

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.018

半开叶轮离心泵叶顶间隙非定常流动特性研究

卢金玲 郭蕾 王李科 王维 郭鹏程 罗兴铨

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 为研究半开式离心泵叶顶间隙区域的非定常流动特性,应用 SST $k-\omega$ 两方程模型,对半开式离心泵进行了全流道数值模拟,利用快速傅里叶变换(FFT)将各监测点的时域值转换为频域值,并分析了泄漏涡轨迹与叶片载荷的相关机理以及泄漏涡的频谱特性。结果表明:泄漏涡涡核与叶片骨线的夹角 θ 随着叶尖载荷的变化发生了周期性脉动;泄漏涡加剧了叶尖处的流动分离,在叶片前缘形成了连接叶片表面与泵壳的涡管;在流量为 $0.75Q_d$ 时,叶顶前缘间隙处扰动主信号为 $0.51f_B$,该频率与二次泄漏以及叶尖处涡管的非定常脉动特性相关;随着流量减小,扰动信号频率有所波动,叶尖泄漏涡破碎位置向叶片前缘移动。

关键词: 半开式离心泵;叶顶泄漏涡;二次泄漏;频谱分析

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0163-10

Unsteady Flow Characteristics of Tip Clearance in Semi-open Impeller Centrifugal Pump

LU Jinling GUO Lei WANG Like WANG Wei GUO Pengcheng LUO Xingqi

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Transient pulsation of tip leakage vortex is an important factor for flow instability and stall of centrifugal impeller. To get an insight into the unsteady flow characteristics in the tip region of a semi-open centrifugal pump, the SST $k-\omega$ two-equation model was used to solve the N-S equation. And the fast Fourier transform (FFT) was used to transform the time domain value of vorticity of each monitoring point into frequency domain value, so as to monitor the frequency domain characteristics. The correlation mechanism between the leakage vortex trajectory and the blade loading was studied and the spectral characteristics of the leakage vortex were analyzed. The results showed that the angle θ between the leaking vortex core and the blade bone line was changed periodically with the tip blade loading. The leakage flow accelerated the flow separation at the tip, forming a vortex tube extending from the tip blade surface to the shroud. At $0.75Q_d$, the $0.51f_B$ in the tip region was the main disturbance signal, which was closely related with the secondary leakage and the unsteady pulsation of the vortex tube. As the flow rate decreased, the disturbance frequency was changed, and the tip leakage vortex crushing position was moved toward the leading edge of the blade. Under the near-stall operating points, the unsteady fluctuation of the leakage flow was aggravated by the pulsation and shedding of the vortex tube, and the tip leakage vortex crushing position was extended to the leading edge of the blade. The unsteady characteristics of the tip leakage flow of the semi-open centrifugal pump were researched, which provided a theoretical basis for the optimal design of the semi-open impeller and the capture of stall signal.

Key words: semi-open centrifugal pump; tip leakage vortex; secondary leakage; spectrum analysis

0 引言

中低比转数离心泵作为工程中液体输送的主要机械部件,具有流量小、扬程高等特点。随着工业技

术的迅速发展,扩大离心泵的稳定运行范围成为亟待解决的工业问题^[1-2]。离心泵在设计流量下运行时流动状态良好,在小流量下运行时,叶轮流道内会发生严重的流动分离及堵塞,进而引发失速,失速困

收稿日期: 2019-03-01 修回日期: 2019-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879216, 51839010)

作者简介: 卢金玲(1975—),男,副教授,主要从事叶轮机械优化设计研究,E-mail: jinling_lu@163.com

的非定常运动会破坏流场的均匀度以及稳定性,失速引发的振动还可能与其他结构部件发生共振^[3-4]。对于半开式离心泵而言,小流量时流态恶化与失速引发的运行不稳定问题更为突出。由于叶顶间隙的存在,叶顶附近的低能流体在叶片压力面与吸力面压差的驱动下,透过间隙进入叶片相邻流道形成泄漏涡^[5-6]。在近失速工况运行时,来流与泄漏涡相互作用所呈现的旋转非定常特性加剧了叶轮内部的流动分离及堵塞等非定常脉动现象,是叶轮内部失速发生的重要诱因^[7]。失速发生前非定常扰流-叶顶泄漏涡所呈现的非定常脉动特性可以作为预测失速发生的判据^[8]。因此,研究叶顶区域泄漏涡的流动结构及其发展演变规律等非稳态特性,对于控制失速及扩大离心泵的稳定运行范围具有重要意义。

关于叶顶泄漏涡流动特性的研究主要分为两方面。一方面是叶顶间隙与离心叶轮流动特性之间的关系研究。研究表明,随着叶顶间隙的减小,总扬程、功耗和水力效率均增大,叶轮内流场分布紊乱,间隙层内流场更平稳;而随着叶顶间隙的增大,扬程-流量曲线驼峰呈减弱趋势,较大的叶顶间隙可以改善低比速数离心泵的驼峰现象^[9-11]。另外,叶顶间隙对叶顶区域的压力脉动也有显著影响,受泄漏涡的影响,间隙进口处的流场紊乱,压力脉动幅值较大,随着间隙增大,叶顶区域的脉动幅值逐渐增大^[12-13]。叶顶间隙的均匀性对流场也有明显影响,非均匀间隙会增大泄漏涡、二次流的不稳定性^[14]。因此,设计合理的叶顶间隙尺寸、均匀度可以改善叶轮内部流态,扩大稳定工作范围^[15-17]。另一方面是关于叶顶泄漏涡非定常演变机理的研究。研究发现,流道中部以后,间隙流扰乱了主流方向,并在叶顶吸力面附近形成涡流聚集区^[18]。在小流量工况运行时,叶顶间隙发生堵塞且叶尖处泄漏涡存在周期性扰动,这种周期性扰动被称为旋转失稳,其时域特性表现为高频信号,频谱特性表现为宽带峰^[19-21]。通过分析发现,这种旋转不稳定性是叶顶间隙泄漏涡与回流相互作用的结果^[7]。上述泄漏涡的非稳态特性在气力机械中研究较为深入,而针对半开式离心泵中叶顶泄漏涡的非定常演化机理的研究较少。且水的密度大、压缩性小,在泵中的流动速度远小于气力机械,这些水气之间物性参数的差异,使得气力机械相关泄漏涡非定常特性的研究无法直接应用于半开式离心泵中。因此,半开式离心泵内叶顶泄漏涡的时域非稳态行为还有待深入研究。

本文基于半开式离心泵全流道非稳态计算结

果,对失速发生前叶顶泄漏涡流动结构的不稳定性进行分析,并对比不同流量下泄漏涡结构的演变过程。通过对叶顶泄漏涡非定常特性的研究,揭示泄漏涡的运动特性,为扩大半开式离心泵稳定运行范围以及改善叶轮内部失速问题提供水力设计参考依据。

