DOI: 10.3901/JME.2020.14.216

第二代涡识别方法在混流泵内部流场中的适用性分析*

赵斌娟¹ 谢昀彤¹ 廖文言¹ 韩璐遥¹ 付燕霞¹ 黄忠富²

(1. 江苏大学能源与动力工程学院 镇江 212013;

2. 江苏科技大学材料科学与工程学院 镇江 212003)

摘要: 流体机械内部涡的产生会严重影响流体机械的内流场及外性能, 速度、压力等传统方式并不能全面揭示流场真实的流动情况, 而涡识别方法可以表征混流泵内部涡结构, 识别涡的大小、位置和演变规律。采用大涡模拟对混流泵内部流场进行高精度数值模拟, 由此获得不同涡识别方法(涡量、螺旋度方法、 λ_2 准则和 Q 准则)在混流泵内流场中识别出的涡结构。结果表明: 与涡量准则法相比, 采用第二代涡识别方法更能获得详细的混流泵内部的涡结构。其中, Q 准则能剔除绝大部分的剪切层影响, 较其他涡识别方法更好地捕捉混流泵内部的涡结构, 显示的涡大小更加精确。通过 Q 准则的识别, 提取了混流泵叶轮流道内规则的通道涡, 此类型涡结构均匀分布在各个流道, 叶片叶顶泄漏涡结构清晰, 摆脱了壁面剪切层的干扰; 导叶叶片靠近轮毂处同样获取了规则的通道涡, 通道涡均匀的分布在各个流道内, 叶片尾缘脱落涡摆脱了壁面剪切层的干扰, 可以看到清晰的涡结构。 Q 准则在第二代涡识别方法中脱颖而出, 更适用于混流泵内流场的涡识别, 在涡结构以及涡大小的显示方面都具有优势, 可用于旋转机械内流场的分析。

关键词: 混流泵; 大涡模拟; 涡识别; Q 准则; 螺旋度方法; λ_2 准则

中图分类号: TH311

Adaptability Analysis of Second Generation Vortex Recognition Method in Internal Flow Field of Mixed-flow Pumps

ZHAO Binjuan¹ XIE Yuntong¹ LIAO Wenyan¹ HAN Luyao¹
FU Yanxia¹ HUANG Zhongfu²

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

2. School of Materials Science and Technology,

Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003)

Abstract: Internal and external properties of fluid machinery are affected by the vortices generated in the machine. Traditional methods such as speed and pressure fail to reveal the true flow of the flow field. The vortex identification method succeeds in characterizing the internal vortex structure of the mixed-flow pump and identifying the size and position of the vortex and evolution. Large eddy simulations are used to obtain the vortex structures of different vortex identification methods (vorticity, helicity method, λ_2 criterion, and Q criterion) in the flow field of a mixed-flow pump. The results show that the second generation vortex identification method can obtain the detailed vortex structure inside the mixed-flow pump more than the vorticity criterion method. Among them, the Q criterion eliminates most of the influence of the shear layer, and presents the obvious superiority in capturing the vortex structure inside the mixed flow pump, and accurately displaying the vortex size. Through the identification of the Q criterion, the regular channel vortices in the impeller flow channel of the mixed-flow pump are extracted and evenly distributed in each flow channel. The structure of the vortex leakage at the blade tip is clear, and the interference of the shear layer on the wall is eliminated. In order to form a regular channel vortex, the blade trailing edge vortex sheds the interference of the wall shear layer, and a clear vortex

* 国家自然科学基金(51609107)、江苏省高校优势学科建设工程和西华大学
省部级学科平台开放课题(szjj2018-123)资助项目。20190910 收到初稿,
20200209 收到修改稿

structure can be seen. The Q criterion is more appropriate for vortex identification of the flow field in a mixed-flow pump. It offers advantages in displaying the vortex structure and the size of the vortex, which can be used to analyze the internal flow field of rotating machinery.

