

不同流量工况下混流泵压力脉动试验

李伟 季磊磊 施卫东 周岭 平元峰
(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为了研究混流泵叶轮和导叶非定常时序干涉引起的压力脉动特性,通过试验对混流泵泵体关键测点进行了压力脉动测量,分析了不同流量工况下叶轮进口、叶轮中部、叶轮出口、导叶进口、导叶出口以及装置出口等位置压力脉动的时域和频域响应。研究结果表明:叶轮旋转周期较大程度影响了叶轮进口、叶轮中部监测点的压力脉动,脉动曲线出现了与叶轮叶片数相一致的4个波峰和4个波谷,压力脉动主频为叶轮叶片通过频率;叶轮和导叶的动静干涉作用使得叶轮出口和导叶进口监测点压力脉动在小流量工况下分别出现7~12个波峰和波谷,压力脉动频谱范围变大,分频成分增多,主频随着流量减小向高频方向偏移,动静干涉诱导的流体激振以及噪声等高频成分出现并逐渐增多。叶轮中部监测点的压力脉动幅值最大且对流量变化最敏感,远离叶轮区各监测点的压力脉动受流量变化的影响较小。

关键词: 混流泵; 压力脉动; 流量工况; 试验

中图分类号: TH313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0070-07

Experiment on Pressure Fluctuation in Mixed-flow Pump under Different Flow Rate Conditions

Li Wei Ji Leilei Shi Weidong Zhou Ling Ping Yuanfeng
(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to study the pressure fluctuation characteristics in the mixed-flow pump caused by the effect of impeller and guide vane's unsteady periodical interference, the pressure fluctuation in key monitoring points was measured on the mixed-flow pump body. The time domain and frequency domain responses of the pressure fluctuation under different flow rate conditions on the impeller inlet, middle part of impeller, impeller outlet, guide vane inlet, guide vane outlet and device exit were analyzed. The results showed that the impeller rotational cycle greatly influenced the pressure fluctuation at the positions of the impeller inlet and the blade rim central point of the impeller. The four peaks and four valleys were appeared in the fluctuation curves which were consistent with the number of impeller blades. Meanwhile, the main pressure fluctuation frequency was consistent with the impeller blade passing frequency. The pressure fluctuations appeared 7~12 peaks and valleys respectively in impeller outlet monitoring points and guide vane inlet monitoring points under small flow rate condition, which was caused by the rotor-stator interaction between impeller and guide vane. Besides, due to the rotor-stator interaction, the pressure fluctuation spectrum range became larger and frequency component was increased. The main frequency was shifted to high frequency with the decrease of flow rate. The fluid vibration induced by dynamic and static interference and the noise of high frequency composition was increased gradually. The pressure fluctuation amplitude of the monitoring points in the center of the impeller was the largest and the

收稿日期: 2016-09-21 修回日期: 2016-10-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(51409127、51679111、51579118)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAB07B06)、江苏省重点研发计划项目(BE2015119、BE2015001-4)、江苏省六大人才高峰项目(HYZB-002)、江苏省自然科学基金项目(BK20161472)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)和江苏大学高级专业人才培养启动基金项目(13JDC105)
作者简介: 李伟(1979—),男,副研究员,博士,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: lwjiangda@ujs.edu.cn

most sensitive to the change of flow rate, the pressure fluctuation of the monitoring points away from the impeller area was less affected by the change of flow rate. The research results had significant reference value for revealing the unsteady flow characteristics of mixed-flow pump.

Key words: mixed-flow pump; pressure fluctuation; flow rate conditions; experiment

引言

混流泵广泛应用于农业排灌、城市供排水、矿山、大型水利工程、舰船喷水推进、海水脱盐系统以及火力发电和核电站的循环水系统等领域^[1-2]。在混流泵内,由于叶轮和导叶非定常时序性相互干涉、叶片进口的水流冲击,偏离最优工况时叶片出口的脱流、汽蚀造成的流动不连续等引起的压力变化等因素,都可能导致泵内水压力随时间不断快速变化,即出现压力脉动。压力脉动的最大危害是使机组的结构振动加剧,即出现水力激振,同时还可引发进一步的局部空化,甚至在某些情况下引起共振^[3-4]。因此,研究混流泵压力脉动特性,对改进混流泵设计、提高混流泵运行稳定性具有重要意义。