1 计算模型及方法

1.1 几何模型与网格划分

本文所采用的半开式离心泵模型主要包括:进口管、半开式叶轮、无叶扩压器,其主要设计参数如表1所示。为区别于蜗壳对叶轮内部流场的影响,采用无叶扩压器作为叶轮流道出口边界条件。本文所研究的泄漏涡非定常脉动特性在叶片前缘表现出了旋转非定常特性,并非局限于单个流道,且各流道内的流动特性差异明显。因此,对半开式离心泵进行了全通道数值模拟。半开式离心叶轮几何模型及网格划分如图1所示。为了保证数值模拟的精确度,各部件计算网格均为六面体结构网格。对叶顶间隙区域的网格进行了加密以获得离心泵叶顶间隙区域的细微流动特性,并对该半开式离心泵进行了网格无关性验证。

表1 叶轮基本参数

Tab. 1 Basic parameters of impeller

参数	数值
设计流量 $Q_d / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	144
叶顶间隙 B / mm	1
叶片数 Z	5
转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 980
比转数 n_s	74.45
进口直径 D_1 / mm	121.5
出口直径 D_2 / mm	265
叶片出口宽度 b_2 / mm	18.02
叶片进口安放角 $\beta_{b1} / (^\circ)$	18
叶片出口安放角 $\beta_{b2} / (^\circ)$	30

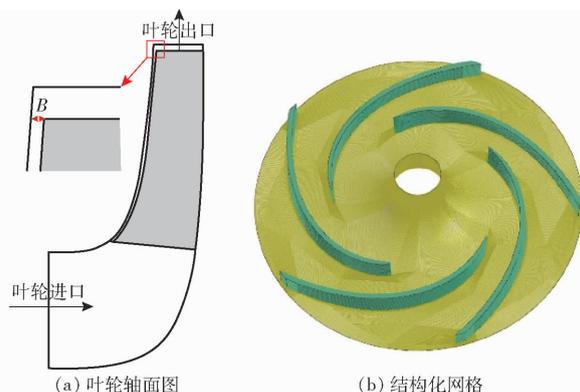


图1 叶轮几何模型与网格划分

Fig. 1 Pump impeller and computational grids

本次计算共进行了4种网格方案的对比分析,网格总数分别为 2.8×10^6 、 4.2×10^6 、 6.4×10^6 、 8.3×10^6 。图2中 N 表示网格数, H 表示运行工况扬程, H_0 表示额定工况扬程, η 表示效率,如图所示为4种网格方案在 Q_d 、 $0.5Q_d$ 和 $0.33Q_d$ 工况下半开式离心泵数值计算与外特性分析的结果。可以看出,随着网格数的增加,不同工况下扬程与效率逐渐趋于稳定,当网格数达到 6.4×10^6 时,各工况下的扬程随网格数增加的变化量均小于0.2%,效率随网格数增加的变化量均小于0.3%。因此,网格数为 6.4×10^6 以及 8.3×10^6 两种方案均满足研究条件。为了提高计算效率并保证计算结果的准确性,本文选定网格数为 6.4×10^6 的网格方案进行后续计算研究。 y^+ 表示第1层网格节点与壁面的无量纲距离,通过对近壁区的网格加密,以及控制第1层网格尺寸,保证叶轮近壁区 $y^+ < 2$ 。

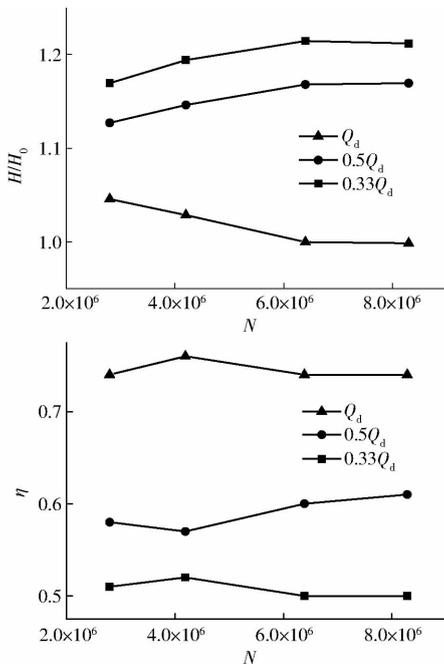


图2 计算域的网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification of computational region

1.2 数值模型与边界条件

利用SST $k-\omega$ 模型对半开式离心泵进行了全流道的数值模拟。相比于一般的 $k-\varepsilon$ 模型,SST $k-\omega$ 模型对于近壁区自由流动的模拟精度更高,应用更为广泛。叶顶泄漏涡是靠近叶片壁面的自由流动,因此,本文所选用的SST $k-\omega$ 模型能够准确地捕捉叶顶间隙区域的流动特性。对于SST $k-\omega$ 模型,在近壁区的低雷诺数流动中, y^+ 值满足模型的计算要求。离心泵进口边界条件给定全压为101.325 kPa,出口边界条件给定质量流量,同时固体壁面设置为无滑移边界条件,对流项和空间项采用二阶精度进行离散。离心泵的瞬态模拟

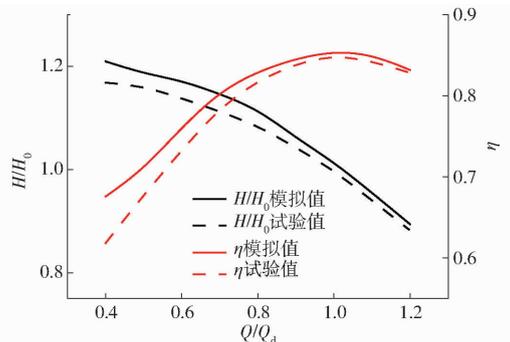
以定常计算结果为初始条件,叶轮每旋转 4° 为一个时间步长,一个步长为 2.2×10^{-4} s,一个周期迭代90步。

2 结果与分析

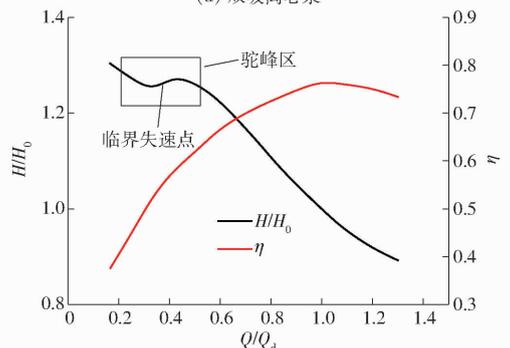
2.1 外特性

本文数值仿真所应用的SST $k-\omega$ 模型已广泛应用于泵领域有关叶顶泄漏特性的数值仿真中,且与试验结果吻合度高。文献[22]对比了SST $k-\omega$ 模型与试验结果,发现叶顶泄漏涡的轨迹与试验涡核轨迹高度吻合。文献[23]在离心叶轮中利用SST两方程模型对泄漏涡的流动特性进行了分析,与试验结果相符。文献[24-25]同样利用SST $k-\omega$ 模型捕捉到了离心叶轮叶尖泄漏涡的瞬态特性。因此,SST $k-\omega$ 模型的计算结果对泄漏涡的模拟具有较好的适用性^[26]。

