

DOI:10.11918/202502040

# 进口斜槽对轴流推进泵快速启动瞬态特性影响

于升平<sup>1</sup>, 望喻虎<sup>1,2</sup>, 陈泰然<sup>1,2</sup>, 王国玉<sup>1,2</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 重庆创新中心, 重庆 401120)

**摘要:** 为改善轴流推进泵在快速启动条件下的瞬态性能, 解决复杂运行环境下马鞍区扬程下降的问题, 提出一种进口斜槽流动控制方法, 旨在通过优化入流条件提升泵的稳态及瞬态性能。首先, 对轴流推进泵的性能进行数值模拟计算, 并通过试验验证数值计算的准确性。其次, 设计斜槽尺寸, 通过数值计算探究了进口斜槽对轴流推进泵快速启动过程瞬态性能的影响。最后, 通过内部流场分析, 对斜槽改善推进泵瞬态性能的机理进行探究。结果表明, 斜槽有效改善了稳态马鞍区性能, 扬程最高提升 56.5%。根据扬程的演化, 快速启动过程可划分为一次发展区、马鞍区、二次发展区和稳定运行区 4 个阶段。斜槽改善了启动马鞍区扬程下降的现象, 最高提升 27.15%。斜槽上下游的局部低压区诱导了斜槽内部的逆向流动, 与主流混合, 减弱了主流的周向角动量。良好的入流条件改善了泵内的流动分离, 抑制了叶顶阻塞涡, 减弱了动静干涉区域的压力脉动幅值, 提升了快速启动过程的稳定性。

**关键词:** 进口斜槽; 轴流推进泵; 快速启动; 水力性能; 瞬态特性

中图分类号: U664.34

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)04-0182-11

## Influence of inlet inclined grooves on transient characteristics of axial-flow propulsion pumps during rapid start-up

YU Shengping<sup>1</sup>, WANG Yuhu<sup>1,2</sup>, CHEN Tairan<sup>1,2</sup>, WANG Guoyu<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** To improve the transient performance of an axial-flow propulsion pump under rapid start-up conditions and address the drop of head in the saddle region under complex operating environments, this paper proposed a control method for imported inclined groove flow, aiming to enhance the steady-state and transient performance of the pump by optimizing the inflow conditions. Firstly, numerical simulation calculation was conducted on the performance of the axial-flow propulsion pump, and the accuracy of the numerical calculation was verified through experiments. Secondly, the sizes of the inclined groove were designed, and numerical calculations were conducted to investigate the influence of the imported inclined groove on the transient performance of the axial-flow propulsion pump during rapid start-up. Finally, internal flow field analysis was performed to investigate the mechanism of inclined grooves for improving the transient performance of the propulsion pump. The results demonstrate that the inclined groove effectively improves steady-state performance in the saddle zone, achieving a maximum head increase of 56.5%. The rapid start-up process is categorized into four stages based on head evolution: primary development region, saddle region, secondary development region, and stable operation region. The inclined groove improves the drop of head during start-up, with a maximum increase of 27.15%. Localized low-pressure zones in the upstream and downstream of the inclined groove induce reverse flow inside the inclined groove, which is mixed with the main flow to reduce circumferential angular momentum. The optimized inflow conditions improve flow separation, suppress the tip blockage vortex, and reduce pressure fluctuation amplitudes in the rotor-stator interaction zone, thereby enhancing the stability during rapid start-up.

**Keywords:** imported inclined groove; axial-flow propulsion pump; rapid start-up; hydraulic performance; transient characteristic

收稿日期: 2025-02-24; 录用日期: 2025-04-21; 网络首发日期: 2026-01-22

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20260122.1111.002>

基金项目: 北京市科技新星计划(20240484686); 喷水推进技术重点实验室项目(JCKY2024206D001); 多栖平台驱动系统全国重点实验室项目(QDXT-NY-202407-02); 北京理工大学科技创新计划专项项目(2023CX11004)

作者简介: 于升平(1999—), 男, 硕士研究生; 陈泰然(1990—), 男, 教授, 博士生导师; 王国玉(1961—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈泰然, chentairan@bit.edu.cn

喷水推进器作为一种常见的船舶与海洋工程推进装置,具有低噪声、高抗空化性、高功率密度等优点,被广泛应用于水下潜航器推进装置、船舶的推进装置,以及两栖车辆的水上推进装置等<sup>[1-3]</sup>。轴流推进泵是喷水推进器的重要动力转化部件,随着水力装备的发展和应用场景的扩充,偏离设计工况和快速启停工况成为轴流推进泵苛刻的工作条件,这对其在变工况环境中的性能提出了更高的要求<sup>[4]</sup>。但快速启动过程会破坏设计工况的入流条件,造成轴流推进泵性能的下降和不稳定性的提高。因此,研究轴流推进泵快速启动过程的性能变化及其性能改善方法对于提高装备性能和在极端工况下的环境适应性具有重要的工程意义<sup>[5]</sup>。

快速启动过程和变工况运行条件破坏了轴流推进泵设计工况下的入流条件,造成了轴流推进泵紊乱而复杂的内部流场,使得其性能急剧下降。这种异常工作条件使得轴流推进泵的扬程曲线呈现正斜率区域,简称为马鞍区。为了扩展轴流推进泵的高效运行区域,研究其在偏流量工况下的运行特性具有明显的意义。Ran等<sup>[6]</sup>通过试验研究,发现叶轮进口处的流动分离是马鞍区形成的主要原因。Ikuta等<sup>[7]</sup>确定叶轮尾缘轮毂处不稳定流的增加导致了能量损失增大,进一步造成了马鞍区的出现。陈为升<sup>[8]</sup>利用超大涡模拟捕捉了失速工况下的内流特性,发现叶轮内的通道涡和进水管内的回流涡降低了进口来流的主动量,造成了能量损失。Han等<sup>[9]</sup>通过数值模拟与模型试验,发现叶片吸力面上的流动分离和漩涡流动结构尤为严重,阐明了叶片内的异常流动是引起推进泵振动和性能下降的主要原因。

国内外许多研究人员对水力机械在启动过程的瞬态效应进行了相关研究。Zhang等<sup>[10]</sup>通过实验,分析了轴流泵在启动过程瞬态效应发生的阶段。并完成了对不同阶段启动进度的评价和识别。张富毅等<sup>[11]</sup>通过数值模拟发现,轴流式喷水推进泵在快速启动时存在显著的瞬态特性:流量和扬程的响应均滞后于转速稳定,且这种迟滞时间与启动时间密切相关。徐贵颖等<sup>[12]</sup>通过CFD计算了轴流泵不同流量下的瞬态流动特性,结果表明叶轮进口偏流角较大的区域主要集中于叶片前缘,导叶出口偏流角较大的区域集中于尾缘,且随着叶轮的旋转呈现动态变化的趋势。马凌凌<sup>[13]</sup>基于理论推导、数值计算和试验,揭示了混流泵启动过程的内流场变化和瞬态特性,探究了启动加速度对系统的冲击影响,分析了瞬态与准稳态特性之间的差别。Bantelay等<sup>[14]</sup>对涡轮机的瞬态启动过程进行了试验和数值模拟的研