Key words: mixed-flow pump; large eddy simulation; vortex recognition; Q criterion; helicity method; λ_2 criterion

0 前言

混流泵具有扬程高、流量大、高效区宽等优点,并能对驼峰现象有较好的改善,致使其在众多领域具有广泛的应用,但其内部涡的产生、发展及耗散过程会影响混流泵内部流场以及泵的外特性,引发压力脉动、旋转失速以及运行的不稳定性等问题^[1-3]。我国著名流体力学家陆士嘉曾说过“流体的本质是涡,因为流体经不住‘搓’,一‘搓’就‘搓’出了涡。”^[4]在有黏流体的流动内部处处是涡,涡的产生会诱导振动和空蚀,进而影响泵的稳定运行,增加能量损失,降低扬程和效率。因此,利用涡识别技术探索混流泵内部流场涡的产生和发展不仅丰富了涡动力学的研究内容,且具有工程应用的经济价值。

目前,对混流泵内部流场的分析已经不能满足于简单的压力分布、速度矢量或者流线等常规参数,这些参数基本上是连续变化的,无法揭示引起流动突变的内在原因。混流泵内部的旋涡流动是非定常的,从而使得研究问题变得更复杂^[5];对旋涡的研究处于不断的探索中,发展了多种涡识别技术。从最初将涡量高度集中的区域认作为涡,用涡量来表征涡结构;到后来提出的 Q 准则、 λ_2 准则、 Δ 准则、 λ_{ω} 准则和螺旋度等方法^[6]。付炜嘉等^[7]通过涡量云图分析了悬停状态旋翼桨尖涡的涡结构细节,捕捉到细小蠕虫涡结构及“涡对”现象。李伟等^[8]利用正则化螺旋度法提取混流泵启动过程瞬态流场涡核并进行内流场分析,研究结果表明启动过程中叶轮流道内正向涡与反向涡交替出现,之后的发展正向涡占主导地位。ELSAS 等^[9]验证旋转强度准则识别涡结构的正确性,研究表明 λ_{ω} -criterion 适用于湍流边界层的识别。王维军等^[10]基于正则化螺旋度、 Q 准则、BVF 诊断等研究了离心泵中涡结构、涡演化和涡的相互作用,分析表明叶片表面分离出来的旋转方向相反的涡旋正是离心泵脉动的根源。ZHANG 等^[11]详细介绍了几种典型的涡识别方法,针对水轮机中的涡识别进行研究,为水轮机(或涡相关学科)的研究人员提供了一个清晰的图景和指导。

本文通过大涡模拟获取混流泵的内部流场,分别利用螺旋度方法、 λ_2 准则和 Q 准则进行涡结构分

析,对比分析这三种第二代涡识别方法对混流泵内部涡识别的可行性和适应度。

1 数值计算

1.1 计算区域及网格划分

本文的研究对象是一导叶式混流泵,额定转速为 1 450 r/min,额定流量为 1 562 m³/h,额定扬程为 5.5 m;进出口管径为 350 mm,叶轮叶片数为 4,导叶叶片数为 7。模型采用三维 Pro/Engineer 建模软件根据叶轮与导叶木模图造型,整体计算区域分为 4 个部分:进口段、叶轮段、导叶段和出口段。进出口段为满足流动充分发展的要求,长度均确定为管径长度的四倍,混流泵整体计算模型如图 1 所示。

图 1 导叶式混流泵计算域

本文利用 ANSYS-CFX 进行模拟,模拟方法采用大涡模拟(LES),其基本思想是通过滤波函数区分大尺度涡和小尺度涡,对大尺度涡进行直接数值模拟,小尺度的涡则进行亚格子应力模型处理^[12]。LES 以网格尺寸为标准,通过控制网格尺寸控制对湍流的解析,网格越密,模拟结果越好。因此本文对计算域进行分块结构化网格划分,边界层进行加密,尤其是叶片附近以满足 LES 计算要求,图 2