为了验证本次数值结果的准确性,将SST $k-\omega$ 模型应用于现有双吸离心泵试验台的数值计算中。图3a给出了双吸离心泵试验与数值计算的外特性对比。可以看出,在设计流量工况下,扬程变化率为1%,效率变化率为0.5%,小于设计流量时扬程与效率变化率增加,而大于设计流量时变化率逐渐减小,试验值与模拟值更接近。由于试验测试中存在机械损失以及轴封泄漏,造成试验值略低于数值计算值。总体而言,采用SST $k-\omega$ 模型对离心泵进行数值模拟能够获得与试验一致性的结果。本文采用



(a) 双吸离心泵



(b) 半开式离心泵

图3 外特性曲线

Fig. 3 Characteristic curves

SST $k-\omega$ 两方程模型对半开式离心泵叶顶区域泄漏特性进行数值研究。

图 3b 为半开式离心泵在不同工况下扬程-效率曲线。由图 3b 可知,在小流量工况下扬程曲线出现了驼峰区,驼峰区波谷点的流量为 $0.3Q_d$,当离心泵运行于 $0.35Q_d$ 工况时,叶轮内发生失速。本文主要研究内容为叶顶区域泄漏涡的发展及其对离心泵内部流动的影响,为了区别于驼峰现象、失速涡与泄漏涡的交互作用,本文主要对失速点及驼峰区之前的流量工况进行分析。

2.2 泄漏涡的流动结构

为了研究叶顶泄漏涡的流动结构,图 4 给出了 $0.75Q_d$ 工况下不同叶高处的速度分布。图 4 表明,

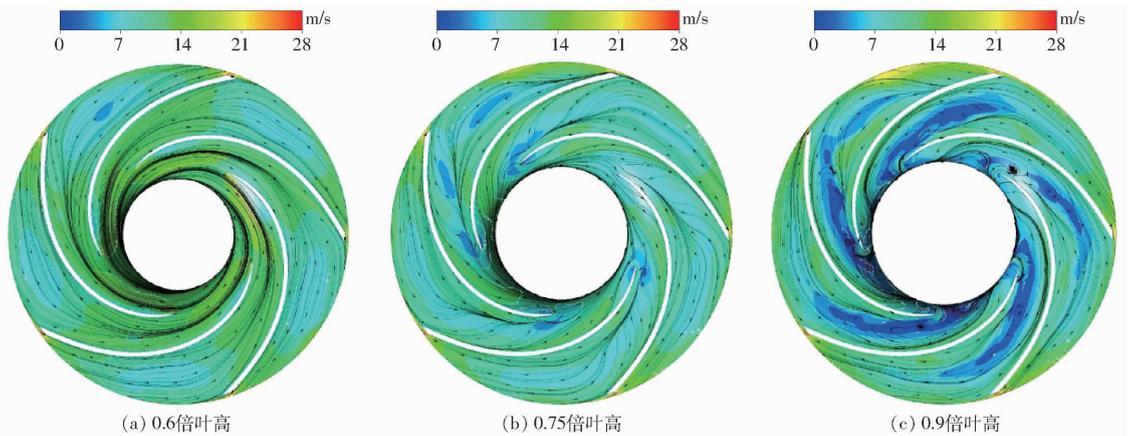


图 4 不同叶高截面的速度分布

Fig. 4 Velocity distributions at different spans

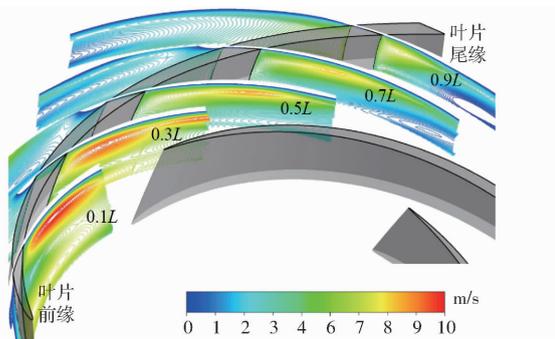


图 5 不同径向截面的流向速度分布

Fig. 5 Flow velocity distributions at different radial cross sections

在半开式离心叶轮内,径向速度分布可以准确描述泄漏涡沿叶轮流道的发展情况。图 5 中靠近叶片顶部的高速区域表示泄漏涡,不同径向位置叶顶吸力面附近的泄漏涡强度有所差异,叶片前缘泄漏涡速度接近 10 m/s ,叶片尾缘处泄漏涡的速度接近 6.5 m/s ,靠近叶片前缘 ($0\sim 0.5L$) 泄漏涡的强度几乎为叶片尾缘 ($0.5L\sim L$) 的 1.5 倍。因此,叶顶间隙的存在使得叶顶附近的低能流体在间隙处形成射流,叶尖泄漏涡在叶片前缘处产生并进入叶片流道

在 0.6 倍叶高处,叶轮流道内部流动平稳、流线顺畅;在 0.75 倍叶高处流道内出现了低速区,主要集中在叶顶附近,且流线开始出现了流动分离;而在 0.9 倍叶高处,流道内出现了大量低速区并由叶顶处向叶片尾缘延伸,另外叶顶附近及低压区均出现了旋涡,其靠近叶顶间隙处低速区并逐渐发展扩大至整个流道。因此,泄漏涡是造成叶顶附近流动性降低的重要原因。

图 5 为不同径向截面的径向速度分布,图中 L 为叶片型线的长度,速度公式为

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_r + \mathbf{V}_a + \mathbf{V}_w \quad (1)$$

式中 \mathbf{V}_r ——径向速度 \mathbf{V}_a ——轴向速度
 \mathbf{V}_w ——周向速度

吸力面附近与主流混合,沿着叶片流线方向逐渐减弱,至近尾缘处消散。

由于叶片压力面与吸力面之间存在压力梯度,使得叶顶附近的低能流体在压力梯度的作用下穿过叶顶间隙在叶片吸力面前缘形成细微射流,并在流道下游逐渐与主流混合、耗散。为了研究叶顶泄漏涡与主流的相互作用机理,图 6 给出了从不同叶顶间隙高度沿叶片型线 ($0\sim 0.25L$) 释放的流线, h^* 为叶顶间隙高度。由图 6a 可知,叶顶间隙处释放的流线在叶片吸力面附近相互缠绕形成泄漏涡,并向叶片尾缘扩散;如图 6b 所示,随着叶顶间隙释放高度的增加,流线的缠绕半径增大,泄漏涡扩大,当释放高度增加到 $75\%h^*$ 时,流线并没有发生缠绕,而与主流混合沿着叶片流道向下游扩散,甚至泄漏至下一流道。因此,由于轮盖壁面边界层的作用,叶顶泄漏涡的轨迹主要取决于 $75\%h^*$ 以下间隙高度释放的流线。

