离心泵内部流动诱导噪声测试系统设计

袁寿其，杨 勇，袁建平，骆 寅
（江苏大学 流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘 要：设计了一套基于虚拟仪器的噪声测试系统，能够便利地对离心泵内部流动诱导噪声信号进行采集、调理、分析，得到噪声特性．应用ST70型水听器测量诱导噪声信号，通过虚拟仪器应用模块分析频谱特征，进而判断机组运行状况．在工频时对5种流量大小状况的诱导噪声进行测试及时域频域分析，发现随着流量的增加，诱导噪声时域波形开始趋于紊乱，而且振幅峰值不断降低；噪声信号在低频范围内组成基本稳定；在500～1 000 Hz范围内频谱内有两个峰值，且随流量变化影响很小；在1 000～2 000 Hz范围内频谱峰值逐渐开始突显．试验表明水听器采集的信号能够反映噪声的基本特性，该测试系统能够进行噪声信号的时域、频域、A计权声级及倍频程等分析，能满足工程和科学研究的需要，具有较好的应用前景．

关键词：测试系统；虚拟仪器；诱导噪声；频谱
中图分类号：TB52 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－6254(2009)01－0010－05

Measurement system design of flow-induced noise in centrifugal pumps

Yuan Shouqi, *Yang Yong*, *Yuan Jianping*, *Luo Yin*
(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: A measurement system for flow-induced noise based on LabVIEW is designed and applied in the test. The system can easily collect noise signal, and obtain the characteristic of noise. With the sensor ST70 measuring induced noise signal and being sent to applied modules to analyze frequency in virtual instrument modules, it can be used to understand the state of unit running. By comparing five flow measurements, it shows that signal's time domain tends to fluctuated wave and its amplitude decreases as flow rate increase. Signals are almost constant at low frequency, but from 500 to 1 000 Hz, two obvious peaks appear and have little change. There is a trency which peaks from 1 000 to 2 000 Hz turns out as flow is growing. Signals by ST70 can represent the basic characteristics of flow-induced noise in test. The measurement system applied in time domain, frequency domain, band octave and so on can be satisfied to meet engineering and research needs in the future.

Key words: measurement system; virtual instrument; induced noise; frequency spectrum

离心泵广泛应用于工业、农业、化工、国防等领域，它的运行状态是否良好直接影响安全生产．当前离心泵故障诊断常用的方法是以其基本性能参数是否偏离设计工况点和监测是否有异常振动．这种诊断方法需要有经验的技术人员，诊断结论具有较大的主观性．离心泵内部流动诱导噪声测试系统通过

收稿日期：2008－10－20
基金项目：国家杰出青年基金资助项目(5082590)
作者简介：袁寿其(1963—)，男，上海金山人，研究员，博导(shouqiy@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及工程的研究．
杨 勇(1982—)，男，安徽怀远人，硕士研究生(ya2008yo@sina.com)，主要从事流动诱导噪声的研究．

万方数据

对噪声信号进行时域、频域分析，以频谱特征为离心泵运行状况检测或故障诊断的依据，克服了主观性. 国外学者在诱导噪声理论试验及应用研究方面取得有益成果，如 Langthjem 和 Olhoff[1] 分析了诱导噪声的产生机理并提出预测诱导噪声源的声学模型和降低诱导噪声的水力设计方法. Chudina[2] 对汽蚀产生的诱导噪声进行了测试，并用声压测量法测试由汽蚀原因产生的诱导噪声. Choi[3] 等在离心泵非稳定流动和诱导噪声研究中，阐述了内部流体不稳定而引起的诱导噪声，解释了其运行机理. 国内这方面研究还处于起步阶段，冯涛[4] 等人对离心泵流动噪声进行测试研究，取得了一定的研究成果. 这些研究成果促进了离心泵内部流动诱导噪声在理论试验和工程应用方面的发展.

笔者基于虚拟仪器技术建立离心泵内部流动诱导噪声测试系统，对一台离心泵进行其内部流动诱导噪声的测试. 水听器采集到的信号输入到虚拟仪器模块上进行时域和频域分析，获得各工况下的时域和频谱特征.

