doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.020

不同空化工况下轴流泵装置压力脉动试验

李彦军　陈　超　裴　吉　王文杰　吴天澄
(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为研究不同空化工况下轴流泵装置内部压力脉动特性,采用动态压力传感器对派河口泵站轴流泵装置模型的叶轮进口、叶轮出口、导叶出口 3 个压力监测点,分别在 2.5、3.5、4.5、5.4 m 扬程和未发生空化、临界空化(泵装置效率下降 1%)、深度空化(泵装置效率下降 3%)等 12 种工况下进行了压力脉动试验。试验结果表明:叶轮进口处的压力脉动曲线为平滑的近似正弦曲线;叶轮出口处压力脉动曲线幅值最大,且只在高扬程、未发生空化工况下的一个旋转周期内表现出明显有规律的二次谐波特性;导叶出口的压力脉动时域特性与叶轮进口相似。快速傅里叶变换(FFT)结果表明:各监测点在各工况下的主频为叶片通过频率的整数倍频,同一扬程工况下,随着空化程度的加深,各监测点主频附近的谐频逐渐向低频段移动;导叶出口与叶轮进口受叶频影响较小,且表现出相似的频率特性。

关键词: 轴流泵装置; 空化; 压力脉动; 试验
中图分类号: TH312　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)12-0158-07

Experiment on Pressure Fluctuation of Axial Flow Pump System under Different Cavitation Conditions

LI Yanjun　CHEN Chao　PEI Ji　WANG Wenjie　WU Tiancheng
(*Research Center of Fluid Machinery Engineering Technology*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to obtain the pressure pulsation characteristics of the model of one axial flow pump unit named Paihekou station under different cavitation conditions, the monitoring points of pressure were set near the impeller inlet, the impeller outlet and the vane outlet, the test was conducted by applying a dynamic pressure sensor system under four different head conditions with three different cavitation conditions of no cavitation, critical cavitation (pump efficiency decreased by 1%), deep cavitation (pump efficiency decreased by 3%). The test results showed that the pressure pulsation curve at the inlet of the wheel was a smooth and approximate sine curve, and the amplitude of the pressure fluctuation curve at the outlet of the impeller was the largest and showed obvious second harmonic characteristics in a rotating cycle under the high head condition without cavitation. The time domain characteristics of pressure pulsation of vane outlet were similar to that of impeller inlet. The results of FFT showed that the main frequency of each monitoring point under different working conditions was the integral frequency doubling of the blade passing frequency. With the deepening of cavitation, harmonic frequency near the main frequency of each monitoring point was gradually moved to the low frequency section. The vane outlet and impeller inlet were less affected by the blade passing frequency and showed similar frequency characteristics.

Key words: axial-flow pump device; cavitation; pressure pulsation; experiment

0　引言

压力脉动是影响泵站安全稳定的重要因素之一[1]。目前国内外对轴流泵的压力脉动[2-4]已进行了较多的研究,但对泵装置[5]空化工况下的压力脉动研究较少。张德胜等[6]在轴流泵叶轮段和导叶

收稿日期: 2018-05-23　修回日期: 2018-07-06
基金项目: 江苏省科技计划项目(BY2016072-05)、国家自然科学基金青年基金项目(51879121、51779107)和江苏省高校"青蓝工程"项目
作者简介: 李彦军(1976—),男,副研究员,主要从事泵和泵装置优化设计及动力特性测试研究,E-mail: lyj782900@ujs.edu.cn

段外壁面布置了 6 个压力脉动监测点，对多个流量工况的压力脉动进行了动态测量，揭示了轴流泵内部不同位置处压力脉动规律，发现由于受到叶轮内压力梯度的交替变化影响，叶轮进口、叶轮中间和叶轮出口监测点的时域脉动周期与叶片旋转周期一致，在小流量工况下叶轮内部涡流诱导了明显的二次谐波，导叶进口、导叶中间和导叶出口监测点的压力脉动频域中出现了撞击和回流诱导的低频信号，同时也存在叶轮的主频及其谐频。陆荣等[7]采用高精度数字压力采集系统，对轴流泵模型的叶轮进口、导叶流道内和导叶出口进行压力测试，发现受叶轮与导叶的动静干涉影响，导叶内部及出口均出现了小峰值的二次谐波。在非稳定工况下各点的时域信号均出现较大峰值的二次谐波，由于回流和叶顶泄漏涡等因素的影响，各监测点的频率成分复杂，脉动幅值大于其余工况。杨帆等[8]开展了立式轴流泵装置非定常数值模拟，通过设置监测点获得了不同位置的压力脉动结果，并进行了频谱分析，发现大流量工况时叶轮进口的脉动相对幅值较大，且涡带诱发的脉动主频与轴频相同，各工况下箱涵式进水流道底部水力脉动均为低频涡带脉动，大流量工况时，箱涵式进水流道底部的脉动压力主频与轴频相同，次主频与叶频相同，扭矩变化主频与叶轮的轴频相同，而涡带工况时叶轮进口的脉动主频已不再受轴频控制。