究,结果表明启动初期叶轮前部存在明显的涡流和低压区。

目前,流动控制技术成为抑制流体机械内部流动分离和旋转失速的有力手段,针对水力机械的流动控制技术已经有了一定的发展。流动控制技术分为主动控制和被动控制。被动控制技术由于其简单高效且不需要额外能量消耗的特点而受到广泛的关注<sup>[15]</sup>。自20世纪50年代起,被动流动控制技术便在压气机和风力机等叶轮机械中有了一定的应用<sup>[16]</sup>。近年来,研究人员开始关注流动控制在叶片泵中的应用。赵晨彦等<sup>[17]</sup>研究了不同沟槽结构对卫星轴流涡轮叶尖泄漏流动的影响,阐明了不同的机匣沟槽结构对叶尖泄漏流动都存在一定的抑制能力,但抑制效果有所差距,同时会对效率带来负面影响。黄丛磊等<sup>[18]</sup>探究了进水管不同位置的涡流发生器对流场内流动分离现象的控制效果,结果表明不同位置的涡流发生器控制效果有所差别,安装在分离区前能够较好地抑制流动分离。Kurokawa等<sup>[19]</sup>提出了一种J-Groove槽道流动方法对叶片泵内异常流动现象进行控制,并通过试验的方式验证了其有效性。Mu等<sup>[20]</sup>研究了不同槽型对轴流泵内流场水力性能改善效果,发现槽道形状改善效果有一定的区别。

上述研究表明,流动控制在抑制流动分离、改善内部流态方面有着显著的效果。然而,现有的研究主要集中在对叶片泵稳定运行时流动分离的改善效果,对快速启动中的瞬态流动影响的相关研究较少。因此,本文提出一种进口斜槽装置,并针对轴流推进泵快速启动过程的瞬态性能进行了数值模拟的研究,揭示了进口斜槽对轴流推进泵快速启动的瞬态特性的改善情况。

## 1 数值计算方法与计算域设置

### 1.1 控制方程

本文采用不可压缩的非定常雷诺时均(Reynolds average Navier-Stokes, RANS)方法对多相流动进行模拟,该方法能够较好地表征流体机械内部的流动特征<sup>[21]</sup>。其连续性方程和动量方程分别为:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_1 (1 - \alpha_1)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_1 u_j (1 - \alpha_1))}{\partial x_j} = \dot{m}^+ + \dot{m}^- \quad (3)$$



表1 槽道段尺寸

Tab. 1 Groove section size

槽道参数	轴向长度/ mm	角度/ (°)	宽度/ mm	深度/ mm	数量
原型工况	357	0	0	0	0
斜槽工况	357	10.65	10.72	10.72	60

采用商业软件 CFX 20.2 进行数值仿真计算。如图2所示,轴流推进泵快速启动计算域的入水水域与出水水域的外侧5个面均设置为恒定总压的开放水域(opening)的边界条件,压力给定为253.3125 kPa,内侧面与叶轮、导叶、导水锥、管壁和斜槽均设置为无滑移壁面(wall)。数值计算边界条件给予的压力高于轴流推进泵的必需汽蚀余量要求,以避免运行过程中空化对性能造成影响。叶轮区域设置为旋转域,其余部件为静止域,动静交界面采用瞬态转子-定子模型(transient rotor stator)。轴流泵的快速启动过程伴随着强烈的冲击,平滑的启动曲线有助于优化启动过程的冲击效应。因此,本文快速启动的转速曲线设计为

$$n = \begin{cases} \frac{0.01 n_{\text{rated}}}{0.01 + 2.72^{(-14/T_0)t}}, & t < T_0 \\ n_{\text{rated}}, & t \geq T_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $n_{\text{rated}}$ 为额定转速,1450 r/min; $T_0$ 为快速启动时间,0.5 s; $t$ 为启动经历的时间。瞬态计算的时间步长为额定转速下叶轮转过 $1^\circ$ 经历的时间,内循环的最大步数为50,收敛标准为 $10^{-4}$ 。

稳态计算域在瞬态计算域的基础上去除了入水水域与出水水域,采用入水管进口面压力入口和出水管出口面流量出口的边界条件,为了防止空化的影响,压力入口设定为1013.25 kPa,斜槽段与叶轮区域、叶轮区域,以及导叶区域的动静交界面采用Frozen Rotor的边界,收敛标准为 $10^{-5}$ ,其他边界条件与瞬态启动模型相同。

### 1.3 轴流推进泵试验台

轴流推进泵性能测试试验台如图3所示,试验台为闭式试验台,主要由泵、驱动电机、水箱、压力变送器、流量计、真空泵、电动球阀,以及可替换进水管路组成。推进泵轮缘与电机转子固连,采用防水措施防止泄漏,通过电磁阀开度调控管路流量。泵的前后以均压环的形式安装两个压力变送器,测量范围为0~1.6 MPa,误差小于0.2%,流量计测量范围为0~4.8 m<sup>3</sup>/s,测量误差小于0.5%。试验台的压力由安装在水箱顶部的空压机调节,确保泵运行时入口压力稳定,防止空化的发生。

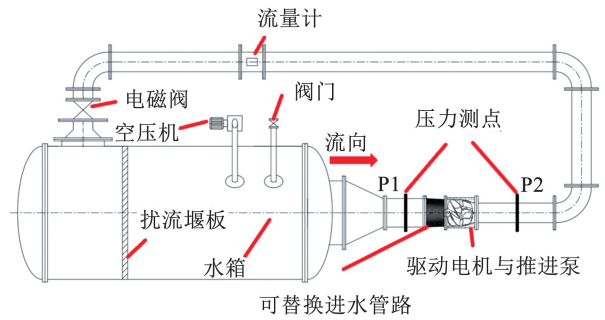


图3 轴流推进泵性能测试试验台示意

Fig. 3 Axial-flow propulsion pump performance test bench

### 1.4 网格划分与数值方法验证

计算域网格划分采用商业软件 TurboGrid 和 ICEM 进行。如图4所示,所有流体域均划分为结构化网格。为保证计算的精度,对叶轮及导叶的进出口、叶片表面、轮毂、轮缘部分、斜槽段的外壁,以及入、出水管的管壁添加边界层并进行局部加密。入水水域与入水管的网格数为69万,斜槽段网格数为156万,叶轮段网格数为242万,导叶段网格数为202万,出水管和出水水域的网格数为59万。为保证计算满足湍流模型的需求,控制叶片表面网格的最大 $y^+$ 在50以下,满足计算精度要求<sup>[26]</sup>。