目前,国内外学者已对混流泵内部流动特性进行了深入研究^[5-9],但是关于混流泵压力脉动特性的研究相较于离心泵和水轮机等^[10-13]而言并不充分。LI 等^[14]研究了导叶厚度对混流泵内部压力脉动的影响,研究发现,导叶厚度对叶轮进口处压力脉动影响较小,对导叶中部压力脉动影响最大,与减薄叶片相比,加厚叶片的导叶内部压力脉动幅值增幅达到 7.8%,适当减薄导叶叶片有利于导叶内部的流动趋于稳定;张德胜等^[15]利用数值方法研究分析了叶轮叶片数、导叶叶片数以及导叶厚度对斜流泵内部压力脉动特性的影响,结果表明叶轮叶片数对整个流场的压力脉动影响较大,导叶内部压力脉动的周期性变化在设计工况下主要受叶轮叶片数的影响;施卫东等^[16-17]研究了高比转数斜流泵叶轮进出口、导叶中部和导叶出口等位置的非定常压力脉动特性,为更好地了解混流泵内部压力脉动规律提供了理论参考;黎义斌等^[18-19]对设计工况下的低比转数混流泵的压力脉动以及采用大涡模拟手段对非设计工况下其内部的不稳定流动特性进行了研究,得到了不同监测位置处的压力脉动规律以及引起泵内部不稳定流动原因;靳栓宝等^[20]研究了不同运行工况、转速以及监测位置对混流泵内部压力脉动的时域和频域特性的影响。目前对混流泵压力脉动特性的研究基本上是基于数值计算方法进行的。

本文通过试验测量方法,分析不同流量工况下混流泵各个监测点压力脉动的时域响应,着重探讨压力脉动敏感区域(叶轮进口、叶轮中部和叶轮出

口监测点处)压力脉动的频谱特性和主频幅值,研究流量变化对混流泵压力脉动特性的影响。

1 试验模型及试验装置

1.1 研究模型

本文研究的混流泵模型参数如下:流量 $Q = 380 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 6 \text{ m}$,转速 $n = 1\,450 \text{ r/min}$,比转数 $n_s = 480$ 。叶片数 $Z = 4$,导叶叶片数 $Z_d = 7$ 。泵进口段直径 $D_1 = 200 \text{ mm}$,出口段直径 $D_4 = 250 \text{ mm}$,工作介质为常温清水。混流泵模型如图 1 所示。

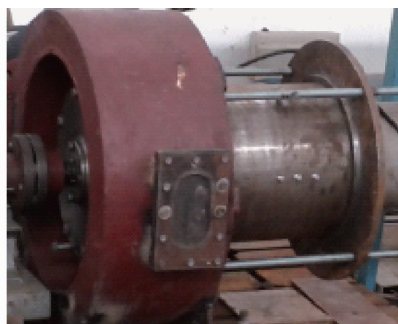


图 1 混流泵模型图

Fig. 1 Model of mixed-flow pump

1.2 试验台

试验测量在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心实验室的 $\Phi 250 \text{ mm}$ 不锈钢轴(斜)流泵闭式试验台上进行,该试验台专门用于混流泵、轴流泵模型泵段及模型装置试验,试验装置系统如图 2 所示。在试验泵段进、出口位置各安置一个压力变送器以便进行扬程的测量,压力变送器为 WT-1151 型电容式压力变送器;进口测量用压力变送器测量范围为 $\pm 100 \text{ kPa}$,精度为 0.2 级;出口测量用压力变送器测量范围为 $0 \sim 600 \text{ kPa}$,精度为 0.2 级。流量测量采用公称压力为 1.6 MPa 、精度为 0.5 级的 LWGY-250 型涡轮流量计。采用转矩转速仪测量模型泵的轴转速、转矩和轴功率,转速仪测量误差范围为 $\pm 0.2\%$ 。测试系统达到 1 级精度要求。

2 试验方法

2.1 外特性试验

试验中,将进、出口调节阀全开,开启试验泵。通过变频器调节泵转速,使转速达到 $1\,450 \text{ r/min}$ 并在稳定后通过出口调节阀来控制泵运行的流量,每隔一个流量区间调节一次,当各参数变化不大时,开



图 2 试验装置图

Fig. 2 Experimental setup

1. 混流泵 2. 试验管路 3. 稳压罐 4. HJS2010 型水力机械综合测试仪

始记录试验数据,共测试 15 个工况点。为尽可能减小测量中的随机误差,关闭电源停机,待管路内流体重新稳定,进行重复性试验,并记录试验数据,取所得值的算术平均值作为试验所得实际值。

