

进流畸变下涡流发生器对喷水推进器性能的影响研究

杜鑫

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月27日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

喷水推进器在高速航行时, 进水管斜背侧流动分离, 导致喷水推进器性能下降。在进水管入口前加装三角型涡流发生器(MRVG), 抑制推进泵的进流畸变, 提升喷水推进器效率。采用雷诺时均方程和SST $k-\omega$ 湍流模型模拟喷水推进器内部流场, 分析涡流发生器对喷水推进器整体性能和内流特性的影响规律。结果表明: 在低进速比工况下, 通过MRVG抑制流动进水管斜坡侧分离, 喷泵进流的均匀度系数提升了33.14%, 总压畸变指数下降了53.97%, 喷水推进器的推力提升了3.59%, 推进效率提升了3.35%。在高进速比工况未发生流动分离时, MRVG会增加船体阻力, 可采用主动装置进行MRVG使用工况控制。

关键词

喷水推进, 进流畸变, 涡流发生器, 流动控制

Research on the Influence of Vortex Generator on the Performance of Waterjet Propulsion under Inflow Distortion

Xin Du

School of Energy and Power Engineering, The University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 27th, 2024; accepted: May 23rd, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

During high-speed navigation, the flow separation occurs on the oblique back side of the water intake pipe of the waterjet propulsion, leading to a decline in its performance. The installation of a

triangular plow vortex generator (MRVG) in front of the inlet of the water intake pipe can suppress the inflow distortion of the propulsion pump and enhance the efficiency of the waterjet propulsion. Using the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the SST $k-\omega$ turbulence model, the internal flow field of the waterjet propulsion was simulated to analyze the influence of the vortex generator on the overall performance and internal flow characteristics of the waterjet propulsion. The results show that under low advance ratio conditions, the MRVG suppresses flow separation on the slope side of the water intake pipe, increasing the uniformity coefficient of the inlet flow by 33.14% and reducing the total pressure distortion index by 23.87%. Consequently, the thrust of the waterjet propulsion increases by 3.6%, and the propulsive efficiency improves by 3.88%. However, under high advance ratio conditions where flow separation does not occur, the MRVG may increase hull resistance, necessitating the use of active devices to control the operating conditions of the MRVG.

Keywords

Waterjet Propulsion, Inflow Distortion, Vortex Generator, Flow Control

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

喷水推进装置主要由推进泵、进水流道和操舵倒航装置组成，液体经进水流道进入叶轮，在导叶的作用下达到喷口处，通过喷流和进流动量的增量来获得推力[1]。运行时，进入喷水推进泵的水会经进水流道出现 2 次折转，形成流道出流面的二次流畸变。高航速运行时，进水流道背部发生流动分离，影响泵轮入口的进流条件，导致喷水推进泵水力性能下降[2]。

目前针对喷水推进器的研究主要关于进水流道的优化设计和泵的设计选型。Willem N [3]通过使用 RANS 方程的数值模拟结果与混流式喷水推进器实验结果进行对比，证明了采用数值模拟方法研究混流式喷水推进器的可行性，同时分析发现进水流道存在导致出流的不均匀性与喷水推进系统之间相互关系。杨琼方[4]使用 RANS 对混流式喷水推进泵叶片数进行模拟，表示喷水推进泵扬程增加与叶轮叶片数相关，但同时轴向推力增加，效率下降，经对比后叶轮数为 5，导叶数为 9 的组合使整体性能最佳，本文也选用此叶片数的混流式喷水推进泵。Bulten [5]证明了喷水推进泵进流速度场周向不均匀性的主要成因是：船底边界层的影响，流道中的弯管流动以及驱动轴的扰动。低进速比($IVR \leq 0.6$)条件下，进水管流道上壁面发生流动分离，其非均匀出流扰动喷水推进泵的内流场，导致叶片载荷发生突变，进而影响泵扬程和效率，是喷水推进系统效率下降的重要原因。金实斌[6]通过自定义泵的非均匀入流条件与均匀进流进行对比，发现喷水推进泵的扬程与效率下降幅度与非均匀程度成正比，泵进口预旋不可忽略。Cao [7]等通过数值模拟的方法，对比分析均匀入流和非均匀入流的性能偏差，发现非均匀进流在泵前顶部区域产生涡流畸变，导致泵吸入流量不均匀从而影响推进泵性能下降。

涡流发生器是一种被动流动控制方式，主要用于推迟飞机机翼边界层而被提出，通过不同能量边界层流动混合后，从而抑制边界层的流动分离。Anderson [8]提出高度低于边界层厚度的斜坡型涡流发生器，提出的 MRVG 最优结构尺寸得到广泛应用。张奕[9]在中等雷诺数平板湍流边界层中进行实验测量涡流发生器阵列下游速度场，发现微型涡流发生器可以影响近壁含能结构得空间分布，减摩阻效果可持续至下

游 80 倍自身高度处。Babinsky [10]通过改变当马赫数为 2.5 时斜坡涡流发生器的高度获得 MRVG 的精细流场结构, 展示反向旋转主涡对来自斜坡表面和来自板表面的次级涡和前缘角分离产生了马蹄涡系统。黄丛磊[11]将涡流发生器应用在喷水推进器进水流道前, 证明叶片型涡流发生器有效抑制斜坡侧流动分离, 获得显著的总压恢复提高均匀度。王忠杰[12]通过风洞实验证明 VG 控制进水管流动畸变的有效性, 提供应用的实验依据。

本文在混流喷水推进器上, 引入 MRVG 流动控制技术, 消除低进速比工况下, 进流管内的流动分离, 同时对不同工况下进行比较, 提高涡流发生器的工程可靠性。论文分析比较增加后进水流道、喷水推进器以及整体喷水推进器的内流特性以及相关参数影响, 为喷水推进器整体性能提高提供理论依据。

2. 数值模型

2.1. 计算模型

本文研究对象为平入口进水流道的混流式喷水推进系统装置, 包括进口流道、轴、叶轮、导叶和喷嘴 5 个部分, 推进泵为混流泵其叶轮叶片数为 5, 导叶片数为 9, 叶轮进口直径 $D = 0.181 \text{ m}$, 喷嘴直径 $D_n = 0.1 \text{ m}$ 。进流管入口为椭圆与矩形的组合形状, 出口为圆形且出流直径与叶轮直径相同, 流道倾斜角为 25° 。建立矩形数值计算域以模仿船底流场, 如图 1 所示, 数值计算域的长、宽、高分别为 $10D$ 、 $6D$ 和 $4D$ 。

