

# 机匣开槽控制喷水推进器不稳定流动的数值研究

陈二云<sup>1</sup>, 邓明国<sup>1</sup>, 张庆<sup>1</sup>, 杨爱玲<sup>1,2</sup>, 付士银<sup>1</sup>, 潘虹宇<sup>3</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海出版印刷高等专科学校 科研处, 上海 200093;

3. 杭州汽轮动力集团股份有限公司, 杭州 310022)

**摘要:** 针对喷水推进器小流量工况下的驼峰区不稳定流动, 采用计算流体力学方法研究了其失稳特性。结果表明, 随着流量的减少, 推进泵的扬程和效率显著下降, 扬程曲线在  $0.42Q_d \sim 0.8Q_d$  范围内呈现出正斜率的驼峰特性, 同时内部流场变得紊乱, 并出现流动分离和回流等现象。为了改善这一不稳定流动, 采用了机匣开槽技术进行流动控制, 使驼峰现象得到明显改善。在最佳槽体结构参数下, 深度失速工况点的扬程和效率分别比原模型提高了约 147.6% 和 70.3%。机匣开槽一方面能够对进口来流进行整流, 起到减少预旋和增大轴向进流速度的作用, 另一方面可以抑制主流区漩涡的形成以及叶轮进口位置的低频压力脉动。

**关键词:** 喷水推进器; 水力性能; 失速工况; 压力脉动

中图分类号: U 664.3 文献标志码: A

## Numerical study on unsteady flow controlled by magazine slotting in waterjet propulsor

CHEN Eryun<sup>1</sup>, DENG Mingguo<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>1</sup>, YANG Ailing<sup>1,2</sup>, FU Shiyin<sup>1</sup>, PAN Hongyu<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Scientific Research Department, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 3. Hangzhou Turbine Power Group Co., Ltd., Hangzhou 310022, China)

**Abstract:** For the unsteady flow in hump region of waterjet propulsor under low flow conditions, computational fluid dynamics method was used to study the instability characteristics. The results show that the head and efficiency of propulsion pump significantly decrease with the decrease of the flow rate, the head curve shows a hump characteristic of positive slope between  $0.42Q_d$  and  $0.8Q_d$ , while the internal flow field becomes turbulent, accompanied by flow separation and backflow. The magazine slotting technique was used to controll the unsteady flow, and the hump phenomenon was significantly

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106099)

通信作者: 陈二云(1977-), 男, 副教授. 研究方向: 计算流体力学. E-mail: cheneryun@usst.edu.cn

引文格式: 陈二云, 邓明国, 张庆, 等. 机匣开槽控制喷水推进器不稳定流动的数值研究[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(3): 284-292. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230221003

Citation: CHEN Eryun, DENG Mingguo, ZHANG Qing, et al. Numerical study on unsteady flow controlled by magazine slotting in waterjet propulsor[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(3): 284-292.

improved. The head and efficiency at the deep stall operating point were increased by about 147.6% and 70.3% respectively compared to those of the original model under the optimal slot structure parameters. On one hand, the magazine slotting can rectify the inlet flow and play a role in reducing the pre-swirl and increasing the axial inlet velocity. On the other hand, it can inhibit the formation of vortex in mainstream area and low-frequency pressure fluctuations at impeller inlet.

**Keywords:** *waterjet propulsor; hydrodynamic performance; stall condition; pressure fluctuation*

近些年来，喷水推进器凭借其高航速、高效率、强抗空泡能力等优点，在高性能船舶和军用舰艇上得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。不同于传统的直管进流形式，喷水推进器在实际航行过程中由于海面风浪以及偏航和启停等机动条件的影响，往往会偏离设计工况而处于部分负载工况，加之进水流道弯管和驱动轴等结构的限制，系统内部的流动分离、流态分布不均等现象大量存在，由此引发能量耗散，使得流动恶化、效率降低<sup>[2-3]</sup>。进流条件的不稳定会将影响在叶轮旋转区域扩大，叶轮在高速旋转过程中，由于长时间受到这种周向的不均匀扰动，叶片载荷分布出现差异，进而诱发结构振动和噪声，严重时会对叶片造成损伤，甚至带来安全风险<sup>[4-7]</sup>。这种不稳定流动所导致的能量损失，会使喷水推进装置的扬程和效率下降，通常使其外部特性曲线在低流量条件下表现出正斜率的驼峰现象。因此，改善推进器内部这种不稳定状况的研究具有很重要的意义。

对于推进泵等叶片式旋转机械在小流量下流动失稳的问题，许多国内外学者进行了深入的研究。Hu 等<sup>[8]</sup>和 Hagiya 等<sup>[9]</sup>分析了混流泵在小流量下叶轮通道内部的流动状况，发现该区间的扬程曲线呈现正斜率，并且此现象的产生是由叶轮通道中位于叶轮尖端前缘部位的失速流动引起的。Ye 等<sup>[10]</sup>采用定常和非定常计算模拟了低转速比离心泵的流动失稳现象，通过数值模拟与 PIV 试验相结合，结果表明：失速工况下，叶轮所造成的能量损失最大，由于失速流动引起的流道堵塞会使泵的性能降低并引发压力振动。Zheng 等<sup>[11]</sup>研究了混流泵在不同工况下的流动和压力脉动变化，并阐明了失速工况下的低频压力脉动是由导叶内部漩涡所引起的。为了对叶片泵在驼峰工况区的不稳定流动进行改善，研究者们提出了不同的改进措施。Kurokawa<sup>[12]</sup>提出了 J 型槽的流动控制技术，通过对主流角动量的控制来减弱系统内部的不稳定流动，以达到改善泵的水力性能的目的。