2.2 压力脉动测量试验

为了研究混流泵在设计工况稳定运行时导叶与叶轮相互干涉诱发的压力脉动特性,试验重点考察叶轮进口(监测点 A)、叶轮中部(监测点 B)、叶轮出口(监测点 C)、导叶进口(监测点 D)、导叶出口(监测点 E)及装置出口(监测点 F)的压力脉动特性。布置 6 个压力监测点分别采集不同位置的流态信息,以捕捉引发叶轮和导叶低频振动的水压脉动源,监测点布置如图 3 所示(测点 F 未在图中显示)。

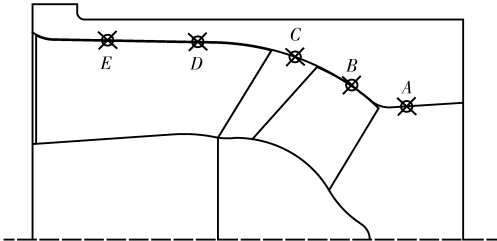


图 3 压力脉动测点位置

Fig. 3 Positions of monitoring points

压力脉动的试验过程与外特性试验同步进行,进行不同监测点处压力脉动信号的数据采集。高频压力传感器采用 MPM480 型压阻式压力变送器,传感器采用带不锈钢隔离膜的压阻式 OEM 压力传感器作为信号测量元件,并使用激光调阻工艺进行了宽温度范围的零点和温度性能补偿,因此传感器精度较高。高频压力传感器精度为 0.5%,采用 0 ~ 24 V 直流电源供电,原始输出为 0 ~ 5 V 的电压信号,将信号输入到 HJS2010 型水力机械综合测试仪中,再将电压信号转换为压力信号。

进行不同流量工况下模型泵的压力脉动特性测量时,根据文献[21-23]的计算公式和推荐,本试验设置采样频率为 17 400 Hz,采样时间为 1 min,设

置低通滤波,截止频率为 6 796 Hz。通过压力脉动试验得到各监测点在不同工况下的压力脉动数据,取每个工况下试验数据中的 60 个叶轮旋转周期的压力脉动数据进行分析。

3 试验可靠性分析

为了准确地得到泵的外特性结果,对模型泵进行重复性试验,验证试验台和试验方法的可靠性。获得的重复性试验结果如图 4 所示。从图中可以看出,2 次外特性测量结果比较集中,趋势基本一致,最大误差不超过 5%,说明本次试验可重复性好,试验结果较为可靠。

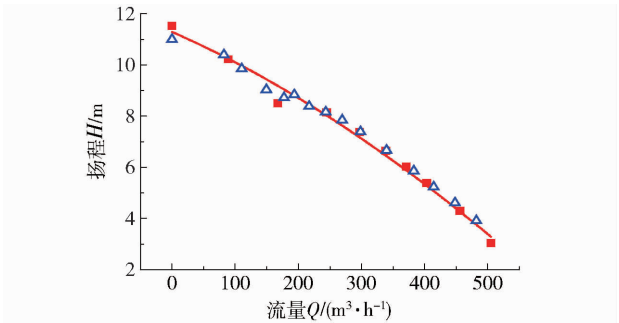


图 4 模型泵外特性的重复性试验结果

Fig. 4 Repetitive experiment results of external characteristics for model pump

4 压力脉动试验分析

4.1 压力脉动时域分析

通过试验测量获得了混流泵叶轮进口、叶轮中部、叶轮出口、导叶进口、导叶出口以及装置出口等监测点的压力脉动幅值,并用压力系数 C_p 来表示其结果。压力系数 C_p 的表达式为

$$C_p = \frac{2(p - \bar{p})}{\rho u_2^2} \tag{1}$$

式中 p ——各个采样时刻在监测点的压力,Pa
 $\bar{p}$ ——某个试验监测点在所取的 60 个周期内的平均压力,Pa
 ρ ——流体密度
 u_2 ——叶轮出口圆周速度,m/s

图 5(图中 Q_{opt} 表示设计流量工况)为各监测点的压力脉动时域图,由图可知,在一个叶轮旋转周期内(约 0.04 s),不同流量工况下各个监测点处的压力脉动幅值均呈一定的周期性波动。在监测点 A ~ D,小流量工况下压力脉动幅值均较高,随着流量的增大,流体流动逐渐稳定,压力脉动的幅值有所减小。而在监测点 F,脉动幅值随着流量增加逐渐增大。