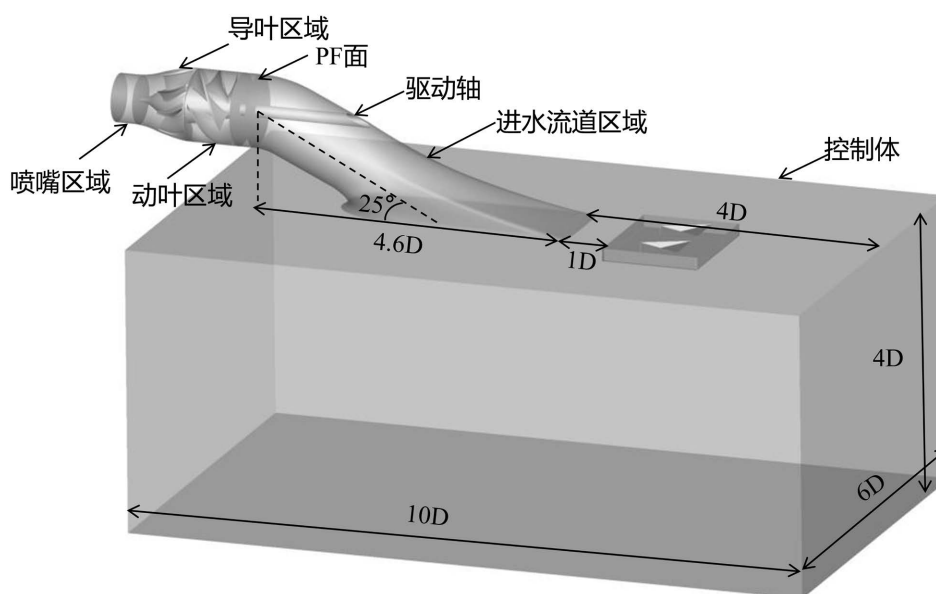


Figure 1. Physical model of water jet propulsion

图 1. 喷水推进器物理模型

涡流发生器安装在距离进水管入口前缘 $1D$ 处, 且关于控制体中心线左右对称, MRVG 高度一般为边界层厚度的 $20\% \sim 40\%$ 。周盈盈[8]分析不同结构的 MRVG 对流动分离的抑制情况, 在 $IVR = 0.5$ 工况下, 并确定了优化性能较好的几何参数尺寸 ($L = 0.82D$, $H = 0.16D$, $A = 24^\circ$), 模型如图 2 所示。

本文采用 RANS 方法对不同工况下运行的喷水推进系统进行三维、定常单向流数值模拟。基于 SIMPLEC 算法对压力速度耦合方程组求解, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型, 其中对流项采用高精度进行空间离散, 计算残差控制在 10^{-6} 。

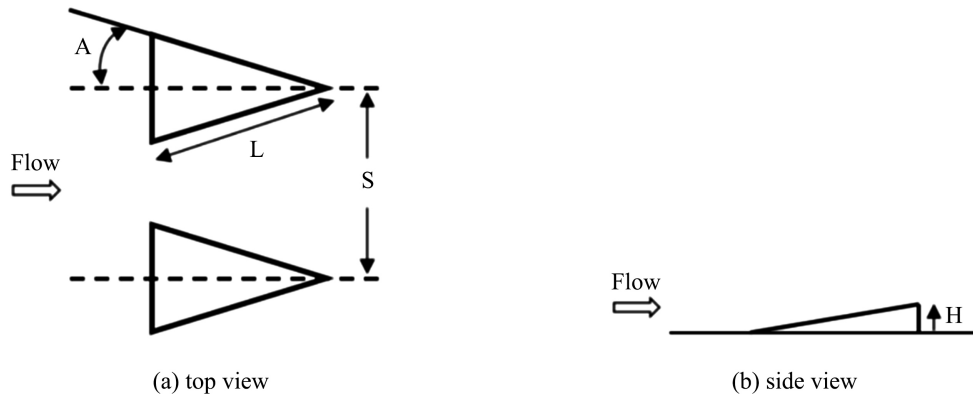


Figure 2. MRVG Geometry
图 2. MRVG 几何尺寸

应用 CFX 软件进行数值模拟，数值计算域分为静态域和动态域两个部分，其中叶轮部分为动态域，其他部分均为静态域，二者通过交界面传递流动参数。控制体上游入口给定指数形式的速度分布，代替较长距离的边界层发展。根据不同航速计算边界层名义厚度，泵轴转速为 1450 rpm，泵喷口设置为相对压力出口，控制体下游出口设置为自由出流，控制体下壁面为自由滑移壁面，侧面为镜面边界，其余边界均为固壁面。

在控制体的入口平面上规定指数形式的速度分布，以模拟边界层船体表面的发展过程，如式(1)所示：

$$\begin{cases} V = V_s \left(\frac{y}{\sigma} \right)^{1/9} & (y \leq \delta) \\ V = V_s & (y > \delta) \end{cases} \quad (1)$$

