

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.01.019

轴流泵双驼峰特性与内流场测试研究

谢荣盛^{1,2} 华尔天¹ 徐高欢² 郭晓梅² 杨帆³ 汤方平³

(1. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江水利水电学院机械与汽车工程学院, 杭州 310018;
3. 扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室, 扬州 225009)

摘要: 为研究轴流泵在小流量工况双驼峰区域下的水力稳定性,探讨轴流泵扬程-流量曲线稳定性与内流场特性的关系,针对一比转数为825的轴流泵进行了测试研究。依次通过外特性能量曲线测试、内流场示踪粒子高速摄像机拍摄、壁面压力脉动采集、叶轮进出口截面速度LDV测试,获取了叶轮在小流量工况下的内外水力特性。由能量特性结果发现轴流泵的扬程-流量曲线存在双驼峰现象:第1次驼峰出现在 $0.5Q_{\text{BEP}} \sim 0.6Q_{\text{BEP}}$ 之间,对应着进口轮缘侧的切向速度出现明显波动,速度环量剧增,同时压力脉动峰峰值出现极大值,结合内流场测试结果表明第1次驼峰与叶轮进口回流生成相关;第2次驼峰出现在 $0.33Q_{\text{BEP}} \sim 0.4Q_{\text{BEP}}$ 之间,叶轮进口回流已然生成,虽然强度不断增强,影响范围更广,但进口侧叶轮室壁面的压力脉动峰峰值不再增强,而出口侧叶轮室壁面的压力脉动峰峰值迅速增加,同时出口近轮毂及中间侧的速度分布明显恶化,回流区域增加,表明第2次驼峰与叶轮出口流场的剧烈变化相关。

关键词: 轴流泵; 双驼峰; 水力特性; 流场测试

中图分类号: TH312 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0178-08 OSID: 

Research on Double Hump Phenomenon of Axial Flow Pump

XIE Rongsheng^{1,2} HUA Ertian¹ XU Gaohuan² GUO Xiaomei² YANG Fan³ TANG Fangping³

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric, Hangzhou 310018, China

3. Key Laboratory of Water Conservancy and Power Engineering of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to research the hydraulic stability of axial flow pump in the double hump region under small flow conditions, the relationship between the head - flow curve of the axial flow pump and the characteristics of the internal flow field was discussed, and a test and research on an axial flow pump with a specific speed of 825 was carried out. The internal and external hydraulic characteristics of the impeller under small flow conditions were obtained through the characteristic energy curve test, the internal flow field tracer particle trajectory was captured by a high-speed camera, the wall pressure pulsation collection, and the impeller inlet and outlet section velocity measurement by LDV equipment. According to the results of energy characteristics, it was found that there was a double hump phenomenon in the head - flow curve of the axial flow pump. The first hump appeared between $0.5Q_{\text{BEP}}$ and $0.6Q_{\text{BEP}}$, corresponding to the tangential fluctuation of the speed on the side of the inlet flange, the rapid increase of the velocity circulation, and the extreme peak-to-peak pressure pulsation. The test results showed that the first hump was related to the generation of the impeller inlet reflux. The second hump occurred between $0.33Q_{\text{BEP}}$ and $0.4Q_{\text{BEP}}$, the test results showed that the second hump was related to the drastic changes in the flow field of the impeller outlet. The impeller inlet reflux was generated during the second hump formation, although the strength was increasing and the influence range was wider, the pressure pulsation peak-to-peak value on the wall of the inlet side of the impeller chamber was no longer increased. The pressure pulsation peak-to-peak value on the wall of the outlet side of the impeller chamber was increased rapidly, and the unevenness of the velocity distribution between the outlet hub and the blades was obviously deteriorated, the reflux area of impeller outlet was increased, which indicated that the second hump was related to the drastic changes in the flow field of the impeller outlet.

Key words: axial flow pump; double hump; hydraulic characteristics; flow field test

收稿日期: 2021-08-31 修回日期: 2021-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609210、51976202)、浙江省自然科学基金项目(LY21E050002)、浙江省重点研发计划项目(2021C01158)和浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室开放基金项目(UZJWEU-RWM-20200304B)

作者简介: 谢荣盛(1987—),男,博士后,浙江水利水电学院讲师,主要从事流体力学内部流动分析研究,E-mail: xrspump@163.com

通信作者: 华尔天(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事机构进化设计研究,E-mail: het@zjut.edu.cn

0 引言

轴流泵适用于低扬程大流量场合,在多种领域发挥了重要作用^[1-2]。但轴流泵性能曲线的高效区范围较窄,在实际运行中易受工况波动影响^[3],在远离设计工况,特别是小流量工况下运行时,扬程-流量曲线往往会出现“S”型不稳定振荡现象,即能量特性曲线的驼峰现象,出现马鞍区,其相应工况下的内流场表现出强烈的不稳定性,严重时甚至会引起整个机组的强烈震动,对泵站系统的安全稳定及可靠性构成极大威胁。

透平机械在小流量工况下表现出的不稳性一直得到广大科研工作者的关注^[4-7]。小流量工况下水泵的失速现象与性能曲线的正斜率往往联系在一起,但是水泵性能曲线的拐点现象并不等同于失速^[8]。文献[9]给出离心泵交替失速和旋转失速状态下失速团的演变过程及其诱导的压力脉动变化规律。文献[10]对轴流泵马鞍区的压力脉动分布进行了测试分析,发现失速下的压力脉动出现明显的噪声。文献[11]探讨了轮缘间隙对混流泵旋转失速特性的影响,发现间隙泄漏强度与失速密切相关。近年来,为了提高叶轮的有效运行范围,学者们在叶轮设计参数优化、抑制叶顶泄漏涡结构等方面进行了一了相关研究^[12-23]。