2.3 泄漏涡的非定常特性

图 7 为一个旋转周期内任一叶片流道在 0.9 倍叶高处的静压分布,静压凹槽的连线用以表征泄漏涡的涡核轨迹。 t 表示叶轮旋转不同时刻, T 为一个

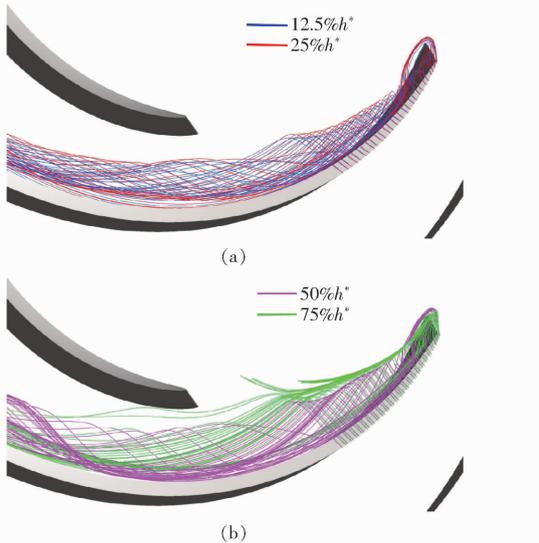


图 6 不同叶顶间隙高度释放的流线分布
Fig. 6 Tip streamline distributions along streamwise

旋转周期, θ 为叶片骨线与泄漏涡核的夹角, 随着

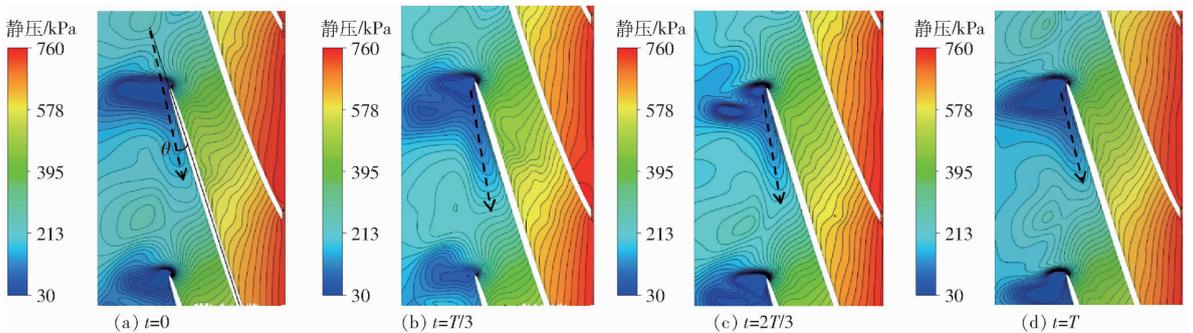


图 7 0.9 倍叶高处泄漏涡的周期性发展

Fig. 7 Periodic development of tip leakage flow on 0.9 span

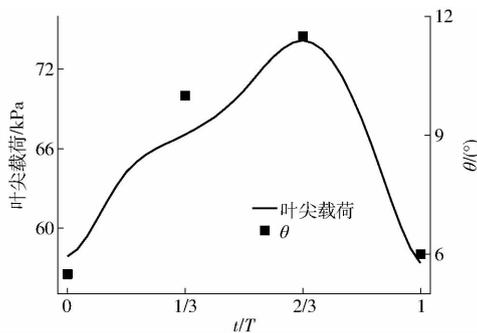


图 8 叶片前缘单个周期内叶尖载荷和夹角 θ 变化

Fig. 8 Blade tip loading during unsteady period in tip blade

图 9 给出了非定常计算结果在 3 550 步时的叶顶区域的流线结构以及叶尖区域的 Q 准则在 $3 \times 10^6 \text{ s}^{-2}$ 时等值面分布, Q 为速度梯度张量的第二矩阵不变量, 可用 Q 等值面表示涡量分布。对比图 6 的定常结果, 显然非定常结果中泄漏涡流线分布更紊乱且叶尖区域均形成了连接叶片表面与泵壳的涡管。可以看出, 叶顶前缘释放的红色流线在 C1 流道产生堵塞并发生了二次泄漏, 而叶顶尾缘的流线在叶片吸力面与主流混掺向下游发展。叶片进口的

时间的变化, 夹角 θ 也发生了明显变化。从 0 到 $T/3$, θ 逐渐增大, 泄漏涡增强; $T/3$ 到 $2T/3$, 泄漏涡强度依然较大, 泄漏涡轨迹向相邻叶片前缘倾斜, 夹角 θ 略有增加; 到 T 时刻, 泄漏涡强度减弱, 此时夹角 θ 又逐渐减小, T 时刻与 0 时刻的夹角 θ 大小几乎相同, 一个周期循环完成。在离心式气力机械中, 夹角 θ 的变化与叶片载荷及流体的流动特性有关^[27], 相对而言, 离心泵的流体流速较小, 可压缩性差, 物性较为稳定, 则泄漏涡强度与叶片载荷具有高度相关性。

图 8 给出了叶片吸力面前缘一个周期内叶尖载荷分布, 可以看出, 从 0 到 $2T/3$, 叶尖载荷逐渐升高, 泄漏涡增强, 夹角 θ 逐渐增大; 从 $2T/3$ 到 T , 叶尖载荷迅速降低至接近 T 时刻的载荷, 泄漏涡减弱, 夹角 θ 迅速减小。单周期内叶尖载荷与夹角 θ 的变化规律接近同步, 因此叶片载荷的非定常脉动是导致泄漏涡不稳定的重要因素。

堵塞区使得进口冲角增大, 产生前缘溢流进而发生叶尖流动分离, 这种流动分离在叶片前缘产生旋涡, 旋涡在叶尖压力面产生, 向吸力面扭曲, 并逐渐发展为涡管, 延伸到泵壳表面。文献[20]在近失速点的离心压缩机中同样发现了这种非定常的涡结构, 但不同的是离心压缩机的涡管在叶片吸力面产生, 而本文半开式离心泵中的涡管在叶尖压力侧产生, 在二次泄漏涡的作用下向叶尖吸力面旋转延伸至泵壳。

