

齿轮传动噪声测量系统的研究

周满平, 陈洪芳, 林家春*, 杨森元
(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要:为实现通过测量齿轮传动噪声来分析齿轮加工工艺的目标,开发了一套齿轮传动噪声测量系统。利用硬件系统现场采集与分析处理齿轮噪声,并实时显示噪声信号的处理结果;为了对噪声信号做进一步对比分析,利用硬件系统的 USB 模块与上位机进行数据通讯,通过上位机信号处理软件对齿轮传动噪声信号做 FFT 分析和细化谱分析,并对处理结果进行实时显示及保存。实验结果表明,该系统能准确采集与处理齿轮传动噪声信号,并能有效分析噪声信号的特征频率,可用于齿轮加工工艺的分析。

关键词:传动噪声;USB 通讯;细化谱分析;特征频率

中图分类号:TH825;TH132.41;TP274.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0516-04

Research on gear mesh noise measurement system

ZHOU Man-ping, CHEN Hong-fang, LIN Jia-chun, YANG Sen-yuan
(College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to analyze the gear manufacturing process by measuring the gear mesh-noise, a noise measurement system was developed. The hardware of the system was used to collect and analyze the gear noise signal, and the processed results of noise could be real-time displayed. Further more, in order to contrastively analyze the noise signal, a USB module was used to communicate with PC. FFT&ZFFT analysis method was applied in the interface, the analysis results could also be real-time displayed and preserved. Finally, test results show that this system can collect and analyze the gear mesh-noise accurately, and analyze the characteristic frequency of gear noise efficiently, so it can be used to analyze the gear manufacturing process.

Key words: mesh-noise; USB communication; ZFFT analysis; characteristic frequency

0 引 言

齿轮传动噪声是机械噪声的重要组成部分^[1],为了降低噪声应从设计、工艺等方面提出要求,这些工作都与噪声测量分不开,只有通过噪声测量才能评价噪声的高低,分析噪声产生的原因,因此齿轮噪声测量成为分析齿轮工艺的一种重要手段^[2-3]。目前测量噪声的主要手段是声级计^[4],特别在齿轮噪声测量领域主要采用声学测量分析站^[5],声级计主要针对噪声声压级测量,仅仅测量了噪声的分贝数,缺乏对噪声的处理分析,声学测量分析站是虚拟仪器,依赖于 PC 机的软

件分析,不能做到便携式和嵌入式。

因此,本研究设计了基于 DSP 与 FPGA 的便携式齿轮传动噪声测量系统,它能实现齿轮传动噪声信号的采集、实时数据处理及结果显示功能。可以通过测量齿轮传动噪声,分析齿轮的加工工艺。

1 齿轮噪声分析方法

在齿轮传动噪声测量中采集到的声音信号不仅包括齿轮啮合噪声,还含有大量电机运转及周围环境等背景噪声。针对这样复杂的噪声系统,时域分析和 FFT 分析已不能满足要求。本研究所设计的系统采用

收稿日期:2010-12-07

作者简介:周满平(1982-),男,湖南永州人,主要从事齿轮噪声测量系统方面的研究. E-mail: zmp421@emails.bjut.edu.cn

通信联系人:林家春,男,副教授,硕士生导师. E-mail: linjc@bjut.edu.cn

了FFT分析和细化谱分析相结合的方法。FFT分析能得到噪声信号中所包含的频率成分^[6-7],但分辨率不够高。为了准确获取齿轮啮合频率成分,需提高频率分辨率。因此,本研究采用细化谱分析,即基于复解析带通滤波器的复调制细化选带频谱分析方法^[8]。

复调制细化选带频谱分析方法,即ZFFT方法,只需输入样本的一部分进行FFT变换,这样可使信号频谱局部(即感兴趣的频率带)频率分辨率得到极大提高。

下面以低通滤波器宽度为 $f_s/(2D)$ 、间隔 D 点选抽一点作 N 点谱分析, N 条谱线反映($f_1 \sim f_2$)频带频谱的方法为例,说明ZFFT的原理。

设原信号的采样频率为 f_s , N 为一段FFT分析点数, D 为细化倍数, M 为滤波器半阶数,采样序列为 $x(n)$ 。首先确定欲细化频段的中心频率 f_c 及细化倍数 D ,在频带($f_1 \sim f_2$)范围内进行频率细化分析;然后构造一个实低通滤波器 $h_l(n)$,进行复调制移频,得到一个复解析带通滤波器 $h^0(n)$;再用复解析带通滤波器 $h^0(n)$ 对样本信号 $x(n)$ 作选抽滤波,选抽比为 D ,选抽出 N 点,得到选抽后的复信号 $y(Dn)$;接下来对 $y(Dn)$ 进行复调制移频,将细化的起始频率移到零频点,移频信号为 $s(n)$,得到复调制后信号为 $y_2(n) = y(Dn)s(n)$;最后对 $y_2(n)$ 作 N 点FFT分析,即可以得到具有 N 条独立谱线的细化频谱。