针对小流量驼峰问题的研究已开展了较为深入系统的工作,也取得了不少成果,通常认为轴流泵在 $0.5Q_{BEP}$ (最优流量工况)附近发生失速,伴随着扬程-流量曲线的驼峰现象出现,部分水体从上一级叶片通道出口流入下一级叶片通道,堵塞叶轮内部空间,叶轮进口外侧的回流及进口压力脉动出现剧增^[24-25]。列入国家型谱的轴流泵性能测试结果表明,有近半数的性能曲线在小流量工况下存在双驼峰现象^[26],但由于轴流泵失速下内流场表现出的非定常特性,且有各种尺度的涡混合,共同影响着性能特性,目前不同预测模型对内流场得出的结果不尽相同,缺乏有力的内流场试验验证,对轴流泵双驼峰现象对应流动机理的研究较少。同时由于失速后叶片通道内流场表现出的复杂性,不同泵型表现出来的规律不尽相同,对于引起该现象的成因尚未形成统一的解释,对轴流泵双驼峰现象与内流场的对应关系及其规律仍有待进一步研究。

本文针对某轴流泵在小流量工况下出现的扬程-流量曲线双驼峰现象,通过试验手段,依次开展外特性曲线测试、高速摄像机拍摄示踪气泡轨迹、叶轮进出口外缘的压力脉动测试和叶轮内部流场激光多普勒测速仪(Laser Doppler velocity, LDV)测试,探讨轴

流泵小流量工况下双驼峰现象不同的流动机理。

1 轴流泵试验台及测试设备

为了研究轴流泵在小流量工况下的流场特性,搭建了能够在小流量工况稳定运行的轴流泵试验台,如图 1 所示,测试用轴流泵水力模型原型为 TJ-04-25 型轴流泵水力模型,经过改型演变而来。叶片经数控加工而成,保证表面精度,叶轮室采用透明有机玻璃制成,导叶体、扩散段及弯头段采用不锈钢分段加工装配而成。其中轴流泵结构及测试叶轮图片如图 2 所示,主泵叶轮外缘为圆柱面,直径 D 为 150 mm,名义比转数 n_s 为 825,轮毂比 d/D 为 0.4(d 表示轮毂直径),叶顶间隙最小值为 0.2 mm。限于篇幅,测试系统具体见文献[27]。小流量工况下轴流泵双驼峰的内外特性研究中采用的仪器及其工作参数如表 1 所示。

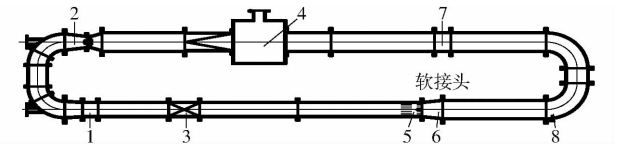


图 1 轴流泵试验台架

Fig.1 Axial flow pump test bench

1. 主泵系统 2. 辅助泵系统 3. 流量计 4. 稳压罐 5. 整流栅
6. 渐缩管 7. 蝶阀 8. 进出水孔

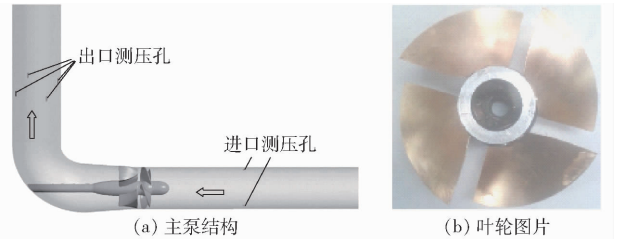


图 2 主泵结构及测试叶轮图片

Fig.2 Photo of main pump structure and test impeller

表 1 试验测量系统主要仪器设备

Tab.1 Main instruments and equipment of test and measurement system

测量项目	设备名称	型号	工作参数	规格
扬程	差压变送器	EJA110A	0 ~ 100 kPa	0.1 % FS
流量	电磁流量计	E - mag	0 ~ 80 L/s	0.5 % FS
转矩、 转速	转速转矩传 感器	JW - 3	10 N·m 0 ~ 6 000 r/min	0.2 % FS 0.1 % FS
压力脉动	数字压力传 感器	CY302	0 ~ 30 kPa	0.1 % FS
速度场测试	LDV		-100 ~ 100 m/s	0.1 % FS
	高速摄像机	MSK70	0 ~ 5 000 帧/s	512 像素 × 512 像素

流量、扬程、扭矩及转速传感器配合使用可以获得轴流泵外特性曲线,相关公式参照文献[1]。内流场通过高速摄像机对叶轮进口的示踪粒子拍摄合

成轨迹图,获取来流速度分布,再通过数字压力传感器获得叶轮进出口的压力脉动,最后针对特征工况点进行进出口 LDV 速度测试,获取不同工况下的速度分布规律,通过轴流泵的内外特性综合分析双驼峰现象与流场关系。

2 试验结果及分析

2.1 能量特性曲线

能量特性试验方法依照 SL-140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》进行,单点测试采集不少于 15 点,取平均值。最优效率下试验台的综合不确定度 E_r 为 0.75%。

为了能够充分捕捉到双驼峰现象,对小流量工况下的测试点进行了加密处理。为了尽可能减小试验台稳定性引起的误差,试验在两个转速 1 000、1 500 r/min 下分别进行,工况调节通过辅助泵反向旋转制动与调节阀门开度方式进行。为了便于对比不同转速下的性能曲线特性,以最高效率点为参照,将扬程及流量转化为相对值处理,测试所得的外特性曲线如图 3 所示。图中 Q 、 H 、 P 、 η 分别表示流量、扬程、功率、效率,下标 BEP 表示最优工况点对应的参数,1 000 r/min 下最高效率对应的流量 Q_{BEP} 为 30 L/s,扬程 H_{BEP} 为 0.70 m。由于在第 2 次驼峰区域运行时,流量工况无法稳定,性能曲线中不稳定区间采用间断线表示。