诱导噪声在离心泵运行状态监测、故障诊断等方面具有很大的优点. 离心泵内部流动诱导噪声测试系统通过对噪声信号进行时域和频域分析，进而判断离心泵是否运行正常，特别是对大型或重要部门的离心泵进行实时监测、故障诊断具有重大意义.

1　基本原理

1.1　采样定理

采样是将连续变化的信号转变为时间域离散信号[5]. 设模拟信号为 $x_a(t)$，采样周期为 T，即采样频率 $f_s = 1/T$. 将信号离散的最简单方法是记录 x_a 在区间 T 上的样本值 $\{x(nt)\}_{n\in Z}$，这些采样点插值可以将 近似地恢复. 物理上，采样过程是周期为 T 的采样脉冲对模拟信号的调制，周期性单位脉冲序列记为 $\delta(t)$，有

$$\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \tag{1}$$

当原始连续信号 $x_a(t)$ 按采样频率 f_s 采样后，采样信号 $x(t)$ 为模拟信号和脉冲序列的乘积，即

$$x(t) = x_a(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \tag{2}$$

其傅里叶变换为

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f_s X_a(f - f_s) \tag{3}$$

其中 X_a 为原始连续信号的频谱. 采样信号的频谱包含着原始信号频谱及无限个经平移的原信号频谱.

为保证采样信号无失真，必须使得信号最大频率 f_m 与采样频率 f_s 之间满足奈奎斯特采样定理，采样频率至少要大于信号最大频率的 2 倍，数学表达式为

$$f_s \geqslant 2f_m \tag{4}$$

当 $f_m \leqslant f_s/2$ 时，在 $0 \leqslant f \leqslant f_m$ 范围内，采样信号的频谱和原信号频谱完全一样.

1.2　声学原理

声压是由于声扰动产生的逾量压强，是关于时间和空间的函数. 声场中某一瞬时的声压值称为瞬时声压，在一定时间间隔内最大的声压称为峰值声压. 一定时间间隔内，瞬时声压对时间取均方根值称为有效声压. 声学上引入“级”的概念，用等效声压级表示声压的大小[6]. 声压级 L_p(dB) 的定义为

$$L_p = 10\lg\left(\frac{p_e}{p_0}\right)^2 = 20\lg\frac{p_e}{p_0} \tag{5}$$

式中 p_e 为有效声压，$p_e = \frac{1}{\Delta T}\int_0^{\Delta T} p^2 \mathrm{d}t$；$p_0$ 为基准声压，一般取 $p_0 = 1\ \mu\mathrm{Pa}$.

噪声的频率特性常用频谱来描述，各个频率或频段上的声能量分布绘成的图称为频谱图. 一般情况下，频率不同的声波是不相干的，总的声能量是各个频率分量上的能量叠加之和. 根据试验分析精度要求，声学量的分析频率带宽常用的有窄频带宽、倍频程和 1/3 倍频程带宽. 倍频程带宽为百分比带宽，其中心频率 f_0 和带宽上、下限截止频率 f_2 和 f_1 的关系为

$$f_0 = \sqrt{f_2 f_1} \tag{6}$$

$$f_2 = 2^n f_1 \tag{7}$$

其中 n 一般取 1，1/3，1/6.

2　测试系统架构设计

离心泵内部流动诱导噪声测试系统由硬件和软件两部分组成.

2.1　硬件系统

主要包括各种传感器、采集卡元件和计算机 3 部分. 水听器采集离心泵内部流动诱导噪声的声压信号，由 NI - PXI - 6251 多功能采集卡将声压信号输入到装有虚拟仪器应用模块的主机中，完成数据采集、调理、显示及存储等. 水听器安放在离心泵出

万方数据

口测量段中,中间放置,探头朝迎流方向.

采集卡性能参数:8路差分输入或16路单端输入;16位A/D转换器;最大采样频率250 kHz;信号输入范围: ±1, ±5, ±10, ±12 V. 采集卡端采用BNC接口插头,用来实现测试信号与采集卡直接传输,完成信号的采集. 主机采用NI机箱,它是便携式的处理系统. 具备计算机主机的功能,且安装了虚拟仪器软件.

