

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.04.002

基于小波包分解的离心泵关死点流动状态

袁寿其, 黄萍, 骆寅, 梁赞, 付燕霞

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为研究离心泵关死工况点时内部复杂流动产生的压力脉动对离心泵多工况设计的影响, 基于虚拟仪器技术, 应用 LabView 进行数据采集, 利用小波包对离心泵压力信号进行分解, 建立了不同频率范围的特征信号, 并进行试验验证。分析结果表明: 离心泵关死点时压力脉动呈现不规则变化, 没有明显的周期性, 低于 1 倍叶片通过频率的低频脉动占据主导地位, 轴频处的幅值随着流量的减小先增大后减小; 离心泵流量减小至关死点工况时, 叶轮内部出现回流, 低频段的小波包重构系数变化明显, 可见回流对低频段产生了较大影响; 离心泵关死点工况轴频处的振幅和强度明显增强; 离心泵关死点进口回流为辫状回流。试验结果表明: 与傅里叶方法比较, 基于小波包分解可识别不同频率对应的不稳定流动, 提高离心泵关死点内部流动诊断的分辨性。

关键词: 离心泵; 关死点; 小波包分解; 虚拟仪器; 进口回流

中图分类号: S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)04-0282-05

Flow analysis based on wavelet packet decomposition for centrifugal pumps at shut-off condition

Yuan Shouqi, Huang Ping, Luo Yin, Liang Yun, Fu Yanxia

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to research the effect of pressure fluctuation caused by complicated flow inside centrifugal pumps at shut-off condition, based on the virtual technology and LabView, the pressure signal of centrifugal pumps was decomposed and the wavelet packet analysis was applied to extract the feature spectrum and establish different frequency bands. The experiment was carried out to test the analysis results. The analysis results show that the pressure pulsation at shut-off condition is irregular and non-cyclical, and low-frequency pulsation plays an important role. With the flow decreases, the amplitude of the shaft frequency first increases and then decreases. Backflow appears when centrifugal pumps operate at low flow rate to shut-off conditions and the wavelet packet reconstruction coefficient changes and it could be concluded that backflow exert significant influence at low frequency. The amplitude and strength at shut-off condition with enhancement on shaft frequency. The inlet backflow of centrifugal pumps at shut-off condition is braided backflow. The validating test results show that different frequency corresponding to different unsteady flow can be identified based on wavelet packet, which will improve the diagnosis of the inner flow of centrifugal pumps at shut-off condition.

Key words: centrifugal pump; shut-off condition; wavelet packet decomposition; virtual instrument; inlet backflow

收稿日期: 2011-03-24

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50825902); 江苏省自然科学基金攀登项目(BK2009006)

作者简介: 袁寿其(1963—), 男, 上海金山人, 研究员, 博士生导师(shouqi@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械及排灌机械研究。
黄萍(1988—), 女, 江苏镇江人, 硕士研究生(fupingdeliliang@126.com), 主要从事流体机械及工程研究。

离心泵在泵类产品中的份额占 70% 左右,在国民经济各部门被广泛应用,其技术水平的提高将带动整个泵行业的发展。离心泵的设计不仅要满足设计工况点的性能要求,有时也要满足泵的多个非设计工况点的性能要求^[1],其中包括离心泵的关死点性能要求。离心泵关死点内部流动近 10 年才被关注^[2-4],Dyson 在已有数据资料的基础上进行了大量的研究,并基于欧拉方程提出了扬程修正系数。Guo Shijie 等^[5]利用压力传感器对不同导叶叶片数和叶轮叶片数的离心泵内部压力脉动进行测量,得到离心泵内非正常流动包括气蚀、旋转失速和进出口回流等特性。S. Berten 等^[6]研究了高扬程多级离心泵内旋转失速频率在轴频的 50% ~ 90%。我国在旋转机械故障监测与诊断方面也做了大量的研究^[7-8],但对离心泵不稳定流动规律由于缺乏有效的监测手段和技术,而尚未掌握。倪永燕^[9]应用出口压力脉动以及泵体振动特性对泵汽蚀进行了检测。用于信号采集与处理的方法有很多,其中小波包具有较强的优越性。黄忠富^[10]利用小波包分解将振动信号分解到不同的频率带,对离心泵不同严重程度的气蚀振动信号进行分解。

文中对离心泵关死点时内部非正常流动造成的压力脉动进行研究,采用小波包分解分析关死点的压力信号。通过研究离心泵关死点内部流动状态以及非正常流动的类型,为后续的离心泵关死点性能研究提供依据。