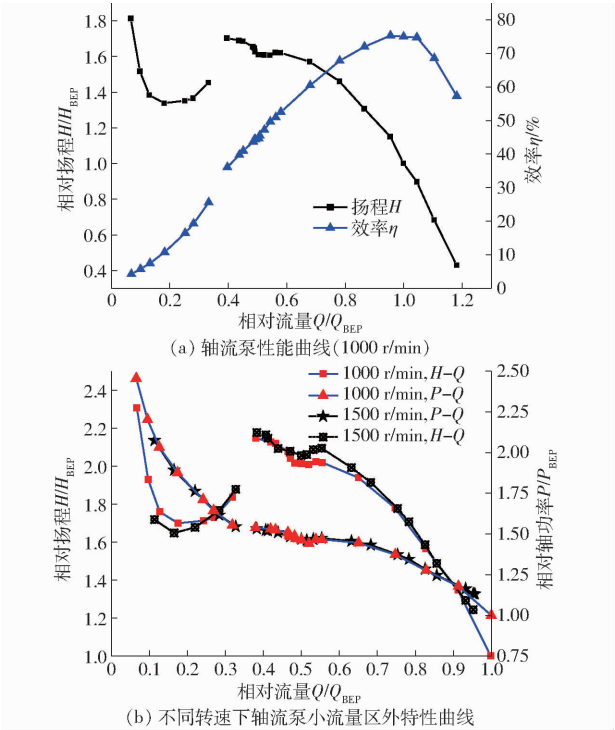


图 3 外特性测试结果

Fig. 3 External characteristic test results

由图 3a 可知,在 $0.6Q_{BEP} \sim 1.2Q_{BEP}$ 之间扬程随

着流量的减小而逐渐增加。对扬程-流量曲线拟合,当采用线性拟合时, R^2 为 0.935 7,当采用系数为 2 的多项式拟合时, R^2 为 0.999 1,可认为扬程-流量曲线在 $0.6Q_{BEP} \sim 1.2Q_{BEP}$ 范围之间较好满足二次曲线关系。当流量进一步减小时,扬程-流量曲线出现波动,在 $0.5Q_{BEP} \sim 0.6Q_{BEP}$ 之间扬程-流量曲线第 1 次出现驼峰,随着流量的进一步减小扬程继续增加,直至达到 $0.4Q_{BEP}$ 工况时仍能保持稳定运行。在 $0.33Q_{BEP} \sim 0.4Q_{BEP}$ 之间扬程-流量曲线会进入不稳定的驼峰区域,如图 3a 曲线间断区域所示,无论是单独控制闸门、辅助泵,还是联合控制,无论流量是增加还是减小,1 000 r/min 下第 2 次驼峰间断区域的右侧稳定出现在 $0.4Q_{BEP}$,左侧稳定出现在 $0.33Q_{BEP}$ 。至 $0.18Q_{BEP}$ 时扬程-流量曲线的正斜率段消失,当流量进一步减小时扬程迅速增加,且斜率绝对值远大于其余工况。

由图 3b 可知,不同转速下性能曲线保持较好的对应关系,扬程-流量曲线均出现了两次驼峰现象,轴功率-流量相对值曲线仅在扬程-流量曲线第 1 次出现驼峰的地方出现了下凹区间。在流量小于 $0.4Q_{BEP}$,扬程-流量曲线的第 2 次驼峰区域出现时,相对轴功率与相对流量的斜率绝对值迅速增大。

2.2 叶轮进口示踪气泡迹线

为清晰捕捉轴流泵叶轮室进口处在不同特征工况下速度变化情况,采用高速摄像机对轴流泵叶轮进口前的流场进行拍摄,通过在叶轮室进口加入微量气泡,捕获气泡移动形成的迹线来体现流体运动规律,从进口速度场的变化中寻找不同驼峰区出现的原因。图 4 为拍摄工况、区域示意图及拍摄图像。图 5 为选取典型工况下叶轮进口前示踪气泡迹线图。

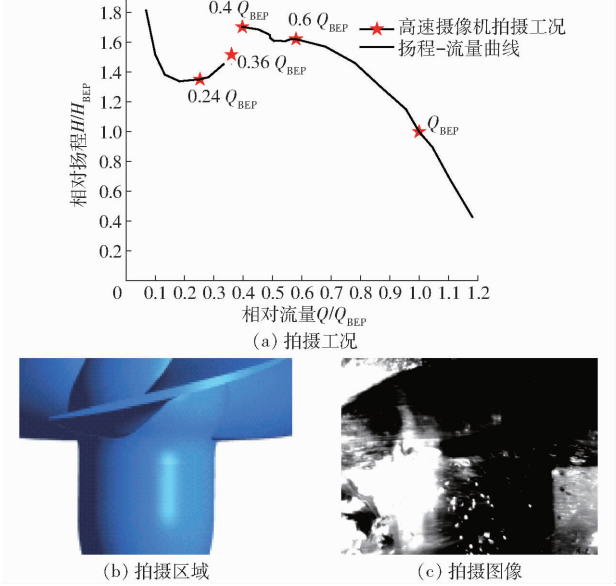


图 4 拍摄工况及拍摄区域示意图

Fig. 4 Schematics of shooting conditions and shooting area

图 5 表明:设计工况 Q_{BEP} 附近叶轮的迹线几乎为轴向,不受叶轮旋转的影响,与常规假设相符;扬程-流量曲线第 1 次出现拐点位置 $0.6Q_{\text{BEP}}$,此时叶轮进口的速度出现了较大的波动,对应叶轮进口的示踪气泡迹线出现了切向波动;在失速不稳定临界工况,对应 $0.4Q_{\text{BEP}}$ 工况,叶轮进口的示踪气泡迹线出现明显的倾斜,表明进口水流出