图 2 计算域各分段结构网格示意图

是各部分计算区域及结构化网格划分示意图,混流泵整体区域的 Y^+ 值均小于 25, 满足大涡模拟对网格的要求。

随着网格数量的增加, 计算精度随之提高, 同时数值模拟的时间也会随之加长, 运算成本增大。因此综合考虑以上因数, 对 6 种不同密度的网格进行网格无关性检验, 模拟采用大涡模拟的 Smagorinsky 亚格子应力模型进行计算, 计算结果扬程及效率不因网格数量的变化而产生较大的影响, 且兼顾计算的经济性时, 此时是最符合计算要求的网格, 结果表明当网格数在 731 万时扬程和效率不随着网格数的增加产生较大变化, 此时确定进口段的网格数为 650 496, 叶轮段的网格数为 3 334 584, 导叶段的网格数为 2 171 070, 出口段的网格数为 1 159 836。

1.2 边界条件及计算方法

本文进口边界设置为速度进口, 泵进口的湍流强度设为 5%(中等湍流强度), 出口给定压力值, 参考压力为 10^5 Pa, 相对静压设置为 0 MPa, 固壁条件采用无滑移壁面, 叶轮壁面设为旋转壁面, 近壁处的壁面函数选择 ANSYS CFX 内嵌的标准壁面函数处理。为保证计算的正确性, 残差收敛精度设置为 1×10^{-5} , 叶轮旋转十圈, 总时间为 0.413 793 1 s, 时间步长设置为 0.000 344 827 5 s, 即每旋转 3° 计

算一次, 考虑到存储量问题, 叶轮每旋转 20° 保存一次计算结果, 取最后 5 圈非定常结果进行分析。

1.3 计算结果及验证

图 3 为混流泵不同截面的绝对流线分布图, 其中图 3a、3b、3c 分别是叶轮中部截面、导叶中部截面和导叶出口截面, 从图中可以看出, 叶轮中部截面上的流线在叶轮吸力面附近较为紊乱, 存在旋涡, 导叶中部叶片靠近轮毂处的流线呈现出非对称性, 流道内的涡有向周向运动的趋势, 导叶出口处的流线更加混乱, 导叶流道内的旋涡不断发展成涡对, 叶片尾缘处的涡被分解成若干小涡。

速度矢量的旋度称为涡量, 涡量 $\omega = \nabla \times V$, 第一代涡识别方法即涡量准则法认为涡量高度集中的流体区域就是涡。其物理意义由 Boussinesq 在 20 世纪改进 Stokes 的局部角速度解释而提出来的: 流体的涡量是应变率张量主轴旋转角速度的两倍^[13]。图 4 是涡量云图, 与速度流线图相对应, 叶轮和导叶中部截面前后盖板处有较大的值, 叶轮吸力面附近存在较小的涡结构, 导叶流道内分布着大小相差不大的通道涡, 导叶尾缘的涡主要是叶片靠近轮毂处的通道涡和叶片尾缘的脱落的涡。但从图中可以看出涡量大的地方不一定存在旋涡, 由此可见涡量并不能代表旋涡, 涡量准则在涡的识别方面存在欠缺。

图 3 混流泵不同截面绝对流线分布图

图 4 混流泵不同截面涡量分布云图

此外, 为了验证数值模拟结果的准确性, 在本单位 B 级精度水泵性能试验台上进行了模型泵外特性试验, 试验选取不同流量作为测试点, 获取其对应的扬程与效率; 数值模拟同样设置扬程监控及计算出效率, 将试验结果与数值模拟结果进行对照。如图 5 所示, 试验扬程与数值模拟得到的扬程基本一致, 模拟效率的趋势与试验效率的趋势相同, 试验与模拟得到的效率误差范围在 4% 以内。综上所述, 认为数值模拟结果准确, 可以反映混流泵内部的真实流动情况。

图 5 试验与数值模拟性能曲线对比

2 第二代涡识别方法简介

涡量为研究方法的涡识别技术已应用于各个领域, 随着研究的不断深入, 众学者提出 H_n 、 Q 、 λ_2 、 Δ 和 λ_{ci} 等方法来识别涡结构, 这些方法是在涡量的基础上对涡量就是涡这个定义进行了修正, 并把上述方法统分为第二代涡识别方法, 涡量为代表的涡识别技术被定义为第一代涡识别方法, 本文选取应用最为广泛的几种涡识别方法进行研究。

