

离心泵压力脉动测试关键问题分析

姚志峰, 王福军, 肖若富, 严海军, 刘竹青, 王 敏

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 分析了离心泵进口区域、压水室区域和出口区域压力脉动的特点, 提出了用于压力脉动试验研究的测点布置方案, 尤其是蜗壳隔舌区测点布置方案. 分析了采样频率和采样时间对测试结果的影响, 得出采样频率主导频域的频率范围, 采样时间主导频域的频率分辨率. 在给定频率分辨率的前提下, 结合采样定理和 FFT 方法特点, 建立了普遍适用的离心泵压力脉动测试采样频率和采样时间选取公式. 比较了运用 5 种不同窗函数进行 FFT 分析时所产生的频域分辨率和频率幅值的差异, 发现矩形窗函数比其他窗函数在捕捉主频脉动频率及保持频率幅值不失真方面具有一定的优势.

关键词: 离心泵; 压力脉动; 采样频率; 采样时间; 窗函数

中图分类号: S277.9; TV131.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)03-0219-05

Key issues in pressure fluctuation experiments
for centrifugal pumps

Yao Zhifeng, Wang Fujun, Xiao Ruofu, Yan Haijun, Liu Zhuqing, Wang Min

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the analysis of pressure fluctuations at different flow regions in centrifugal pumps, measuring point arrangements on suction chamber, volute casing and delivery pipes are proposed. Especially, the distribution scheme of measuring points near volute tongue area was discussed in details. The impacts of sampling frequency and sampling time on the experimental results were analysed. The results show that the sampling frequency determines the range of frequency domain, and sampling time determines the frequency resolution. Combining the sampling theory with features of the FFT method, two constraint equations for determining sampling frequency and sampling time are established. Five window functions used for FFT analysis were compared by means of their frequency resolutions and amplitudes. The rectangular window function is recommended because of its advantage in the capturing the main frequency and keeping its amplitude lossless for centrifugal pumps.

Key words: centrifugal pump; pressure fluctuation; sampling frequency; sampling time; window functions

从大型泵站的实际运行情况看, 水泵机组普遍存在压力脉动等运行不稳定问题. 用测试的方法了

解离心泵内部压力脉动情况被认为是最基本和最可靠的手段. 在离心泵壁面布置压力脉动测点, 安装压

收稿日期: 2009-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779070); 北京市自然科学基金重点资助项目(3071002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009-2-12)

作者简介: 姚志峰(1984—), 男, 浙江舟山人, 博士研究生(yz2004cau@sina.com), 主要从事水力机械流动理论和测试技术研究.

王福军(1964—), 男, 河北唐山人, 教授, 博士生导师(wangfj@cau.edu.cn), 主要从事流体机械、计算流体力学和计算固体力学研究.

力脉动传感器来获取水泵内部压力脉动信息,避免了因使用探针对流场造成的干扰。离心泵压力脉动测试中测点布置、采样频率和采样时间选择以及FFT分析方法中窗函数选用等几个关键问题对测试结果有重要影响。

目前,离心泵压力脉动测试中测点的选择存在一定的任意性:Dazin和Charley等^[1]在泵进口不同截面布置4个测点,在蜗壳不同圆周位置布置7个测点,在出水管路不同截面布置2个测点;Gonzalez和Santolaria等^[2]在压水室圆周方向上每隔10°布置压力脉动测点。因此,需要分析不同学者的测试方案及测试结果,总结出较为合理的测点布置方案。测试中采样频率和采样时间的选取也存在较大经验成分;Kaupter和Staubli^[3]选用6 000 Hz的采样频率,采样270个旋转周期;Wang和Tsukamoto^[4]采用2 000 Hz的采样频率,采样时间为50 s;袁寿其等^[5]选用的采样频率为20 kHz,采样时间为0.1 s。此外,在采用FFT分析方法处理数据时,需要选用窗函数来截取分析数据,不同窗函数因其频谱特征不同在工程上有不同的应用。许多学者在处理压力脉动信号时常常采用默认的矩形窗函数,也有很多学者为了减少频谱泄露选用汉宁窗函数^[2]。对窗函数在离心泵压力脉动信号处理中应用的研究目前还比较少。