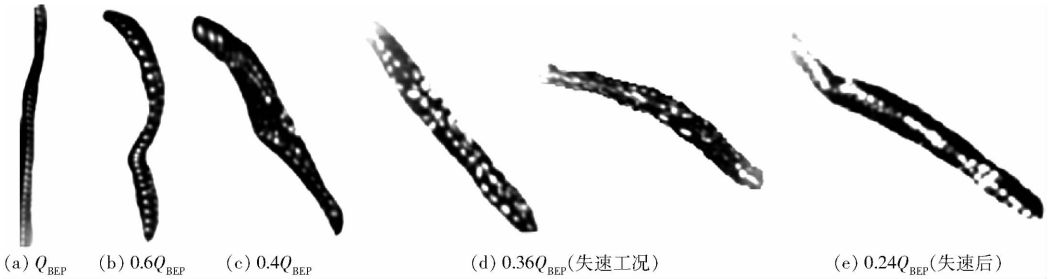


图 5 不同工况下叶轮进口前示踪气泡迹线

Fig. 5 Traces of bubbles in front of impeller inlet under different working conditions

从进口示踪气泡的迹线可以得出扬程-流量曲线在第 1 次出现拐点位置时对应叶轮进口的速度出现了明显的切向波动,但整体运行仍然稳定,在第 2 次出现拐点时,叶轮进口流场表现出明显的稳定性。

2.3 叶轮室进出口压力脉动测试

为了进一步研究叶轮进出口的内流场在双驼峰下的特性,探讨性能曲线突变与压力脉动的规律,进行了叶轮进口壁面压力脉动测试。压力传感器的布置如图 6 所示,测点 1~4 为叶轮进口侧,呈斜 45°排列,沿主轴轴向方向间距均为 10 mm,测点 1 与叶片最外缘进口头部距离为 12 mm。测点 5、6 为叶轮出口侧,测点 5 位于正对导叶处,测点 6 位于两片导叶中间,测点 5、6 的相位角相差 36°。为了剔除局部扰动对压力脉动峰峰值的影响,选取 97% 置信区间的右临界点作为压力脉动峰峰值 p_{pk} ,不同测点压力脉动峰峰值如图 7 所示。

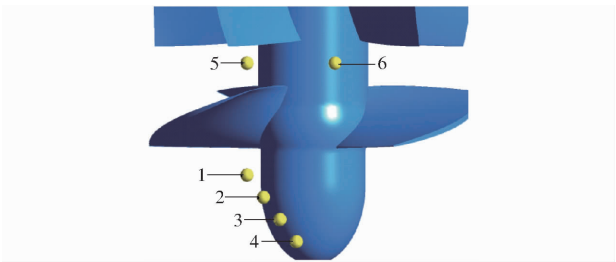


图 6 压力脉动测点布置

Fig. 6 Pressure pulsation measuring point layout

由图 7 可知,进口的压力脉动峰峰值沿着远离叶轮方向幅值迅速下降,在最优工况附近压力脉动整体较低。在流量降低至 $0.58Q_{\text{BEP}}$ 时,进口的压力脉动峰峰值达到最大值,对应扬程-流量曲线的第 1

现明显的回旋,在失速不稳定工况 $0.36Q_{\text{BEP}}$ 中,采用瞬态结果表明同一流量下表现出不稳定性,不同时刻提取出来的示踪气泡迹线表现出明显的不一致,表明叶轮进口的速度出现较大的波动,表现出明显不稳定性;在失速结束后,对应 $0.24Q_{\text{BEP}}$ 工况,叶轮进口速度分布虽然表现出明显的旋转速度分布,但总体保持稳定。

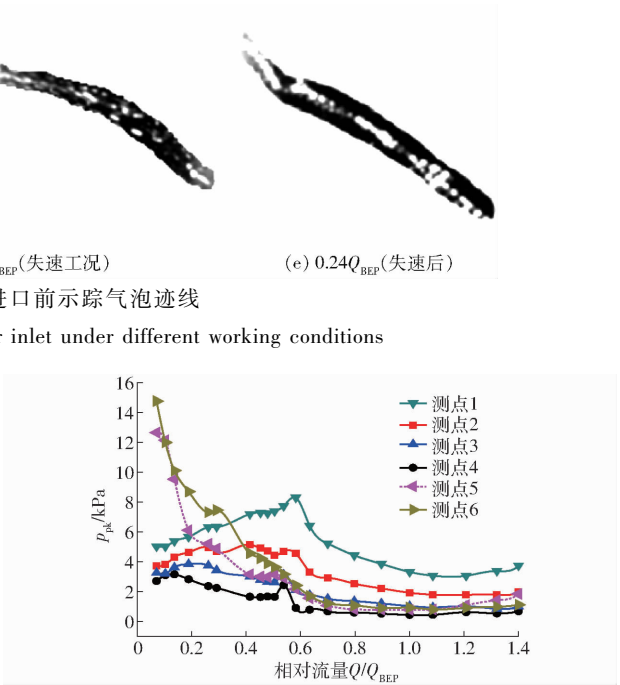


图 7 压力脉动峰峰值分布

Fig. 7 Pressure pulsation peak-to-peak value

个驼峰区域。在流量工况小于 $0.58Q_{\text{BEP}}$ 时,离叶轮最近测点 1 的压力脉动峰峰值出现递减,测点 2~4 有所增加,但幅值均小于测点 1,说明进口的切向速度影响范围向叶轮来流侧延伸,联合示踪气泡迹线图说明叶轮进口虽然存在切向速度,但是脉动逐渐降低,流场反而稳定。