由于轴流泵试验系统庞大，试验成本较高[6]，目前国内外主要采用数值模拟研究轴流泵压力脉动[9-13]。但是数值模拟往往误差较大，尤其是在非设计点工况和发生空化的情况下[14-15]，模拟结果与试验有较大的差别。本文针对派河口泵站轴流泵站装置模型在不同空化工况下进行试验和分析，揭示非空化和发生空化工况下轴流泵装置内部的压力脉动特性。

1　试验模型与设备

压力脉动试验在江苏大学流体机械工程技术研究中心水力机械四象限多功能试验台进行。试验装置示意图如图 1 所示，试验设备主要由高压罐、低压罐、电磁流量计、蝶阀、循环泵等组成；试验仪器主要包括：智能电磁流量计 1 支、EJA 型智能差压变送器 1 支、EJA 型智能绝对压力变送器 1 支、JCL2/500N·m 智能型转矩转速传感器 1 支、CY200 型数字压力传感器 3 支、485－20 型集线器 1 台。数据采集系统采用成都泰斯特公司研制的系统，其融合了高精密度、信号采集处理、通讯、总线等技术。

试验模型泵性能参数为：设计扬程 H_d = 4.5 m，额定流量 Q_d = 303.7 L/s，额定转速 n = 1 430 r/min，比转数 n_s = 887；叶片数 z = 3，导叶叶片数 z_d = 6，叶轮直径 D_2 = 300 mm，叶顶间隙 C = 0.15 mm。模型泵装置结构图如图 2 所示，性能曲线如图 3 所示。

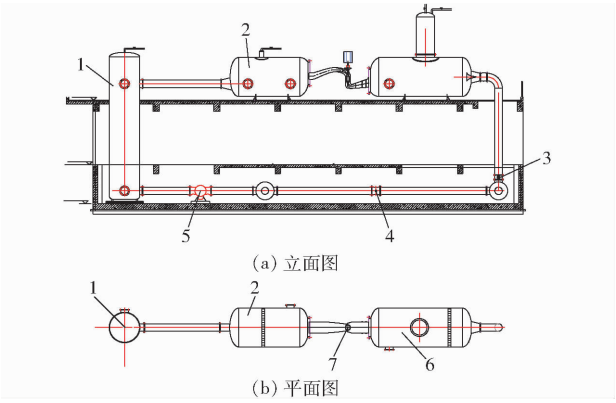


图 1　泵试验台布置图

Fig. 1　Layout of pump test system

1. 稳流罐　2. 高压罐　3. 蝶阀　4. 电磁流量计　5. 循环泵　6. 低压罐　7. 模型泵装置

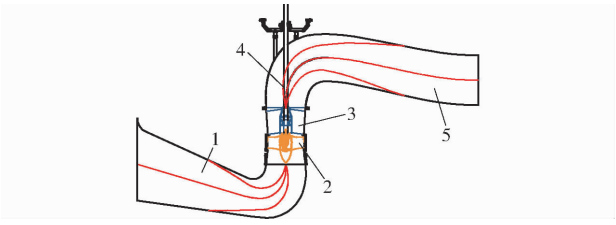


图 2　模型泵装置结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of structure of model pump device

1. 肘形进水流道　2. 叶轮　3. 导叶　4. 泵轴　5. 驼峰形出水流道

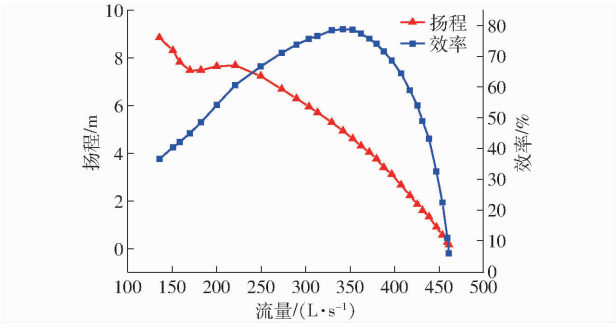


图 3　模型泵装置效率与扬程实测特性曲线

Fig. 3　Measurement characteristic curves of efficiency and head of model pump device