笔者通过对多种泵型的离心泵进行压力脉动试验研究,就以上几个关键问题进行了探讨,得出了离心泵压力脉动测试中测点位置选择建议、采样频率和采样时间选取办法以及窗函数选用推荐。

1 压力脉动测点选择

离心泵压力脉动研究在预防汽蚀、优化水力设计和指导稳定运行等方面发挥着重要作用。为了得到尽量全面的离心泵压力脉动信息,需要在进口区域、压水室区域和出口区域合理选择测点。

1.1 进口区域测点选择

离心泵进口区域的压力脉动分析对泵进口结构优化,特别是抗汽蚀性能的提高具有决定性的作用。如图1所示,以双吸泵半螺旋形吸水室为例,探讨进口区域测点的选择。

水流在进入叶轮前,其方向由径向转为轴向,同时又有较大周向旋转运动,因此,半螺旋形吸水室内存在一个较大尺度的涡带,在小流量工况下非常明显^[6]。半螺旋形吸水室内压力脉动顺着水流方向从Ⅷ断面到隔舌(图1中0断面)位置有增大的趋势,

同时在Ⅺ断面到Ⅷ断面的过渡部分存在一个压力脉动最大位置点^[7]。据此,选择吸水室断面Ⅰ、Ⅳ、Ⅶ、Ⅸ布置测点4,5,6,7。

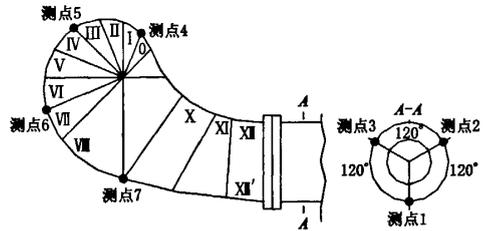


图1 半螺旋形吸水室和吸水管测点布置图

Fig. 1 Measuring point arrangement on suction pipe and semi-volute suction chamber

此外,为了获得泵进口来流状态信息,一般在吸水管法兰圆断面(如图1中的A-A断面)上布置3个测点(测点1、测点2和测点3),测点间相隔的角度最佳为120°。

1.2 压水室区域测点选择

压水室区域压力脉动是离心泵压力脉动研究的热点。蜗壳结构圆周方向不对称导致的流动不平衡和叶轮与蜗壳的动静干涉作用都可以产生较大的压力脉动^[8]。压水室区域压力分布及脉动幅值大小和与隔舌位置远近有关^[1,9]。在某一台离心泵蜗壳上布置3个测点,按叶轮旋转方向,测点位置A、B和C与隔舌位置夹角分别为85°、147°和210°。额定工况下,各测点压力脉动情况如表1所示。

表1 额定流量下不同测点的压力脉动比较
Tab. 1 Comparison of pressure fluctuations on different locations at nominal flow rate

测点位置	A	B	C
峰峰值 $\Delta X_{pp}/m$	7.40	5.23	3.97
压力脉动参数 $\Delta H/\%$	16.17	11.43	8.67
叶频幅值 H_{bp}/m	1.29	0.62	0.01
轴频幅值 H_{st}/m	0.31	0.39	0.40

注: $\Delta H = \frac{\Delta X_{pp}}{H}$ (H为在该流量下所对应的扬程)

表1的数据显示,压水室区域压力脉动的主要频率成分为轴频和叶频,越靠近隔舌区域,叶频就越明显,压力脉动峰峰值和 ΔH 的值就越大;远离隔舌区域,叶频成分消失,轴频成分有增大的趋势。另外,隔舌区域的压力脉动以叶频或低于1倍叶频的频率为主,压力脉动最大幅值区域在隔舌区域偏向叶轮旋转方向处^[10];蜗壳轴向的中截面上压力脉动相比其他截面较大^[2];在非额定工况下,隔舌区域的流态相差很大。