2.1 螺旋度方法

螺旋度和螺旋密度最早由 MOFFATT^[14]提出, 螺旋密度的体积积分为螺旋度。螺旋度用来衡量流动中涡线交互的混乱程度^[15], 后经学者研究提出归一化螺旋度法(H_n)

$$H_n = \frac{V \cdot \omega}{|V||\omega|} \quad (1)$$

式中, V 为速度, ω 为涡量。速度和涡量在涡核心区域的值较大, 两者之间的夹角较小, 而 H_n 的物理意义为 V 和 ω 之间角度的余弦, 因此 H_n 可以捕捉到涡核位置, 涡的方向由 H_n 的正负判断。郭婧等利用螺旋度方法识别了泄漏涡和分离涡, 泄漏涡和分离涡区域的螺旋度较高^[16]。

2.2 λ_2 准则

JEONG 等^[17]研究发现压强极小值判断涡区域适用性存在问题, 提出改进后的 λ_2 准则方法。

Cauchy-Stokes 分解是将速度梯度张量 ∇V 分解为对称部分 S 和反对称部分 A , 对称张量 S 代表流体的变形, 反对称张量 A 代表流体的旋转运动。

λ_2 准则通过判断对称张量和反对称张量的组合方程 $A^2 + S^2$ 是否存在两个负的特征值来识别旋涡, 特征值分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 , 且 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$, $\lambda_2 < 0$ 则认为存在涡。刘登成等^[18]将 λ_2 准则应用于螺旋桨中, 分析了梢涡和梢涡空泡的流动特性。

2.3 Q 准则

Q 准则方法基于速度梯度张量 ∇V 的特征方程: $\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0$, HUNT 等^[19]提出将第二矩阵不变量 $Q > 0$ 的区域认定为旋涡。 Q 的表达式为

$$Q = \frac{1}{2}(\|A\|_F^2 - \|S\|_F^2) \quad (2)$$

式中, S 为速度梯度张量的对称部分, A 为反对称部分, 分别对应流场中的变形和旋转, 因此, Q 准则代表的物理意义是流场中旋转部分的涡量大于变形, 占主导地位。高助威等^[20]采用 Q 准则识别了旋风分离器内部空间涡的结构, 观察到了涡结构的变化趋势。

3 涡识别结果与讨论

涡在流体中普遍存在, 涡的产生、发展和溃灭及涡与固体之间、涡与涡之间以及涡与其他流动形式之间的相互作用一直是众多学者研究的重心^[21-23]。涡动力学的研究更是广泛, 涉及到圆柱绕流、平板湍流、压气机、水轮机及台风等问题的研究, 在流体机械中的应用更是广泛。但对于混流泵内部涡结构的分析还远远不够明晰, 目前对旋涡的识别还未给出普适的方法, 图 3、4 显示的流线图以及涡量图只能表征二维的情况, 存在欠缺, 无法完整地显示整个流场的情况。为研究混流泵内流场涡结构, 本节采用上述三种第二代涡识别方法应用于混流泵的流动研究中(螺旋度方法、 λ_2 准则和 Q 准则), 对比分析不同涡识别方法在混流泵流场分析中的可行性。

3.1 不同涡识别方法所获涡结构对比

图 6~8 分别是通过螺旋度方法、 λ_2 准则和 Q 准则识别出来的混流泵内部涡核分布图, 三种方法所选取的阈值相同, 均为 0.006, 阈值代表其准则值选取的临界值, 控制相同的阈值可调控相应的准则值的大小, 由此来对比不同涡识别方法所识别出的涡结构的差异。图 6 螺旋度方法显示的

泵内部涡结构中涡核心区域过小, 实际流场的情况更为复杂, 螺旋度方法较涡量准则虽然没有把前后盖板全部的剪切层识别为涡结构, 但同时和涡量准则一样没有捕捉到详细的流场状态, 叶片靠近轮毂处的旋涡结构较小, 不足以表达涡结构, 对导叶尾缘处的涡结构识别不够准确。相比于涡量方法, 螺旋度方法把叶轮叶顶泄漏涡的形态很好地表达出来了。