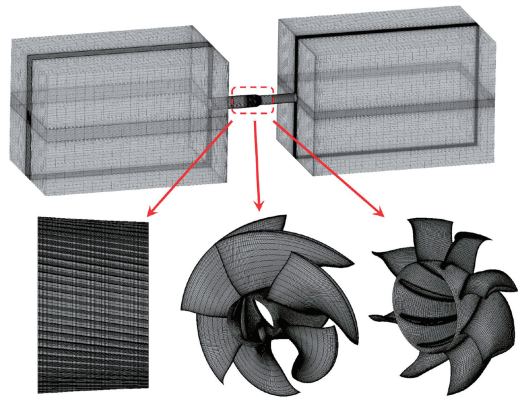


图4 计算域网格

Fig. 4 Computational domain mesh

针对该轴流推进泵模型进行了计算方法验证:Zhao等<sup>[27]</sup>使用Richardson外推法,划分3组不同的网格,网格细化率为2,计算得到的 $GCI_{\text{fine}}^{21}$ 小于2%,证明了网格的无关性,同时其空化试验结果对比验证了空化计算结果的准确性。本文采用的流体域、网格划分方式、湍流模型,以及空化模型等均与文献<sup>[26-27]</sup>相同,文献<sup>[26]</sup>中采用试验和数值模拟的方法研究了轴流喷水推进泵快速启动过程的特性,并通过快速启动过程中前、后压力测点的压力值对比,证明了快速启动算法的可靠性。因此,本文的数值模拟结果也可以准确预测轴流推进泵快速启动过程的瞬态特性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 斜槽对稳态外特性的影响

轴流推进泵性能试验在图 3 所示的试验台中进行,图 5 展示了原型工况和斜槽工况的稳态外特性对比。稳态扬程采用量纲一的参数  $H^*$  进行表征,其定义如下:

$$H^* = \frac{gH}{D^2 n^2} \quad (9)$$

式中: $g$  为重力加速度, $H$  为泵的扬程, $D$  为叶轮的直径, $n$  为额定转速。外特性的计算范围在  $0.3 \sim 1.2Q_{des}$  之间,其中  $Q_{des}$  为该轴流泵的设计流量。数值计算与试验的扬程平均误差小于  $4.8\%$ ,效率的误差小于  $6.1\%$ ,验证了进口斜槽数值计算方法的准确性。

马鞍形曲线。原型工况的效率随着相对流量的增大先提高后下降,在  $0.9Q_{des}$  时达到最大值。斜槽工况的扬程在设计流量附近与原型工况的扬程相似。但是在马鞍区内,斜槽工况的扬程系数要显著高于原型工况。扬程系数在  $0.4Q_{des}$  时提升了  $56.50\%$ ,在  $0.5Q_{des}$  时提升了  $40.17\%$ ,在  $0.6Q_{des}$  时提升了  $11.47\%$ 。流量在设计工况附近时,斜槽工况的效率略低于原型工况,在  $0.9Q_{des}$  时降低了  $2.23\%$ 。但在马鞍区内,由于斜槽工况扬程的显著提高,效率也有了明显的提升,仅在  $0.3Q_{des}$  时低于原型工况。

两种模型的稳态性能对比表明了进口斜槽能够显著提高轴流推进泵在马鞍区的外特性。轴流推进泵在快速启动过程中经历了流量渐增的过程,因此进口斜槽对轴流推进泵快速启动过程的性能影响值得更多的关注。

### 2.2 斜槽对快速启动瞬态特性的影响

图 6 展示了在快速启动过程中原型工况和斜槽工况的扬程和流量随时间的变化趋势。根据扬程的变化,原型工况的启动过程可以被划分为 4 个阶段。1)  $0 \sim <0.300$  s 为启动过程扬程的一次发展区,启动扬程保持稳定的上升, $0.3$  s 时流量达到一次发展区的峰值,随后扬程开始下降。2)  $0.300 \sim <0.454$  s 为启动过程扬程的马鞍区,马鞍区内扬程出现下降的现象,在  $0.454$  s 时扬程下降至最低点。3)  $0.454 \sim <0.600$  s 为启动过程扬程的二次发展区,在经过马鞍区后继续保持稳定上升。4) 在  $0.600$  s 后,扬程保持稳定,在小范围内轻微波动,启动完成,为启动扬程的稳定运行区。图 7 展示了 4 个阶段内  $90\%$  叶高处叶栅流线分布情况。一次发展区内的流量较小,偏离设计工况严重,叶片前缘流动分离现象明显;马鞍区内流量快速上升,叶轮通道上游出现阻碍流动的通道涡;二次发展区内整体流动情况已经较好,两种工况都在叶片尾缘靠近吸力面出现轻微的流动分离;进入稳定运行区后,启动过程已经完成,进口斜槽对其运行没有明显影响。

斜槽工况的扬程变化同样可以划分为 4 个阶段。与原型工况相比,斜槽工况的一次发展区和二次发展区的时间跨度更长,马鞍区到来的时间滞后且结束的时间提前。斜槽工况在启动马鞍区的扬程要显著高于原型工况,在  $0.358$  s 时扬程提升  $24.62\%$ ,最高在  $0.402$  s 时提升  $27.15\%$ ,仅在  $0.358 \sim 0.425$  s 的时间内存在扬程下降现象。从流量的角度来看,斜槽工况的流量在马鞍区的后半部分至稳定运行区域要显著高于原型工况,在其余的时间内二者的流量保持相同。快速启动过程中的外

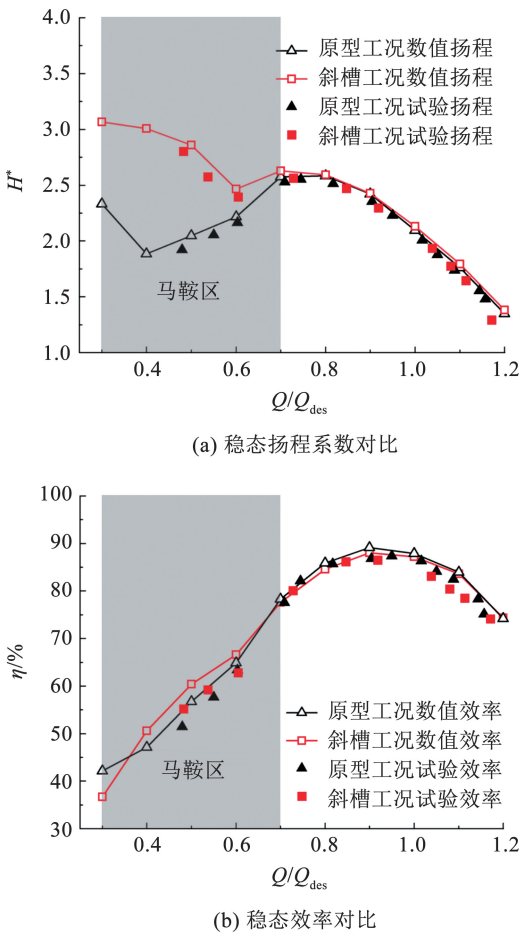


图 5 两种工况稳态外特性对比

Fig. 5 Comparison of steady-state external characteristics under two operating conditions