2.2 软件系统

本软件系统是基于LabVIEW的高校套件开发,设计数据采集模块,时域分析、频域分析、声级等数据处理模块. 应用虚拟仪器中的Tab Control控件,将各个独立功能的应用模块集成为一个"仪器系统". 同时,对硬件非线性误差进行补偿,提高测试系统的精度和稳定性[7].

2.3 测试系统特点

离心泵内部流动诱导噪声测试系统通过硬件与软件的匹配,测试速度大大提高. 减少了一些常规测试环节,降低试验误差,且性能稳定,便于携带到工作现场,如图1所示. 诱导噪声测试系统具有精度高、可靠性高、测量速度快、操作简单等优点.

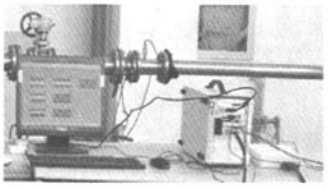


图1 测试现场图
Fig. 1 Picture of measuring spot

3 虚拟仪器模块设计

LabVIEW是一种图形化的编程语言,编程简单、高效;已被工业界、学术界和实验室广泛认识并接受,被视为标准的数据采集和仪器控制软件. LabVIEW具备了满足GPIB, VXI, RS-232和RS-485协议的硬件及数据采集卡通讯的全部功能,还内置了应用TCP/IP, Active X等软件标准的库函数[8,9]. NI公司推出的数据采集卡,提供配套的数据采集卡驱动软件,用以驱动NI公司的上百种不同平台上的数据采集设备,实现对采集卡的连接、操作管理和资源管理[10]. 虚拟仪器采用"软件即仪器"的构想,以通用的计算机硬件及操作系统为依托,实现各种仪器功能. 离心泵诱导噪声测试系统组成如图2所示.

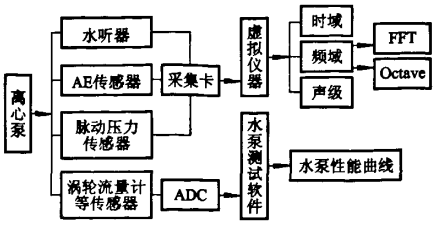


图2 测试系统组成结构图
Fig. 2 Components structure of measurement system

3.1 数据采集模块

根据采样定理和诱导噪声特性确定采集模块的采样时间间隔和采样数. 采样时间间隔 $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ s,采样数 $N = 2\ 000$. 按钮开关决定是否启动数据开始采集,存储. 本测试系统数据采集模块还可以同时进行振动加速度、声压和脉动压力的数据采集,如图3所示. 图3中波形1~4为AE传感器测得振动信号,波形5,6为高频脉动压力传感器测得压力信号.

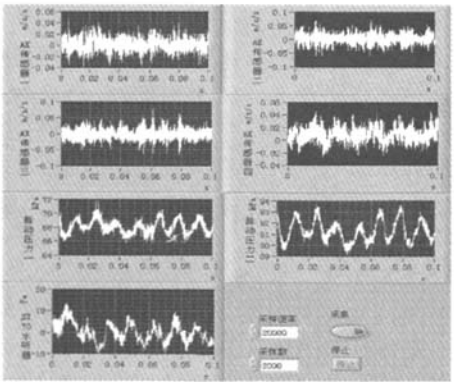


图3 诱导噪声测试系统的数据采集界面
Fig. 3 Front panel of data collection of flow-induced noise measurement system

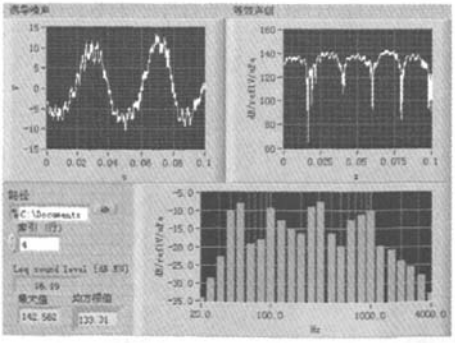


图4 诱导噪声时域及声级、倍频程分析
Fig. 4 Analysis of time domain, sound level and octave of flow-induced noise