试验依据 GB/T 17189—2007《水力机械振动和脉动现场测试规程》进行。压力脉动监测点选择了叶轮进口 C1、叶轮出口 C2、导叶出口 C3 共 3 个压力脉动监测点，如图 4 所示。

试验对 0°叶片安放角采集了在 2.5、3.5、4.5、5.4 m 扬程下分别在未发生空化（效率无下降）、临界空化（效率下降 1%）、深度空化（效率下降 3%）3 种空化工况附近的压力脉动信号，共 12 组数据，采样频率为 2 000 Hz，采样时间为 15 s。

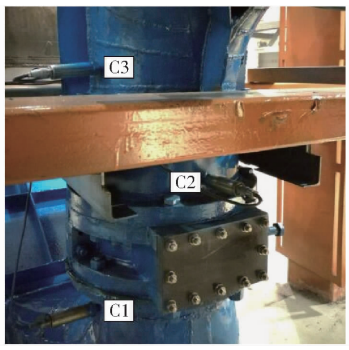


图 4 监测点位置示意图

Fig. 4 Diagram of monitoring point positions

2 试验结果与分析

2.1 压力脉动信号时域分析

各监测点在不同工况下的压力脉动时域图如图 5 所示。其中,压力脉动幅值以压力脉动系数 C_p 表征,定义为

$$C_p = \frac{p - \bar{p}}{0.5\rho u_2^2} \tag{1}$$

式中 p——瞬时压力,Pa

$\bar{p}$——平均压力,Pa

ρ——流体密度,kg/m^3

u_2——叶顶圆周速度,m/s

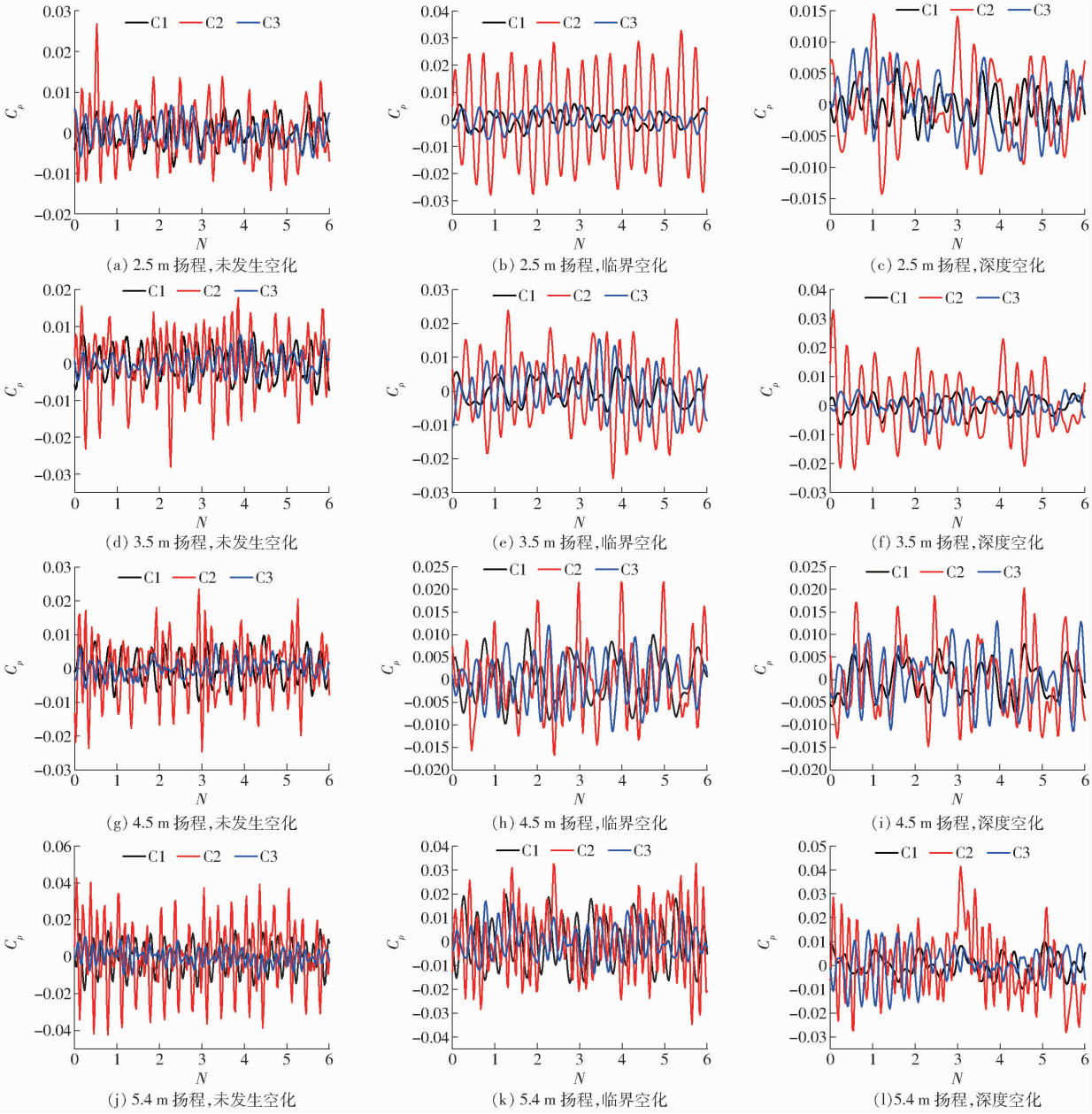
定义叶轮旋转周期数

$$N = t/T \tag{2}$$

式中 t——信号时间长度,s

T——叶轮旋转一周的时间,s

本文对叶轮旋转 6 个周期的压力脉动值作时域分析。



(a) 2.5 m 扬程,未发生空化 (b) 2.5 m 扬程,临界空化 (c) 2.5 m 扬程,深度空化

(d) 3.5 m 扬程,未发生空化 (e) 3.5 m 扬程,临界空化 (f) 3.5 m 扬程,深度空化

(g) 4.5 m 扬程,未发生空化 (h) 4.5 m 扬程,临界空化 (i) 4.5 m 扬程,深度空化

(j) 5.4 m 扬程,未发生空化 (k) 5.4 m 扬程,临界空化 (l)5.4 m 扬程,深度空化

图 5 不同工况下压力脉动时域图