的。Zhang 等<sup>[13-14]</sup>和 Feng 等<sup>[15]</sup>通过在泵进水管设置轴向槽来改善叶轮的进流条件，提升其水力性能，并有效抑制了驼峰区的形成。Mu 等<sup>[16]</sup>采用了相同的控制方法，通过对比不同的沟槽布置形式，发现轴向槽比斜向槽更适合改善轴流泵的水力性能和内部流场。王维等<sup>[17]</sup>运用端壁开缝的技术来改善轴流泵的驼峰现象，同时减弱了叶片顶部因叶顶泄漏涡和二次流引起的压力脉动。目前在流动失稳及控制方面，现有的研究大多是针对单个泵体组件，且多采用直管进流的形式，没有将弯管进流等结构所造成的进流不均匀的影响考虑在内，而喷水推进器是包含推进泵、进水流道等过流部件以及下方水体部分的一整个系统，流动控制技术的适用性以及控制效果的优劣还需展开相关的探索性研究。

本文以喷水推进器为研究对象，对其在非设计工况下的流动特性进行研究。采用计算流体动力学分析方法，揭示了在小流量工况下系统内的失速流动特性，并探讨了采用机匣内壁开槽技术来抑制推进器内部不稳定流动的机理，为进一步优化喷水推进装置的水力性能提供有效参考。

1 计算模型及数值方法

1.1 几何模型

喷水推进器三维几何模型如图 1 所示，具体设计参数见表 1。推进泵所采用的泵型为混流泵，在进水管道段内壁添加沟槽设计，沟槽参数示意图见图 2。

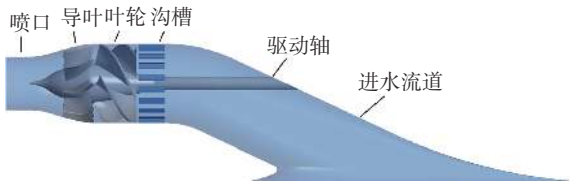


图 1 喷水推进器几何模型

Fig.1 Geometric model of waterjet propulsor

表 1 喷水推进器几何参数

Tab.1 Geometric parameters of waterjet propulsor

| 参数                                      | 符号       | 数值    |
|-----------------------------------------|----------|-------|
| 额定流量/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $Q_d$    | 0.1   |
| 转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )   | $n$      | 1 350 |
| 比转速                                     | $n_s$    | 450   |
| 叶轮叶片数/个                                 | $Z$      | 5     |
| 导叶叶片数/个                                 | $Z_s$    | 9     |
| 进口直径/mm                                 | $D$      | 180   |
| 出口直径/mm                                 | $D_s$    | 100   |
| 沟槽数量/个                                  | $N$      | 20    |
| 沟槽均布角度/( $^\circ$ )                     | $\alpha$ | 9     |
| 沟槽长度/mm                                 | $l$      | 60    |
| 沟槽深度/mm                                 | $d$      | 4/6/8 |

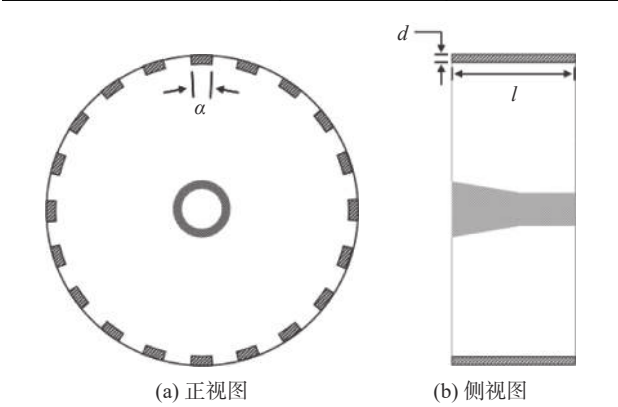


图 2 沟槽参数示意图

Fig.2 Schematic diagram of groove parameters

图 3 为计算域，包括船底的周围水域。考虑到数值模拟的精度和时间，控制体的长、宽、高分别取为  $30D$ ， $10D$ ， $8D$ 。

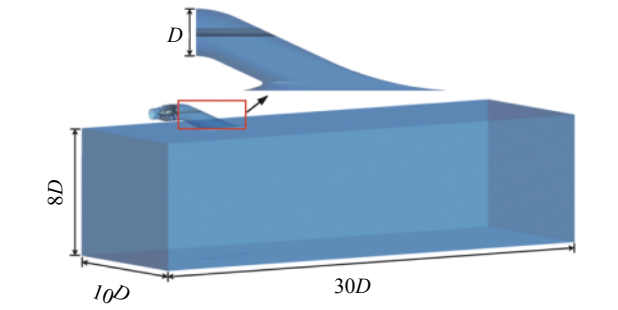


图 3 计算域

Fig.3 Computational domain

1.2 网格划分及无关性验证

使用 ANSYS TurboGrid 软件，对叶轮和导叶区进行了结构化六面体网格划分处理。对部件周围弯曲较大的区域进行加密， $y+$ 值小于 30，满足

湍流模型的求解要求。喷口、进水流道及控制体基于 ICEM CFD 进行结构化六面体网格划分。喷水推进器各部件网格如图 4 所示。

采用 5 套不同节点数的网格(表 2)，网格无关性验证见图 5，其中  $H$  和  $\eta$  为推进泵的扬程和效率， $H_1$  和  $\eta_1$  表示网格 1 所对应的扬程和效率。可以看出，扬程和效率随着网格节点数的增加变化不大，相对误差小于 0.1%，满足网格无关性测试要求。因此最终选择方案 4 作为数值计算网格。