根据压水室压力脉动分布特征,建议在选择压力脉动测点时,在隔舌区域至少布置3个测点,布置方案如图2所示。测点8-13位于压水室不同圆周位置,沿叶轮旋转方向与隔舌所在0断面位置夹角分别为 15° 、 60° 、 105° 、 180° 、 270° 和 345° ,测点9、测点10、测点11和测点12的压力脉动传感器,优先选取压水室中截面位置进行安装。测点8和测点13可安装在对应于叶轮出口的压水室侧面。测点14位于蜗壳轴向中截面上,是以隔舌的舌端为圆心作辅助圆与泵体内壁相切的切点。同时,将隔舌舌端与切点连线的延长线作为该测点压力脉动传感器的安装方向。

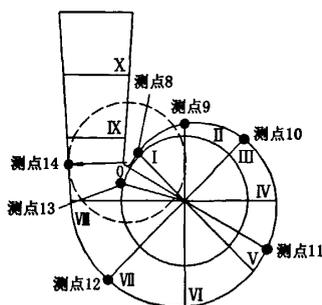


图2 压水室测点布置图

Fig. 2 Measuring point arrangement on volute casing

1.3 出口区域测点选择

为研究离心泵内部压力脉动对出口管路系统的影响,需要在出口区域布置合适的测点。泵内汽蚀产生的低频信号和隔舌区域强烈的动静干涉产生的叶

频信号,具有较强的向下游传播的能力^[1,11],因此,该区域的测点可以直接选在靠近水泵出口法兰出水管路的断面上,布置方式与吸水管测点一样。

2 采样频率和采样时间选取

为了减少信号采集设备及数据分析软件的投入,总是希望采样频率尽量低,采样时间尽量短,但是,低的采样频率或者短的采样时间常常会导致测试的失败。目前,对于离心泵压力脉动测试中采样频率和采样时间的选取存在较大的经验成分。

笔者设计了三种采样方案在相同工况下采集某一台离心泵同一测点位置的压力脉动信号。其中,方案一采样频率为4 000 Hz,采样时间为10 s;方案二采样频率为4 000 Hz,采样时间为1 s;方案三采样频率为500 Hz,采样时间为10 s。对相应的时域数据进行FFT分析,频域图见图3-5。

分析图3-5发现,方案一时域信号经FFT分析所得的频域图在15~20 Hz频率范围内有13个明显的频率成分,而方案二相应的频域图在该频率范围内只含有1~2个明显的频率成分。前者约为后者的10倍。方案一时域信号经FFT分析所得的频率范围为0~2 000 Hz,而方案三相应的频率范围为0~250 Hz。前者为后者的8倍,而所得频域图频率分辨率几乎一样。所以,采样频率主导了频域图的范围,采样时间主导了频域图频率的分辨率。