Fig. 5 Time domain diagrams of pressure pulsation under different working conditions

叶轮进口 C1 处的压力脉动曲线为平滑稳定的曲线，一个周期内有 2 ~ 3 个主波峰和波谷；除低扬程工况下压力脉动曲线近似正弦曲线外，其余工况下均有二次波峰的出现，但是二次波峰的出现没有明显的规律性，有的工况甚至出现了一个周期内有的主波峰没有谐波而其余主波峰却有二次波峰的情况，比如在 4.5 m 扬程未发生空化的工况下，这说明流场受叶轮旋转的影响较小；在未发生空化和深度空化工况下，随着扬程的升高，谐波出现的趋势逐渐明显，具体表现为：一个周期内带有二次波峰的主波出现的个数增加，二次波峰与主波的差别如幅值大小的差异、波形的陡峭程度等逐渐明显，最终谐波明显生成，如 5.4 m 扬程未发生空化的工况，此时每个周期内有 3 个主波，每个主波带有一个二次谐波，呈现明显的规律性。原因可能是随着流量的减小，叶轮进口处的脱流回流造成漩涡的现象逐渐严重，而漩涡破灭形成的压力波是引起谐波的主要原因；随着流量的减小最终在叶轮进口区域附近形成稳定的漩涡区从而造成二次谐波周期性有规律的出现。

叶轮出口 C2 处的压力脉动幅值与叶轮进口相比在低扬程工况时明显增大且一个周期内有明显的 3 个主波峰和波谷，表明受叶轮旋转作用明显；但是，谐波出现的情况与叶轮进口类似：每个周期内谐波的个数没有明显的规律性，有的工况压力脉动曲线为平滑的未出现谐波的曲线，如 2.5 m 扬程发生临界空化的工况，有的工况每个周期内出现了稳定周期性的主波和二次波峰，如 5.4 m 扬程未发生空化的工况，这说明叶轮出口处压力脉动谐波的产生和叶轮与导叶之间动静干涉的影响关系不大，空化产生的涡以及空泡的溃灭对谐波的产生影响较大，泄漏涡的影响在文献[7]也有提及，但文献[7]并没有说明空化涡对谐波的影响；在同一种扬程下，随着空化情况的加深，每个周期内波峰峰顶和波谷谷底的形状由尖锐向圆滑趋势发展，且谐波的趋势越来越不明显，即二次波峰与主波的幅值、形状等的差异越来越小。