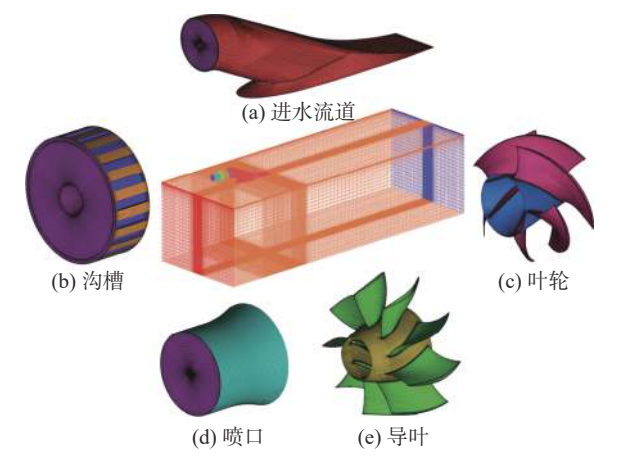


图 4 计算域网格划分

Fig.4 Meshing of computational domain

表 2 不同方案下的网格划分参数

Tab.2 Meshing parameters under different schemes

| 网格方案 | 节点数  |
|------|------|
| 1    | 590万 |
| 2    | 643万 |
| 3    | 696万 |
| 4    | 748万 |
| 5    | 800万 |

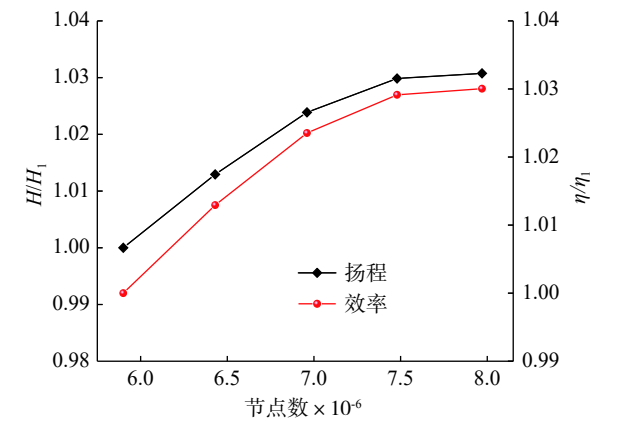


图 5 网格无关性验证

Fig.5 Independence verification of mesh

### 1.3 边界条件和数值方法

计算域的进口采用速度进口设置; 喷口采用质量流量出口; 控制体的出口采用自由出流; 叶轮作为旋转域, 其余部分为静止域; 叶片和轮毂为相对静止的壁面, 叶轮外壳则为绝对静止的壁面; 旋转域和静止域之间的交界面采用滑移网格模型进行处理, 并且所有的壁面都被设定为无滑移壁面条件。

本研究使用有限体积法在空间上对控制方程进行离散化处理, 并采用二阶全隐式格式对时间项进行离散化, 湍流模型选择 SST  $k-\omega$  模型。使用 SIMPLEC 算法求解离散方程, 并基于雷诺平均 N-S 方程对推进器内的稳态和非稳态流场进行数值模拟<sup>[18]</sup>。所有模拟工作均在 Ansys Fluent 软件中完成。为了加快非稳态计算的收敛速度, 在求解过程中使用稳态计算的结果作为非稳态计算的初始条件。叶轮旋转一周的时间为  $T=60/1\ 350\text{ s}$ , 时间步长取为  $2.47\times 10^{-4}\text{ s}$ , 即为叶轮旋转  $2^\circ$  所需的时间, 总时长为叶轮旋转 8 周所需的时间。

### 1.4 监测点设置

为了探究沟槽设计对推进泵内部瞬态流动特性的影响, 需要对泵内的压力脉动进行捕捉, 在叶轮进口截面, 旋转轴的上方部位, 沿轮毂到轮缘径向均匀布置 5 个监测点 R1~R5, 具体位置如图 6 所示。

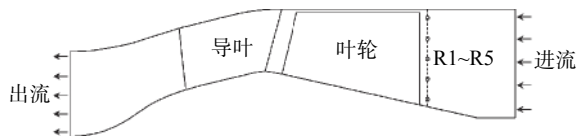


图 6 压力脉动监测点布置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the monitoring points of pressure fluctuation

## 2 计算结果及分析

### 2.1 非均匀进流成因分析

进流品质的好坏将直接影响到喷水推进器的性能, 由于其特殊的弯管进流形式, 与一般的直管进流相比, 推进器在叶轮进口的流态分布上存在很大的差别。以设计工况为例, 图 7 为该条件下进水流道各截面的压力和速度云图。从图中可以看出, 受到船底边界层的影响, 流道内上方的流速偏低, 并且由于弯管和驱动轴扰动的综合影响, 呈现出由上而下的压力梯度分布。叶轮进流

面的压差和速度差分别达到了 5 kPa 和 7 m/s 以上, 不均匀分布的特征十分明显。驱动轴下方的高速流体在抵达上方的过程中, 需要消耗自身动量来克服阻力, 导致管道顶部会形成一个低能流体区域。下方的高速流体在冲击驱动轴的过程中, 会在旋转效应的作用下发生偏转, 与上方低压区的流体相互混合, 甚至会形成漩涡, 进一步恶化进口流态。