在监测点 A 和监测点 B 处,压力脉动曲线在不

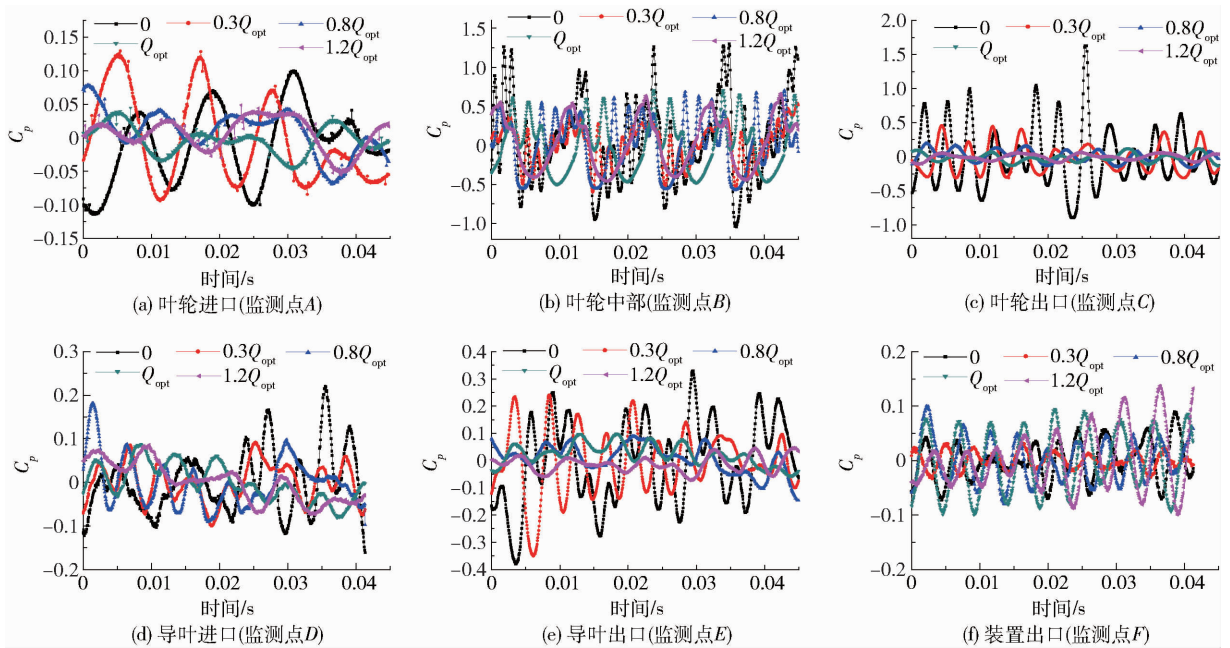


图 5 不同工况下各测点处压力脉动时域图

Fig. 5 Time domain diagrams of pressure fluctuation for different monitoring points under different operating conditions

同工况下均存在明显的 4 个波峰和 4 个波谷,与叶轮叶片数 $Z=4$ 相同,说明叶片数是影响叶轮进口和叶轮中部位置处压力脉动的主要因素。尤其在监测点 B 处,受叶轮旋转周期的影响最大,各个流量工况下的压力脉动幅值均较大。同时,在流量为零时,由于受出口阀门关闭的影响,管路内流体不稳定流动增多,回流、脱流等二次流现象等对流体的压力分布产生了较严重的影响,使得监测点 B 处的脉动曲线在一个周期内还存在许多次峰幅值。在叶轮出口监测点 C 、导叶进口监测点 D 处,当流量为 $1.2Q_{opt}$ 时,压力脉动曲线存在 4 个波峰和 4 个波谷,在此工况下叶片通过频率在叶轮与导叶相干区域也占据主导作用;但是在小流量工况下,压力脉动曲线分别出现 7~12 个波峰和波谷,与导叶叶片数及叶轮叶片数之和相一致,说明在此工况下叶轮和导叶的动静干涉作用明显,对流场影响较大。随着监测点与叶轮的轴向距离增大,监测点处的压力脉动系数有所减小,在设计工况下远离叶轮的导叶出口监测点 E 处压力系数 C_p 仅为 0.1,可见叶轮旋转对压力波动的影响逐渐减弱,导叶的整流、稳流作用逐步凸显出来。在装置出口监测点 F 处,叶轮旋转周期内压力波动呈现一定的周期性且幅值较大,原因可能是由于泵装置出口面积小于环形蜗室截面积,环形蜗室内部的多种尺度旋涡在出口处发生碰撞并进行动静压转换,导致了较大的压力脉动。随着流量的增加,在 $1.2Q_{opt}$ 流量工况下,该处的压力系数 C_p 的幅值最大。