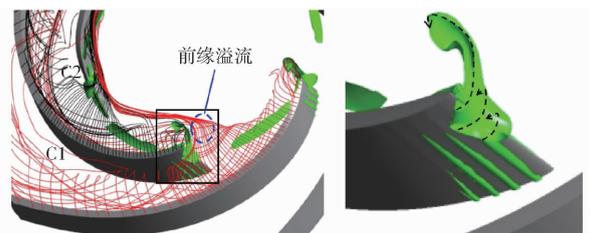


图 9 叶顶泄漏涡流线结构及 Q 准则等值面分布

Fig. 9 Stream structure of tip leakage flow and iso-surface of vortex detection Q criterion

进一步对图 7 中不同时刻的静压分布进行分

析,发现叶片进口存在图9所示的涡管。不同时刻下,涡管的形状及大小有所脉动,在0时刻叶片进口产生了一个涡管,但在 $T/3$ 时刻,泄漏涡逐渐增强,叶片进口涡管开始分裂,至 $2T/3$ 时刻,完全分裂为两个小涡管,当到 T 时刻,泄漏涡减弱,两个小涡管又相互融合为一个整体。另外,与文献[20]中近失速工况涡运动特性不同的是,涡管始终在叶片进口波动、分裂与融合,并未发生周向运动。这种涡管的非稳态演变、脱落等时频特性对叶尖区域流体的脉动有明显的影响。

由以上的分析可知,泄漏涡在叶片前缘特别是叶尖附近的流动稳定性较差,其主要影响范围为叶片前缘的近叶顶区域。因此,为了进一步分析叶顶泄漏涡的非定常流动特性,在0.5倍的叶顶间隙处设置了14个监测点。测点分布如图10所示,其中C1~C5分别表示不同流道,P1~P5、S1~S5分别布置在叶片叶尖压力侧与吸力侧,R1~R4布置在C1流道内。

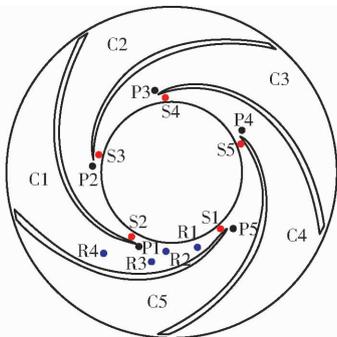


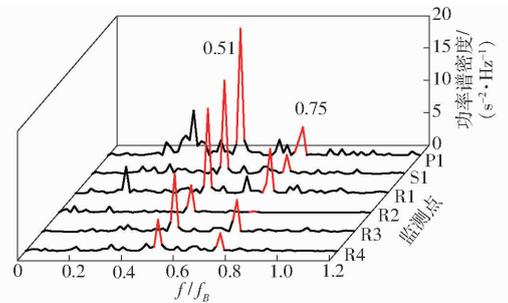
图10 叶轮内监测点布置

Fig. 10 Monitor points distribution in impeller

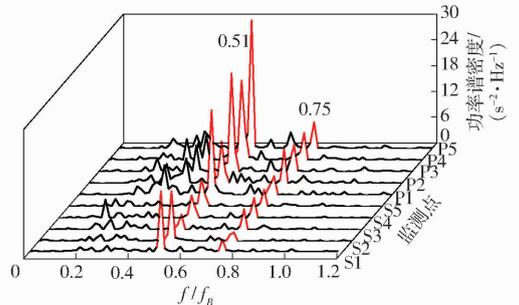
为了分析叶顶泄漏涡的旋转非定常特性,对各监测点流量的频域特性进行了分析。图11a为流道C1中监测点的频谱图, f 为频率, f_b 为叶片通过频率。可以看出所有监测点均存在频率为 $0.51 f_b$ 以及 $0.75 f_b$ 的扰动信号,其中 $0.51 f_b$ 为主扰动频率,由不同测点幅值看出叶尖压力面P1以及吸力面S1的扰动信号最为强烈,结合图9可知,这种叶尖间隙处存在的大幅值扰动与泄漏涡的前缘溢流^[28]以及涡管的非定常脉动有关。由叶尖泄漏涡对相邻叶片压力面的冲击作用以及涡管的时域不稳定性,使得P1点出现了高幅值脉动,而叶尖泄漏涡的非定常脉动以及前缘溢流是S1点幅值脉动的主要原因。

分析可知,叶尖处的高幅值脉动是泄漏涡不稳定的主要表征形式,图11b对比了各流道叶尖间隙处监测点的频谱分布。显然,叶尖间隙处的扰动强度沿周向分布并非均匀,这些强度不同的扰动使得各流道的涡漏流呈现出不同的非定常特性。C1、C2流道吸力侧的脉动幅值大于其他流道,说明该处

受叶尖泄漏涡与涡管的影响最明显。而C5流道压力侧的脉动幅值又远大于其他流道,C2流道压力侧脉动最弱,说明相邻叶片叶顶泄漏涡的冲击强度以及涡管的脉动有所差别。



(a) C1流道监测点



(b) 叶尖处监测点

图11 相对坐标系下的频谱特性

Fig. 11 Frequency and amplitude characteristics in relative frame

2.4 不同流量下叶顶泄漏涡的特性

不同工况下叶轮内部流动状态对半开式离心泵的运行稳定性有很大的影响。当离心泵在小于设计流量点运行时,叶顶间隙泄漏涡会呈现出明显的非定常波动。为了进一步分析泄漏涡的非定常特性,图12给出了不同流量下各流道叶尖处测点的频谱分布。可以看出各工况下的频谱分布差异明显,流量为 $0.83Q_d$ 、 $0.67Q_d$ 、 $0.5Q_d$ 、 $0.42Q_d$ 对应的涡量脉动主频率分别为 $0.3 f_b$ 、 $0.4 f_b$ 、 $0.8 f_b$ 和 $0.2 f_b$ 。在 $0.83Q_d$,压力侧与吸力侧的脉动幅值差异较小且沿周向流量强度分布较为均匀,与 $0.75Q_d$ 分析结果相近,涡管在各流道叶尖处均存在;在 $0.67Q_d$ 时,压力侧波动幅值远大于吸力侧,说明叶片前缘的涡管主要分布在压力侧;而当流量减小到 $0.5Q_d$ 时,吸力侧波动幅值远大于压力侧,说明该流量运行时涡管在吸力面产生;流量继续减小至 $0.42Q_d$ 时,频谱图中出现了两种以上扰动频率且吸力面波动幅值较大,说明在近失速工况下,叶尖处涡管发生不同频率的脉动及脱落,泄漏涡的非定常波动加剧。

与文献[29-30]中的研究结论不同,随着流量减小,扰动频率并非逐渐降低。各流量工况下均出现除主扰动频率之外的其他扰动,而在 $0.5Q_d$ 时只存在主扰动频率($0.8 f_b$),并不存在其他扰动。这