叶轮出口的测点 5、6 在小于 $0.58Q_{\text{BEP}}$ 之后出现明显的差别,主要是因为测点 5 位于导叶正上方,导叶起到了有效的整流作用,表现出明显的压力脉动幅值减小。而测点 6 位于两导叶之间,导叶对其作用很小。在流量工况小于 $0.4Q_{\text{BEP}}$,对应第 2 次驼峰区域后随着流量的减小压力脉动峰峰值迅速增加,并超过叶轮进口成为装置最主要的脉动。而叶轮进口的压力脉动峰峰值在经历第 2 个驼峰区域之后并没有表现出明显的增加趋势。

总结进出口的压力脉动分布规律可以得出叶轮性能曲线的第 1 个驼峰区域对应进口的压力脉动峰峰值突变,第 2 个驼峰区域对应出口的压力脉动峰峰值突变。

2.4 叶轮进出口速度分布

为了获取叶轮进出口的速度分布,采用 LDV 无

接触的测试设备对叶轮进出口的截面进行了速度测试,观测其在扬程-流量曲线出现拐点部位的速度分布特征,测试截面如图 8 所示。

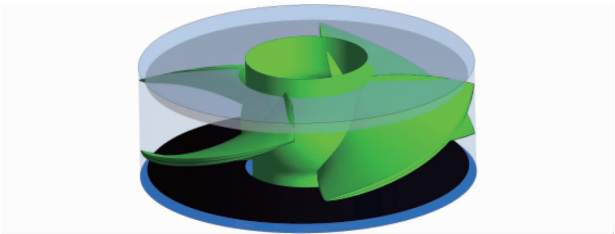


图 8 叶轮进出口速度分布截面测试位置
Fig. 8 Test position of speed distribution section of impeller inlet and outlet

2.4.1 切向速度分布

由水泵的基本理论可知,性能曲线与进出口速度的切向速度密切相关,驼峰形成时进出口的切向速度变化最明显,分别提取进出口的切向速度,以环量 Γ 为纵坐标,径向无量纲因子 Span 值为横坐标,如图 9 所示。Span 值为 $(r - r_1)/(r_2 - r_1)$,其中 r 表示半径, r_1 表示轮毂半径, r_2 表示轮缘半径。

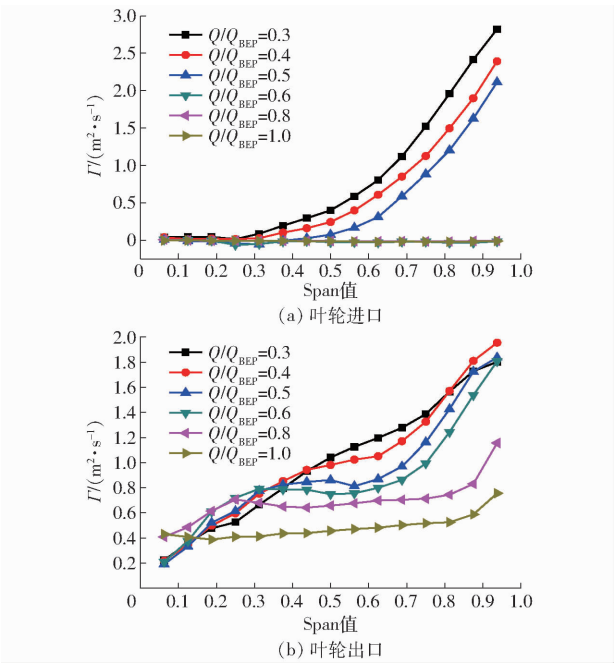


图 9 叶轮进出口环量分布
Fig. 9 Circulation distributions of impeller inlet and outlet

叶轮进口的环量在 $0.6Q_{BEP} \sim Q_{BEP}$ 流量工况下均为零,到 $0.5Q_{BEP}$ 时叶轮进口形成明显的切向速度,进口的环量逐渐增加,与图 5 示踪气泡的迹线图相对应。随着流量的减小,切向速度增加,环量逐渐增加,切向速度的影响区域也逐渐增加,但是轮毂侧切向速度在测试中的最小流量工况 $0.3Q_{BEP}$ 环量也几乎为零,说明叶轮进口的切向速度主要影响外侧区域。

叶轮出口的环量在 Q_{BEP} 工况下外缘略大于内侧,在外缘 Span 值从 0.8 到 1.0 位置会有明显的局部递增。从 Q_{BEP} 到 $0.8Q_{BEP}$,出口环量在 Span 值从 0 到 0.25 位置逐渐增加,而在 Span 值从 0.25 到 1.0 位置为整体增加。到 $0.6Q_{BEP}$ 时近轮毂侧的环量有所减小,而外缘侧的环量增加明显高于内侧。从 $0.6Q_{BEP}$ 到 $0.4Q_{BEP}$ 环量在轮毂侧几乎保持不变,主要在中部及外缘增加。从 $0.4Q_{BEP}$ 到 $0.3Q_{BEP}$ 时,轮缘侧的环量也有所减小。