导叶出口 C3 处压力脉动曲线均为平滑的曲线，一个周期内主波峰和波谷的数量为 2 ~ 4 个，每个周期内谐波的出现也无明显的规律性，有的工况完全没有谐波出现，如 4.5 m 扬程临界空化工况，有的工况一个周期内的 3 个主波峰却只有一个出现谐波，如 2.5 m 扬程发生深度空化工况；在同一个扬程工况下，随着空化余量的降低，导叶出口压力脉动曲线的幅值逐渐增加，具体表现为：在未发生空化时，导叶出口处的压力脉动幅值比叶轮进口处略低，在 4.5 m 扬程和 5.4 m 扬程工况时表现得更加明显；在空化余量下降到临界空化时，导叶出口处的压力脉动曲线幅值与叶轮进口处大小相似；在空化余量下降到深度空化时，导叶出口处的压力脉动幅值比叶轮进口处大，但仍比叶轮出口处小。

2.2　压力脉动系数峰峰值分析

为了对各个测点压力脉动程度有一个总体估量，统计了各工况下 C1 ~ C3 监测点 97% 置信度压力脉动系数峰峰值，如图 6 所示。在叶轮进口 C1 处，深度空化工况下，各个扬程下的峰峰值均最小且随着扬程的升高缓慢增长；未发生空化时各个扬程下的压力脉动系数峰峰值均比深度空化时大，而发生临界空化时除了最低扬程 2.5 m 工况外，其余工况下的峰峰值均为最大；叶轮出口 C2 处不同工况下的峰峰值除了 2.5 m 深度空化的工况下，各个工况下的峰峰值均比导叶出口 C3 处大，原因可能是旋转的叶轮与静止的导叶形成的动静干涉作用对流体的压力脉动影响所致；导叶出口 C3 处的峰峰值变化情况在深度空化和未发生空化时与叶轮进口 C1 处相反：深度空化时各个工况下的峰峰值均比未发生空化时大。

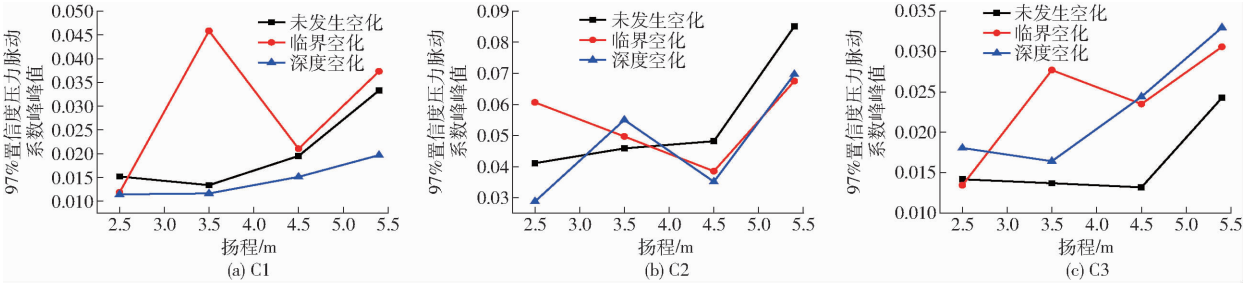


图 6　各监测点 97% 置信度压力脉动系数峰峰值对比

Fig. 6　Comparisons of peak to peak values with 97% confidence of each monitoring point