边界层厚度计算：

$$\delta = 0.27 \chi (\text{Re})^{-1/6} \quad (2)$$

式中：V 为边界层内流速； V_s 为来流速度； σ 为船底边界层名义厚度；y 为距船底的距离；Re 为雷诺数。

2.3. 网格划分及无关性验证

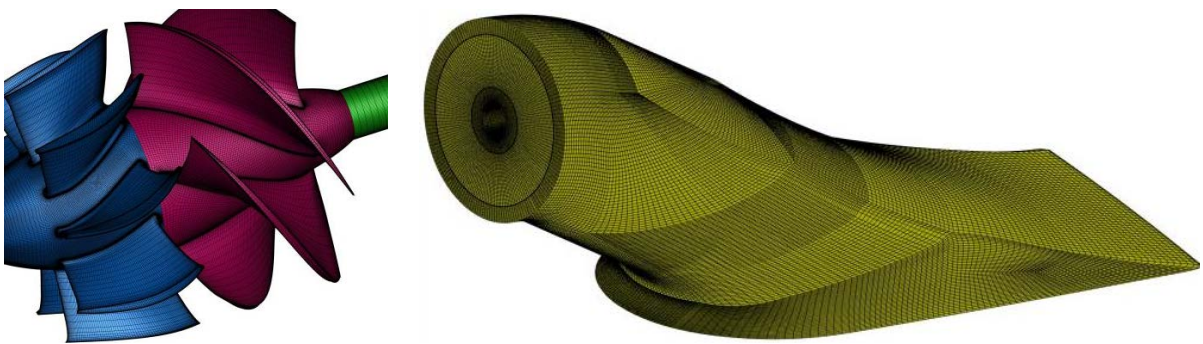


Figure 3. Grid topology
图 3. 网格拓扑结构

为保证计算过程的精度，采用结构化网格和非结构化网格混合的方式进行划分，涡流发生器区域使用非结构网格填充，其他区域采用结构化网格，在流道进口、叶轮间隙、近轴处区域进行局部网格加密，

网格拓扑结构如图 3 所示。

分别对进水流道和叶轮进行网格无关性验证。进行叶轮网格无关性验证时，水泵左端直管进口设置为速度入口，出口设置为压力出口，叶轮转速为 1450 rpm，通过出口质量流量进行网格无关性验证，如图 4 所示，当单流道网格总数大于 89 万时，监测两值得波动小于 1%，满足无关性要求。进行进水流道网格无关性验证时，进口设置为速度入口，出口设置为质量流量出口，通过出流均匀度和总压恢复系数进行网格无关性验证。最终确定总网格数量约为 985 万，其中进水流道及船底控制体 544 万，喷水推进泵 442 万。

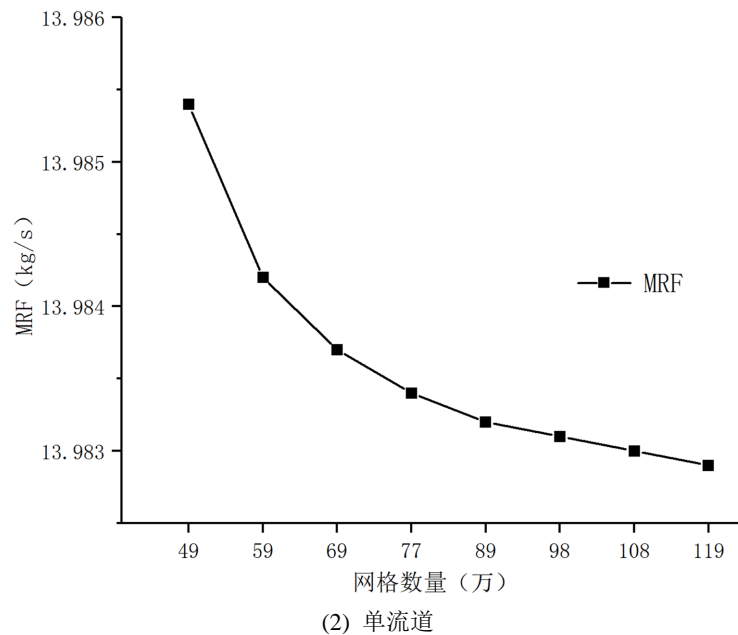
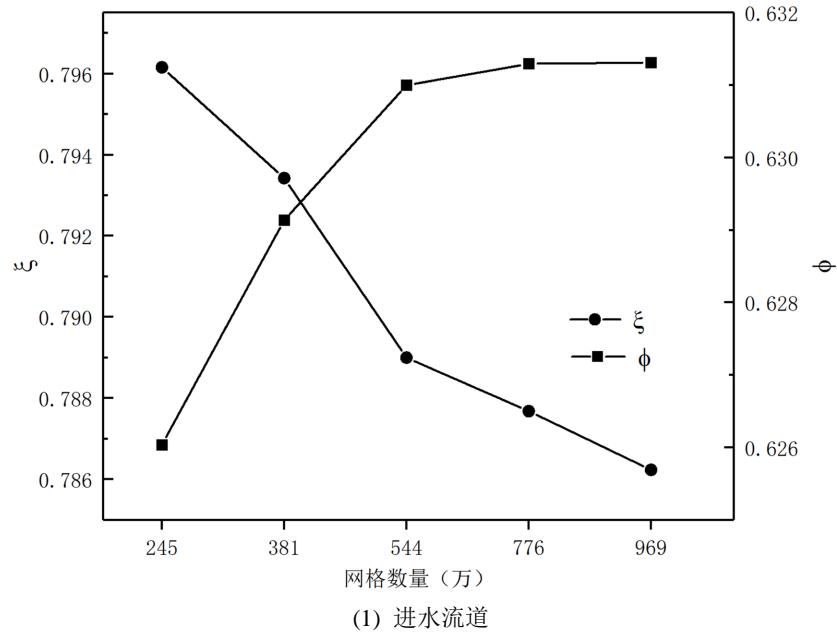


Figure 4. Grid-independent verification

图 4. 网格无关性验证

2.4. 计算方法验证

对照 Brandner [5] 的实验模型和结果, 验证了本文计算方法。图 5 给出了实验和数值计算所得的进流管斜坡侧压力分布情况, 不同工况下压力分布趋势一致, 计算结果与实验结果吻合较好, 尤其在 $IVR = 1.0$ 和 0.5 工况下倾斜直管段及靠近 PF 面处, 两者之间误差小于 5%, 计算方法是可靠的。

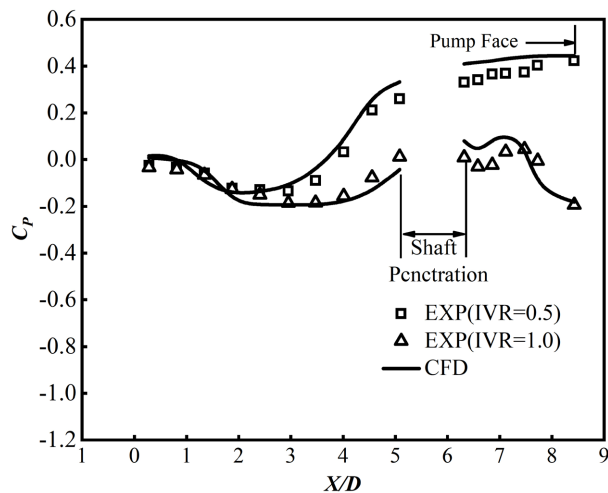


Figure 5. Comparison of experimental and numerically calculated static pressure coefficient distributions on the slope side of the inlet pipe