1 试验系统

1.1 试验装置

本试验在江苏大学流体中心实验室的开式试验台对离心泵进行测试,测试泵为 IS-65-50-160 型单级离心泵,其性能参数分别为额定流量 $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$,额定扬程 $H = 65 \text{ m}$,额定转速 $n = 2\,900 \text{ r/min}$,额定功率 $P = 5.5 \text{ kW}$ 。试验装置如图 1 所示。

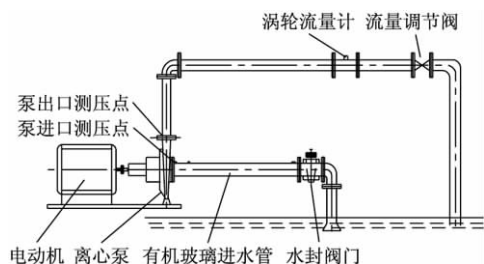


图1 试验装置

Fig. 1 Test devices

1.2 测试原理

试验测试系统分试验回路以及信号采集处理系统。信号采集系统由压力传感器、涡轮流量计、转速仪、信号调理电路、数据采集卡和基于 PCI Express 的 PXI 机箱等组成,其中: CYG1145 型压力传感器精度为 0.5 级,输出信号 0 ~ 5 V,量程 0 ~ 1 MPa,使用温度 -40 ~ 80 °C;涡轮流量计精度为 $\pm 0.3\%$,输出标准电压信号 0 ~ 5 V;虚拟仪器测控数据采集卡为 PXI-6253,采集速率能达到 2 Mb/s,具有 16 个电压采集通道 2 个电压生成通道。测试系统原理如图 2 所示。

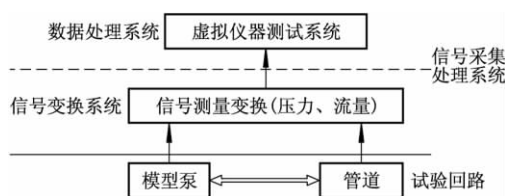


图2 测试原理

Fig. 2 Test principle

测得的信号经过信号调理装置,传送到动态信号采集卡进行 A/D 转换,由 LabView 编写软件进行数据处理、显示和存储等。图 3 为现场试验测试与采集系统。

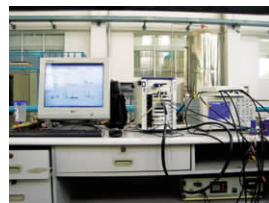


图3 现场测试与采集系统

Fig. 3 Field testing and acquisition system

2 小波包分解基本理论

2.1 小波包分解的定义

小波包分解属于线性时频分析法,它具有良好的时频定位特性以及对信号的自适应能力,因而能够对各种时变信号进行有效的分解。小波包分解能对小波子空间 W_j 按照二进制方式进行频率细分,以达到提高高频分辨率的目的^[11]。小波包分解利用一对相关联的低通滤波器和高通滤波器,可将信号分解为某一尺度下的低频和高频部分。

2.2 小波包的分解

以 3 层小波包分解为例,对信号进行小波包分解,图 4 为 3 层小波包分解树结构。

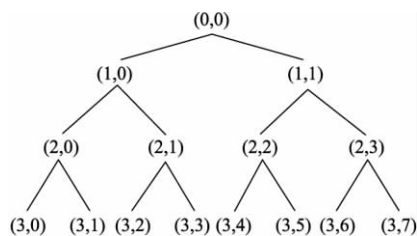


图 4 3 层小波包分解树

Fig. 4 Decomposition tree of three layers wavelet packet

离心泵压力信号采样频率为 10 kHz,由乃奎斯特定理可得信号 S 中最低频率成分为 0,分析频率上限为 5.000 kHz. $S_{3j}(j=0,1,\cdots,7)$ 8 个频率成份所代表的频率范围分别为 S_{30} : 0 ~ 0.625 kHz; S_{31} : 0.625 ~ 1.250 kHz; S_{32} : 1.250 ~ 1.875 kHz; S_{33} : 1.875 ~ 2.500 kHz; S_{34} : 2.500 ~ 3.725 kHz; S_{35} : 3.725 ~ 3.750 kHz; S_{36} : 3.750 ~ 4.375 kHz; S_{37} : 4.375 ~ 5.000 kHz.