### 2.2 水力外特性分析

喷水推进泵的外特性可由扬程和效率这两个参数体现, 其计算公式如下:

$$H = (P_i - P_o) / \rho g \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P_s} \quad (2)$$

$$P_s = M \omega \quad (3)$$

式中:  $H$  为推进泵扬程;  $P_i$  为推进泵进口总压;  $P_o$  为出口总压;  $\rho$  为水的密度;  $\eta$  为推进泵效率;  $Q$  为体积流量;  $P_s$  为轴功率;  $M$  为流体作用在叶轮上的转矩;  $\omega$  为角速度。

为探究喷水推进泵性能和沟槽参数之间的关系, 对沟槽数量为 20, 槽长  $l=60\text{ mm}$ , 深度  $d$  分别为 4, 6, 8 mm 的喷水推进泵进行了研究。图 8 为不同槽深下的喷水推进泵扬程和水力效率曲线, OM(original model)表示原始模型, SM(slotted model)表示开槽模型。

由效率曲线图 8(b) 可以看出, 推进泵在设计工况点  $A$  附近的效率较高, 但在小流量区域的效率下降很快。扬程曲线图 8(a) 显示, 当流量在  $0.42Q_d \sim 0.8Q_d$  之间时, 曲线出现明显的“驼峰区”特性, 该区域内的推进泵效率急剧下降, 运行过程中可能会发生旋转失速等流动不稳定现象。 $B$  为扬程曲线转折点, 称为临界失速工况点,  $C$  是深度失速工况点。根据效率和扬程曲线, 原始模型的驼峰现象比较严重, 扬程和效率在  $0.65Q_d$  附近出现了陡降, 扬程下降了 39.3%, 效率下降了 28.3%。在机匣内壁进行开槽后, 推进泵的驼峰现象得到了改善, 扬程和效率都有不同程度的提高。在小流量工况下, 开槽能够在一定程度上提高推进泵的效率, 且对最优工况和大流量工况的效率影响不大。当槽深  $d$  增加到 6 mm 时,  $0.65Q_d$  附近的扬程陡降现象基本消失, 此时推进泵  $C$  工况点的扬程和效率分别提高了约 147.6% 和 70.3%。槽深进一步增加至 8 mm 时, 虽然在低流

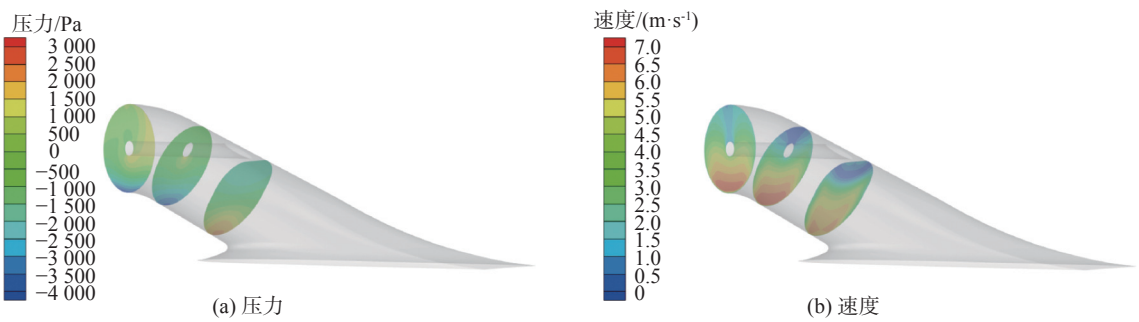


图7 设计工况下进水流道各截面压力云图及速度云图

Fig.7 Pressure and velocity contours for each corss-section of the inlet channel under the design condition

量下的扬程仍有部分提高，但效率提升微弱，且在大流量工况附近的效率出现下降。综合考虑，选取槽深 6 mm 作为最优方案。由此来看，开槽除了对推进器在面临部分负载条件所造成的扬程和效率降低具有一定提升效果外，在常规运行的设计工况下也没有造成水动力性能的损失，表明开槽能够在一定程度上拓宽推进器的稳定运行范围，而且槽体结构简单，加工制造成本低，具有一定的实际应用价值。

2.3 内部流场分析

为了研究沟槽对推进泵叶轮进口流场的影响，图 8 比较了原始模型和开槽模型在不同工况下叶轮进口截面处轴向速度和圆周速度环量的分布。其中  $V_m$  为轴向速度， $U_d$  为设计工况下的进口截面速度，无量纲系数  $R^*$ ， $\Gamma^*$  定义如下：

$$R^* = (R - R_h) / (R_s - R_h) \tag{4}$$

$$\Gamma^* = 2\Gamma / \pi \omega D^2 \tag{5}$$

式中： $R^*$  为径向位置的相对坐标； $R$  为截面上任一点的半径； $R_h$  和  $R_s$  分别为轮毂半径和轮缘半径； $\Gamma^*$  为速度环量系数； $\Gamma$  为速度环量； $\omega$  为叶轮

旋转角速度。

叶轮进口轴向速度和速度环量分布如图 9 所示。从图 9(a) 可以看出，两种模型在相同工况下叶轮进口轴向速度分布规律基本相同，总体上都随着流量的减小而降低。推进泵在最优工况区内的流动相对稳定，叶轮进口轴向速度分布均匀，改进模型的轴向速度稍大于原始模型。当推进泵运行至失速工况区时，进口轴向速度出现较大幅度变化：主流区的流动稳定性降低，轴向速度从轮毂到轮缘先减小再增大，并在管道内壁附近产生二次回流。此外，随着流量减小，回流区域趋于扩大。开槽模型与原始模型相比，在中部主流区的轴向速度更高，在轮缘处改进模型的轴向回流速度略高。