2.3　压力脉动信号频域分析

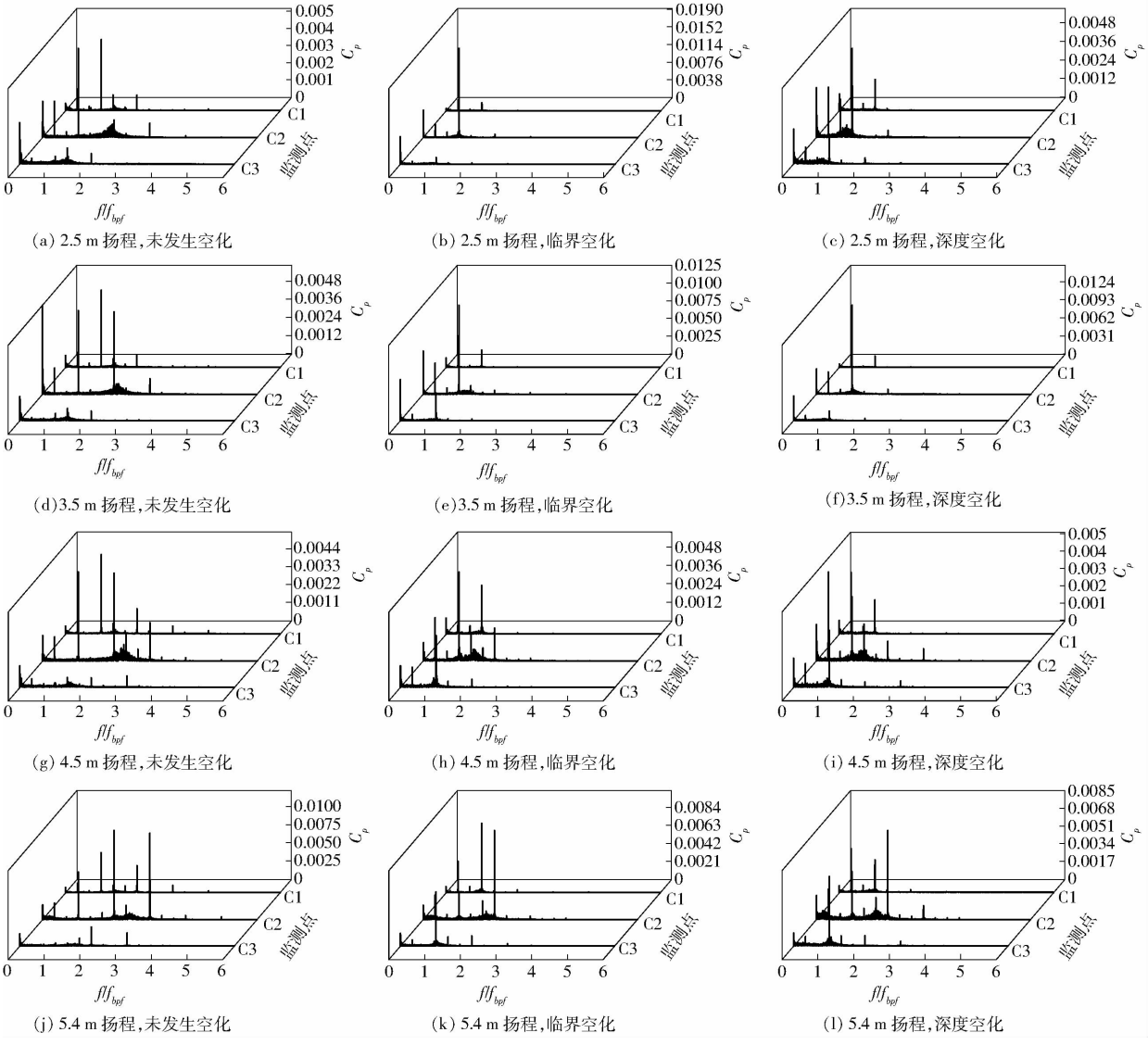
为了更好地分析轴流泵装置内部的压力脉动规律，对时域信号进行快速傅里叶变换（FFT）并进行频域分析，如图 7 所示。为了便于分析，定义叶片转频倍数 f/f_{bpf} 表示采样周期

$$f/f_{bpf}=\frac{60f}{nz} \tag{3}$$

式中　f——脉动数据经过 FFT 变换后对应的频率，Hz

f_{bpf}——叶片通过频率,Hz

从图 7 中可以看出,监测点 C1、C2 和 C3 在不同的扬程和空化工况下压力脉动的主频均在叶片通过频率整数倍频附近,有的工况为 1 倍叶频,有的工况为 2 倍叶频。在同一种空化情况下,随着扬程的增加,叶轮进口 C1 处的压力脉动谐频逐渐明显,具体表现为:频带变宽、高阶谐波个数增加及其幅值增大,原因可能是随着流量的减小、扬程的增加,叶轮进口处流体不稳定造成的脱流回流等不良流态越来越严重,流体对壁面不同程度的撞击形成不同频率的压力波从而使谐波的频带变宽;在同一个扬程工况下,随着空化余量的降低,叶轮进口 C1 处的压力脉动谐波趋势逐渐减弱,具体表现为:高阶谐频的减少及其幅值的降低并且主频向低频移动,4.5 m 扬程下未发生空化和临界空化两种工况形成明显的对比。



(a) 2.5 m 扬程,未发生空化 (b) 2.5 m 扬程,临界空化 (c) 2.5 m 扬程,深度空化

(d)3.5 m 扬程,未发生空化 (e)3.5 m 扬程,临界空化 (f)3.5 m 扬程,深度空化

(g) 4.5 m 扬程,未发生空化 (h) 4.5 m 扬程,临界空化 (i) 4.5 m 扬程,深度空化

(j) 5.4 m 扬程,未发生空化 (k) 5.4 m 扬程,临界空化 (l) 5.4 m 扬程,深度空化

图 7 不同工况下压力脉动频域图

Fig. 7 Frequency domain diagrams of pressure pulsation under different working conditions