2.3 小波包能量分解

小波包信号分解遵循能量守恒原理,即

$$E_n(x(t)) = \sum_{m=0}^{2^k-1} E_n(U_{j-k}^{2^k+m}) = \sum_{m=0}^{2^k-1} E_n(x_{(2^k+m)}^{k,m}) = \sum_{m=0}^{2^k-1} E_n(x^{k,m}(i)), \quad (1)$$

式中: $E_n(\cdot)$ 表示信号的能量. 在分辨率为 j 水平下的小波包信号分解中, $x^{k,m}(i)$ 表示位于 $U_{j-k}^{2^k+m}$ 子空间信号 $x_{(2^k+m)}^{k,m}$ 的离散信号; k 表示分解次数; $m=0, 1, 2, \cdots, 2^k-1$ 表示分解频率的位置序号.

采取归一化相对能量监测,第 m 频带分解信号的相对能量为

$$E_n(m) = \frac{E_n(x^{k,m}(i))}{E_n(x(t))}. \quad (2)$$

3 压力信号小波包分解步骤

小波包分析可以对信号在全频带范围内进行正交小波包分解,得到全频带均匀划分的各子频带的小波包分解系数.提取各频带信号的能量即可构造出小波包特征向量^[12].以 3 层小波包分解为例其步骤如下:

1) 对压力信号进行 3 层小波包分解,以提取第 3 层从低频到高频 8 个子频带的小波包分解系数 ($X_{30}, X_{31}, \cdots, X_{37}$).

2) 对第 3 层各小波包分解系数进行重构,各子

频带范围的信号为 ($S_{30}, S_{31}, \cdots, S_{37}$).

3) 求各频带信号的总能量.各频带信号 S_{3j} 对应能量 E_{3j} 可由式 (3) 求得,即

$$E_{3j} = \int |S_{3j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{jk}|^2. \quad (3)$$

4) 构造小波包特征向量

$T = [E_{30}, E_{31}, E_{32}, E_{33}, E_{34}, E_{35}, E_{36}, E_{37}]$, 为方便分析,对向量进行归一化处理为

$$T' = \left[\frac{E_{30}}{E}, \frac{E_{31}}{E}, \frac{E_{32}}{E}, \frac{E_{33}}{E}, \frac{E_{34}}{E}, \frac{E_{35}}{E}, \frac{E_{36}}{E}, \frac{E_{37}}{E} \right] \text{ 其中 } E = \sqrt{\sum_{j=0}^7 |E_{3j}|^2}, \text{ 即 } T' \text{ 为归一化的小波包特征向量.}$$

4 试验步骤与数据分析

4.1 试验步骤

沿着蜗壳周围布置 8 个压力传感器,测点的位置为图 5 所示.与虚拟仪器连接,设计数据采集软件,采集数据时间在 10 s 左右.

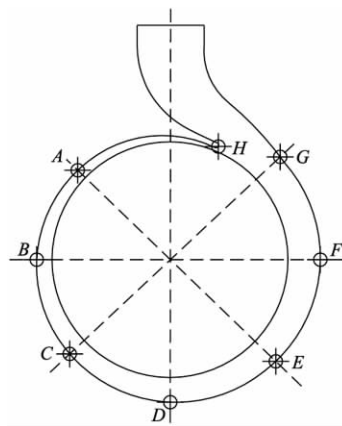


图 5 蜗壳压力测点位置

Fig. 5 Pressure monitoring points position of volute

4.2 信号傅里叶变换及小波包分解

图 6 为测点 B 压力脉动频谱图.

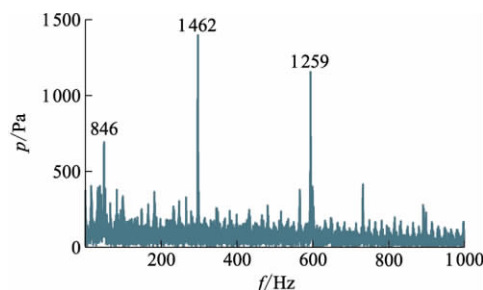


图 6 测点 B 压力脉动频谱

Fig. 6 Pressure pulsation spectrum of point B

由图6可以看出:在轴频、叶频以及2倍叶频处存在峰值。其他测点的压力脉动频谱图与测点B类似,分别在轴频、叶频及2倍叶频处存在尖峰,但数值大小存在差异。为了获得更为详尽的信息,应对低频段的压力脉动进行细化分析。

LabView与Matlab的接口,可以完成各种精度计算和数据处理以及可视化。首先对测量所得的压力信号进行零均值化,利用db4正交小波基对均值化的信号进行7层小波分解和重构。表1为不同流量下测点A压力信号快速傅里叶变换后得到的叶频和轴频处压力幅值。可以看出:随着流量的增大,压力脉动在叶频处的幅值增大;但当离心泵处于关死点工况时,压力脉动在叶频处的幅值比小流量的幅值大;随着流量的减小,压力脉动在轴频处的幅值先增加后减小,在流量为 $0.7Q_d$ 时轴频处幅值最大,离心泵内部出现不稳定流动;而在流量为 $0.2Q_d$ 时,压力脉动的轴频和叶频幅值相当,离心泵内不稳定