从图 5 可以看出,在设计流量附近,原型工况的扬程呈现负斜率,扬程系数随着流量的增大而降低。当流量减小至  $0.7Q_{des}$  时,扬程系数开始下降,直到流量减小至  $0.4Q_{des}$  时扬程系数达到最小值,呈现出

特性时域变化表明,无论是从扬程还是流量的角度,斜槽工况快速启动的外特性要优于原型工况。

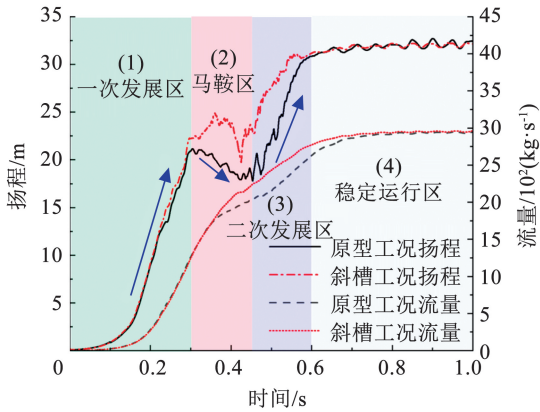


图6 两种工况启动扬程和流量曲线

Fig. 6 Head and flow curves during start-up under two operating conditions

曲线重合。而斜槽工况相对流量达到  $0.7Q_{des}$  时的性能稍有下降,与原型工况的启动外特性重合后继续上升。这意味着当流量超过临界流量值时,进口管壁的斜槽对轴流推进泵的流动与性能没有明显的影响,与稳态外特性曲线展现的特性相一致。

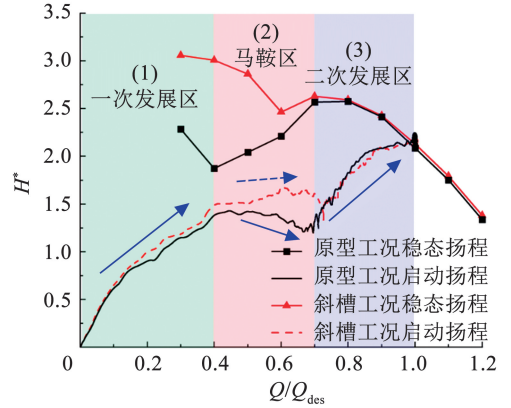


图8 两种工况启动外特性曲线与稳态扬程曲线对比

Fig. 8 Comparison between external characteristic curves during start-up and steady-state head curves under two operating conditions

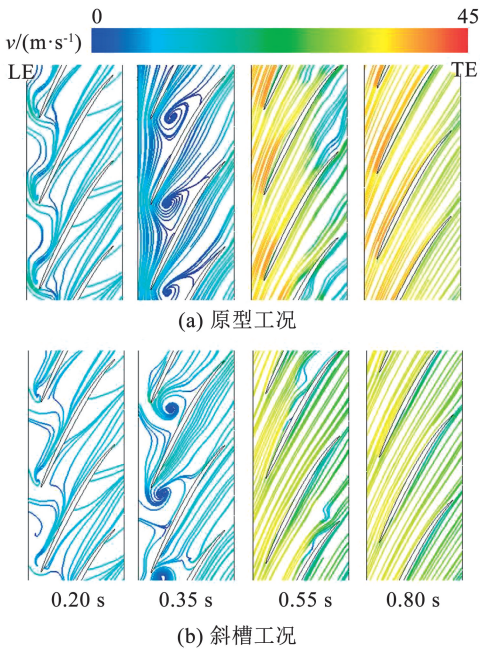


图7 两种工况启动过程90%叶高叶栅流线分布

Fig. 7 Blade cascade streamline distribution at 90% blade height during start-up under two operating conditions

图8展示了快速启动过程的扬程随相对流量的变化关系。原型工况启动过程的扬程-流量演化过程可以分为3个阶段:一次发展区、马鞍区和二次发展区。在一次发展区内,原型工况与斜槽工况的扬程随着流量的提高而稳步升高,但扬程的增速逐渐放缓。当相对流量达到  $0.4Q_{des}$  时,原型工况的扬程开始下降。斜槽工况启动过程在马鞍区不存在明显的性能下降现象,仍然保持一个较为平稳的状态。当相对流量达到  $0.7Q_{des}$  时,原型工况进入二次发展区,流动逐渐平稳,扬程稳步上升直至与稳态外特性

### 2.3 斜槽对快速启动过程内流场的影响

对于轴流推进泵而言,理想的入流条件为轴向入流<sup>[28]</sup>。图9展示了原型工况与斜槽工况在启动过程中D1截面的切向速度分布。D1截面为轴流推进泵段进口的径向截面,其位置如图2所示,为了防止槽道下游端壁处复杂流动对分析造成的影响,将径向截面的位置取在槽道下游端壁前6mm处。在0.350s时,原型工况进口速度分布不均匀程度显著,高切向速度区占据了整个管壁区域,非轴向流动扰乱了进口流动,对轴流推进泵的做功带来不利影响。而在斜槽工况中,由于斜槽对周向流动的吸收和抑制作用,高切向速度区被抑制在管壁处,整体流动优于原型工况。在0.425s时,原型工况中的切向速度仍主导着进口截面的流动。而斜槽工况中进口管的流动均匀,进口流动由轴向入流主导。随着启动过程的继续发展,在0.455s时,原型工况进口截面的切向速度分布有了明显的改善,中高切向速度区被抑制在管壁附近,启动过程的扬程也开始上升。此时斜槽工况的入流条件平稳,进口截面的中高切向速度已经被完全抑制,启动过程的性能也明显优于原型工况。

为探究斜槽对轴流推进泵流场的影响机理,图10展示了启动至  $0.5Q_{des}$  时单个斜槽截面内部流动情况。其中,该截面取沿斜槽长边的斜向截面,与推进泵轴向存在夹角,该夹角即为斜槽与轴的角度  $\alpha$ 。从图10可以看出,斜槽的进口与出口位置存在两个低压区。流体流经斜槽下游时形成向内的射