叶轮出口 C2 处的压力脉动的谐频现象与其他两个监测点相比最明显:在未发生空化时,各个扬程工况下叶轮出口压力脉动谐波主频均出现在 2 倍叶频附近,当空化余量下降至达到临界空化和深度空化工况时,除 5.4 m 扬程工况外其他工况的主频均出现在 1 倍叶频附近,而高扬程 5.4 m 下的不同空化工况压力脉动主频却都出现在 2 倍叶频附近,表明叶频是影响压力脉动频率的主要因素;在同一个扬程工况下时,随着空化余量的降低,主频及谐频也向低频区域移动,原因可能是空化情况的加剧造成了更多空泡的破灭,而空泡的破灭产生了较多的低频信号,这与文献[6]的结果有相似之处。但文献[6]并没有分析 2 倍叶频与 3 倍叶频出现的原因,在本文中:在不同的工况下,在发生临界空化和深度空化时,叶轮进口 C1 处几乎没有出现 2 倍叶频,在叶轮出口 C2 和导叶出口 C3 处出现了,原因可能是叶轮与导叶的动静干涉,动静干涉的影响不仅出现了 2 倍叶频,3 倍叶频也时有

出现；从图中可以看出 C3 处的 2 倍叶频与 3 倍叶频均比 C2 处弱，原因可能是动静干涉产生的压力波在经过导叶的整流作用后并没有完全消失，而是通过流道壁等因素传递到了 C3 处，故幅值有衰减。

导叶出口 C3 处的压力脉动情况与叶轮进口 C1 处相似：在 2.5 m 和 3.5 m 扬程各空化工况下，主频均出现在 1 倍叶频附近；4.5 m 扬程未发生空化以及 5.4 m 扬程未发生空化和临界空化的工况下，出现了高阶谐波频率；导叶出口高阶谐频与叶轮进口有一定的类似关系，即：叶轮进口出现谐频的频率附近，导叶出口处也出现了谐频，原因可能是叶轮进口和导叶出口谐频的出现与泵段外部因素有关，比如辅助泵的影响、管道共振等。

3　结论

（1）低扬程工况下一个旋转周期内主波峰和波谷数为 2～4 个，而高扬程工况下时域图中一个旋转周期内有 3 个周期性的主波峰和波谷，与叶片数相一致，表明叶轮的旋转作用对叶轮进口流场有较大的影响，并且二次谐波有规律地周期性出现。

（2）除个别工况外，叶轮出口处压力脉动时域图中一个周期内并未出现明显的有规律性的谐波，表明叶轮与导叶的强动静干涉作用并不明显。

（3）同一种扬程工况下，叶轮进口处幅值最小，随着流体向出口流动，导叶出口处压力脉动幅值随着空化余量的减小而逐渐增加，在深度空化时幅值大于叶轮进口，叶轮出口处脉动始终最强烈，幅值最大。

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，2003.

2　施卫东，冷洪飞，张德胜，等. 轴流泵内部流场压力脉动性能预测与试验[J]. 农业机械学报，2011，42(5)：44－48.
SHI Weidong，LENG Hongfei，ZHANG Desheng，et al. Performance prediction and experiment for pressure fluctuation of interior flow in axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2011，42(5)：44－48.（in Chinese）

3　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，TAN 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）

4　赵浩儒，杨帆，吴俊欣，等. 立式轴流泵装置压力脉动特性的试验[J]. 流体机械，2017，45(7)：12－16.
ZHAO Haoru，YANG Fan，WU Junxin，et al. Experimental analysis on pressure fluctuation of multiple conditions in axial-flow pumping system[J]. Fluid Machinery，2017，45(7)：12－16.（in Chinese）

5　郑源，刘君，周大庆，等. 大型轴流泵装置模型试验的压力脉动[J]. 排灌机械工程学报，2010，28(1)：51－55.
ZHENG Yuan，LIU Jun，ZHOU Daqing，et al. Pressure pulsation of model test in large-size axial-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2010，28(1)：51－55.（in Chinese）

6　张德胜，王海宇，施卫东，等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(11)：139－145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20141122&flag=1. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.022.
ZHANG Desheng，WANG Haiyu，SHI Weidong，et al. Test on pressure pulsation characteristics of axial flow pump in multiple operating conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(11)：139－145.（in Chinese）

7　陆荣，袁建平，李彦军，等. 基于数字信号处理的轴流泵压力脉动试验研究[J]. 振动与冲击，2017，36(20)：18－22.
LU Rong，YUAN Jianping，LI Yanjun，et al. An experimental investigation of pressure fluctuation in an axial-flow pump based on digital signal processing[J]. Journal of Vibration and Shock，2017，36(20)：18－22.（in Chinese）