2.4.2 轴向速度分布

非设计工况下水泵内部流场不再满足内外半径圆柱面无关假设,水流在不同的半径处迁移,必然形成不同半径处轴向速度的分布不均,同时,由于沿着圆周方向在叶片压力面及吸力面的影响下,轴向速度 v_z 也必然存在较明显的区别。为此,将不同时刻测试的叶轮进出口轴向速度沿圆周方向展开,形成叶轮进口及出口轴向速度分布(图 10、11)。

由图 10、11 可见,随着流量的减小,整体上轴向速度均值逐渐减小,但是分布上表现出不一样的特性。从图 10 可以发现,当流量小于 $0.6Q_{BEP}$ 之后,局部速度会出现增加的情况,主要是在两叶片之间外缘出现了回流现象,必然迫使主流偏向一侧形成局部高速流区域,也对应了进口切向速度的增加及压力脉动的加剧,随着流量的减小,虽然回流有所加强,但轴向速度的降低不会导致进口外缘脉动持续增强。进口轮缘侧的回流与扬程-流量曲线的第 1 次驼峰出现密切相关,目前不少研究中通过在叶轮进口设置各种方案抑制回流有效抑制驼峰区

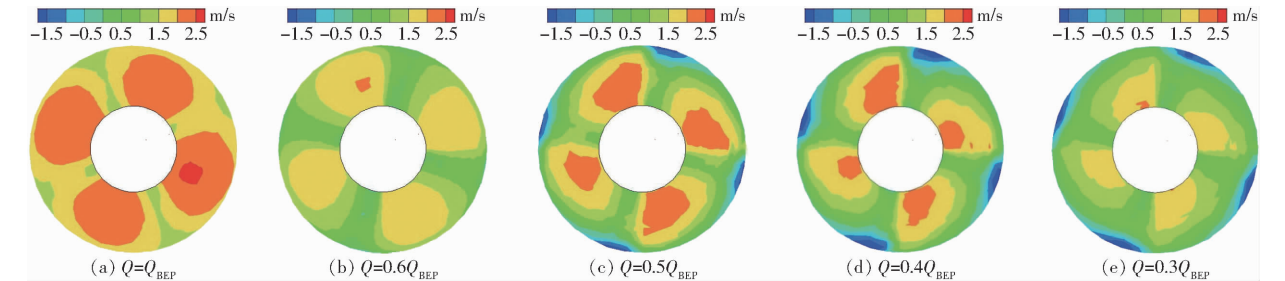


图 10 叶轮进口轴向速度云图分布

Fig. 10 Distributions of axial velocity cloud diagram at inlet of impeller

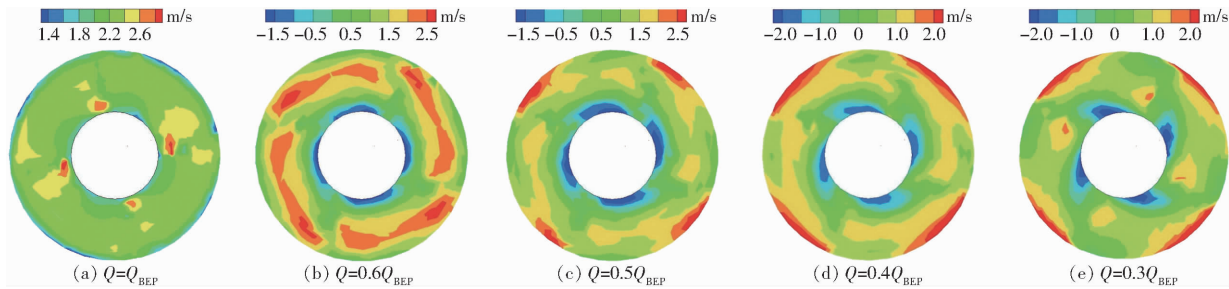


图 11 叶轮出口轴向速度云图分布

Fig. 11 Distributions of axial velocity cloud diagram of impeller outlet

域^[14-17]，与本文试验测试数据结论一致。

扬程-流量曲线的第 2 次驼峰区与出口的压力脉动峰峰值极大值区域相对应，由图 11 可知，轮缘侧的速度脉动在小于 $0.6Q_{BEP}$ 之后已经形成，受工况的变化影响不大，而在轮毂及叶片中间的速度分布不均匀度有明显恶化趋势，特别是从 $0.4Q_{BEP}$ 到 $0.3Q_{BEP}$ 随着流量的减小近轮毂侧的回流增强，叶片通道出口局部轴向速度增加。可见，通过对叶轮出口侧进行相应调整可以有效改善此部分的不稳定区域，文献[19]中将下环转轮半径扩大，减小安放角能明显增加驼峰裕度，很好地印证了本文的研究结果。

3 双驼峰现象机理分析

通过对轴流泵叶轮内外特性测试获得轴流泵双驼峰下对应的典型流场变化。但是由于失速工况下叶轮内部流动的复杂性，对于形成机理，学者们作出过很多解释。本文从测试所得数据出发，得出：双驼峰的出现均与叶轮通道内部流场的变化相关，都是叶轮内部流态从一种平衡过渡到另一种平衡状态的表现，但通过流场测试得到的特性并不同。

设计工况至 $0.6Q_{BEP}$ 前，叶轮内外不同半径处满足圆柱层无关假设，即径向速度近似为零，但随着流量继续降低，叶轮外缘升力增加快于内侧，叶轮外缘的压力脉动增加，圆柱无关性假设不再成立。此时叶轮通道出口侧局部水流会卷吸返回至进口侧，一方面使进口外缘的切向速度迅速增加，进口环量增加，另一方面挤压叶轮进口外缘的轴向流速，这是造成第 1 次驼峰区的主要原因，同时伴随着轴功率减小。