图 9(b) 显示了叶轮进口截面上圆周速度环量在不同工况下的分布情况。在最优工况区，叶轮进口处的速度环量分布均匀，数值接近于零，表明流体主要沿着轴向进入叶轮区域；随着流量的减小，靠近管壁处的速度环量出现了较大的波动，并且幅值随着流量的减小而增大。在最优工况区，沟槽对速度环量的分布影响不大，但在失

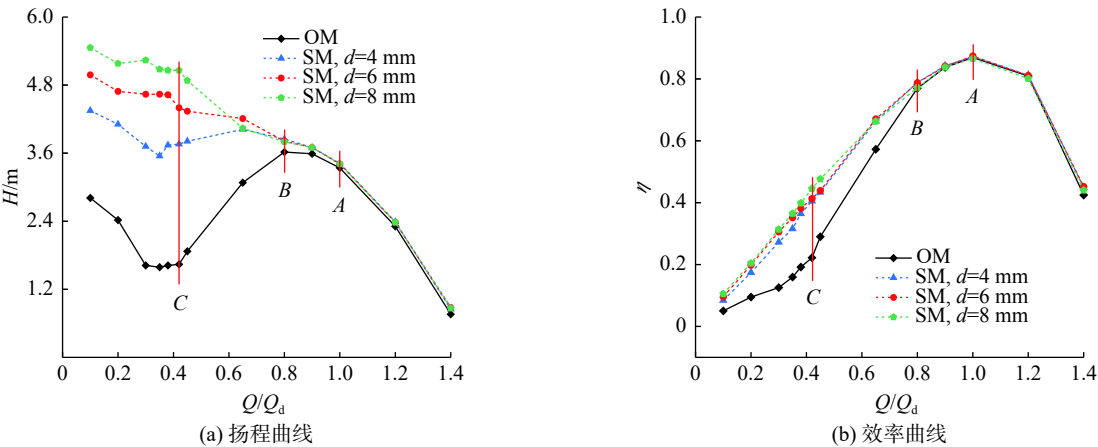


图8 水力性能曲线 (N=20, l=60 mm)

Fig.8 Hydraulic performance curves (N=20, l=60 mm)

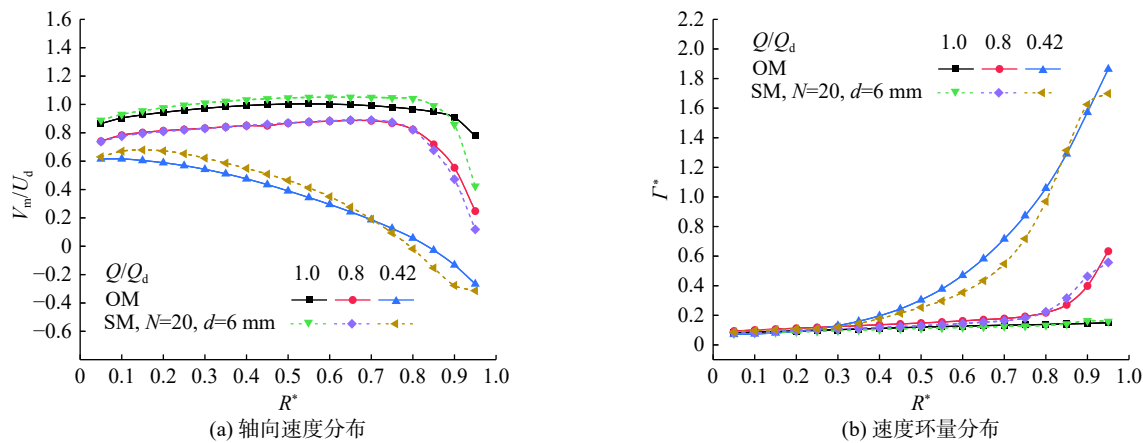


图 9 叶轮进口轴向速度和速度环量分布

Fig.9 Axial velocity and velocity circulation distribution at impeller inlet

速工况区, 沟槽结构可以减小叶轮进口处的速度环量, 使流体尽可能地沿轴向进入叶轮。

可见, 沟槽设计在增大叶轮进口轴向速度和减小周向速度环量方面都有不错的效果, 为了更直观地体现这种变化, 需要分析改型前后叶轮进口的流态分布情况。图 10 为进口截面  $Q$  准则识别的涡量及速度分布。可以看出, 靠近轮缘处的涡量最大, 轮毂侧的涡量最小, 对比分析后发现, 槽体结构对通道内的涡量强度有一定的抑制作用, 能够有效地将大范围的涡破碎成为小涡, 从而降低主流区的漩涡强度。分析其原因, 由速度

分布图可以发现, 原始模型的光滑壁面附近由于叶轮旋转效应的影响而具有较高的速度分布。结合图 11 分析可知, 开槽模型由于槽体结构的阻挡, 使得近壁面高速区得到削弱, 在沟槽内部形成一个与主流旋转方向相反的漩涡。

图 12 为失速工况 ( $Q/Q_d=0.65$ ) 下, 不同截面处的速度流线图。由图可知, 随着相对叶高的增加, 叶轮通道内的流动状态是逐渐变差的, 叶轮通道涡增加并占据了大部分流道空间, 与此同时也加剧了叶片背部的流动分离; 对比分析改进后的流动状况可以发现, 沟槽设计改变了叶轮进口