8　杨帆，赵浩儒，刘超，等. 涡带工况下轴流泵装置内部脉动特性数值分析[J]. 应用基础与工程科学学报，2017，25(4)：670－678.
YANG Fan，ZHAO Haoru，LIU Chao，et al. Numerical analysis of internal pulsation characteristics of axial flow pump unit under vortex band condition[J]. Journal of Basic Scienceand Enginering，2017，25(4)：670－678.（in Chinese）

9　王凡，钱忠东，郭志伟，等. 可调导叶式轴流泵压力脉动数值分析[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(3)：119－123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170315&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.015.
WANG Fan，QIAN Zhongdong，GUO Zhiwei，et al. Pressure oscillations prediction of axial flow pump with adjustable guide vanes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(3)：119－123.（in Chinese）

10　王福军，张玲，张志民. 轴流泵不稳定流场的压力脉动特性研究[J]. 水利学报，2007，38(8)：1003－1009.
WANG Fujun，ZHANG Ling，ZHANG Zhimin. Study on pressure fluctuation characteristics of unsteady flow field in axial flow pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2007，38(8)：1003－1009.（in Chinese）

11　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/OL]. 农业机械学报，2017，48(7)：127－135. http:

// www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20170716&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 07. 016.
ZHENG Yuan, CHEN Yujie, ZHANG Rui, et al. Analysis on unsteady stall flow characteristics of axial-flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):127 - 135. (in Chinese)

12 ZHANG Desheng, SHI Weidong, CHEN Bin, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(1):35 - 43.

13 RAINS D A. Tip clearance flows in axial compressors and pumps[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1954.

14 张德胜, 石磊, 陈健, 等. 轴流泵叶轮叶顶区空化特性试验分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(8):1585 - 1592.
ZHANG Desheng, SHI Lei, CHEN Jian, et al. Experimental analysis on characteristic of cavitation in tip region of axial flow pump impeller[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(8):1585 - 1592. (in Chinese)

15 张德胜, 吴苏青, 施卫东, 等. 轴流泵小流量工况条件下叶顶泄漏空化特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22):68 - 75.
ZHANG Desheng, WU Suqing, SHI Weidong, et al. Characteristics of tip leakage vortex cavitation in axial flow pump at small flow rate condition[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 68 - 75. (in Chinese)

16 李琪飞, 谭海燕, 李仁年, 等. 异常低水头对水泵水轮机压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(2): 99 - 104.
LI Qifei, TAN Haiyan, LI Rennian, et al. Influence of abnormally low head on pressure fluctuation of pump turbine[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(2): 99 - 104. (in Chinese)

17 蒋玲林, 刘厚林, 王凯, 等. 径向导叶出口型式对洒水车泵压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(4):289 - 293.
JIANG Linglin, LIU Houlin, WANG Kai, et al. Effects of radial diffuser outlet pattern on pulsation of sprayer pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(4): 289 - 293. (in Chinese)

18 郑源, 陈宇杰, 毛秀丽, 等. 混流泵压力脉动特性及其对流动诱导噪声的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23):67 - 73.
ZHENG Yuan, CHEN Yujie, MAO Xiuli, et al. Pressure pulsation characteristics and its impact on flow-induced noise in mixed-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23):67 - 73. (in Chinese)

19 戴辰辰, 郭鹏程, 罗兴锜. 轴流泵端壁间隙流动特性的数值分析[J]. 流体机械, 2009, 37(6):32 - 35.
DAI Chenchen, GUO Pengcheng, LUO Xingqi. Numerical analysis of tip clearance flow characteristic in axial flow pump[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(6): 32 - 35. (in Chinese)

20 梁开洪, 张克危, 许丽. 轴流泵叶顶间隙流动的计算流体动力分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(9): 36 - 38.
LIANG Kaihong, ZHANG Kewei, XU Li. Analysis of the flow trough the blade tip clearances of axial pump by CFD[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(9): 36 - 38. (in Chinese)

(上接第 115 页)

19 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995:414 - 433.

20 阿德里安·班纳. 普林斯顿微积分读本[M]. 杨爽, 赵晓婷, 高璞, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2016.

21 陈杰. MATLAB 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

22 戴飞, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 64 - 72. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20170109&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01. 009.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):64 - 72. (in Chinese)

23 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

24 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.

25 高玉璐. 免耕播种机地轮滑移现象的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.

26 王旭峰, 胡灿, 鲁兵, 等. 抛膜链齿输送式残膜回收机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3):122 - 129. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20180314&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 03. 014.
WANG Xufeng, HU Can, LU Bing, et al. Design and experiment of sprocket conveying residual film recycling machine of casting film[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):122 - 129. (in Chinese)