叶轮进口回流产生之后，轴流泵仍能产生一定的扬程，在一定范围随着流量的降低扬程逐渐升高，仍可以稳定运行。当流量降低至某一程度之后，叶轮内部涡带进一步恶化，会出现交替失速状态，并表现出不稳定性，叶轮出口近轮毂侧回流增加，压迫出口水流偏向轮缘侧。

叶轮进口侧的速度出现不稳定性，出现如图 5d 所示同一流量下不同时刻表现出不同的切向速度分布，叶轮内部会重新调整直至平稳，进口的切向速度表现出继续增加趋势，但脉动峰峰值降低，出口的环量增加不明显，但脉动峰峰值继续增加，故本文认为叶轮内部涡带变化引起的叶轮出口流场恶化是第 2 次驼峰区域出现的主要原因，但由于叶轮内部湍动能的增加、涡带消耗能量继续增加，轴功率大幅上升，效率下降。

4 结论

(1) 能量特性结果表明：在 $0.5Q_{BEP} \sim 0.6Q_{BEP}$ 工况扬程-流量曲线出现第 1 次驼峰现象，且对应的轴功率-流量曲线出现了对应的驼峰现象，在深度失速工况下 $0.33Q_{BEP} \sim 0.4Q_{BEP}$ 流量工况下扬程-流量曲线出现第 2 次驼峰现象。

(2) 内流场测试表明：在扬程-流量曲线出现第 1 次驼峰时，对应进口的速度出现切向波动，压力脉动峰峰值出现极大值，表明扬程-流量曲线第 1 次驼峰与进口回流生成相关；而在小于 $0.4Q_{BEP}$ 出现第 2 次驼峰时对应叶轮出口压力脉动峰峰值迅速增加，出口侧的轴向回流显著增强，表明第 2 次驼峰出现与叶轮出口流场的剧烈变化相关。

参 考 文 献

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2017.

[2] 景瑞, 何希杰. 轴流泵及其应用概述[J]. 通用机械, 2014(9): 86-89.

JING Rui, HE Xijie. Axial flow pump and its application overview[J]. General Machinery, 2014(9): 86-89. (in Chinese)

[3] 《中国水利年鉴》编纂委员会. 中国水利年鉴(2019)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.

[4] EMMONS H W, PEARSON C E, GRANT H P. Compressor surge and stall propagation[J]. Transactions of the ASME, 1955, 77(3): 455-469.

[5] 陆亚钧. 风机、叶片机中的旋转失速和喘振现象及分离旋涡流动[J]. 华电技术, 1992(5): 20-44.

- LU Yagou. Rotation stall and surge phenomenon and separation and rotation flow in fan and leaf machine[J]. Huadian Technology, 1992(5):20-44. (in Chinese)
- [6] GRAVDAHL J T, EGELAND O. Compressor surge and rotating stall: modeling and control[M]. Springer, 1999.
- [7] 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(2):35-39.
PAN Zhongyong, LI Junjie, LI Hong, et al. Overview for research on rotating stall of pump[J]. Fluid Machinery, 2011(2):35-39. (in Chinese)
- [8] GREITZER E M. The stability of pumping systems[J]. Journal of Fluids Engineering, 1981, 103(2):193-242.
- [9] 周佩剑. 离心泵失速特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
ZHOU Peijian. Investigation of stall characteristics in centrifugal pumps[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [10] 何乃昌,谈明高,刘厚林,等. 轴流泵马鞍区水力性能与压力脉动测试与分析[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(2):118-123.
HE Naichang, TANG Minggao, LIU Houlin, et al. Test and analysis on pressure pulsation and hydraulic performance of saddle zone in axial flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(2):118-123. (in Chinese)
- [11] 平元峰,施卫东,李伟,等. 不同轮缘间隙下混流泵旋转失速特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9):2109-2117.
PING Yuanfeng, SHI Weidong, LI Wei, et al. Rotating stall characteristics of mixed flow pump under different flange clearances[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2019, 50(9):2109-2117. (in Chinese)
- [12] CAO W, LI W. Study on the performance improvement of axial flow pump's saddle zone by using a double inlet nozzle[J]. Water, 2020, 12(5):1493.
- [13] 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, 2021, 627:012002.
- [14] 程千,冯卫民,周龙才,等. 前置导叶对轴流泵马鞍区工况回流涡特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4):8-14.
CHENG Qian, FENG Weimin, ZHOU Longcai, et al. Effects of inlet guide vane on characteristics of backflow vortex in hump region of axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):8-14. (in Chinese)
- [15] 杨寇帆. 进口管壁面轴向开槽对轴流泵驼峰的改善研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
YANG Koufan. Elimination of hump characteristic of axial flow pump by adapting axial grooves at the wall of inlet pipe[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] 邢杨义,谢荣盛,项春,等. 前置挡板改善轴流泵装置马鞍区的模拟研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(1):52-54.
XING Yangyi, XIE Rongsheng, XIANG Chun, et al. Simulation study on improvement of saddle area of axial flow pump device with front baffle[J]. Coal Mining Machinery, 2019, 40(1):52-54. (in Chinese)
- [17] AL-OBAIDI A R. Analysis of the effect of various impeller blade angles on characteristic of the axial pump with pressure fluctuations based on time- and frequency-domain investigations[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2021(45):441-459.
- [18] 喻德辉,王超,杨由超,等. 叶轮斜切对导叶式离心泵特性的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2):134-137.
YU Dehui, WANG Chao, YANG Youchao, et al. Influence of the oblique trimmed impeller on the characteristics of centrifugal pump with vaned diffuser[J]. Hydropower Energy Science, 2021, 39(2):134-137. (in Chinese)
- [19] 覃永粼,李德友,王洪杰,等. 转轮出口半径分布对水泵水轮机驼峰特性影响研究[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集, 2020:9.
QIN Yonglin, LI Deyou, WANG Hongjie, et al. Study on the influence of runner outlet radius distribution on the hump characteristics of pumps and turbines[C]// China Hydropower Engineering Society Power Grid Peak Regulation and Pumped Storage Professional Committee. Pumped Storage Power Station Project Construction Anthology, 2020:9. (in Chinese)
- [20] 陈丽,尤保健,施亮,等. 3DG 锅炉给水泵径向导叶的无驼峰设计与分析[J]. 流体机械, 2020, 48(8):38-41.
CHEN Li, YOU Baojian, SHI Liang, et al. Design and analysis of no hump for the radial guide vane of 3DG boiler feed pump[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(8):38-41. (in Chinese)
- [21] 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.
ZHANG Rui, CHEN Hongxun. Study on the improvement of hydrodynamic performance of axial-flow pump at stall condition[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3):292-298. (in Chinese)
- [22] 李恩达,李伟,施卫东,等. 驼峰区内混流式喷水推进泵失速状态判别研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(9):2643-2652.
LI Enda, LI Wei, SHI Weidong, et al. Research on stall discrimination of the stall state of a mixed-flow water jet in hump region[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020, 51(9):2643-2652. (in Chinese)
- [23] 李伟,平元峰,施卫东,等. 导叶式混流泵旋转失速的研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(9):737-745.
LI Wei, PING Yuanfeng, SHI Weidong, et al. Research progress in rotating stall in mixed flow pump with guide vane[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(9):737-745. (in Chinese)