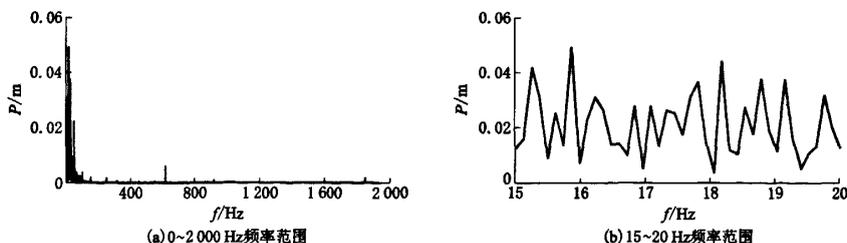


图3 方案一频域图

Fig. 3 Frequency domain for scheme one

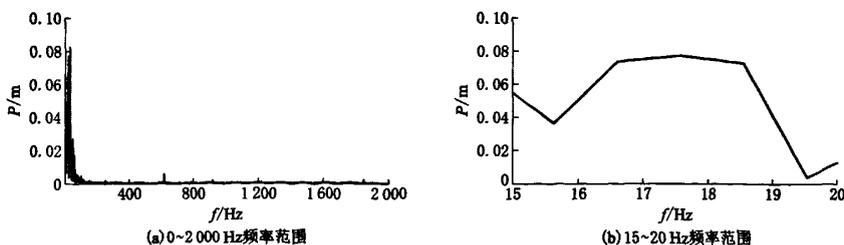


图4 方案二频域图

Fig. 4 Frequency domain for scheme two

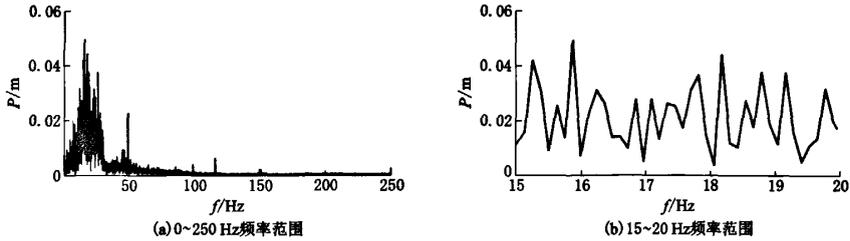


图5 方案三频域图

Fig. 5 Frequency domain for scheme three

根据采样定理,采样频率 f_s 应大于被采集信号频率的2倍.采样频率 f_s 必须根据被采信号中最高有用频率 f 决定,在离心泵的压力脉动试验中,该最高有用频率 f 通常可取叶频的2~3倍.同时,为消除混频现象,需选择低通滤波器滤掉信号中高于 f_s 的频率成分.对所有的FFT软件而言,用于计算的 实际数据点数为2的 n 次幂(n 为正整数),被计算 频率的间距为 $\frac{f_s}{2^n}$ (即频率分辨率 $\lambda = \frac{f_s}{2^n}$).频域的最 高频率 $f_{\max} = \frac{f_s}{2} \cdot \frac{N}{2}$,式中 N 是FFT计算点数,即 $N=2^n$.在给定频率分辨率和已知离心泵泵型的前 提下,采样频率

$$2^n \lambda \geq f_s \geq m f_v, \quad (1)$$

式中 m 为最高有用频率的倍数,建议取2.5~4; f_v 为最高有用频率,建议取叶片通过频率的2~3倍; λ 为频率分辨率,建议取0.1 Hz; n 取使式(1)成立 的最小正整数.

表2 不同窗函数对频率幅值影响比较

Tab. 2 Comparison of effects for main frequencies by using different window functions m

频率	窗函数				
	矩形窗	汉宁窗	汉明窗	韦尔奇窗	布莱克曼窗
1/3倍转频幅值	0.049	0.028	0.029	0.036	0.024
转频幅值	0.023	0.015	0.016	0.018	0.013

由表2可知,选用矩形窗以外的窗函数将导致 频域图中频率成分幅值明显减小.比较选用矩形窗 函数和汉宁窗函数FFT分析的频域图,见图6,7. 比较发现,选用矩形窗函数FFT分析所得频域图中 主频较明显.汉宁窗函数减小了频谱泄露,降低了旁 瓣水平,但同时也降低了频率的整体幅值水平.对于 离心泵压力脉动试验数据的分析主要集中在主要频 率成分及其幅值的分析上,所以应首先推荐选用矩 形窗函数的FFT分析方法.当主频不明显时,再尝 试选用汉宁窗等其他窗函数来减少频谱泄露.

采样时间

$$T \geq \frac{2^n}{f_s} \quad (2)$$

由式(1)求得采样频率 f_s .合适取值范围,建议 取该范围内的较大值.将得到的采样频率 f_s 代入式 (2)便求得采样时间 T 的范围,建议取使式(2)成立 的较小值.

3 窗函数选用

FFT分析过程中,常用的窗函数有矩形窗函数、 汉宁窗函数、汉明窗函数、三角窗函数和布莱克曼窗 函数等.矩形窗函数将在窗内的原信号序列数值与 系数1相乘,而在窗外的原信号序列数值与系数0 相乘.其他窗函数则对输入的原信号序列起点和终 点的数值进行平滑,使其接近一个共同的振幅值.通 过采用不同窗函数的FFT分析方法,分析了方案一 的压力脉动数据,结果如表2所示.