流,在槽内形成与主流逆向的流动并在斜槽上游向进水管内射流,与主流混合,减弱了主流的周向角动量。这也验证了图 9 中斜槽对进口截面周向流动的抑制作用,解释了槽道内部反向切向速度的由来,保证了推进泵在启动过程的轴向入流条件。

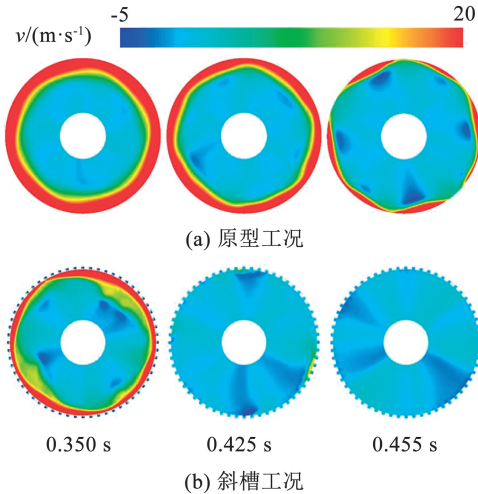


图 9 两种工况启动过程中斜槽道段末端截面切向速度的分布  
Fig. 9 Distribution of tangential velocity at outlet section of groove section during start-up under two operating conditions

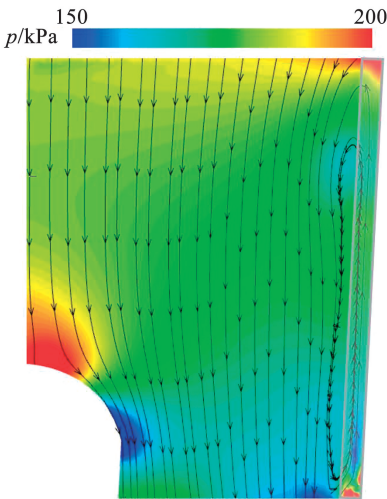


图 10 启动  $0.5Q_{des}$  时单个斜槽截面内部流动情况  
Fig. 10 Internal flow situation of a single inclined groove section at  $0.5Q_{des}$  during start-up

图 11 展示了在启动马鞍区内两种工况在 0.9 倍叶高截面的压力云图与流线分布情况。进口斜槽对泵内流场的影响主要集中在叶轮前缘的叶顶位置。原型工况的叶轮通道内存在着多个涡核,主涡结构为叶片前缘的通道涡与中部压力面的阻塞涡,并且在导叶的前缘形成了严重的涡流。在斜槽工况中,叶片前缘的通道涡被完全抑制,而叶片中部的涡核向尾缘移动,形成出口回流涡,导叶前缘的流动分离现象得到了缓解,整体的通流效果变好。斜槽工

况提升了叶片压力面与吸力面的压力差,对叶片做功带来正面影响。

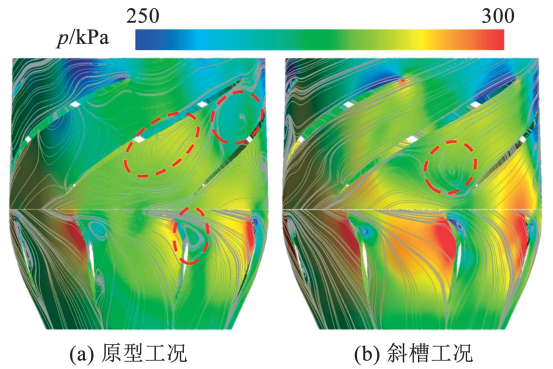


图 11 两种工况 0.35 s 时 90% 叶高截面压力云图与流线分布  
Fig. 11 Pressure cloud map and streamline distribution at 90% blade height section and at 0.35 s under two operating conditions

图 12 展示了快速启动过程中当  $0.5Q_{des}$  时原型工况与斜槽工况在 90% 叶片高度的叶栅流线和叶轮通道涡。原型工况的叶栅通道中存在着严重的流动分离,叶尖的流动由从吸力面向相邻叶片中传播的分离流与叶片下游的叶顶阻塞涡主导。而在斜槽工况中,叶片前缘仍存在着向相邻通道传播的分离流,但下游的阻塞涡被消除。在叶栅流线的的基础上,采用 Omega 涡识别方法探究了两种模型在  $0.5Q_{des}$  时阈值为 0.52 时叶轮内部涡的分布情况。在原型工况中,存在着从叶片前缘轮缘吸力面向下一个叶片前缘传播的分离流,并且由于不存在叶顶间隙,叶轮通道内部的涡流在叶顶处堆积,形成了叶顶阻塞涡。在斜槽工况中,向相邻通道传播的涡流强度减弱,叶顶阻塞涡也得到了明显的抑制,叶轮通道内涡流的明显减少,整体的流动变得更加均匀。

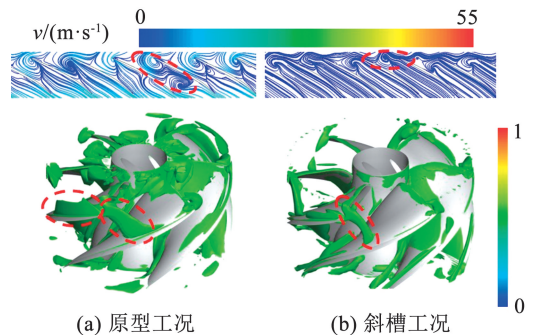


图 12 两种工况  $0.5Q_{des}$  时 90% 叶片高度叶栅流线和叶轮通道涡分布  
Fig. 12 Blade cascade streamline and impeller passage vortex distribution at 90% blade height and  $0.5Q_{des}$  under two operating conditions

边界涡量流诊断法 (boundary vorticity flux, BVF) 是一种基于边界涡量动力学发展起来的局部流动诊断方法。通过 BVF 诊断可以精确定位叶片

泵内部的不良流动,是分析轴流泵叶轮内流场的一种有效手段。叶片表面 BVF 的正峰值会对叶轮的做功产生副作用<sup>[29]</sup>。

图 13 展示了两种工况在启动过程中不同阶段叶片表面的 BVF 分布对比图。在启动初期的 0.20 s,泵内流动十分紊乱,两种工况叶片表面存在明显的 BVF 正峰值区。在 0.35 s 时,原型工况吸力面的通道涡和阻塞涡影响泵的运行,叶片进口和中部轮缘处存在较大面积的正峰值区。而在斜槽工况中,由于流动分离得到改善,叶片整体的 BVF 分布较为均匀。0.50 s 时进入扬程二次发展区,原型工况的 BVF 分布较为杂乱,吸力面中部与压力面轮缘处的正负峰值区交叉混杂;而斜槽工况的内流特性已经有了较好的改善,吸力面和压力面的 BVF 分布都较为均匀,仅在压力面尾缘处存在着高正值区。泵内流动的发展影响了叶片 BVF 的分布,启动不同时刻的 BVF 分布对比说明,斜槽对启动过程的性能改善有着十分明显的作用。