通过上述分析可知,在叶轮进口和叶轮中部的

监测点,叶轮的旋转周期较大程度影响了这些位置的脉动周期,出现了与叶片数相同的 4 个波峰和 4 个波谷。沿着主流运动方向,当流体运动到导叶内部时,叶轮旋转周期的影响逐渐减弱,叶轮和导叶的动静干涉作用占据了主导,在小流量工况下压力脉动曲线分别出现 7~12 个波峰和波谷。在混流泵内部所有监测点中,设计工况下混流泵内部流体流动状态较好,压力脉动系数相对较小且稳定性较高,偏离设计流量点,压力脉动系数变大,流场变得越不稳定,动静干涉作用也越加明显。

4.2 压力脉动频域分析

将各个监测点处的压力脉动数据进行快速傅里叶变换 (FFT),得到各点的频域图并进行分析,如图 6 所示。由于混流泵的额定转速是 1 450 r/min,计算出叶轮的转频 $F \approx 24.17$ Hz,由于试验所用混流泵叶轮叶片数 $Z=4$,因此叶轮的叶频 $F_b = 4F \approx 96.68$ Hz。由图可知,不同流量工况下,监测点 A 和监测点 B 处的压力脉动主频都为叶频。随着监测点远离叶轮,不同流量工况下监测点 $C \sim F$ 处的压力波动频率幅值有所降低,分频成分增多。由于导叶整流作用,在导叶出口主频最大值仅为 0.092,轴频和导叶的影响频率权重增加。

在的监测点 A 处,压力脉动衰减较快,主要集中在 0~100 Hz 内,随着流量的减小,主频幅值增大,分频成分增多。在监测点 B 处,压力脉动受叶轮旋转周期性影响较大,脉动频率的幅值最大,主频最大值出现在零流量工况下,除叶频倍频外的分频成分很少,2 倍叶频和 3 倍叶频的频率成分较明显。