通过细化谱分析方法可以在含有背景噪声的情况下提取出齿轮传动噪声的特征频率,如齿轮啮合频率等。

2 系统总体设计

系统采用差分输入方式,同步采集两路噪声信号,由DSP与FPGA构成的混合结构协同处理^[9],并将信号传输到上位机进行对比分析与显示。系统采用模块化设计思想,首先由两路传声器同步采集噪声信号,经前置放大和抗混频低通滤波后由A/D转换器进行同步转换,再由DSP模块对数据进行分析,送液晶模块实时显示分析结果。为了进一步分析与保存噪声信号,本研究将数据通过USB通讯模块传输到上位机进行多种算法比较分析,以便彻底搞清楚信号特征。这样,系统既具便携式分析特点,又具扩展综合分析特点,系统总体方案如图1所示。

3 系统硬件设计

硬件系统由低通滤波器、A/D转换器、FPGA时序控制器、DSP处理器、键盘控制、串口与USB通讯模块以

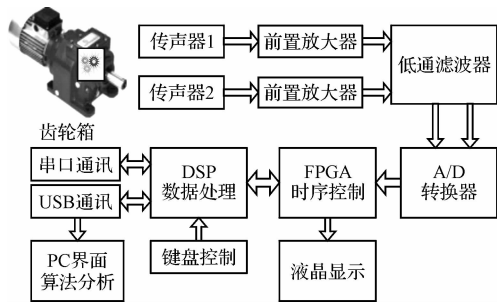


图1 系统总体框图

及液晶显示模块等构成,它们构成了集信号采集、数据处理、人机交互及通讯功能于一体的便携式测量系统。

低通滤波器采用了MAXIM公司的MAX274有源滤波设计芯片^[10],其具有频带宽、外围设计简单等特点,只需匹配好其外围的几个电阻阻值就能设计出各种阶数及类型的滤波器,可以大大提高设计效率。齿轮噪声大致频带在5 kHz以内,该系统设计了上限频率为5 kHz的8阶切比雪夫低通滤波器,滤波特性如图2所示(其中,图2(a)为滤波器的时域特性,图2(b)为滤波器的幅频特性与相频特性)。

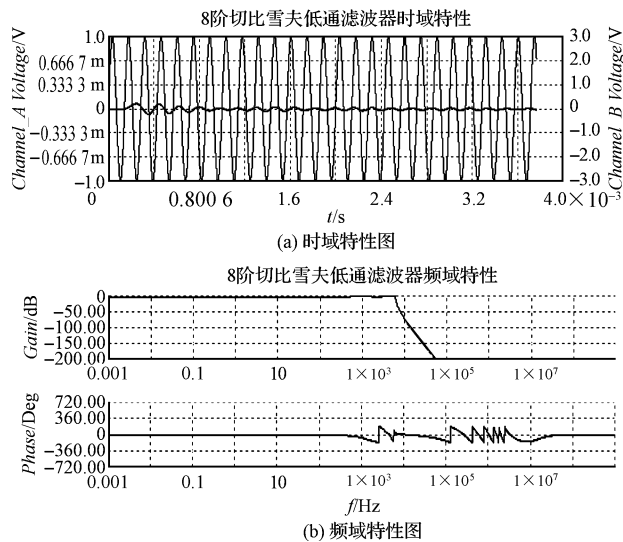


图2 滤波特性图

A/D转换器采用的是ADI公司的AD7656芯片,它是一款具有6通道、同步采样、16位精度、采样速率高达250 ksps的模/数转换器^[11],该系统用了其中两个通道。A/D与LCD的工作时序分别由FPGA控制,采用了Altera公司的Cyclone系列器件EP1C3T144C8,它是一款片上资源丰富、性能优良、高性价比的可编程门阵列。DSP采用了TI公司的TMS320F2812芯片,它是一款主频为150 MHz,数据处理位数高达32位且具有丰富的外设结构的高性能处理器^[12],能轻松控制噪声信号的采集,并快速对数据做算法分析。USB通讯模块采用了SL811HS嵌入式主/从设备控制器,它可