率并增加能耗。特别是在瞬态启动过程中,由于流动状态的剧烈变化,压力脉动表现出更为复杂的特征,其幅值和频率的随机性显著增加,这对泵的运行性能和寿命产生了严重的负面影响。为深入研究斜槽结构对轴流推进泵快速启动过程中内部压力脉动特性的影响,在计算域中设置如图 14 所示的压力监测点。其中,P1 测点位于叶轮前的导水锥内,用于监测进口流动状态对压力脉动的影响;P2~P5 监测点均匀分布在叶轮内部,覆盖了叶轮流道的进口、中部和出口区域,能够反映叶轮旋转过程中压力脉动的时空演变规律;P6~P9 监测点布置在导叶内部,用于分析叶轮-导叶动静干涉效应引起的压力脉动特性;P10 监测点位于导叶后的出水管内,用于评估下游流动对压力脉动的传递和衰减特性。

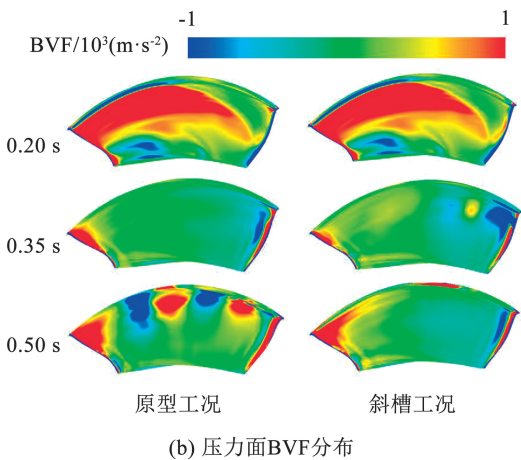
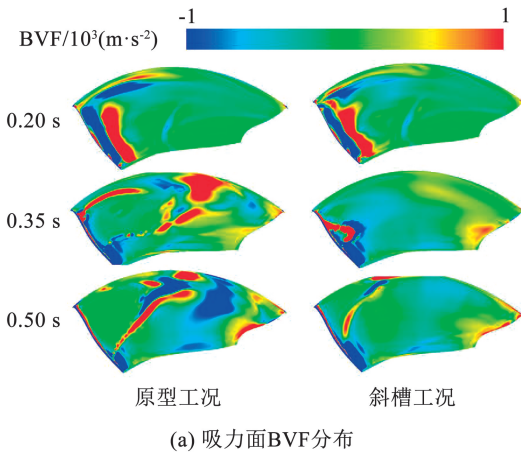


图 13 两种工况启动不同阶段叶片 BVF 分布对比

Fig. 13 Comparison of BVF distribution of blades at different stages of start-up under two operating conditions

轴流推进泵的压力脉动与系统的性能密切相关。压力脉动增加了泵的振动和不稳定性,降低效

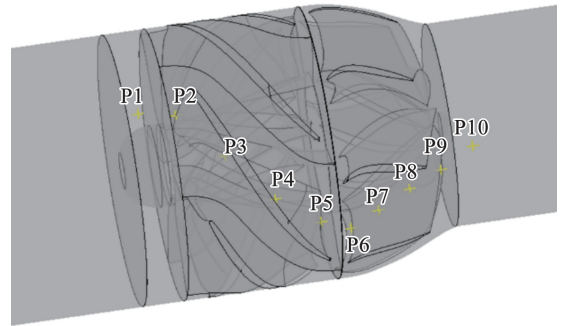


图 14 泵内压力测点位置

Fig. 14 Location of pressure monitoring points inside pump

图 15 展示了两种工况快速启动过程中泵内压力监测点的压力变化情况。在启动的前期,两种工况的泵内压力变化情况类似,存在同样的上升与下降的趋势。原型工况在 0.66 s 后,各个压力监测点产生规律的周期性变化,启动过程完成。而斜槽工况在 0.60 s 时,泵内压力已经趋于稳定,启动完成时间先于原型工况。在启动完成后,斜槽工况的压力脉动幅值较小。但由于瞬态启动过程的压力脉动信号存在明显的时域性和非线性关系,传统的傅里叶变换难以捕捉启动过程的瞬时特征,因此采用 Morlet 小波变换分析泵内压力信号的瞬时频率和幅度。

图 16 展示了在快速启动过程中,两种工况在 P1、P5、P6,以及 P10 测点的压力脉动的小波变换结果,横坐标为启动的时间,纵坐标为压力脉动的频率,颜色的深度为幅值。

从图 16 可以看出,在 P1 测点处,原型工况在 0.30~0.50 s 时存在较强的中频压力脉动,以 66 Hz 的频率为主,而斜槽工况在 P1 测点处整体的压力脉动较为平稳。在 P5 测点处,原型工况在初至额定转速的 0.50 s 附近存在强烈的 23~47 Hz 的 1~2 倍轴频,同时存在较为杂乱的高频压力脉动。斜槽工