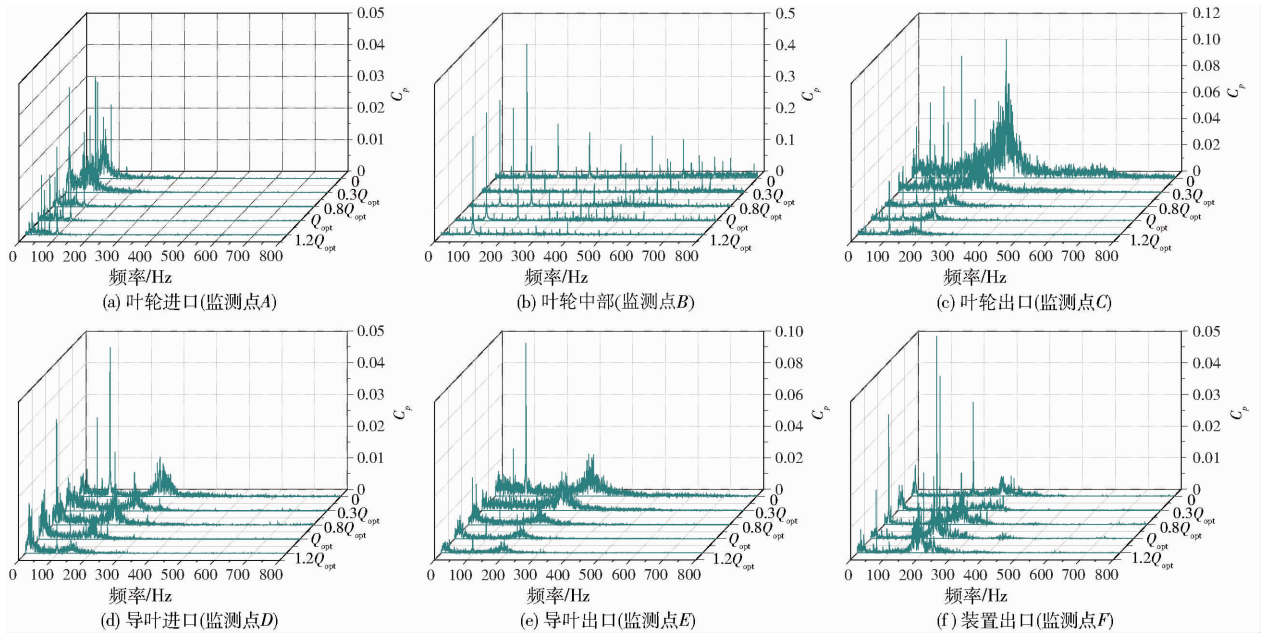


图 6 不同监测点处的压力脉动频域图

Fig. 6 Frequency domain diagrams of pressure fluctuation for different monitoring points

在监测点 C 处,各流量工况下的压力脉动主频均呈峰状分布,分频成分开始增多,主要集中在 $0 \sim 700 \text{ Hz}$ 内,与测点 A 和 B 相同,主频最大幅值出现在零流量工况,此时主频在叶频的 3 倍频附近,其余流量工况下的压力脉动主频基本上均为叶频、2 倍叶频。在监测点 D 和监测点 E 处,与叶轮出口 C 处相似,压力脉动频率范围分布较宽,但略有减小,主要集中在 $0 \sim 500 \text{ Hz}$ 内,分频成分也较多,各个流量工况下,主频主要是叶频或是 2 倍叶频,说明受到叶轮旋转的影响还是很大。在监测点 F 处,各个流量下的主频在 2 倍叶频附近,但随着流量工况增大,次主频向低频方向偏移。

上述分析可知,在靠近叶轮的监测点 $A \sim C$,叶轮的旋转频率使得压力脉动的叶频和其倍频占了主要成分,且频率较为集中。当流体运动至导叶内部及装置出口时,监测点 $D \sim F$ 的压力脉动频谱范围变大,分频成分增多。随着流量工况的改变,各监测点的压力脉动频率变化随流量工况改变的敏感程度不一样,但各监测点均是在设计流量工况时出现较低的压力脉动幅值,这与时域分析结果一致。监测点 C 的压力脉动主频随着流量减小向高频方向偏移,说明此时除了叶轮旋转周期引起的频率分量外,还有动静干涉诱导的流体激振以及噪声等其他高频成分存在。

4.3 压力脉动峰峰值和主频分析

压力脉动的峰峰值反应了该监测点在一个旋转周期内所能达到的最高压力。图 7 为各监测点在不同工况下的压力脉动峰峰值。由图可见,监测点 B 、 C 、 E 处的峰峰值随流量工况的增加呈明显减小的趋

势,但当流量工况增大到设计工况点附近时,监测点 B 处的峰峰值略有增大,之后又缓慢降低。相比其他流量工况,监测点 B 和监测点 C 的压力系数在关死点处的曲线斜率最大。在叶轮进口、导叶出口和装置出口监测点处,压力脉动系数随着流量工况的变化,其峰峰值的振荡趋势不明显,压力脉动的峰峰值基本在 $0 \sim 0.5$ 内变化。

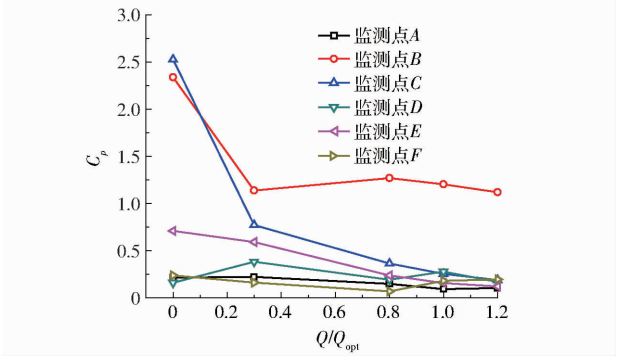


图 7 不同工况下监测点压力脉动峰峰值

Fig. 7 Peak-to-peak values of pressure fluctuation under different conditions

压力脉动的主频幅值不仅能够清晰地反映不同流量工况下各个监测点处的主频值,而且能够监测不同监测点处的压力脉动系数随流量工况的变化情况。图 8 为各监测点在不同工况下主频处的压力脉动频域幅值分布情况。由图可见,混流泵各监测点处压力脉动的主频幅值随着流量的变化趋势不相同,在叶轮中部监测点 B 处的主频幅值最大,而且对流量变化最敏感,主频幅值随着流量增大先减小后逐渐增大,在设计流量工况处又有所降低。同时,由于混流泵叶轮的周期性旋转,其与导叶存在动静