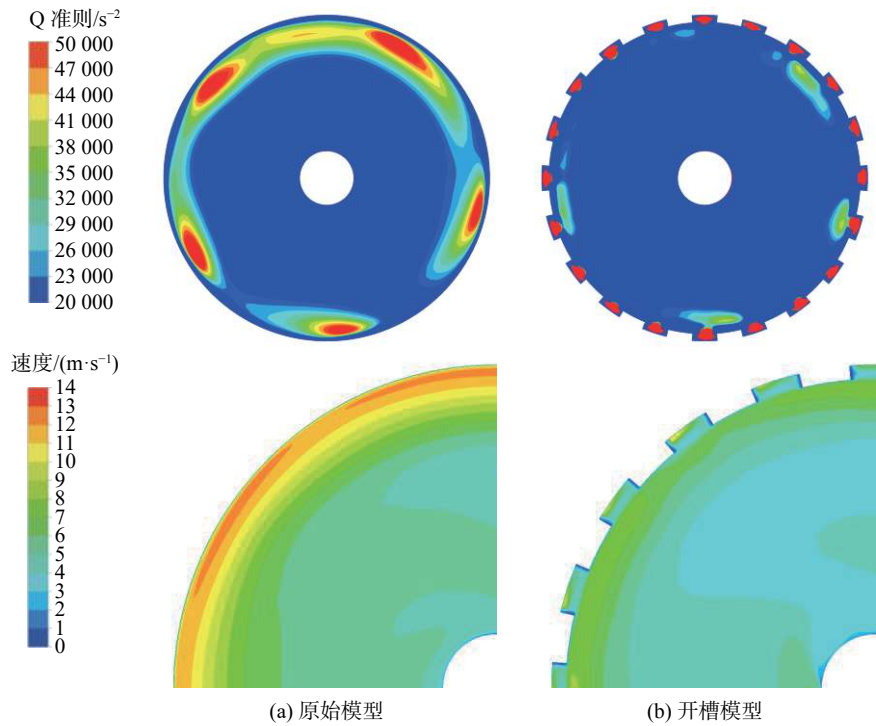


图 10 深度失速工况下叶轮进口涡量及速度分布

Fig.10 Vortex and velocity distribution at impeller inlet under the deep stall condition

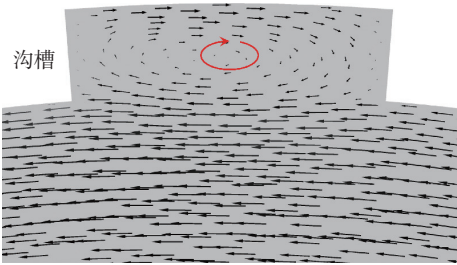


图 11 沟槽内速度矢量分布

Fig.11 Velocity vector distribution in the groove

水流的进流方向，使得进流冲角减小，增加了进口流速，并且消除了叶轮流道中的部分通道涡，改善了叶轮内部流动状况。

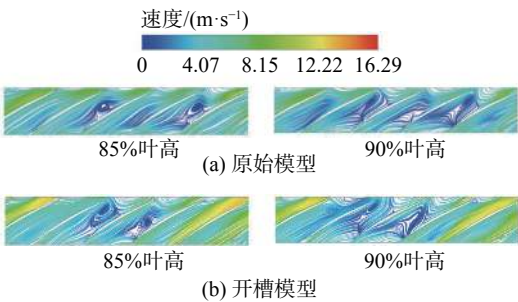


图 12 不同叶高处速度流线分布图

Fig.12 Velocity streamline at different spans of impeller

2.4 压力脉动分析

失速工况下，推进泵内的流体在进入叶轮之前会出现各种不稳定的现象，如旋转、回流和流动分离，这可能导致系统内部压力急剧变化，也就是所谓的压力脉动。如果压力脉动严重，可能会引起一系列问题，例如振动加剧、噪音增加和空化等。因此，有必要研究开槽对推进泵内部压力脉动的影响。采用频域图方法分析各监测点在条件  $Q/Q_d=1$  和  $Q/Q_d=0.65$  下的压力脉动规律。对于转速为 1350 rpm 的叶轮，其轴频为  $f_s = n/60 = 22.5$  Hz，叶片频率  $f_b = 5f_s = 112.5$  Hz，轴频率的倍数定义为  $F_n$ 。引入压力脉动系数  $C_p$ ，分析各监测探头的压力脉动特性，利用公式计算压力脉动系数  $C_p$ ，即