图 5. 实验与数值计算的进流管斜坡侧静压系数分布对比

3. 结果与讨论

进速比 IVR (进水管出口速度与航速之比) 是表征喷水推进装置工作状态的一个重要参数, 本装置中通过控制进口速度变化不同 IVR , 不同航速下的 IVR 对应关系如图 6 所示。本文利用数值模拟分析对比相对于涡流发生器在不同设计工况 ($IVR = 0.5, 0.7, 1.0$) 时对喷水推进器内流场以及整体性能参数的影响。

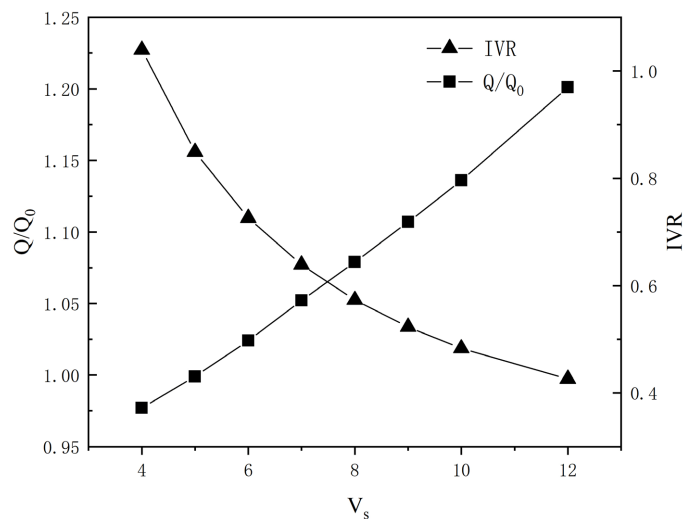


Figure 6. Navigation speed and IVR relationship

图 6. 航速与 IVR 关系

3.1. MRVG 控制进水管流动

图 7 分别为三个工况下安装 MRVG 前后弯管出流面的无量纲总压云图叠加速度矢量, 从压力分布可以看出, PF 面上压力自上而下逐渐增高, 随着 IVR 升高, 截面方向上下总压差增加。通过流动控制前后对比分析, 增加涡流发生器后可以提升进水管流面的压力, 降低总压畸变程度, 同时也减小唇部影响。IVR = 0.5 时在原型进水管顶部存在明显的反向对涡旋流, 增加 MRVG 后, 顶部旋流强度减弱, 旋流区域减小, 整体均匀性有所提高。

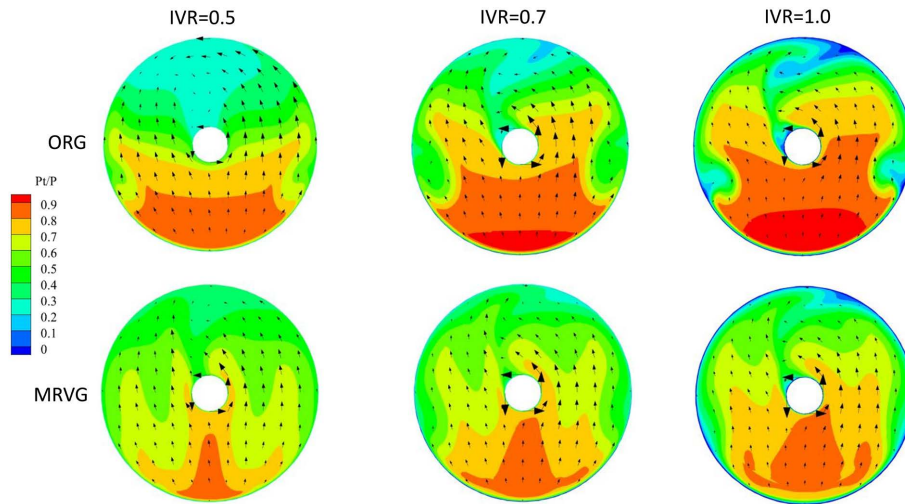


Figure 7. PF surface dimensionless total pressure contour and velocity vectors
图 7. PF 面无量纲总压云图和速度矢量

图 8 为进流管剖面得无量纲轴向速度云图和流线。在低 IVR 工况下, 进流管由 S 弯吸入边界层流体后产生斜坡侧明显得流动分离, MRVG 延迟了分离减小畸变。斜坡侧流动分离产生的泵进流面上端低速区会减小泵的性能和系统效率。但是在高 IVR 工况下, 进流管内并没有流动分离现象, 所以 VG 对高工况影响较小, 甚至会因为额外附加阻力产生负面影响。