流动剧烈;当流量大于设计流量时,压力脉动在轴频处的幅值减小,以叶频占绝对主导。

表1 测点A压力信号快速傅里叶叶后叶频和轴频处的幅值
Tab.1 Pressure amplitude of monitoring point A after FFT at blade passing frequency and shaft frequency

Q	叶频		轴频	
	f/Hz	p/Pa	f/Hz	p/Pa
0	297.5	2 423	49.74	1 133
$0.2Q_d$	296.9	1 736	48.52	1 453
$0.7Q_d$	295.7	3 447	49.44	2 418
$1.0Q_d$	294.2	3 678	48.83	1 224
$1.4Q_d$	293.0	67 711	48.52	921

为了分析离心泵内不稳定流动产生的低于轴频的特性,取7层小波包分解的低频段(7,1)和(7,2),其对应的频率段分别为(0~39 Hz)和(39~78 Hz)。分析流量分别为0, $0.2Q_d$, $0.7Q_d$, $1.0Q_d$, $1.4Q_d$ 时小波包重构系数。图7为测点A小波包重构系数。

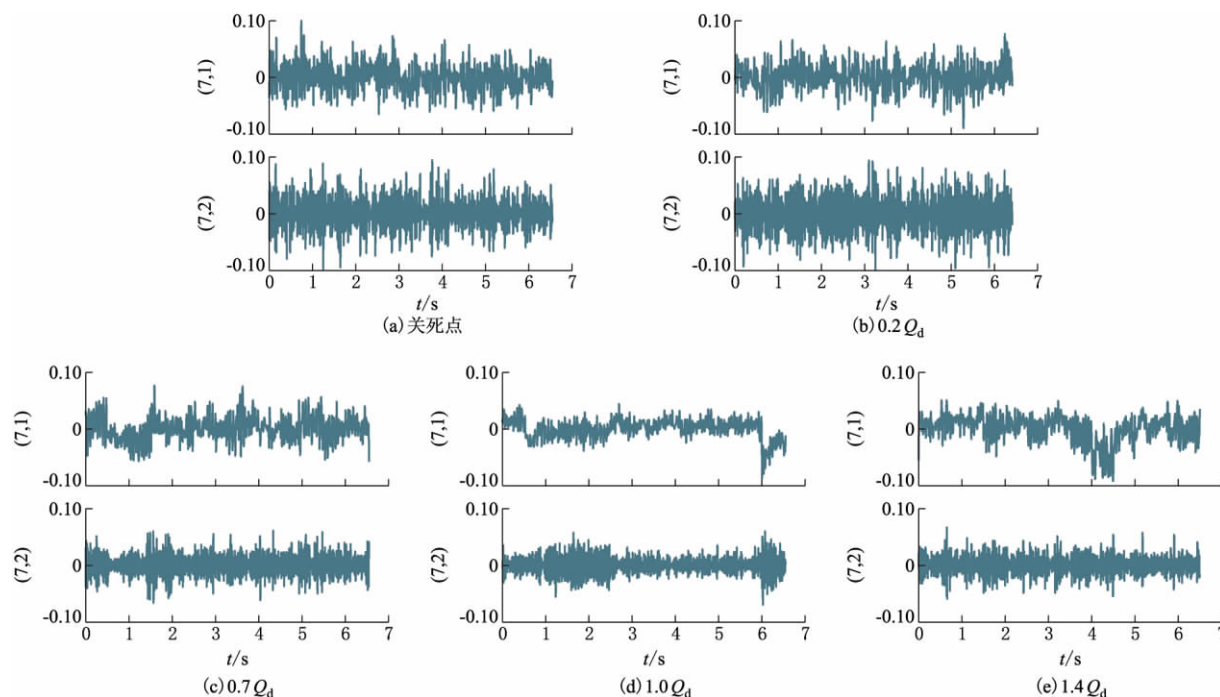


图7 不同流量下测点A小波包重构系数

Fig.7 Wavelet packet reconstruction coefficient of monitoring point A at different flow rates