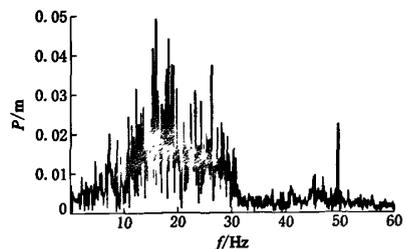


图6 矩形窗函数FFT分析结果

Fig. 6 Result of FFT by using rectangular window function

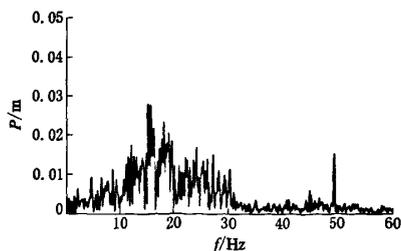


图7 汉宁窗函数FFT分析结果

Fig.7 Result of FFT by using hanning window function

4 结论

通过不同类型离心泵压力脉动试验,探讨了测点布置选择,采样频率和采样时间选取以及窗函数选用等几个关键问题,得到如下结论:

(1)通过分析离心泵吸水室及压水室压力脉动分布特点,给出了离心泵进口区域及压水室的压力脉动测点布置方案,特别针对压水室隔舌区,提出了测点加密策略.该成果对准确评判泵内压力脉动具有指导意义.

(2)推导出普遍适用性的离心泵压力脉动测试采样频率和采样时间的选取公式.

(3)得出矩形窗函数在捕捉主频脉动频率,保持频率幅值不失真方面具有一定的优势.在离心泵压力脉动数据处理时,推荐首先使用矩形窗函数.

参考文献 (References)

- [1] Dazin A, Charley J, Bois G, et al. Pressure fluctuations in the suction and delivery pipes and in the volute of a radial flow pump in non-cavitating and cavitating operating conditions [C] // *Proceedings of 2001 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2001: 331 - 337.
- [2] Gonzalez J, Santolaria C, Blanco E, et al. Unsteady flow structure on a centrifugal pump: experimental and numerical approaches [C] // *Proceedings of 2002 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2002: 761 - 768.
- [3] Kaupert K A, Staubli T. The unsteady pressure field in a high specific speed centrifugal pump impeller part I: influence of the volute [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1999, 121(3): 621 - 626.
- [4] Wang H, Tsukamoto H. Experimental and numerical study of unsteady flow in a diffuser pump at off-design conditions [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, 125(5): 767 - 778.
- [5] 袁寿其, 薛菲, 袁建平, 等. 离心泵压力脉动对流动噪声影响的试验研究 [J]. *排灌机械*, 2009, 27(5): 287 - 290.
Yuan Shouqi, Xue Fei, Yuan Jianping, et al. Experimental study on impact of pressure fluctuation on flow-noise in centrifugal pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(5): 287 - 290. (in Chinese)
- [6] Hodkiewicz M R, Norton M P. The effect of change in flow rate on the vibration of double-suction centrifugal pumps [J]. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 2002, 216(1): 47 - 58.
- [7] 夏伟. 双吸离心泵运行稳定性的试验研究 [D]. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2009: 31 - 38.
- [8] Qin W, Tsukamoto H. Theoretical study of pressure fluctuations at downstream of a diffuser pump impeller (analysis of unsteady flow due to interaction between impeller blades and guide vanes/volute casing) [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part B*, 1995, 61(587): 25 - 63.
- [9] 曹树良, 王万鹏, 祝宝山. 离心泵压水室内部流动数值模拟 [J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2004, 25(3): 186 - 188.
Cao Shuliang, Wang Wanpeng, Zhu Baoshan. Numerical simulation of internal flow through the spiral casing of centrifugal pump [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2004, 25(3): 186 - 188. (in Chinese)
- [10] 丛国辉, 王福军. 双吸离心泵隔舌区压力脉动特性分析 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(6): 60 - 67.
Cong Guohui, Wang Fujun. Numerical investigation of unsteady pressure fluctuations near volute tongue in a double-suction centrifugal pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(6): 60 - 67. (in Chinese)
- [11] 倪永燕, 潘中永, 李红, 等. 出口压力波动特性在离心泵汽蚀监测中的应用 [J]. *排灌机械*, 2006, 24(5): 40 - 43.
Ni Yongyan, Pan Zhongyong, Li Hong, et al. Application of characters of discharge pressure fluctuation to monitor of centrifugal pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(5): 40 - 43. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)