$$C_p = \frac{\Delta p}{0.5\rho u^2} \tag{6}$$

式中： $\Delta p$ 为监测点的静压与计算周期内的平均静压的差值； $u$ 为叶片轮缘的圆周速度。

图 13 为设计工况下 ( $Q/Q_d=1$ ) 叶轮进口监测点的压力脉动频域图。从图中可以看出，两种模型在叶轮进口的压力脉动规律相似。随着监测点靠

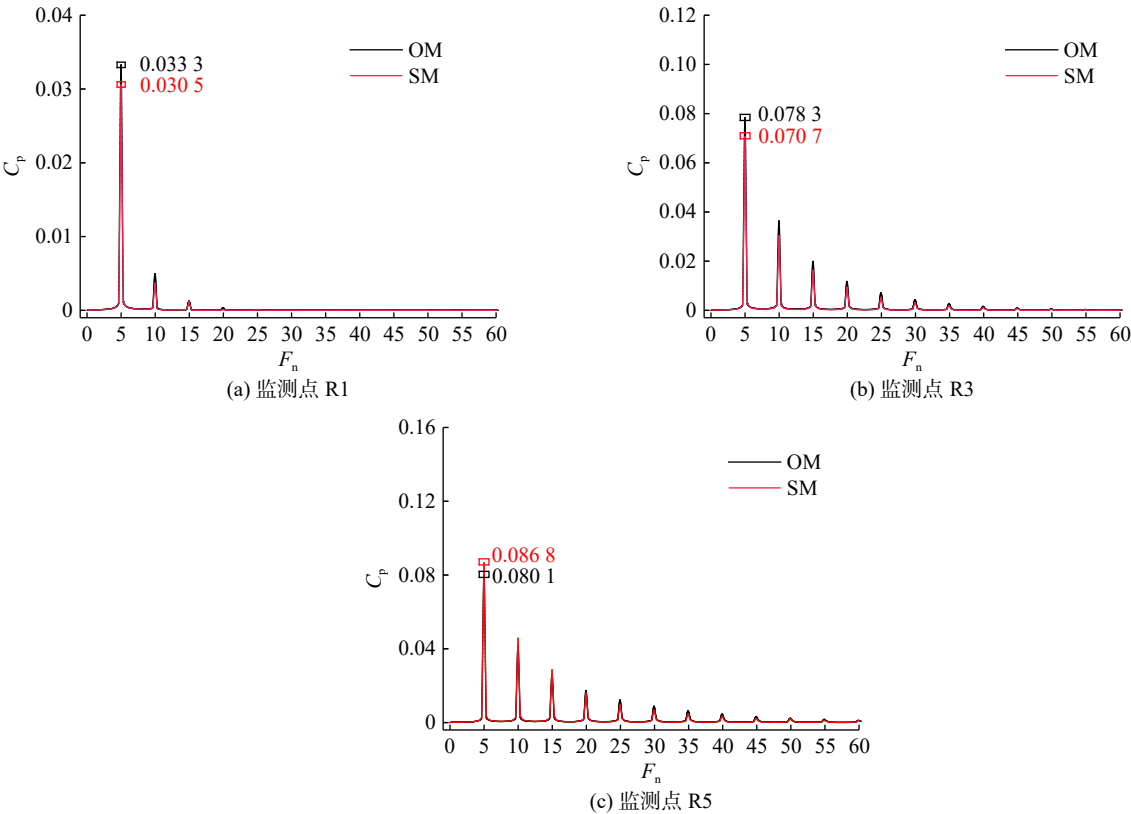


图 13 设计工况下叶轮进口压力脉动频域图

Fig.13 Frequency spectrum of pressure fluctuations at impeller inlet under the design condition

近轮缘部位, 压力脉动的幅值逐渐增大, 主要频率为叶轮叶片通过频率。这表明叶频是影响叶轮进口压力脉动的主要因素。进一步分析发现, 开槽模型在监测点 R5 的压力脉动幅值相较于原始模型稍大, 这主要是因为叶轮进口靠近轮缘部分的流体受到叶轮叶片的牵引作用, 导致周向速度较大, 同时沟槽结构的存在与叶片之间形成了动静干涉, 导致了幅值的增大。

图 14 显示, 在失速工况下 ( $Q/Q_d=0.65$ ), 推进泵内部压力脉动变得更加剧烈和紊乱, 主频部分

仍然是叶片通过频率。相对于设计工况, 监测点 R5 靠近轮缘部位的压力脉动幅值明显增加, 其中原始模型和开槽模型的压力脉动幅值分别增大了约 0.6 倍和 0.9 倍。此外, 原始模型伴随低频特征的出现。在失速工况下, 由于叶轮与槽体的动静干涉作用, 开槽模型相比于原始模型的压力脉动幅值增大了约 0.3 倍。对比分析发现, 虽然沟槽结构增加了主频压力脉动的幅值, 但却抑制了低频压力脉动。这也表明沟槽设计对于在不稳定工况下运行的推进泵具有一定的改善效果。