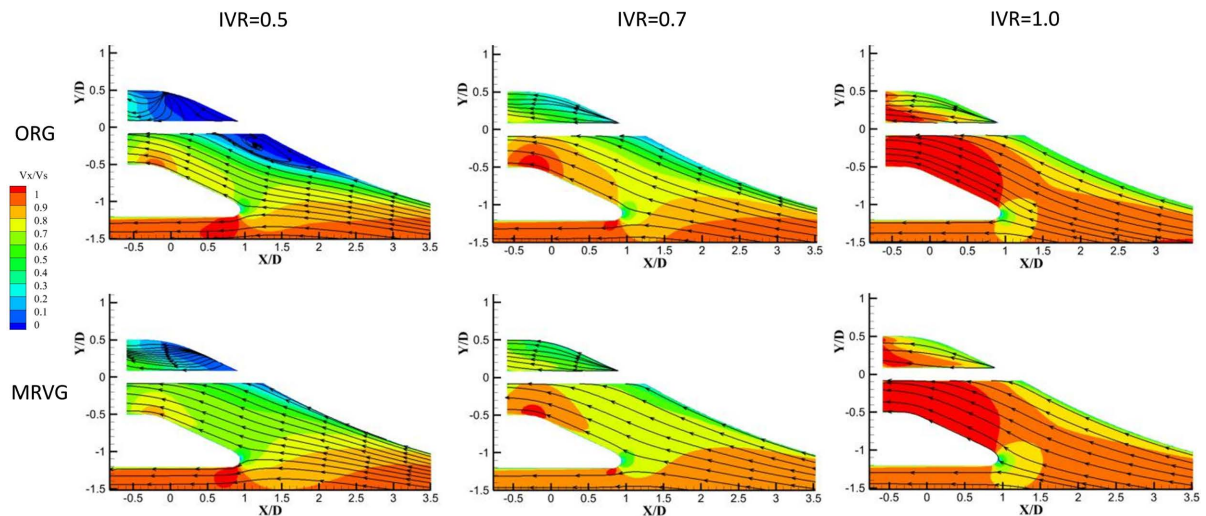


Figure 8. Dimensionless velocity contours and flow lines for inlet pipe profiles
图 8. 进水管剖面无量纲速度云图和流线

图9为安装 MRVG 后在 PF 面上的轴向速度的均匀度和总压畸变指数随进速比 IVR 变化的过程。在低 IVR 工况下，截面均匀度较低，这会造成喷水推进泵性能下降，从而影响整体喷水推进系统的推进性能，其主要原因是高航速区间运行时，流体在斜坡侧会产生流动分离。增加 MRVG 后，对低工况下可以减少流动分离，从而较大幅度提高 PF 面的均匀度，减小总压畸变，而对高工况下，斜坡侧未出现流动分离现象，MRVG 的影响略有减弱。

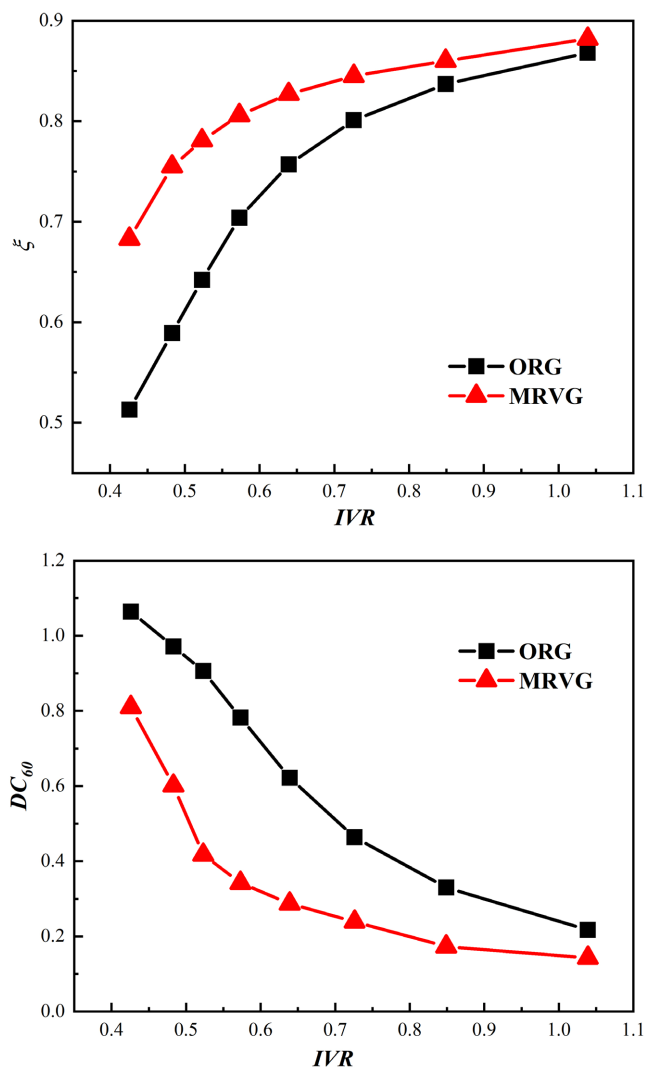


Figure 9. Intake channel performance parameters

图9. 进水流道性能参数

3.2. MRVG 对叶轮影响

通过以上分析，可以看出在低 IVR 工况下，MRVG 对进水流道有较明显的改善，但是在高 IVR 工况下，整体趋势大致不变。在不同工况下，对叶轮内部流动进行分析。

图10和图11展示进入叶轮前端和50%叶高处的叶轮湍动能分布。流动分离、轴的转动和唇部的旋流引起高湍动能流动，进入叶轮后延伸至两个叶片通道，干扰出口射流。由于导叶后面的尾迹混合产生更多损失。横向对比可以看出，随着 IVR 的增大，泵入口前端的湍动能越小，流动不稳定性损失减小。