由图7可以看出:偏离设计工况点时,轴频处(7,2)产生强烈的震荡信号,流量为 $0.7Q_d$ 时轴频脉动比关死点时轴频脉动强,此时离心泵内开始产生了不稳定流动,即此时离心泵内部出现了回流现象;随着流量的减小,小波系数在低频段的振幅和震荡周期显著减小,流离心泵叶轮内的回流进一步加强;关死点工况时离心泵叶轮内仅存在进口回流和

出口回流,可见回流等不稳定流动对低频段脉动产生影响。

表2为离心泵不同工况下不同测点的总能量值。可以看出:离心泵关死点工况时总能量值比其他工况都要高,此时离心泵内能量损失最多;而靠近隔舌处的测点A和测点H的能量值相比较于其他测点能量值较高,可见动静干涉对不同测点的能量值

产生影响. 测点 D 在不同流量工况下的能量值比除测点 A 和 H 处其他测点的能量值高, 表明测点 D 处存在较强的非稳定流动状况.

表 2 蜗壳测点不同工况下不同测点的总能量值

Fig. 2 Total energy of all monitoring points at different flow rates V^2

Q	测点							
	A	B	C	D	E	F	G	H
0	8.1	2.6	2.6	4.1	3.7	2.5	3.4	9.8
$0.2Q_d$	3.4	0.9	1.3	2.2	1.4	1.1	1.4	4.4
$0.7Q_d$	4.5	1.7	2.0	2.8	2.6	2.0	2.6	5.2
$1.0Q_d$	3.9	1.2	1.4	2.7	2.3	1.5	1.8	5.4
$1.4Q_d$	5.0	1.4	1.2	2.3	2.3	1.5	1.9	5.5

4.3 关死点进口管路回流

利用高速摄影仪拍摄进口有机玻璃管内的流动, 离心泵出口阀门关闭时, 叶轮内的高速流体进入进水管中, 产生进口辫状回流, 如图 8 所示. 观察进口管路 2~3 min 发现, 进口回流是一脉冲信号且没有规律, 存在衰减和增长的过程.



图 8 关死点进口回流

Fig. 8 Inlet backflow at shut-off condition

5 结 论

1) 关死点时压力脉动呈现不规则变化, 没有明显的周期性, 由于泵内湍流强烈的不规则运动, 低于 1 倍叶频的低频脉动占据主导地位.

2) 小流量工况时轴频处的振幅和强度明显加强, 流量为 $0.7Q_d$ 时振幅与强度比关死点强, 此时离心泵内部出现不稳定流动.

3) 离心泵关死点进口回流为脉冲信号且进口为辫状回流.

参考文献 (References)

[1] 袁寿其, 付强, 朱荣生. 核电站离心式上充泵多工况水力设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 185-189.

Yuan Shouqi, Fu Qiang, Zhu Rongsheng. Multi-operating-condition hydraulic design of centrifugal charging pump for nuclear power plant[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* 2010, 28(5): 185-189. (in Chinese)

[2] Dyson G. A review of closed valve head prediction methods for centrifugal pumps[J]. *Journal of Power and Energy* 2002, 216(4): 329-337.

[3] Newton T M. Rotor-stator interaction in radial flow pumps and fans at shut-off condition[D]. United Kingdom, Newcastle: Newcastle University, 1998.

[4] Dyson G, Teixeira J. Investigation of closed valve operation using computational fluid dynamics[C]// *Proceedings of the 2009 ASME Fluids Engineering Division Summer Meetings* 2009: 78021.

[5] Guo Shijie, Okamoto Hidenobu. An experimental study on the fluid forces induced by rotor-stator interaction in a centrifugal pump[J]. *International Journal of Rotating Machinery* 2003, 9(2): 135-144.

[6] Berten S, Dupont P, Fabre L, et al. Experimental investigation of flow instabilities and rotating stall in a high-energy centrifugal pump stage[C]// *Proceedings of the 2009 ASME Fluids Engineering Division Summer Meetings* 2009: 78562.

[7] 韩清凯, 于晓光. 基于振动分析的现代机械故障诊断原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[8] 褚福磊. 机械故障诊断中的现代信号处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[9] 倪永燕. 离心泵非定常湍流场计算及流体诱导振动研究[D]. 镇江: 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 2008.

[10] 黄忠富. 小波分析在离心泵气蚀故障诊断中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 2008.

[11] 何正嘉, 譬艳阳, 张西宁. 现代信号处理及工程应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

[12] 高英杰, 孔祥东, Zhang Qin. 基于小波包分析的液压泵状态监测方法[J]. *机械工程学报* 2009, 45(8): 80-88.

Gao Yingjie, Kong Xiangdong, Zhang Qin. Wavelet packets analysis based method for hydraulic pump condition monitoring[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(8): 80-88. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)