万方数据

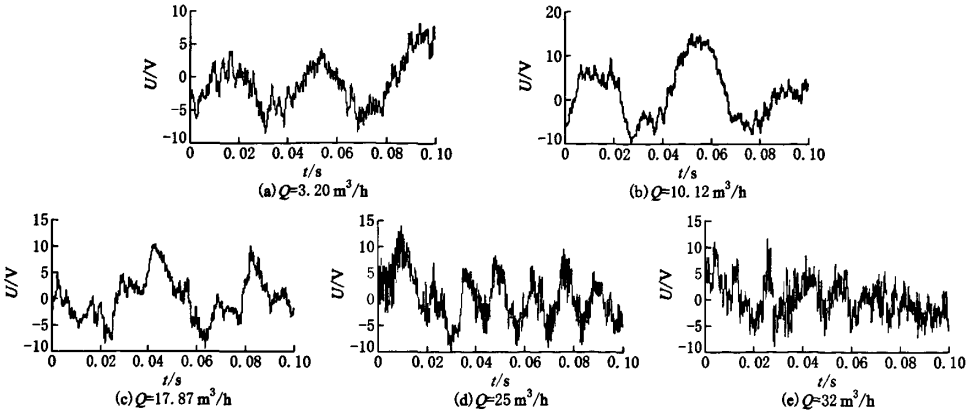


图 5　5 种流量状况下的诱导噪声信号输出时域波形

Fig. 5　Wave in time domain of five conditions flow induced noise signal voltage-out

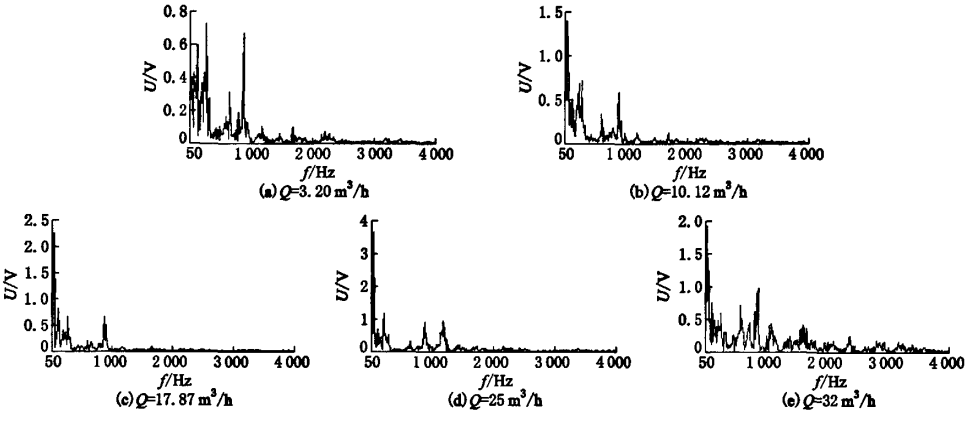


图 6　5 种流量状况下的诱导噪声信号幅值谱

Fig. 6　Five conditions flow induced noise signal modulus frequency spectrum

3.2　数据分析模块

数据分析模块通常由读入控件、显示控件和处理功能控件组成. 应用采集模块在数据采集的同时可以实时进行分析，也可以在数据采集结束后进行分析. 数据分析模块读取数据采集模块获得的数据文件，进行时域、频域或相关方面的处理，进行声压时域、声级和倍频程的分析，如图 4 所示.

4　诱导噪声测试及分析

对一台离心泵进行测试，其性能参数：Q = 25 m³/h，H = 8 m，P = 7.5 kW，n = 1 440 r/min. 采样时间间隔 $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ s，采样数为 2 000，即在 0.1 s 内时间采集 2 000 个数据并保存到电子表格文件中. ST70 型水听器量程 50 Hz ~ 70 kHz，接收声压灵敏度为 −204 dB.

数据分析模块对存储的电子表格文件进行读取，得到传感器输出的电压时域信号，图 5 为各工况下的时域图. 对输出电压信号进行 FFT 分析，得到频谱，图 6 为各流量工况下的频谱图.

比较分析这些状况下数据可以得到以下结论：

1）离心泵内部流动诱导噪声时域曲线随着流量的增加，波形逐渐开始紊乱；波形的波峰波谷交替趋于剧烈，在 Q = 32 m³/h 时基本没有周期性；且随流量增加，波形的振幅降低.