从图7可以看出, λ_2 准则显示的流场内涡结构非常丰富, 对比前面的涡量准则和螺旋度方法, λ_2 准则识别出的旋涡结构更加清晰。在图7a叶轮中可以看出叶轮进口吸力面存在涡团, 每个流道内的涡

团基本一致, 但涡结构已经破碎, 看不出具体的旋涡形态。叶轮叶顶泄漏涡比较紊乱, 相互交杂, 分不清具体的旋涡形状。导叶前盖板处的剪切层有部分被误识别为涡结构, 进口处的由叶轮和导叶动静干涉所产生的涡结构被识别出来, 叶片靠近轮毂处显示出规则对称的通道涡, 分布在导叶的各个流道内, 叶片尾缘处同样具有规则对称性的尾缘脱落涡。由此可见, λ_2 准则识别出的涡结构较为清晰明确。

图8中 Q 准则显示的涡结构较上述的任何一种识别方法更为精确, 有效地剔除了剪切层对涡结构的干扰。对叶轮内部涡结构的识别比 λ_2 准则更加清

图6 螺旋度方法显示的混流泵内部涡结构

图7 λ_2 准则显示的混流泵内部涡结构

图8 Q 准则显示的混流泵内部涡结构

晰,完整地显示出了叶轮流道内的通道涡,能够看出完整的涡结构,对叶轮叶顶的泄漏涡的识别更加精确, Q 准则识别出的泄漏涡与前盖板剪切层完全区分开来。同样导叶进口、叶片靠近轮毂处、叶片通道中以及叶片尾缘脱落的旋涡都能显现出来。 Q 准则在混流泵内部涡结构的识别中具有明显的优势,这种方法获取的涡结构对认识混流泵内部流场机理有着重要的意义。

3.2 不同涡识别方法所获涡大小对比

图 9~11 分别是通过螺旋度方法、 λ_2 准则和 Q 准则显示的 XY 截面的云图,将图 4 涡量云图与螺旋度云图进行对照分析, λ_2 准则云图与 Q 准则云图进行对比分析,由此筛选出能够表达混流泵涡大小的方法。

从图 4 和图 9 的对比中可以看出,叶轮和导叶中部截面前后盖板在涡量云图中有较大的值,而螺旋度云图中的值为零。叶轮吸力面附近存在较小的

涡结构,导叶流道内分布着规律相似的通道涡,通道涡是由叶顶的泄漏涡与二次流相互作用产生的。导叶内的,螺旋度显示的叶顶泄漏涡的大小要小于涡量显示的值,叶轮叶片尾缘的螺旋度区域小于涡量区域,螺旋度和涡量相比显示出涡的更小。同样在导叶的中部截面和出口截面,螺旋度显示的叶片靠近轮毂处的通道涡以及导叶尾缘脱落涡的区域和强度均大于涡量显示的结果。

从图 10、11 中可以看出, λ_2 准则云图显示的值和 Q 准则云图正好相反,不考虑数值的正负,从图中显示的涡核的绝对值来比较 λ_2 准则和 Q 准则识别的结果。图 9a 叶轮中部截面上,叶轮吸力面附近的强涡 Q 准则所识别出的范围更大,弱涡范围及大小相差不大。叶顶泄漏涡由 Q 准则显示的区域和强度略大于 λ_2 准则的结果,叶片尾缘的脱落涡的强度两种方法显示的结果几乎相同,但 Q 准则显示的涡的区域

图 9 混流泵不同截面螺旋度云图

图 10 混流泵不同截面 λ_2 准则云图

图 11 混流泵不同截面 Q 准则云图

范围更大。 Q 准则在导叶中部截面叶片靠近轮毂处捕捉到的弱涡的范围要大于 λ_2 准则捕捉的范围, 涡的强度也要略大于 λ_2 准则显示的结果, Q 准则云图导叶通道内的通道涡所占区域大于 λ_2 准则云图中的区域。导叶出口截面上的叶片尾缘脱落涡由于叶片的分离, 破碎成两部分, 并逐渐向后部脱落, 叶片靠近轮毂处的涡也不断碰撞, 混合发展, 导叶通道内的通道涡发生破裂和耗散形成小的涡, 总体 Q 准则显示的结果在强度和区域方面均大于 λ_2 准则。综合考虑以上因素, Q 准则在涡的大小表达方面同样具有得天独厚的优势, 但不能完全剔除壁面剪切层的影响, 并且会受到阈值的影响, 不同阈值的显示结果不同。