以全速或低速与 PC 设备通信。LCD 显示模块选用了图形点阵式液晶显示器 JM240128A, 内置 t6963c 控制器, 便于开发应用。

4 系统软件设计

系统软件包括 DSP 下位机软件和上位机信号处理软件。其中 DSP 软件实现两路 A/D 同步采样、信号 FFT 分析、键盘控制、LCD 界面显示、USB 及串口通讯功能; 上位机信号处理软件包括数据通讯、数据显示、数据保存、算法分析、图形显示等功能。

4.1 DSP 软件设计

DSP 程序包括 A/D 采样程序、LCD 显示程序、FFT 算法程序、USB 及串口通讯程序, 流程图如图 3 所示。首先进行系统初始化, 设置 DSP 系统时钟, 关看门狗, 初始化外设时钟等; 然后初始化 A/D 转换时序, 等待转换中断的到来; USB 初始化, 设置 USB 通讯功能; LCD 初始化, 设置控制模式及显示模式; 接下来进行 LCD 清屏, 进入开机 LOGO 显示界面, 按启动键进入菜单界面, 包括信号采集、信号分析、USB 通讯 3 个功能模块。移动光标到信号采集模块, 按确定键, 启动 A/D 转换, 进入 A/D 转换子程序, 当完成 N 点数据采样, 自动返回菜单界面; 当选择信号分析模块, 按下“确定”键时, 将 A/D 采集的 N 点数据进行 FFT 分析, 频谱图由 LCD 显示出来; 当选择 USB 通讯模块时, 按“确定”键将 A/D 采集的 N 点数据发送到上位机, 用上位机软件对信号做进一步处理, N 点数据发送完, 自动返回功能菜单界面。

4.2 上位机软件设计

上位机数据处理软件由 VC++6.0 编程, 实现了齿轮噪声信号多种算法对比分析、图像化显示及数据备案保存作用。本研究采用模块化设计结构, 界面包括通讯设置、算法分析、图形显示 3 个模块, 如图 4 所示。

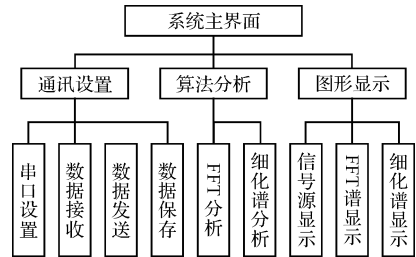


图 4 上位机软件结构

通讯设置模块包括串口设置、数据接收、数据发送及数据保存功能, 实现上位机与下位机便携式仪器之间的数据通讯。算法分析模块有信号 FFT 分析和细化谱分析功能, 首先对采集的噪声信号进行 FFT 分析, 大致分析出齿轮噪声频谱

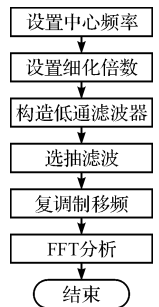


图 5 ZFFT 算法流程图

及其边频带, 然后通过查找主动轮与被动轮齿数及转速等参数计算出齿轮的理论啮合频率, 并以此作为细化谱分析的中心频率, 进行细化分析, 细化谱算法流程图如图 5 所示。首先构造复解析带通滤波器进行带通数字选抽滤波, 重抽样; 然后进行复调制移频, 将要分析的频带的频率起点移到零频率处; 最后进行 FFT 分析。图形显示模块包括原始噪声信号显示、FFT 分析结果显示和细化谱分析结果显示, 通过图形显示更直观地看到噪声信号实时变化和其数据处理的对比结果。软件测试界面如图 6 所示, 它既能实现在线测量结果的实时分析, 又能对历史数据进行分析, 通过窗口输入, 可以设置显示的数据长度、做谱变换点数以及做细化谱分析的参数等, 同时变换结果通过窗口显示出来。