2）5 种流量状况下诱导噪声频谱图有共同的特征，在 50 Hz 附近低频噪声表现非常明显，峰值异常突出. 在 50 ~ 500 Hz 范围内，另一个 300 Hz 低频噪声峰值随流量的增加逐渐降低. 在 500 ~ 1 000 Hz 范围内有两个中频噪声的频谱表现突出，即 900 Hz 和 600 Hz 在低于设计流量工况时，900 Hz 比 600 Hz 的峰值明显；600 Hz 幅值逐渐降低，900 Hz 幅值变化不大. 在 1 000 ~ 4 000 Hz 范围内高频噪声组成比较稳定，随着流量增加，1 000 ~ 2 500 Hz 的噪声

万方数据

组成表现活跃.

3)虚拟仪器实时采样,诱导噪声波形幅度变化较大,设计工况下等效声级大小基本在126.8 dB处波动.声级大小随流量增加,呈现下降趋势.

5 结 论

测试系统试验得到离心泵内部流动的诱导噪声与流量之间的关系特性,发现在某些特殊流量状况下的时域和频域特征,特别是频谱图中,峰值的影响除了离心泵的轴频与叶频影响外,主要是受到液体内部流动的剧烈程度有关系,流态越紊乱,频谱趋向低频;反之趋向高频.通过频谱分析,可以监测离心泵是否偏离设计工况并加以调整.

参考文献(References)

[1] Olhoff L. A numerical study of flow-induced noise in a two-dimensional centrifugal pump[J]. *Part Ⅱ. Hydrodynamics. Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19: 369-386.

[2] Chudina. Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump[J]. *Acoustical Physics*, 2003, 49(4): 463-474.

[3] Choi J S, McLaughlin D K, Thompson D E. Experiments on the unsteady flow field and noise generation in a centrifugal pump impeller[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 263 (2003): 493-514.

[4] 冯 涛.离心泵流动噪声的测量研究[D].北京:中科院声学所, 2005.

[5] 刘君华,申忠如,郭福田.现代测试技术与系统集成[M].北京:电子工业出版社,2005.

[6] 陈克安,曾向阳,李海英.声学测量[M].北京:科学出版社,2004.

[7] 田湛君.动态数据采集系统中虚拟仪器的设计与实现[J].基础自动化,2002(2):30-32.
Tian Zhanjun. Design and realization of virtual instrument in dynamic data collecting and Analyzing System [J]. *Basic Atutomation*, 2002 (2): 30-32. (in Chinese)

[8] 陈锡辉,张银鸿. LabVIEW8.20程序设计从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2007.

[9] 杨乐平,李海涛,赵 勇,等. Lab VIEW高级程序设计[M].北京:清华大学出版社,2003.

[10] 杨昌棋,秦树人,何 辉.基于FFT的虚拟实时噪声倍频程分析仪[J].测控技术,2009 (9):25-27.
Yang Changqi, Qin Shuren, He Hui. Virtual real-time noise octave analyzer based on FFT [J]. *Measurement and Control Techno ledge*, 2000(9): 25-27. (in Chinese)

(责任编辑 贾国方)

江苏大学流体机械工程技术研究中心再获殊荣

近日,江苏省科技厅授予江苏大学流体机械工程技术研究中心"江苏省科技创新平台建设先进单位"称号.据悉,为了进一步激发全省科技创新平台的建设热情,营造全省加强科技创新平台建设的良好氛围,江苏省科技厅对2006—2008三年中科技创新平台绩效评估为优秀等次的全省27家科技创新平台承担单位进行表彰,并授予"江苏省科技创新平台建设先进单位"铭牌,江苏大学流体中心位列其中.

江苏大学流体中心自组建以来,坚持国家需求、市场导向原则,以贯彻国家节能、节水、环保、重大装备国产化等政策为己任,以国家相关产业和重点工程急需的高端泵类产品和技术的产业化为主攻方向,不断向国家经济和社会建设提供新产品、新技术和成套设备,在科学研究、成果转化、队伍建设、人才培养、设施条件、管理创新和社会服务等方面取得了显著成绩,已经连续三次被江苏省科技厅、财政厅评为江苏省优秀工程技术研究中心.

(摘编自 http://ww.ujs.edu.cn/pub/xiaonei/jdxw/view/6943)

万方数据