干涉的作用,因此该处压力脉动系数的主频值与叶频相同。并且,相比其它监测点,监测点 B 是压力脉动系数幅值振荡最强烈的区域,在各个流量工况下的主频幅值均较大。总体而言,靠近叶轮的监测点主频幅值都较大。监测点 C 、 D 和 E 主频幅值的分布规律类似,都是在关死点处有最高幅值,随着流量的增加,主频幅值逐渐减小。流量工况对监测点 F 处的主频幅值影响也较大,其中,设计流量工况下该处的主频有最大幅值。而在大流量工况下,监测点 A 、 C 、 D 和 E 的主频幅值的最小值都出现在 $1.2Q_{opt}$ 处。

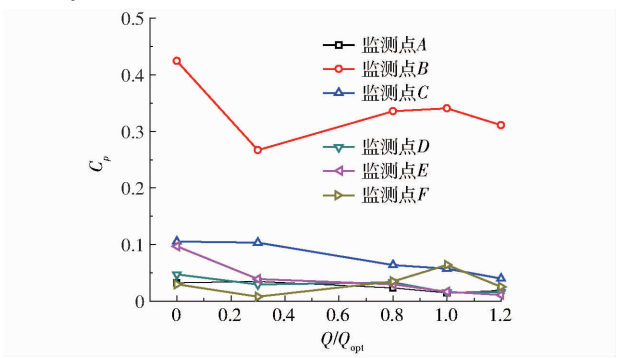


图 8 不同工况下监测点压力脉动主频幅值
Fig. 8 Amplitude of main frequency of pressure fluctuation under different conditions

5 结论

(1)压力脉动时域图显示,在各个流量工况下,

参 考 文 献

1 BING H,CAO S,TAN L,et al. Effects of meridional flow passage shape on hydraulic performance of mixed-flow pump impellers [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2013,26(3) :469 – 475.

2 KIM S,LEE K Y,KIM J H, et al. High performance hydraulic design techniques of mixed-flow pump impeller and diffuser [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2015,29(1) :227 – 240.

3 HU F F,CHEN T,WU D Z,et al. Experiment study of cavitation induced vibration and noise of guide vane mixed flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2013,31(12) :1021 – 1024.

4 WANG K,LIU H,ZHOU X,et al. Experimental research on pressure fluctuation and vibration in a mixed flow pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2016,30(1) :179 – 184.

5 YIBIN L,RENNIAN L,XIUYONG W. The numerical simulation of unsteady flow in a mixed flow pump guide vane[J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems,2013,6(4) :200 – 205.

6 OU Mingxiong,SHI Weidong,JIA Weidong. Numerical simulation and experimental validation on hydrodynamic radial force of mixed-flow pump impeller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(9) :71 – 76.

7 李伟,杨勇飞,施卫东,等. 基于双向流固耦合的混流泵叶轮力学特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(12) :82 – 88. LI Wei,YANG Yongfei,SHI Weidong, et al. Mechanical properties of mixed-flow pump impeller based on bidirectional fluid-structure interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12) :82 – 88. (in Chinese)

8 罗灿,成立,刘超,等. 船用喷水推进泵装置水力特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(5) :374 – 379. LUO Can,CHENG Li,LIU Chao,et al. Numerical simulation of performance of marine waterjet propulsion system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2015,33(5) :374 – 379. (in Chinese)

9 杨敏官,王达,高波,等. 混流式核主泵导叶-壳体匹配水力特性[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(2) :110 – 114. YANG Minguan,WANG Da,GAO Bo,et al. Influences of guide vane-casing volute positions on performance of nuclear reactor coolant pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2016,34(2) :110 – 114. (in Chinese)

10 MIYABE M,MAEDA H,UMEKI I,et al. Unstable headflow characteristic generation mechanism of a low specific speed mixed flow pump[J]. Journal of Thermal Science,2006,15(2) :115 – 120.