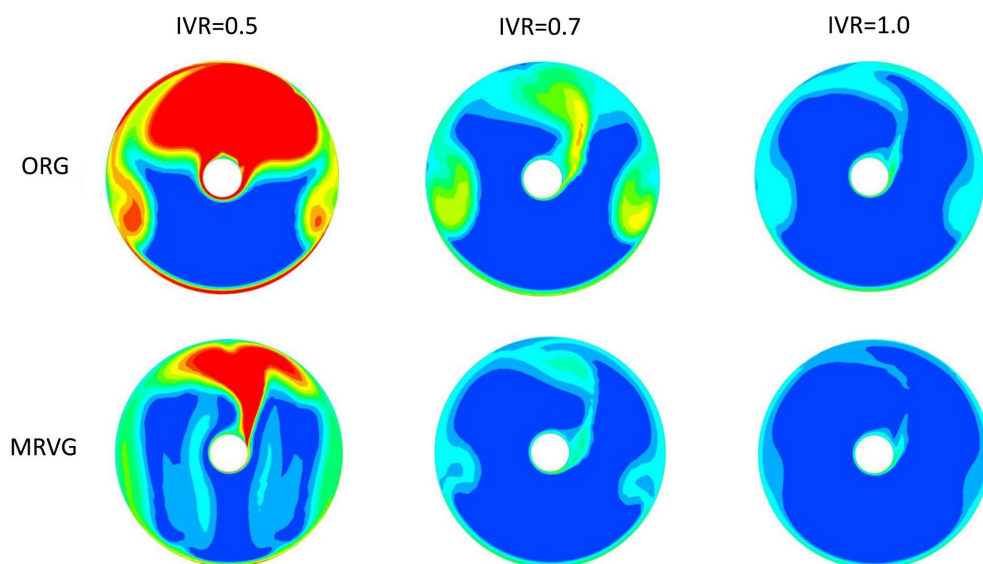


Figure 10. Turbulent kinetic energy contour before the impeller
图 10. 叶轮前湍动能云图

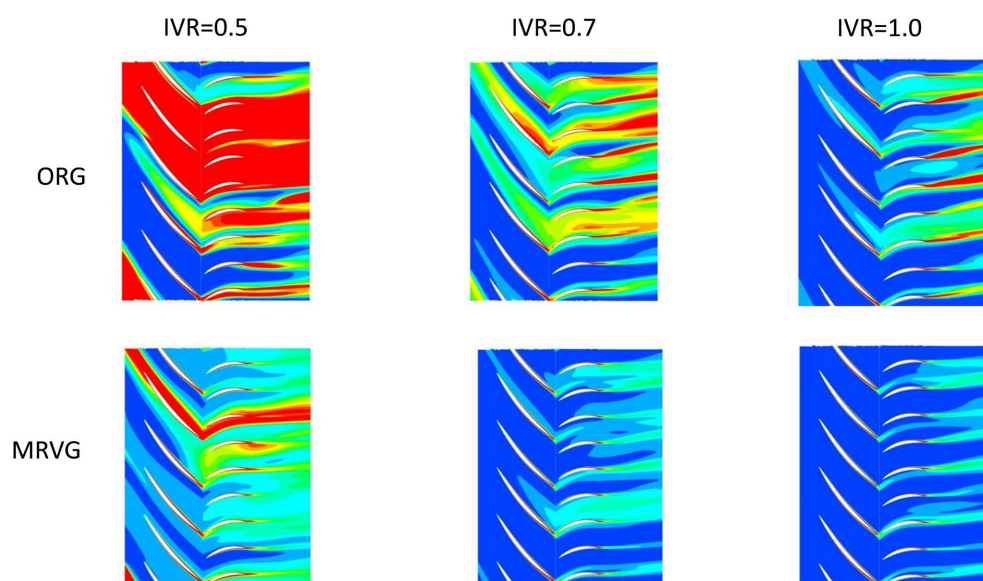


Figure 11. Turbulent kinetic energy contour at the span0.5
图 11. 50%叶高处流道湍动能分布

低 IVR 工况下, 对应斜坡侧流动分离延伸, 在动叶前上端有明显的高湍动能区后流入泵内, 这对泵流会产生较大损失, MRVG 减小泵入口前分离尾流的尺寸, 减小畸变区和损失, 也减少了在泵内流动的损失, 使叶片出口更加均匀, 提高射流量。

3.3. 喷嘴处流动影响

图 12 和图 13 显示了喷嘴出口平面内的总压力和湍动能的云图。MRVG 增加了两种压力的均匀性, 表明流体粒子的能量和动量均均匀。MRVG 不仅降低了湍流强度, 而且降低了上游尾流引起的湍流点。均匀的总压和湍流分布意味着喷嘴内的混合损失减少和推力增加。

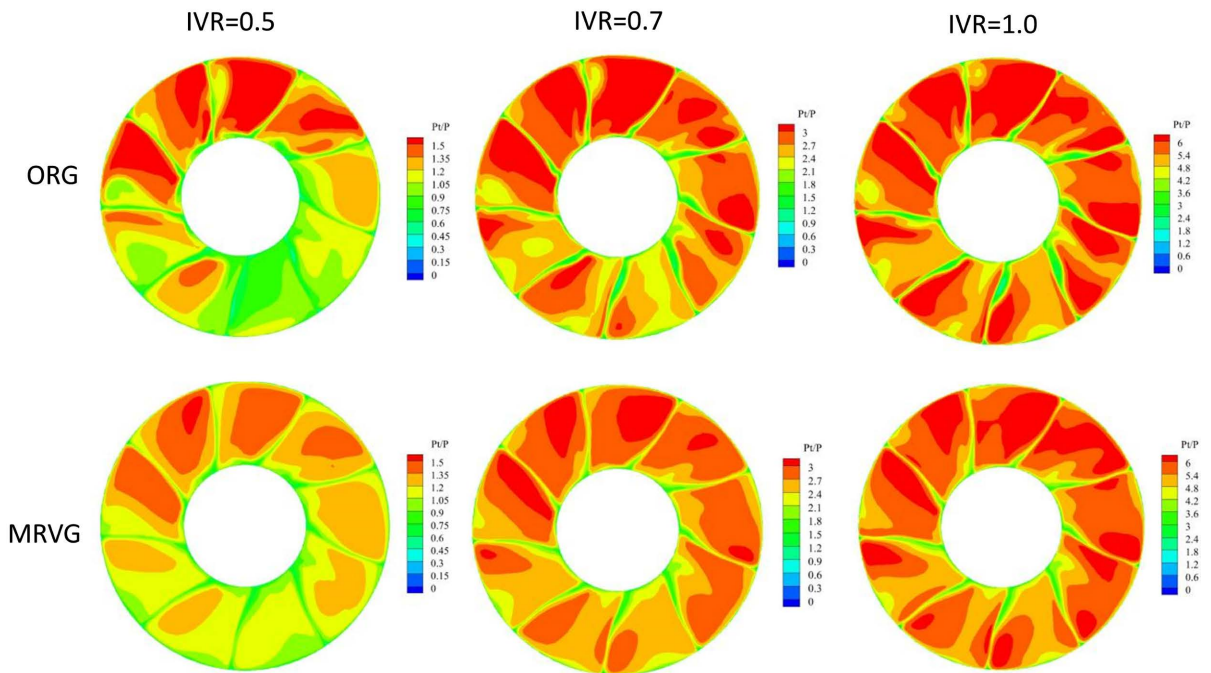


Figure 12. Nozzle outlet relative total pressure distribution contour
图 12. 喷嘴出口相对总压分布云图