- [24] 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.
ZHENG Yuan, CHEN Yujie, ZHANG Rui, et al. Analysis on unsteady stall flow characteristics of axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):127–135. (in Chinese)
- [25] CAO P Y, WANG Y, KANG C, et al. Investigation of the role of non-uniform suction flow in the performance of water-jet pump[J]. Ocean Engineering,2017,140(8):258–269.
- [26] 刘宁,汪易森,张纲. 南水北调工程水泵模型同台测试[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [27] 谢荣盛. 轴流泵小流量工况水力特性研究[D]. 扬州:扬州大学,2016.
XIE Rongsheng. The investigation of small flow condition hydraulic performance in axial flow pumps[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016. (in Chinese)
-
- (上接第 158 页)
- [10] 程晓倩. 无人自转旋翼机建模与控制技术研究[D]. 厦门:厦门大学,2017.
CHENG Xiaoqian. Research on modeling and control technology of unmanned gyroplane[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017. (in Chinese)
- [11] 林清,蔡志浩,闫坤,等. 升降舵辅助操纵的自转旋翼机自适应姿态控制[J]. 航空学报,2016,37(9):2820–2832.
LIN Qing, CAI Zhihao, YAN Kun, et al. Adaptive attitude control of autogyro augmented with elevator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016,37(9):2820–2832. (in Chinese)
- [12] SONG Wang, WAN Lichen, WEN Qiangdun, et al. Design and experiment of flight path control system of unmanned autogyro [C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2016, 44: 01065.
- [13] ZAFER B, OGUZHAN K. Comparison of PID and FOPID controllers tuned by PSO and ABC algorithms for unstable and integrating systems with time delay[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2018, 39(4): 1431–1450.
- [14] ADAM D, PAWEL B, LUKASZ P L, et al. Structural dynamics of a gyrocopter: numerical approach in some emergency cases [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2018, 90(4): 699–710.
- [15] 李亮. 基于改进 PSO 算法的直升机线性自抗扰控制器优化设计[J]. 信息通信,2019(4):44–48,50.
LI Liang. Optimization design of helicopter linear active disturbance rejection controller based on improved PSO algorithm[J]. Information & Communications,2019(4):44–48,50. (in Chinese)
- [16] 薛秦锴,闫兆武,庄淡盛,等. 改进粒子群整定涵道式倾转两轴旋翼机横滚 PID 控制器[J]. 工业控制计算机,2020,33(12):100–102.
XUE Qin'e, YAN Zhaowu, ZHUANG Dansheng, et al. Improved PSO tuning PID controller for tilting two-axis rotorcraft[J]. Industrial Control Computer,2020,33(12):100–102. (in Chinese)
- [17] 陈洁,王道波,盛守照,等. 基于侧偏修正的无人驾驶旋翼机转弯飞行控制[J]. 兵工自动化,2012,31(1):57–60.
CHEN Jie, WANG Daobo, SHENG Shouzhao, et al. Flight control of unmanned rotorcraft turning based on side deflection correction[J]. Ordnance Industry Automation,2012,31(1):57–60. (in Chinese)
- [18] 王正峰,赵兀君. 基于模糊自适应 PID 的无人直升机垂直起降控制律设计研究[J]. 直升机技术,2017(4):18–22,28.
WANG Zhengfeng, ZHAO Wujun. Research on vTOL control law design of unmanned helicopter based on fuzzy adaptive PID [J]. Helicopter Technology,2017(4):18–22,28. (in Chinese)
- [19] 陈淼,王道波,盛守照,等. 无人旋翼机自主滑行起飞建模与控制[J]. 兵工自动化,2011,30(9):56–60,76.
CHEN Miao, WANG Daobo, SHENG Shouzhao, et al. Modeling and control of autonomous taxiing take-off of unmanned rotorcraft[J]. Ordnance Industry Automation,2011,30(9):56–60,76. (in Chinese)
- [20] MAŁGORZATA W, ŁUKASZ C, AGNIESZKA S. The influence of the blades leading edge anti-erosion protection on main rotor performances[J]. Journal of KONES,2018,25(2):48–50.