4 结 论

(1) 第二代涡识别方法可以识别出混流泵内部的旋涡, 在叶轮进口处会出现规则的涡结构, 并发展到叶轮的各个流道内, 形成通道涡, 造成流道的阻塞, 叶轮叶顶的泄漏涡同样会影响内部流场, 上级泄漏流以及叶轮与导叶的动静干涉使得叶轮出口的流动比较杂乱, 进而导致导叶进口处出现旋涡。导叶内部的流动同样紊乱, 流道内同样有规则的涡结构, 这些涡结构逐渐发展形成通道涡, 与叶片尾缘处的脱落涡一同脱落。

(2) Q 准则在混流泵的涡结构识别方面较其他涡识别方法具有明显的优势, 不仅能把各个部件中的旋涡结构表达清楚, 而且有效地剔除了绝大部分的壁面剪切层, 使得涡结构更加准确地显现出来。

(3) 涡量准则方法和螺旋度方法在混流泵 XY 截面云图的显示方面各有利弊, 涡量云图中涡量大的地方不一定有涡, 而螺旋度显示的涡过小, 不能准确表达详细的涡结构。 Q 准则和 λ_2 准则显示的云图总体结构差不多, 但在涡的强度和区域表达方面, Q 准则更胜一筹, 更能显示出具体完整的涡, 综上所述, Q 准则为混流泵内部流场的识别提供了有效的方法, 虽然存在剪切层以及阈值的问题, 但在第二代涡识别方法中脱颖而出, 对日后混流泵以及涡动力学研究奠定了良好的基础, 美国德州大学阿灵顿分校刘超群教授及其团队^[24]提出的 Ω 方法, Liutex 向量等方法被定义为第三代涡识别方法, 对阈值问题进行了探索, 日后的研究可进一步探索第三代涡识别方法的适用性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical simulation of flow instability characteristics in mixed-flow pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 384-389.
- [3] 黎耀军, 沈金峰, 严海军, 等. 叶顶间隙对轴流泵轮缘泄漏流动影响的大涡模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 235-242.
- [4] LI Yaojun, SHEN Jinfeng, YAN Haijun, et al. Large eddy simulation of the effect of tip clearance on the leakage flow in the flange of an axial flow pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 235-242.
- [5] ZHANG Desheng, SHI Lei, SHI Weidong, et al. Numerical analysis of unsteady tip leakage vortex cavitation cloud and unstable suction-side-perpendicular cavitating vortices in an axial flow pump[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 77: 244-259.
- [6] 吴介之, 马晖扬, 周明德. 涡动力学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [7] WU Jiezh, MA Huiyang, ZHOU Mingde. Introduction to vorticity and vortex dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1994.
- [8] 季磊磊, 李伟, 施卫东, 等. 叶片数对混流泵内部非定常压力脉动特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(8): 666-673.
- [9] JI Leilei, LI Wei, SHI Weidong, et al. Influence of different bladenumbers on unsteady pressure pulsations of internal flow field in mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(8): 666-673.
- [10] JIANG Ming, MACHIRAJU R, THOMPSON D. Detection and visualization of vortices[J]. Visualization Handbook, 2005(1): 295-309.
- [11] 付炜嘉, 马经忠, 李杰. 悬停状态旋翼桨尖涡 IDDES 方法数值模拟研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1): 195-202.
- [12] FU Weijia, MA Jingzhong, LI Jie. IDDES numerical simulation of rotor tip vortices in hovering[J]. Journal of Northwest Polytechnic University, 2019, 37(1): 195-202.
- [13] 李伟, 季磊磊, 张扬, 等. 混流泵启动过程瞬态流场的涡动力学分析[J]. 中南大学学报, 2018, 49(10): 2480-2490.
- [14] LI Wei, LI Leilei, ZHANG Yang, et al. Vortex dynamics analysis of transient flow field in starting process of

