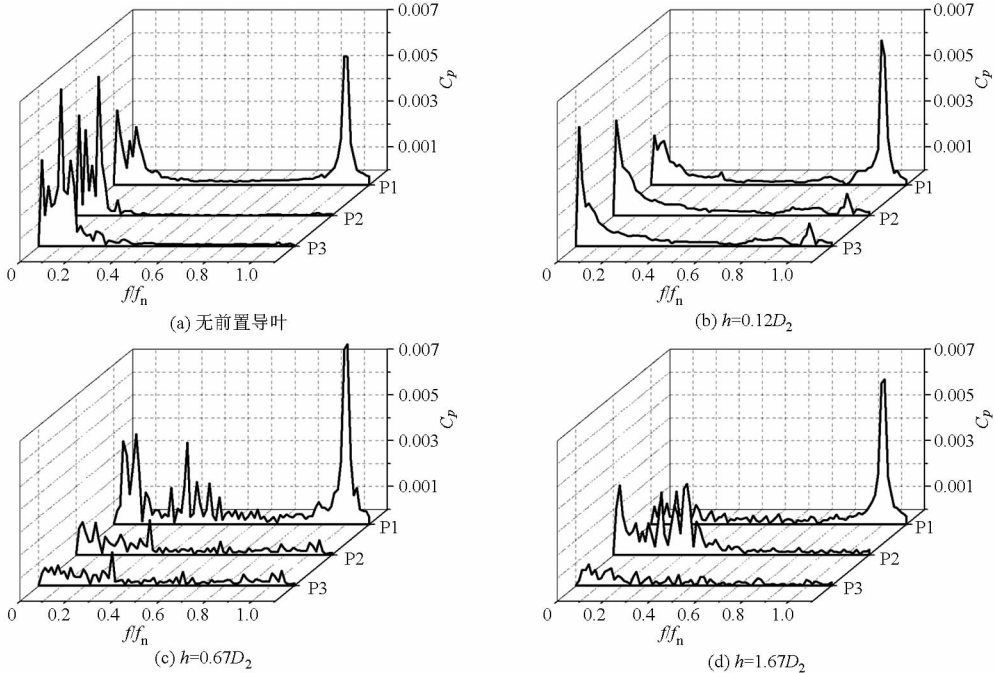


图 10 前置导叶不同位置监测点 P1 ~ P3 压力脉动频域图

Fig. 10 Frequency spectrums of pressure fluctuations at survey points P1 ~ P3 for various locations of inlet guide vane

主流受回流区的影响越大,圆周速度幅值最大为 9.69 m/s,且旋转方向与叶轮一致。增设前置导叶后,径向距离 50% 内圆周速度为零,流体无旋;50% 外旋转流体的圆周速度幅值也减小约 1/3,最大为 6.26 m/s。可见,前置导叶起到了很好的消旋作用。

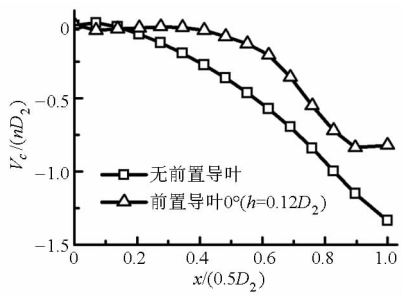


图 11 前置导叶进口圆周速度沿径向分布图

Fig. 11 Radial distributions of circumferential velocity at entrance of inlet guide vane

2.3 前置导叶调角作用

图 12 为前置导叶 $h = 0.12D_2$ 位置,且调角时泵扬程系数曲线,由图可知,前置导叶负角度可使扬程进一步提高,正角度使扬程降低,流量越大扬程变化幅值越大^[23]。当 $\varphi < 0.2$ 时,由于进水流态紊乱,