- 11 LI W F, FENG J J, WU H, et al. Numerical investigation of pressure fluctuation reducing in draft tube of francis turbines[J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2015, 8(3): 202–208.
- 12 黄茜, 袁寿其, 张金凤, 等. 叶片包角对高比转数离心泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9): 742–747.
HUANG Xi, YUAN Shouqi, ZHANG Jinfeng, et al. Effects of blade wrap angle on performance of high specific speed centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9): 742–747. (in Chinese)
- 13 钱忠东, 陆杰, 郭志伟, 等. 水泵水轮机在水轮机工况下压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(8): 672–678.
QIAN Zhongdong, LU Jie, GUO Zhiwei, et al. Characteristics of pressure fluctuation in pump-turbine in turbine mode [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(8): 672–678. (in Chinese)
- 14 LI Wei, SHI Weidong, XU Yandong, et al. Effects of guide vane thickness on pressure pulsation of mixed-flow pump in pumped-storage power station[J]. Journal of Vibroengineering, 2013, 15(3): 1077–1085.
- 15 张德胜, 施卫东, 王川, 等. 斜流泵叶轮和导叶叶片数对压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 167–170.
ZHANG Desheng, SHI Weidong, WANG Chuan, et al. Influence of impeller and guide vane blade number on pressure fluctuation in mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 167–170. (in Chinese)
- 16 施卫东, 邹萍萍, 张德胜, 等. 高比转速斜流泵内部非定常压力脉动特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 147–152.
SHI Weidong, ZOU Pingping, ZHANG Desheng, et al. Unsteady flow pressure fluctuation of high-specific-speed mixed-flow pump [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 147–152. (in Chinese)
- 17 王春林, 贾飞, 吴志旺, 等. 高比转数混流泵非定常流场压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(2): 103–108.
WANG Chunlin, JIA Fei, WU Zhiwang, et al. Pressure fluctuation of unsteady flow in high specific speed mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(2): 103–108. (in Chinese)
- 18 黎义斌, 李仁年, 王秀勇, 等. 低比转速混流泵压力脉动特定的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3): 205–209.
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation in low specific speed mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 205–209. (in Chinese)
- 19 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.
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical simulation of unstable characteristics in head curve of mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 384–389. (in Chinese)
- 20 靳栓宝, 王永生, 常书平, 等. 混流泵内流场压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 64–68.
JIN Shuanbao, WANG Yongsheng, CHANG Shuping, et al. Pressure fluctuation of interior flow in mixed-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 64–68. (in Chinese)
- 21 李伟. 斜流泵启动过程瞬态非定常内流特性及实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
LI Wei. Experimental study and numerical simulation on transient characteristics of mixed-flow pump during starting period [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- 22 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 66–72. (in Chinese)
- 23 翟杰, 祝宝山, 李凯, 等. 低比转数混流泵导叶内部压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 42–46.
ZHAI Jie, ZHU Baoshan, LI Kai, et al. Internal pressure fluctuation characteristic of low specific speed mixed flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 42–46. (in Chinese)

(上接第 69 页)

- 16 高全杰, 夏志勇, 汪朝晖, 等. 多针电极喷雾刀梁静电场特性与雾化效果研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 111–116.
GAO Quanjie, XIA Zhiyong, WANG Zhaohui, et al. Electrostatic field and atomization effect of multiple needle electrodes spraying blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 111–116. (in Chinese)
- 17 史艳玲, 罗智斌, 甘云华, 等. 小尺度荷电锥-射流场强分布特性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 15–20.
SHI Yanling, LUO Zhibin, GAN Yunhua, et al. Analysis on the distribution of electric field strength of a small-scale conejet electro-spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 15–20. (in Chinese)
- 18 周海英, 陈浩. 均匀带电细圆环的电场的一般分布[J]. 大学物理, 2004, 23(9): 32–34.
ZHOU Haiying, CHEN Hao. Space distribution of electrical field generated by a uniformly charged ring[J]. College Physics, 2004, 23(9): 32–34. (in Chinese)
- 19 程昌林, 李业凤, 王慧. 有限长均匀带电薄圆柱面的电场[J]. 大学物理, 2004, 23(2): 32–35.
CHENG Changlin, LI Yefeng, WANG Hui. Electric field of a thin cylindrical surface having limited length charged uniformly [J]. College Physics, 2004, 23(2): 32–35. (in Chinese)
- 20 刘诚杰, 刘景世. 均匀带电细圆环电场的分布[J]. 大学物理, 2005, 24(8): 19–20, 24.
LIU Chengjie, LIU Jingshi. The electric field distribution of a uniformly charged ring[J]. College Physics, 2005, 24(8): 19–20, 24. (in Chinese)