- mixed flow pump[J]. Journal of Central South University, 2018, 49(10): 2480-2490.
- [9] ELSAS J, MORICONI L. Vortex identification from local properties of the vorticity field[J]. Physics of Fluids, 2017, 29(1): 015101(1-17).
- [10] 王维军, 王洋, 黎义斌, 等. 基于涡动力学的离心泵内部流动诊断[J]. 中国农村水利水电, 2019(4): 172-178. WANG Weijun, WANG Yang, LI Yibin, et al. Internal flow diagnosis of centrifugal pump based on vortex dynamics[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(4): 172-178.
- [11] ZHANG Yuning, LIU Kaihua, XIAN Haizhen, et al. A review of methods for vortex identification in hydroturbines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1269-1285.
- [12] 邹萍萍. 高比转速斜流泵内部压力脉动特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011. ZHOU Pingping. Study on internal pressure fluctuation characteristics of high specific speed inclined flow pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
- [13] 张杰, 邓学莹. 旋涡判别准则及其在 PIV 技术中的应用[C]//近代实验空气动力学会议, 2009. ZHANG Jie, DENG Xueying. Vortex criterion and its application in PIV technique[C]// Conference on Modern Experimental Aerodynamics, 2009.
- [14] MOFFATT H K. The degree of knottedness of tangled vortexlines[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 39(1): 117-129.
- [15] DEGANID, SEGNERA, LEVYY. Graphical visualization of vortical flows by means of helicity[J]. AIAA Journal, 1990, 28(8): 1347-1352.
- [16] 郭端, 黄先北, 仇宝云, 等. 涡判据在翼端间隙涡流分析中的应用与评价[J]. 华中科技大学学报, 2018, 46(11): 23-29. GUO Qiang, HUANG Xianbei, QIU Baoyun, et al. Application and evaluation of vortex criterion in eddy current analysis of wing end clearance[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2018, 46(11): 23-29.
- [17] JEONG J, HUSSAIN F. On the identification of a vortex[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 285: 69-94.
- [18] 刘登成, 韦喜忠. 均流中 PPTC 螺旋桨梢涡空泡数值预报[J]. 船舶力学, 2017, 21(12): 1480-1489. LIU Dengcheng, WEI Xizhong. Numerical prediction of PPTC tip vortex cavitation in uniform flow[J]. CSSRC Reports, 2017, 21(12): 1480-1489.
- [19] HUNT J, WRAY A, MOIN P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows[R]. Center for Turbulent Research Report CTR-S88, 1988, 193-208.
- [20] 高助威, 王娟, 王江云, 等. 基于 Q 判据的不同排气管直径旋风分离器内部涡分析[J]. 石油学报, 2018, 34(6): 1172-1180. GAO Zhuwei, WANG Juan, WANG Jiangyun, et al. Vortex analysis of cyclone separators with different exhaust pipe diameters based on Q criterion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 34(6): 1172-1180.
- [21] 吴介之. 旋涡-流体运动的肌腱[J]. 自然杂志, 1985, 8(7): 490-494. WU Jiezhi. Vortices-fluid motion of tendons[J]. Chinese Journal of Nature, 1985, 8(7): 490-494.
- [22] ZHI Feng, ZHU Fang, ZHOU Danli. Numerical prediction of tip vortex cavitation for marine propellers in non-uniform wake[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 804-818.
- [23] 张文武, 余志毅, 祝宝山, 等. 叶顶间隙对低比转速混流泵性能及内部流场影响的数值研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 182-189. ZHANG Wenwu, YU Zhiyi, ZHU Baoshan, et al. Study of Tip clearance effects on performances and flow field of a low specific speed mixed-flow pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 182-189.
- [24] LIU Chaoqun, GAO Yisheng, DONG Xiangrui, et al. Third generation of vortex identification methods: Omega and Liutex/Rortex based systems[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(2): 205-223.

作者简介: 赵斌娟, 女, 1977 年出生, 教授。主要研究方向为叶轮机械内部复杂流动仿真和优化设计。

E-mail: zhaobinjuan@mail.ujts.edu.cn