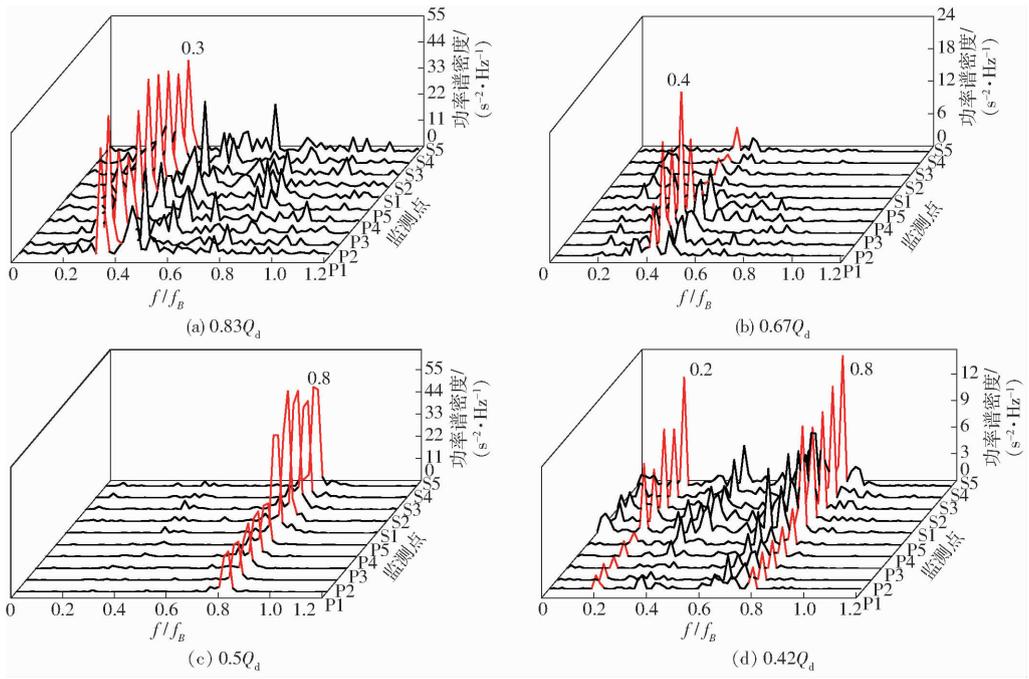


图 12 不同工况下叶尖处频谱特性

Fig. 12 Spectral characteristics of tip region for different operating points

与叶片前缘涡管以及泄漏涡的脉动特性相关。当半开式离心泵在 $0.5Q_d$ 运行时,叶轮内部流动已经进入了驼峰区,扬程即将到达波峰值,此时的流场并非是由多种扰动相互作用所呈现的相对稳定状态,而是单一强扰动频率作用的结果。

由以上分析可知,叶顶附近的静压分布可以较为准确地表示泄漏涡的结构,为了阐明叶片表面的静压分布规律,引入了静压压力系数 C_p ,其表达式为

$$C_p = (p - \bar{p}) / (0.5\rho V_{in}^2) \quad (2)$$

式中 \bar{p} ——叶轮进口压力
 V_{in} ——叶轮进口速度 ρ ——流体密度
 p ——叶片表面静压

叶片吸力面与压力面的叶片表面静压压力系数如图 13 所示。可以看出,在不同流量工况下叶片表面载荷分布差异较大,设计流量下 ΔC_p 沿着径向先增加后减小,叶片尾缘处压力面与吸力面出现静压

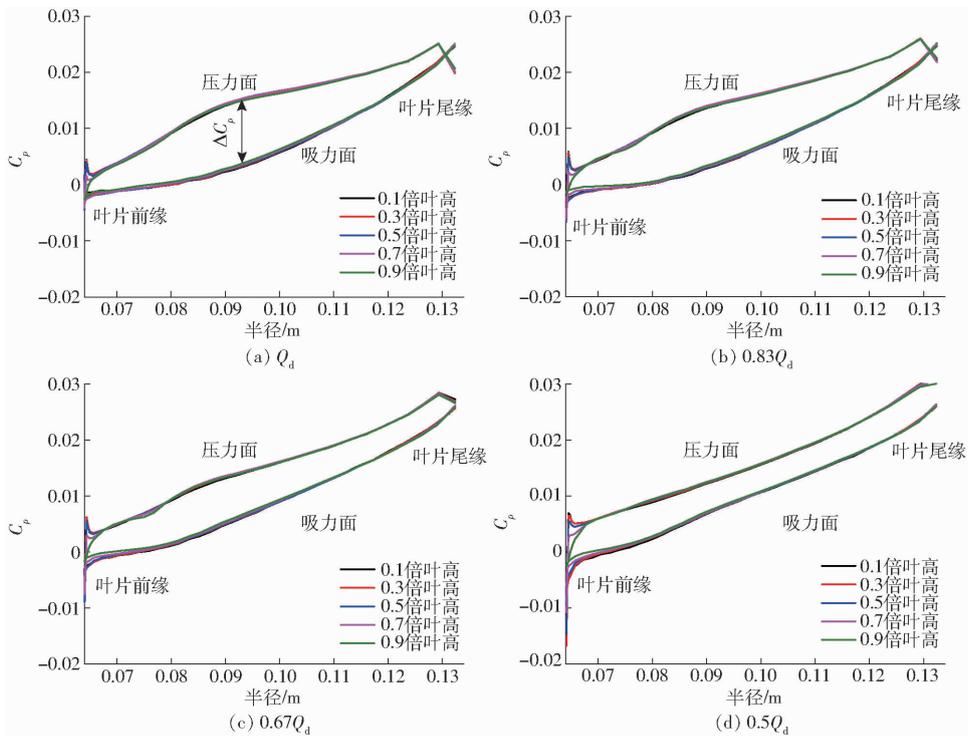


图 13 不同工况下叶片表面静压压力系数分布

Fig. 13 Static pressure coefficient distributions on blade surface for different operating points

交点,即叶片尾缘处存在大量回流与涡流;随着流量的减小, ΔC_p 沿着径向逐渐趋于稳定,静压交点逐渐向叶轮出口移动。当流量减小时, ΔC_p 减小且接近常数,叶片载荷降低,因此泄漏涡强度减弱,叶片尾缘处的回流以及泄漏涡的质量减小,导致静压交点向叶轮出口移动。