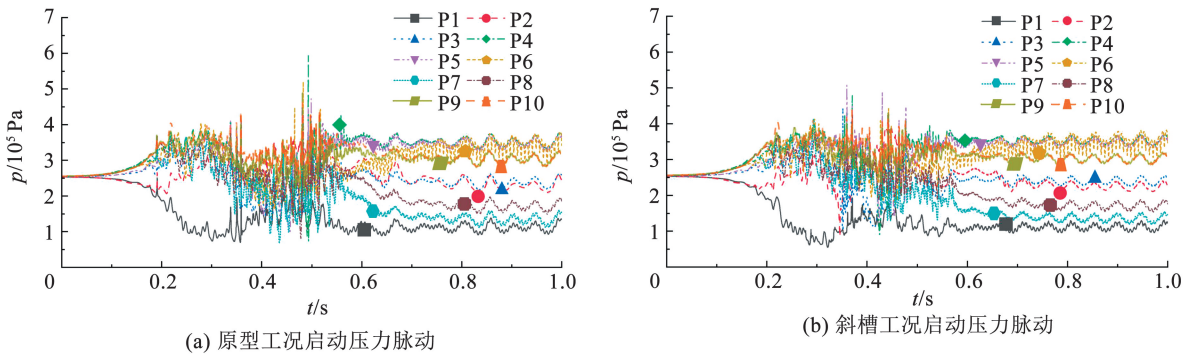


图 15 两种工况启动过程压力脉动

Fig. 15 Pressure pulsation under two operating conditions during start-up

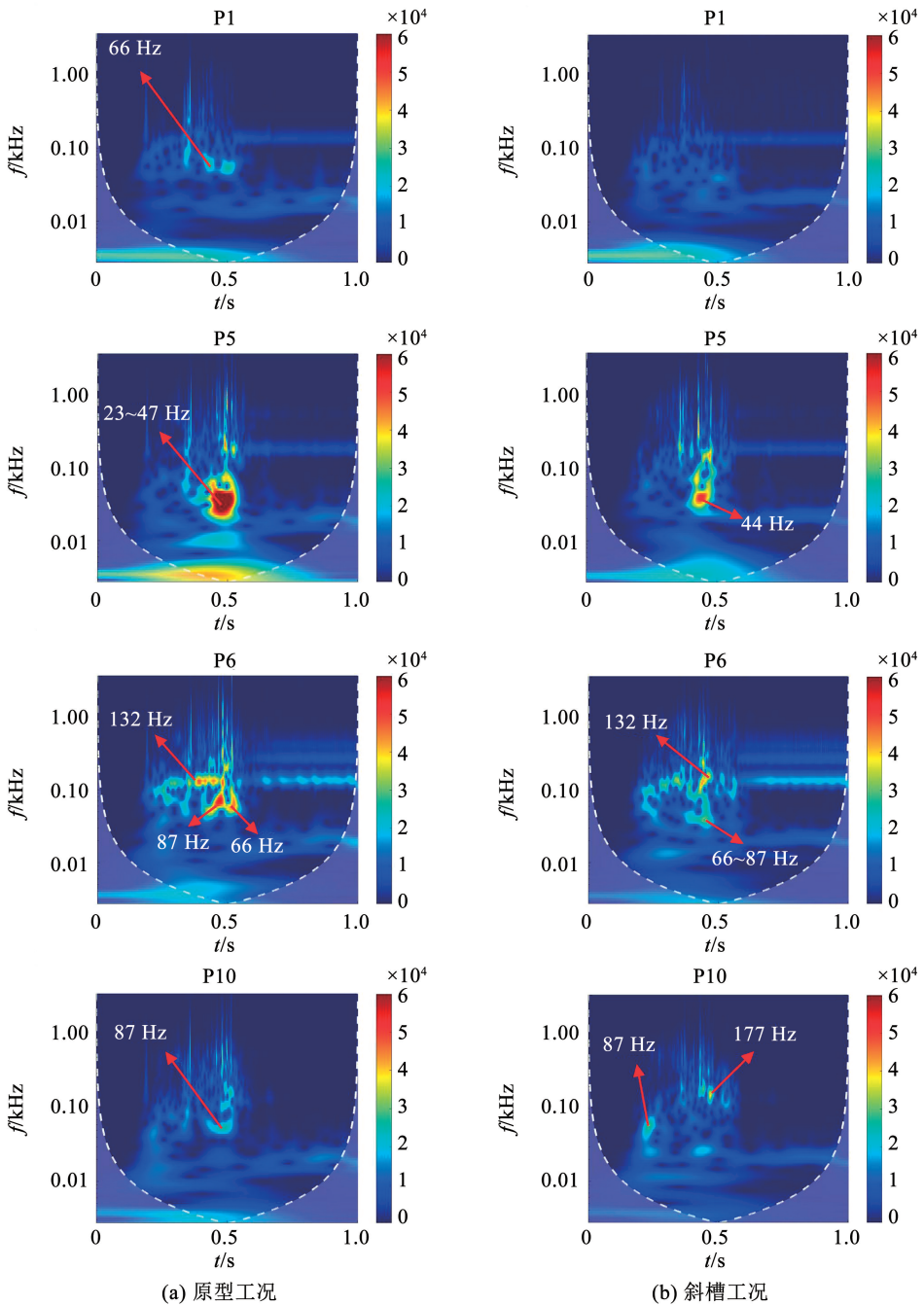


图 16 两种工况压力脉动小波变换结果对比

Fig. 16 Comparison of wavelet transform results for pressure fluctuation under two operating conditions

况降低了P5测点的压力脉动幅值,但未改变其主频率,在0.50 s附近仍以44 Hz的频率为主。在P6测点中,自0.22 s起,原型工况中便存在明显的杂乱的压力脉动,132 Hz的6倍轴频出现较早。在达到额定转速的0.50 s附近,87 Hz与66 Hz的杂频主导了原型工况内的压力脉动。斜槽工况明显降低了P6测点各个主频的压力脉动幅值,显著减弱了0.50 s时87 Hz的压力脉动幅值。在P10测点中,两种工况的压力脉动都较为平稳。原型工况在0.50 s附近以87 Hz的频率为主,同时存在轻微的高频压力脉动,这是由于瞬态启动中的流量迟滞效应,流量迟于转速达到稳定,此时导叶后缘受到的流量变化带来的冲击较为严重。而斜槽工况的流量提升快于原型工况,在0.25 s时存在87 Hz的杂频,0.50 s时存在177 Hz的压力脉动,为导叶数的倍频,证明此处受导叶的影响较为明显。压力脉动的小波变化结果表明,进口斜槽优化了轴流推进泵启动过程中的压力脉动,降低了动静干涉区的压力脉动幅值,对轴流推进泵快速启动的稳定性带来了有益效果。

### 3 结 论

1)采用数值模拟的方法对轴流推进泵在有无进口斜槽条件下的性能进行了研究,并通过试验验证了数值模拟的准确性。结果表明进口斜槽有效改善了轴流推进泵稳态马鞍区的性能,最高在 $0.4Q_{des}$ 时扬程提升56.50%,在 $0.5Q_{des}$ 时提升40.17%。但斜槽使得轴流推进泵在设计工况附近运行的效率有所降低,在 $0.9Q_{des}$ 时降低了2.23%。

2)从扬程演化的角度来看,轴流推进泵快速启动过程可以分为4个阶段,分别为扬程的一次发展区、马鞍区、二次发展区,以及稳定运行区。一次发展区与二次发展区扬程稳定提升,马鞍区的扬程下降。斜槽显著提高了启动马鞍区的扬程,提升了快速启动过程的流量增长速度。当原型工况的流量提升至稳态马鞍区范围内时,扬程发生突降,但斜槽工况的扬程保持增长,仅在临界流量时出现轻微的下降。

3)斜槽改善了启动过程叶轮叶片进口的异常流动,优化了启动马鞍区的入流条件。斜槽上、下游的局部低压区诱导了槽道内部的逆向流动,自斜槽上游与主流混合,抑制了主流周向角动量,进而改善了进口轮缘处的流动分离,抑制了叶轮内部的通道涡,消除了原型工况中充满叶轮通道的叶顶阻塞涡,进而优化了启动过程的压力脉动,增强了启动过程轴流推进泵的稳定性。