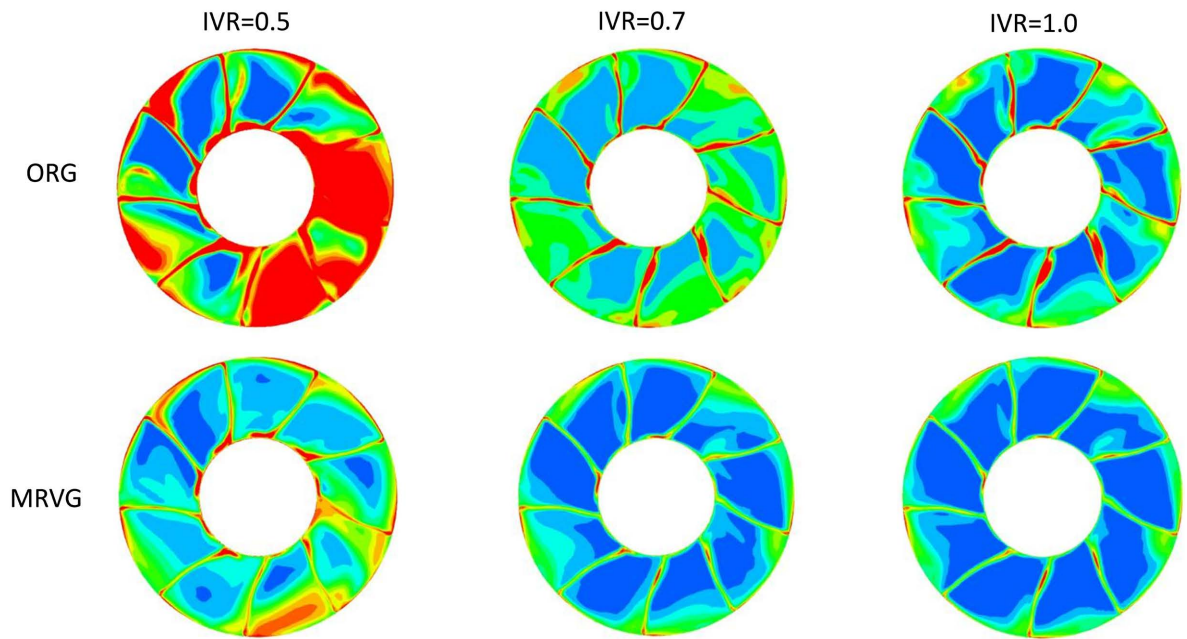


Figure 13. Turbulent kinetic energy distribution contour at nozzle exit
图 13. 喷嘴出口湍动能分布云图

3.4. 水力性能改善

为衡量喷水推进器内部性能改善，所选用的泵效率、推进效率和推力计算采用式(1)~(3)：

$$T = \rho q (V - \alpha V_s) \tag{1}$$

$$\eta_p = \frac{\rho g Q H}{N} \quad (2)$$

$$\eta_d = \frac{TV}{M \frac{2\pi n}{60}} \quad (3)$$

式中： ρ 为水的密度， kg/m^3 ； q 为体积流量， m^3/s ； V 为喷水推进器出口速度， m/s ； α 为进流面的动量影响系数，取值范围为 0.8~0.9 本文选 0.85； V_s 为航速， m/s ； N 为推进泵功率， W ； H 为扬程， m ； M 为扭矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

喷水推进泵实际工作时，进水流道的非均匀流叠加高速旋转的叶轮扰动非均匀流，较均匀进流相比会降低喷水推进泵的扬程和效率。图 14 展示了 1450 rpm 转速下喷水推进泵分别在均匀进流和进水流道条件下的外特性曲线。可以看出在相同转速下，泵在出口均为相对压力为 0 时，吸入的流量变化约在 10%，航速越高，吸入流量越大，IVR 越小。增加进水流道后由于进流畸变产生了泵扬程和效率的降低，且航速越大对喷水推进泵影响越大，曲线越偏离直管段泵的外特性曲线。泵端非均匀进流演变为周向分离涡，将叶轮流场分解为堵塞区与过流区，各区域内冲角的变化诱发流动分离和旋涡，改变静压分布，引起叶片载荷突变，削弱喷水推进泵做功能力，所以直管段的扬程和泵效率均效果好于非均匀进流。在高 IVR 工况下运行时，喷水推进泵效率较高，增加 MRVG 相当增加阻力，并不会对整体性能产生正向影响。但是在低 IVR 工况运行时，增加 MRVG 可以同时提高扬程和效率。

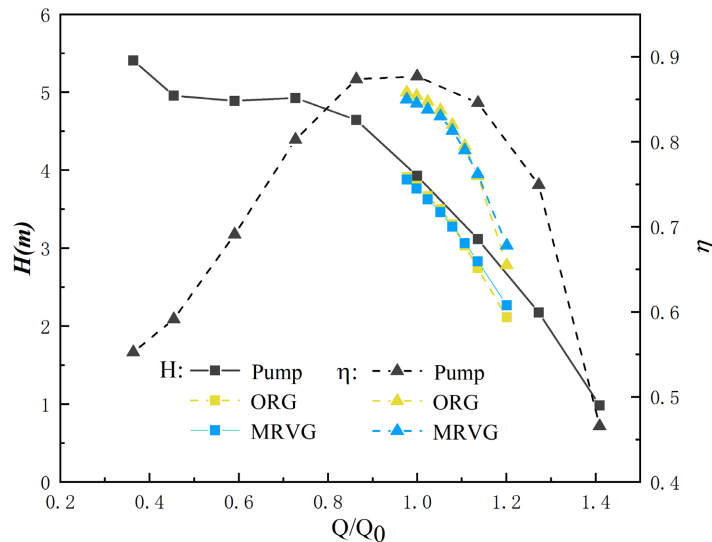


Figure 14. Comparison of external characteristic curves of water jet propulsion pumps