前置导叶调角失效。

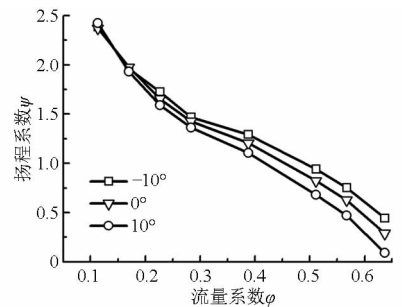


图 12 前置导叶不同安放角泵扬程系数曲线

Fig. 12 Pump head coefficient curves at various angles of inlet guide vane

3 结论

(1)回流区中增设前置导叶可阻断回流区,打破连续的回流涡,降低低频压力脉动幅值,提高轴流泵小流量工况运行稳定性。

(2)前置导叶位置越靠近叶轮进口,回流涡影响范围越小,造成的能量损失越少,扬程曲线马鞍形消失且扬程增幅越大。

(3)前置导叶负角度可进一步提高轴流泵扬程,流量越大扬程增幅越大。

参 考 文 献

1 GOLTZ I, KOSYNA G, STARK U, et al. Stall inception phenomena in a single-stage axial-flow pump [J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Power and Energy, 2003, 217(4): 471 – 479.

2 周佩剑,王福军,姚志峰. 离心泵叶轮在旋转失速条件下压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(10):56 – 61. ZHOU Peijian, WANG Fujun, YAO Zhifeng. Investigation of pressure fluctuation in centrifugal pump impeller under rotating stall conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 56 – 61. (in Chinese)

3 冒杰云,袁寿其,张金凤,等. 低比转数离心泵驼峰工况附近内部流动特性分析[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(4):283 – 289. MAO Jieyun, YUAN Shouqi, ZHANG Jinfeng, et al. Analysis of inner flow characteristics in low specific speed centrifugal pump around hump conditions [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(4): 283 – 289. (in Chinese)

4 肖若富,陶然,刘伟超. 水泵水轮机泵工况驼峰特性形成机理瞬态数值研究[J]. 计算力学学报,2014,31(6):769 – 774. XIAO Ruofu, TAO Ran, LIU Weichao. Numerical study on unstable head-discharge performance in pump-turbine considering the transient rotor-stator interactions [J]. Chinese Journal of Computational Mechanic, 2014, 31(6): 769 – 774. (in Chinese)

5 任芸,吴登昊,刘厚林,等. 离心泵内部不稳定流动的 PIV 测试[J]. 农业机械学报,2015,46(2):46 – 51. REN Yun, WU Denghao, LIU Houlin, et al. PIV experiment on flow instabilities in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 46 – 51. (in Chinese)

6 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)

7 ZHANG D, SHI W, VAN ESCH B P M B, et al. Numerical and experimental investigation of tip leakage vortex trajectory and dynamics in an axial flow pump [J]. Computers & Fluids, 2015, 112: 61 – 71.

8 RINALDO L M, HUIXUAN W, JOSEPH K. The internal structure of the tip leakage vortex within the rotor of an axial waterjet pump [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134(3): 031018 – 031018 – 12.

9 张德胜,施卫东,张华,等. 轴流泵叶轮端壁区流动特性数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(3):73 – 77. ZHANG Desheng, SHI Weidong, ZHANG Hua, et al. Numerical simulation of flow field characteristics in tip clearance region of axial-flow impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 73 – 77. (in Chinese)

10 潘中永,李俊杰,李晓俊,等. 斜流泵不稳定特性及旋转失速研究[J]. 农业机械学报,2012,43(5):64 – 68. PAN Zhongyong, LI Junjie, LI Xiaojun, et al. Performance curve instability and rotating stall [J]. Transactions of the Chinese

- Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 64–68. (in Chinese)
- 11 黎义斌,李仁年,王秀勇,等. 混流泵内部流动不稳定特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(5):384–389.
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical simulation of unstable characteristics in head curve of mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 384–389. (in Chinese)
 - 12 裴吉,王文杰,袁寿其,等. 低比转数离心泵内部非定常流动特性数值预测[J]. 农业机械学报,2014,45(1):79–83.
PEI Ji, WANG Wenjie, YUAN Shouqi, et al. Numerical prediction of inner flow unsteadiness in a low-specific speed centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 79–83. (in Chinese)
 - 13 JINTAO L, SHUHONG L, YULIN W, et al. Numerical investigation of the hump characteristic of a pump-turbine based on an improved cavitation model [J]. Computers & Fluids, 2012, 68: 105–111.
 - 14 施卫东,李通通,张德胜,等. 轴流泵叶轮区域空化特性数值模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(13):88–93.
SHI Weidong, LI Tongtong, ZHANG Desheng, et al. Numerical simulation on cavitating characteristic in impeller of axial-flow pump [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 88–93. (in Chinese)
 - 15 司乔瑞,袁寿其,李晓俊,等. 空化条件下离心泵泵腔内不稳定流动数值分析[J]. 农业机械学报,2014,45(5):84–90.
SI Qiaorui, YUAN Shouqi, LI Xiaojun, et al. Numerical simulation of unsteady cavitation flow in the casing of a centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 84–90. (in Chinese)
 - 16 卢家兴,袁寿其,任旭东,等. 离心泵小流量工况不稳定空化特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(8):54–58.
LU Jiaying, YUAN Shouqi, REN Xudong, et al. Investigation of instabilities of cavitation at low flow rate of centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 54–58. (in Chinese)
 - 17 YAMANISHI N, FUKAO S, QIAO X, et al. LES simulation of backflow vortex structure at the inlet of an inducer [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2007, 129(5): 587–594.
 - 18 YOKOTA K, MITSUDA K, TSUJIMOTO Y, et al. A study of vortex structure in the shear layer between main flow and swirling backflow [J]. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 2004, 47(3): 541–548.
 - 19 GOLTZ I, KOSYNA G, DELGADO A. Eliminating the head instability of an axial-flow pump using axial grooves [J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Power and Energy, 2012, 227(2): 206–215.
 - 20 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)
 - 21 牟介刚,李思,许明远,等. 离心泵锥形吸水室内置隔板对水力性能的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(3):80–84.
MU Jiegang, LI Si, XU Mingyuan, et al. Influence on hydraulic performance of suction chamber with built-in baffles in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 80–84. (in Chinese)
 - 22 JABERG H. Modifying unstable headcurves of swept and unswept pump bladings by means of casing treatment [J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Power and Energy, 2012, 226: 479–488.
 - 23 冯卫民,程千,郭志伟,等. 前置导叶可调式轴流泵低频压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(10):62–67.
FENG Weimin, CHENG Qian, GUO Zhiwei, et al. Characteristics of low frequency pressure fluctuation in axial flow pump with variable inlet guide vane [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 62–67. (in Chinese)
 - 24 MENTER F R. A comparison of some recent eddy-viscosity turbulence models [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1996, 118(3): 514–519.
 - 25 童秉纲,尹协远,朱克勤. 涡运动理论[M]. 2版. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009.

(上接第 232 页)

- 15 高利波,段纲,尹革芬,等. 红外线体温仪在生猪屠宰场体温筛检中的试用效果[J]. 中国畜牧兽医,2010,37(9):235–237.
GAO Libo, DUAN Gang, YIN Gefen, et al. Trial results of infrared thermometer in the application of ante-mortem body temperature screening in the pig slaughterhouse[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2010, 37(9): 235–237. (in Chinese)
- 16 陈柏州. 冷卻梁板空調系統热流场特性之数值模拟分析[D]. 台北:台北科技大学,2012.
CHEN Bozhou. Numerical study of thermal-fluid field of chilled-beam air-conditioning system [D]. Taipei: National Taipei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 17 杨慧杰,郭立波,沈洁,等. 热成像仪在玻璃行业的应用初探[J]. 玻璃,2012,39(5):3–6.
- 18 OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Trans. on SMC, 1979, 9(1): 62–66.
- 19 WIRTHGEN T, ZIPSER S, FRANZE U, et al. Automatic segmentation of veterinary infrared images with the active shape approach[C]//Proceedings of the 17th Scandinavian Conference on Image Analysis, 2011:435–446.