上述静压分布可以较为准确地表述泄漏涡的位置,为了进一步定量分析不同工况下泄漏涡的结构,采用 H_e 准则分析叶顶区域的涡流动情况。本征螺旋度定义为

$$H_e = \zeta n \quad (3)$$

式中 ζ ——涡量

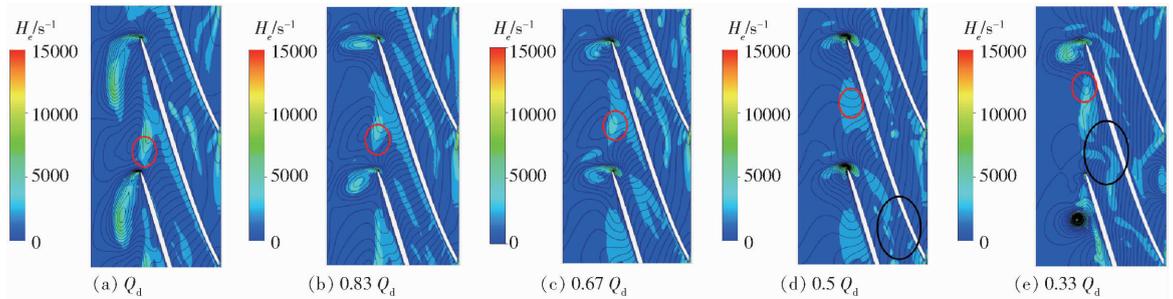


图 14 不同工况下 0.9 倍叶高处 H_e 分布

Fig. 14 H_e distributions on 0.9 span for different operating points

对比不同工况下 H_e 的分布,在 Q_d 时,吸力面与压力面的压差较大,泄漏涡能量较大,泄漏涡轨迹延伸到了相邻叶片前缘压力面处,另外一部分低能泄漏涡沿叶片吸力面向下游传播;图中红色椭圆位置为叶尖泄漏涡涡核轨迹末端,随着流量减小,夹角 θ 逐渐减小,泄漏涡能量减小,泄漏涡轨迹逐渐远离相邻叶片压力面;图中黑色椭圆为泄漏涡破碎位置,当流量减少至 $0.5Q_d$ 时,泄漏涡在叶片尾缘发生破碎;随着流量进一步减小,泄漏涡向叶片压力面传播且破碎位置沿着流道上移;流量减小至失速点时,泄漏涡的破碎位置延伸到了叶片前缘,破碎的泄漏涡与主流的相互作用加快了失速的发生。

3 结论

(1) 叶顶附近泄漏特性主要取决于叶片前缘产

n ——涡旋平面的法向量

生泄漏涡。泄漏涡结构主要取决于 75% 以下间隙高度释放的流线。
(2) 任一周期内,叶片骨线与叶尖泄漏涡涡核的夹角发生了周期性脉动,且变化规律与叶尖载荷的变化规律相吻合,叶尖载荷的非定常脉动是叶尖泄漏涡不稳定的重要因素。
(3) 叶尖处从叶片表面到泵壳的涡管与泄漏涡的相互影响作用,在叶轮内形成了稳定的扰动信号,在流量为 $0.75Q_d$ 时扰动主信号为 $0.51f_B$,不同流量工况下扰动信号的频谱分布有所差异。
(4) 随着流量的减小,泄漏涡向靠近叶片吸力面方向发展,当流量为 $0.5Q_d$ 时,泄漏涡在叶片尾缘发生破裂,随着流量继续减小,泄漏涡破裂位置上移,失速点时,泄漏涡破裂位置几乎延伸到了叶片前缘。

参 考 文 献

- [1] 周文胜. 离心泵原理及其应用[J]. 科技风, 2012(2):97.
- [2] 张佩芳, 袁寿其, 黄良勇. 低比转速离心泵研究现状与发展趋势[J]. 水泵技术, 2004(1):20-24.
- [3] 周佩剑, 王福军, 姚志峰. 离心泵叶轮旋转失速团特性分析[J]. 水利学报, 2015, 46(9):1128-1134.
ZHOU Peijian, WANG Fujun, YAO Zhifeng. Analysis of rotating stall cells in an impeller of a centrifugal pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9):1128-1134. (in Chinese)
- [4] 潘中永, 李俊杰, 李红, 等. 叶片泵旋转失速的研究进展[J]. 流体机械, 2011, 39(2):35-39.
PAN Zhongyong, LI Junjie, LI Hong, et al. Overview for research on rotating stall of pump[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(2):35-39. (in Chinese)
- [5] 贾希诚, 王正明, 王嘉炜. 叶轮机械中的泄漏流与泄漏涡[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5):753-756.
JIA Xicheng, WANG Zhengming, WANG Jiawei. Leakage flow and leakage vortex in turbomachinery [J]. Journal of