图 14. 喷水推进泵外特性曲线对比

为了直观反应喷水推进器性能参数变化，图 15 给出了不同工况下喷水推进器不同效率和推力对比。推进器的推进效率由泵效率和系统效率组成，由图 15 可知，喷水推进泵效率随 IVR 增高而增高，系统效率和推进效率随 IVR 的增大先增大后减小，推力随着 IVR 增大而增大。在 IVR 小于 0.63 时，增加 MRVG 可以使性能达到提升效果，泵效率、推进效率和推力分别提升 2.9%、3.35% 和 3.59%。综上分析可知，在低进速比工况下，由于高速流体进入进水流道产生流动分离，增加 MRVG 可减小分离和进流畸变，提升进流质量使泵和喷水推进器的性能增加；而在高进速比时，流动分离现象不明显，增加 MRVG 相当于

外加阻力, 不适应高 IVR 情况, 可以考虑通过外加主动控制, 在特定工况下通过涡流发生器减小畸变, 提高喷水推进器多工况适应。

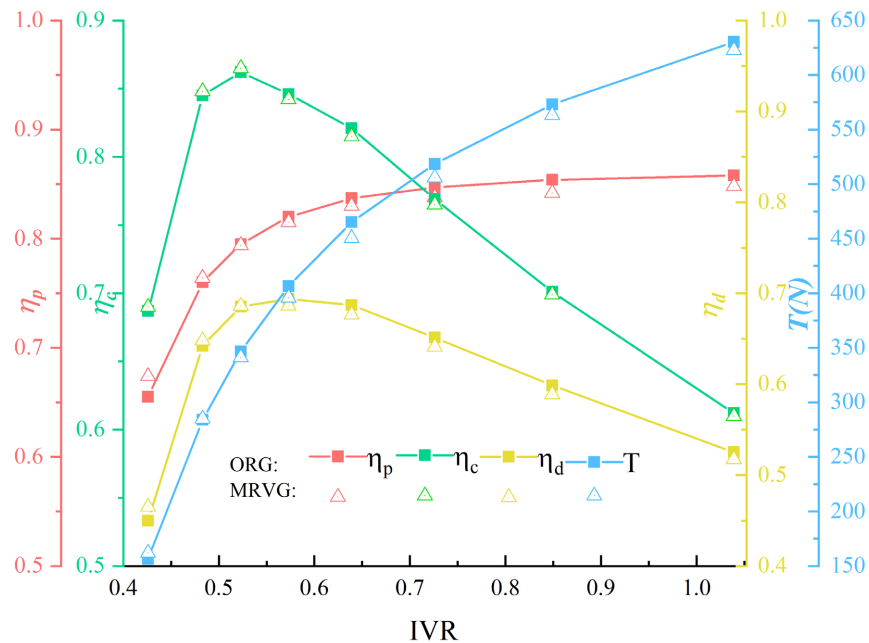


Figure 15. Changes in water jet propeller performance parameters

图 15. 喷水推进器性能参数变化

4. 结论

本文研究了在不同进速比工况(IVR = 0.5、0.7、1.0)下使用斜坡型涡流发生器(MRVG)对喷水推进器性能和流场的影响及工况适应性问题。结论如下:

1) 低进速比工况下, 安装涡流发生器可以抑制进水管斜坡侧流动分离, 明显提高进水流道出流均匀性。当 IVR = 0.5 时, 出流均匀性从 0.58 上升到 0.76, 总压畸变系数从 0.97 下降到 0.6, 进水管性能有明显提高。当 IVR > 0.7 时, 性能改善效果减弱。

2) 入口畸变会影响喷水推进泵性能最终影响整个装置的推力及效率。增加 MRVG 后, 对 IVR < 0.63 工况时, 对进水流道性能影响的提高反应在喷水推进泵上, 喷水推进泵的扬程、泵效率最高提升 7.34%、3.51%, 喷水推进器的推进效率和整体推力最高提升 3.35% 和 3.59%。

3) 在高进速比工况下, 增加 MRVG 后影响可以忽略不计, 实际运行可以增加主动装置控制在低 IVR 工况下使用, 提高工况适应性。

参考文献

- [1] 王立祥. 喷水推进技术及工程设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021
- [2] 王洋, 曹璞钰, 印刚, 等. 非均匀进流下喷水推进泵的内流特性和载荷分布[J]. 推进技术, 2017, 38(1): 69-75.
- [3] Willem, N. and Bulten, H. (2006) Numerical Analysis of a Waterjet Propulsion System. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- [4] 杨琼方, 王永生, 张志宏, 丁江明. 叶片数对喷水推进器性能影响的计算流体动力学分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 222-228.
- [5] Bulten, N. and Verbeek, R. (2007) Development of New Water-Jet Installations for Applications with Reduced Tran-

-
- som Width. *Proceedings of the 9th International Conference on Fast Sea Transportation FAST2007*, Shanghai, 23-27 September 2007, 293-298.
- [6] 金实斌, 曹璞钰, 王洋. 非均匀进流下喷水推进泵进流速度场的数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(2): 115-121.
- [7] Cao, P.Y., Wang, Y., Xiang, Z., *et al.* (2017) Concentrated Separation Vortex Induced by Nonuniform Suction Flow and Its Role in Performance Breakdown of a Water-Jet Pump. *Advances in Mechanical Engineering*, **9**, 258-269. <https://doi.org/10.1177/1687814017703349>
- [8] Anderson, B.H., Tinapple, J. and Surber, L. (2006) Optimal Control of Shock Wave Turbulent Boundary Layer Interactions Using Micro-Array Actuation. 3rd AIAA Flow Control Conference, San Francisco, 5 June-8 June 2006, 2006-3197. <https://doi.org/10.2514/6.2006-3197>
- [9] 张奕, 潘翀, 窦建宇, 等. 微型涡流发生器影响下的湍流边界层流场与摩阻特性[J]. 实验流体力学, 2023, 37(4): 48-58
- [10] Babinsky, H., Li, Y. and Ford, C.W.P. (2009) Microramp Control of Supersonic Oblique Shockwave/Boundary-Layer Interactions. *AIAA Journal*, **47**, 668-675. <https://doi.org/10.2514/1.38022>
- [11] 黄丛磊, 戴韧, 潘振威. 涡流发生器对喷水推进进水管内流场影响数值研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(9): 2298-2304.
- [12] 王忠杰, 黄丛磊, 陈榴, 等. 涡流发生器抑制喷水推进器进水管总压畸变的实验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2023, 38(2): 270-277.