### 参考文献

- [1]梁天雄. 水面快船-喷水推进器的相互作用特性与流动机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023  
LIANG Tianxiong. Study on the characteristics and flow mechanism of the interaction between high speed ship and waterjet propulsion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023
- [2]李福正, 黄桥高, 潘光, 等. 定子预旋角对泵喷推进器散水脉动特性影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(12): 46  
LI Fuzheng, HUANG Qiaogao, PAN Guang, et al. Effect of stator pre-whirl angles on open-water fluctuation characteristics of pump-jet propulsor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(12): 46. DOI:10.11918/202106114
- [3]ZHAO Haoru, WANG Fujun, WANG Chaoyue, et al. Study of driving force characteristics in the formation of dominant unstable flow events in water jet propulsion pumps[J]. Ocean Engineering, 2023, 289: 116291. DOI:10.1016/j.oceaneng.2023.116291
- [4]WU Xianfang, LI Minghui, LIU Houlin, et al. Performance of water-jet pump under acceleration[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2021, 13: 794. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2021.10.004
- [5]FU Shifeng, ZHENG Yuan, KAN Kan, et al. Numerical simulation and experimental study of transient characteristics in an axial flow pump during start-up [J]. Renewable Energy, 2020, 146: 1879. DOI:10.1016/j.renene.2019.07.123
- [6]RAN Hongjuan, LIU Yong, LUO Xianwu, et al. Experimental comparison of two different positive slopes in one single pump turbine [J]. Renewable Energy, 2020, 154: 1218. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.023
- [7]IKUTA A, NITTA N, MIYAGAWA K, et al. Influence of forward skew blade angle on positive slope characteristics of mixed flow pumps[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1909(1): 012076. DOI:10.1088/1742-6596/1909/1/012076
- [8]陈为升. 轴流泵失速工况流场演变与能量损失特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2023  
CHEN Weisheng. Investigation of flow field evolution and energy loss characteristics of axial flow pump for stall conditions [D]. Beijing: China Agricultural University, 2023
- [9]HAN Hanqiao, LONG Yun, ZHONG Jinqing. Research on the internal flow difference between peak and valley conditions of water jet propulsion pump during working at hump region [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(2): 258. DOI: 10.3390/jmse12020258
- [10]ZHANG Xiaowen, PAVESI G, XU Zhe, et al. Phase classification and transient effects of the start-up process of multi-functional pump station in pump mode [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 100: 113517. DOI:10.1016/j.est.2024.113517
- [11]张富毅, 鲁航, 陈泰然, 等. 轴流式喷水推进器启动过程的瞬态特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(8): 1592  
ZHANG Fuyi, LU Hang, CHEN Tairan, et al. Transient characteristics of start-up process of an axial flow water-jet propeller [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(8): 1592. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.08.003
- [12]徐贵颖, 王暴, 王振华, 等. 立式轴流泵装置内流瞬变特性数值分析[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(4): 111  
XU Guiying, WANG Bao, WANG Zhenhua, et al. Numerical

- analysis of internal flow transient characteristics of the vertical axial-flow pump device [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2024, 35(4): 111. DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2024.04.13
- [13] 马凌凌. 混流泵启动过程模型预测与瞬态特性的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020  
MA Lingling. Prediction of start-up process model and investigation of transient characteristics of mixed-flow pump [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020
- [14] BANTELAY D T, GEBRESENBET G, ADMASU B T, et al. Unveiling the startup characteristics of pump as turbine using computational and experimental techniques [J]. *Results in Engineering*, 2025, 25: 103955. DOI:10.1016/j.rineng.2025.103955
- [15] JOSHI S N, GUJARATHI Y S. A review on active and passive flow control techniques [J]. *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering*, 2016, 3(4): 1
- [16] 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  
ZHANG Rui. Research on the stall and cavitation flow characteristics and the performance improvement of axial-flow pump [D]. Shanghai: Shanghai University, 2014
- [17] 赵晨彦, 魏佐君, 倪明, 等. 机匣沟槽对微型轴流涡轮叶尖泄漏流动的影响[J]. *推进技术*, 2022, 43(10): 124  
ZHAO Chenyan, WEI Zuojun, NI Ming, et al. Effects of casing groove on tip leakage flow of micro axial turbine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(10): 124. DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.210314
- [18] 黄丛磊, 陈榴, 王宗龙, 等. 涡流发生器控制喷水推进器进水管流动分离的数值研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(7): 447  
HUANG Conglei, CHEN Liu, WANG Zonglong, et al. Numerical study of flow separation control in waterjet intake duct by vortex generator[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(7): 447. DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.210029
- [19] KUROKAWA J. J-groove technique for suppressing various anomalous flow phenomena in turbomachines [J]. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2011, 4(1): 1. DOI: 10.5293/IJFMS.2011.4.1.001
- [20] MU Tong, ZHANG Rui, XU Hui, et al. Study on improvement of hydraulic performance and internal flow pattern of the axial flow pump by groove flow control technology [J]. *Renewable Energy*, 2020, 160: 756. DOI:10.1016/j.renene.2020.06.145
- [21] BRENNEN C E. Fundamentals of multiphase flow [M]. New York: Cambridge University Press, 2005. DOI: 10.1017/CBO9780511807169
- [22] MENTER F R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective [J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, 23(4): 305. DOI:10.1080/10618560902773387
- [23] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow. Yokohama: [s.n.], 2004: 1
- [24] 望喻虎, 郑枫川, 陈泰然, 等. 侧斜参数对喷水推进泵性能的影响研究[J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(1): 101  
WANG Yuhu, ZHENG Fengchuan, CHEN Tairan, et al. Research on the influence of skew parameters on the performance of water jet propulsion pumps [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(1): 101
- [25] 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  
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. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.13.013
- [26] ZHENG Fengchuan, ZHANG Xiaoping, CHEN Tairan, et al. Strong transient characteristics in axial flow waterjet pump during rapid starting period with special emphasis on saddle zone [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 269: 113506. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113506
- [27] ZHAO Xiaoyang, LIU Taotao, HUANG Biao, et al. Combined experimental and numerical analysis of cavitating flow characteristics in an axial flow waterjet pump [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 209: 107450. DOI:10.1016/j.oceaneng.2020.107450
- [28] PENG Huanghua, GUO Jiamin, SUN Yu, et al. Numerical analysis of hydrodynamic force of front-and rear-stator pump-jet propulsion systems behind a submarine under oblique sailing [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112565. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112565
- [29] WU Jiezhi, MA Huiyang, ZHOU Mingde. Vorticity and vortex dynamics [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. DOI: 10.1007/978-3-540-29028-5

(编辑 张红)