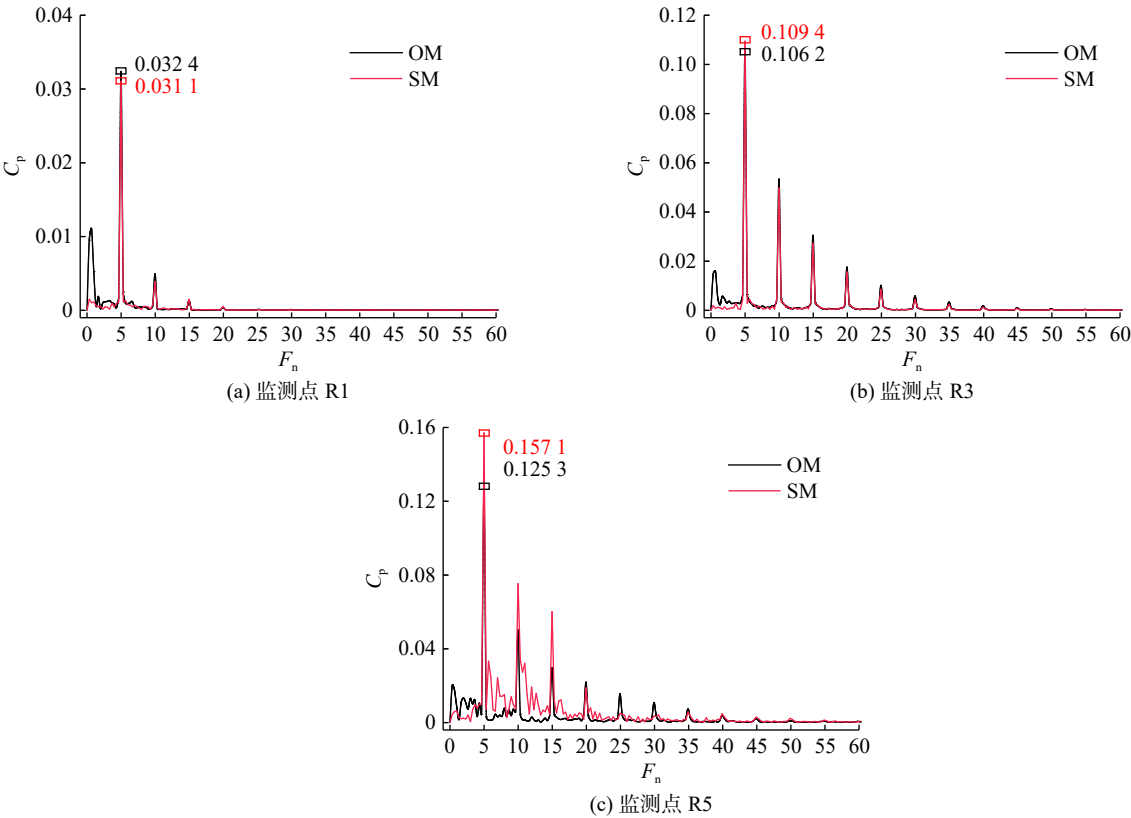


图 14 失速工况下叶轮进口压力脉动频域图

Fig.14 Frequency spectrum of pressure fluctuations at impeller inlet under the stall condition

3 结 论

采用计算流体力学方法, 对喷水推进器在多种工况下的内部流动特性展开了分析。同时, 研究了机匣开槽对推进器在小流量下不稳定流动的改善效果, 主要结论如下:

a. 在临界失速工况附近, 推进泵的扬程和效率会出现大幅度下降, 扬程和效率下降幅度分别为 39.3% 和 28.3%; 扬程曲线在  $0.42Q_d \sim 0.8Q_d$  流量范围内呈现正斜率的驼峰特性。与设计工况相比, 叶轮进口处的周向速度环量会增大, 而轴

向速度会减小, 同时会出现回流等现象。

b. 机匣开槽的流动控制技术可以有效改善推进器在小流量下的失速流动。在一定范围内, 随着沟槽深度的增加, 改善效果会逐渐变强; 当沟槽深度为 6 mm 时, 效果最佳, 推进泵在深度失速工况点处的扬程和效率分别提高了 147.6% 和 70.3%, 且驼峰现象基本消失。此外, 沟槽结构还可以对来流进行整流, 从而减少预旋, 增加轴向进流速度。

c. 在失速工况下, 沟槽能够将叶轮进口前的大范围漩涡破碎成小涡, 并且对叶轮内部的通道涡具有一定的抑制作用。此外, 沟槽的存在与叶片

之间形成了动静干涉作用，在一定程度上增大了近管壁区域的主频压力脉动幅值，但同时也抑制了叶轮进口位置的低频压力脉动。

参考文献：

[1] 王立祥. 船舶喷水推进 [J]. 船舶, 1997(3): 45–52.

[2] XIA C Z, CHENG L, LUO C, et al. Hydraulic characteristics and measurement of rotating stall suppression in a waterjet propulsion system[J]. Transactions of FAMENA, 2018, 42(4): 85–100.

[3] SHAHRIYARI M J, KHALEGHI H, HEINRICH M. A model for stall and surge in low-speed contra-rotating fans[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(8): 081009.

[4] LU G C, ZUO Z G, LIU D M, et al. Energy balance and local unsteady loss analysis of flows in a low specific speed model pump-turbine in the positive slope region on the pump performance curve[J]. Energies, 2019, 12(10): 1829.

[5] 张海胜, 徐建叶, 陈宇杰, 等. 立式轴流泵水力不稳定工况流场数值预测 [J]. 水泵技术, 2016(2): 29–32, 22.

[6] 罗欣, 郑源, 张新. 轴流泵马鞍区流场流固耦合数值模拟 [J]. 排灌机械学报, 2014, 32(6): 466–471.

[7] 周佩剑, 王福军, 姚志峰. 旋转失速条件下离心泵隔舌区动静干涉效应 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 85–90.

[8] HU F F, WU P, WU D Z, et al. Numerical study on the stall behavior of a water jet mixed-flow pump[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2014, 19(4): 438–449.

[9] HAGIYA I, KATO C, YAMADE Y, et al. Clarification of performance curve instability mechanism using large eddy simulation of internal flow of a mixed-flow pump[C]//Proceedings of ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference. Seoul, South Korea: ASME, 2015.

[10] YE W X, HUANG R F, JIANG Z W, et al. Instability analysis under part-load conditions in centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(1): 269–278.

[11] 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.

[12] KUROKAWA J. J-groove technique for suppressing various anomalous flow phenomena in turbomachines[J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2011, 4(1): 1–13.

[13] 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, 310.

[14] ZHANG R, MU T, XU H, et al. Numerical investigation of the grooves effect on the inlet flow characteristics and hydraulic performance of an axial-flow pump[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2019, 627: 012002.

[15] 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.

[16] MU T, ZHANG R, XU H, 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: 756–769.

[17] 王维, 王伟超, 张乐福, 等. 端壁开缝改善轴流泵驼峰的机理 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 12–20.

[18] 韩伟, 韩阳, 龚鹏飞, 等. 螺旋混流式喷水推进泵压力脉动的数值研究 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 136–139, 149.

(编辑：董 伟)