- Engineering Thermophysics, 2003, 24(5):753-756. (in Chinese)
- [6] 张德胜, 邵佩佩, 施卫东, 等. 轴流泵叶顶泄漏涡流体动力学特性数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(3):72-76, 82.
ZHANG Desheng, SHAO Peipei, SHI Weidong, et al. Numerical simulation of tip leakage vortex hydrodynamics characteristics in axial flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3):72-76, 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140313&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.013. (in Chinese)
- [7] ZHENG Xinqian, LIU Anxiong, SUN Zhenzhong. Investigation of the instability mechanisms in a turbocharger centrifugal compressor with a vaneless diffuser by means of unsteady simulations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(11):1558-1567.
- [8] JU Wenyong, XU Shengli, WANG Xiaofang, et al. Numerical study on the influence of tip clearance on rotating stall in an unshrouded centrifugal compressor[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2017; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte, NC: ASME, 2017:1-8.
- [9] BOITEL G, FEDALA D, MYON N. Tip clearance effects on loads and performances of semi-open impeller centrifugal pumps at different specific speeds[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 49(3):032013.
- [10] JIA Xiaoqi, CUI Baoling, ZHANG Yuliang, et al. Study on internal flow and external performance of a semi-open impeller centrifugal pump with different tip clearances[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2015, 32(1):1-12.
- [11] 崔宝玲, 黄达钢, 史佩琦, 等. 叶顶间隙对低比转数半开式离心泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3):283-288.
CUI Baoling, HUANG Dagang, SHI Peiqi, et al. Effect of tip clearance on performance of low specific speed centrifugal pump with semi-open impeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3):283-288. (in Chinese)
- [12] 杨军虎, 张利红, 吴国鸿, 等. 半开式叶轮离心泵叶顶位置压力脉动数值分析[J]. 水泵技术, 2016(3):37-41, 18.
- [13] 黎耀军, 沈金峰, 洪益平, 等. 叶顶间隙对轴流泵轮缘压力脉动影响的数值预测[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5):59-64, 58.
LI Yaojun, SHEN Jinfeng, HONG Yiping, et al. Numerical investigation of pressure fluctuations on axial-flow pump blades affected by tip-gap size[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):59-64, 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140509&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.009. (in Chinese)
- [14] 李伟, 季磊磊, 施卫东, 等. 混流泵非均匀轮缘间隙流场数值计算[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10):66-72.
LI Wei, JI Leilei, SHI Weidong, et al. Numerical calculation of internal flow field in mixed-flow pump with non-uniform tip clearance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):66-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161009&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.009. (in Chinese)
- [15] 张晋东, 赵永胜, 魏学行, 等. 叶顶间隙对离心压气机的多工况性能影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(1):7-11.
ZHANG Jindong, ZHAO Yongsheng, WEI Xuexing, et al. Effect of tip clearance on the performance of centrifugal compressor under multiple load conditions[J]. Journal of Shandong University of Technology (National Science Edition), 2017, 31(1):7-11. (in Chinese)
- [16] 邵栋, 王彤. 叶顶间隙宽度变化对离心叶轮性能和内部流场的影响[J]. 热能动力工程, 2017, 32(8):29-36.
SHAO Dong, WANG Tong. Influence of tip clearance with different width on the performance and internal fluid flow of centrifugal impeller[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(8):29-36. (in Chinese)
- [17] 彭森, 杨策, 马朝臣. 离心压气机叶尖间隙泄漏流动数值研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(6):935-937.
PENG Sen, YANG Ce, MA Chaochen. Numerical simulation of centrifugal compressor with tip clearance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(6):935-937. (in Chinese)
- [18] 刘正先, 陈丽英. 亚声速半开式离心叶轮叶顶间隙的流动特征[J]. 航空动力学报, 2012, 27(4):937-945.
LIU Zhengxian, CHEN Liying. Nature of tip clearance flow in subsonic unshroud impeller of centrifugal compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4):937-945. (in Chinese)
- [19] HE Xiao, ZHENG Xinqian. Flow instability evolution in high pressure ratio centrifugal compressor with vaned diffuser[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 98(11):719-730.
- [20] BOUSQUET Y, BINDER N, DUFOUR G, et al. Numerical simulation of stall inception mechanisms in a centrifugal compressor with vaned diffuser[J]. Journal of Turbomachinery, 2016, 138(12):121005.
- [21] DAY I J. Stall, surge and 75 years of research[J]. Journal of Turbomachinery, 2016, 138(1):011001.
- [22] 张德胜, 吴苏青, 施卫东, 等. 不同湍流模型在轴流泵叶顶泄漏涡模拟中的应用与验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13):46-53.
ZHANG Desheng, WU Suqing, SHI Weidong, et al. Application and experiment of different turbulence models for simulating tip leakage vortex in axial flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13):46-53. (in Chinese)
- [23] 赵会晶, 王志恒, 席光. 跨音速离心叶轮叶尖区域流动的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(3):515-521.
ZHAO Huijing, WANG Zhiheng, XI Guang. Numerical analysis of flow structures in the tip region of a transonic centrifugal

- impeller[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(3):515-521. (in Chinese)
- [24] WEBER A, MORSBACH C, KUGELER E, et al. Flow analysis of a high flowrate centrifugal compressor stage and comparison with test rig data[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2016; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul: ASME, 2016:1-12.
- [25] 崔宝玲, 陈杰, 李晓俊, 等. 高速诱导轮离心泵内空化发展可视化实验与数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 148-155.
CUI Baoling, CHEN Jie, LI Xiaojun, et al. Experiment and numerical simulation of cavitation evolution in high speed centrifugal pump with inducer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 148-155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180417&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.017. (in Chinese)
- [26] 赵伟国, 翟利静, 夏添, 等. 离心泵叶片开槽抑制空化数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12):150-157.
ZHAO Weiguo, ZHAI Lijing, XIA Tian, et al. Numerical simulation of slotted blade in centrifugal pump on cavitation suppression[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 150-157. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181219&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.019. (in Chinese)
- [27] LIU Z X, PING Y, MEHRDAC Z. On the nature of tip clearance flow in subsonic centrifugal impellers[J]. Science China (Technological Sciences), 2013, 56(9):2170-2177.
- [28] YAMADA K, KIKUTA H, IWAKIRI K I, et al. An explanation for flow features of spike-type stall inception in an axial compressor rotor[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 135(2):021023.
- [29] ZHAO H J, WANG Z H, XI G. Unsteady flow structures in the tip region for a centrifugal compressor impeller before rotating stall[J]. Science China (Technological Sciences), 2017, 60(6):924-934.
- [30] 邓向阳, 张宏武, 黄伟光. 低速轴流压气机中前后静叶对动叶顶部区域流动的影响[J]. 航空学报, 2005, 26(5):535-539.
DENG Xiangyang, ZHANG Hongwu, HUANG Weiguang. Effects of upstream and downstream stators on rotor tip flow in a low-speed axial compressor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5):535-539. (in Chinese)
- [31] DEGAMI D, SEGNER A, LEVY Y. Graphical visualization of vortical flows by means of helicity[J]. AIAA Journal, 2012, 28(8):1347-1352.
- [32] ZHAO X R, XIAO Y X, WANG Z W, et al. Numerical analysis of non-axisymmetric flow characteristic for a pump-turbine impeller at pump off-design condition[J]. Renewable Energy, 2017, 115:1075-1085.
- [33] SUN T, PETRIC-REPAR P, VOGT D M. Detached-eddy simulation applied to the tip-clearance flow in a last stage steam turbine blade[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2018; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte, Oslo: ASME, 2018:1-10.

~~~~~

(上接第 162 页)

- [20] 杜永忠, 平雪良, 何佳唯. 圣女果表面缺陷检测与分级系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1):194-199.  
DU Yongzhong, PING Xueliang, HE Jiawei. Surface defect detection and classification system for cherry tomatoes [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Suppl. 1):194-199. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s135&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s135&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.035. (in Chinese)
- [21] 邓继忠, 李山, 张建瓴, 等. 小型农产品分选机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9):245-250.  
DENG Jizhong, LI Shan, ZHANG Jianling, et al. Design and test of small-scale sorting machine for agricultural products [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):245-250. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150936&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150936&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.036. (in Chinese)
- [22] 王风云, 封文杰, 郑纪业, 等. 基于机器视觉的双孢蘑菇在线自动分级系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7):256-263.  
WANG Fengyun, FENG Wenjie, ZHENG Jiye, et al. Design and experiment of automatic sorting and grading system based on machine vision for white *Agaricus bisporus* [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7):256-263. (in Chinese)
- [23] 陈艳军, 张俊雄, 李伟, 等. 基于机器视觉的苹果最大横切面直径分级方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2):284-288.  
CHEN Yanjun, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Grading method of apple by maximum cross-sectional diameter based on computer vision [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2):284-288. (in Chinese)
- [24] 陈红, 夏青, 左婷, 等. 破损花菇机器视觉检测技术[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11):60-67.  
CHEN Hong, XIA Qing, ZUO Ting, et al. Application of machine vision in detection of broken shiitake [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):60-67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141110&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141110&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.010. (in Chinese)