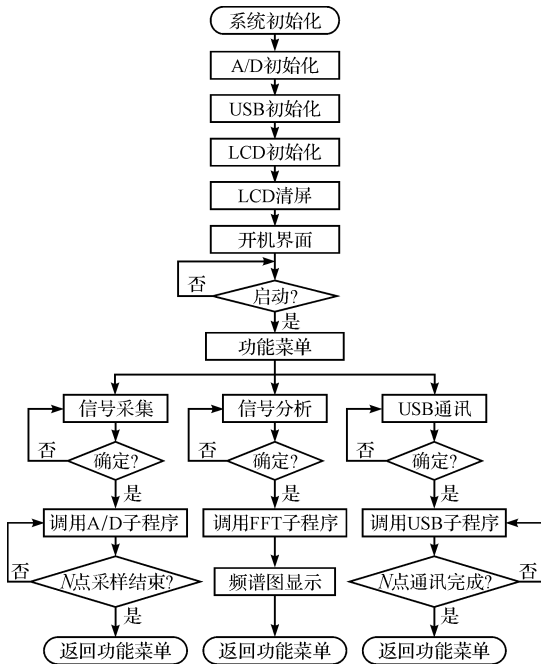


图 3 系统程序流程图

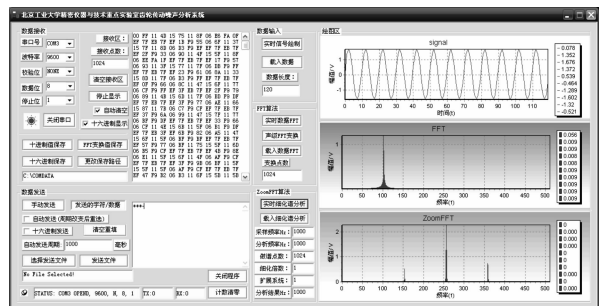


图 6 上位机软件界面

5 实验

本研究对型号为 KAF37-Y4-6.37-M4-270 的变速箱进行了噪声测量试验,变速箱用 ALPHA5000-300GB 型变频器进行调速,设置变频器的输出频率 $f = 15.00$ Hz,变速箱工作参数如下:额定转速为 2 890 r/min,一级斜齿轮副主从动轮齿数分别为 $z_1 = 23$ 、 $z_2 = 31$,传动比为 1.348,啮合频率 $f_1 = 332.35$ Hz;锥齿轮副主从动轮齿数分别为 $z_3 = 15$ 、 $z_4 = 25$,传动比为 1.667,啮合频率 $f_2 = 160.81$ Hz;二级斜齿轮副主从动轮齿数分别为 $z_5 = 15$ 、 $z_6 = 43$,传动比为 2.867,啮合频率为 $f_3 = 96.48$ Hz。所测变速箱噪声时域图及频域图如图 7 所示。

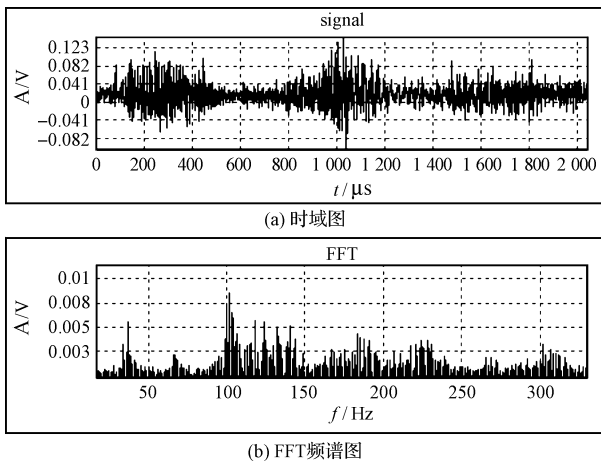


图 7 变速箱时域图及 FFT 频谱图

变速箱齿轮啮合噪声时域图如图 7(a) 所示,呈周期变化;对噪声信号进行 1 024 点 FFT 变换,可分析出一级斜齿频谱,其对应第 34 点谱,如图 7(b) 所示。而锥齿及二级斜齿由于背景噪声较大无法直接通过 FFT 变换分析出来,需要用细化谱算法进行分析,对锥齿轮副进行细化谱分析,结果为 166.65 Hz,对二级斜齿轮副细化谱分析,结果为 99.99 Hz,如图 8 所示。

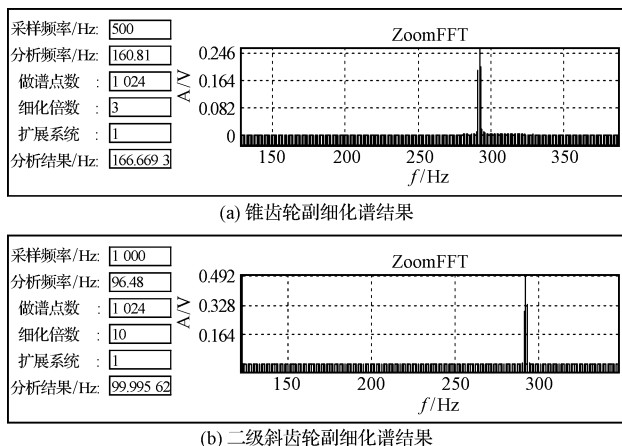


图 8 细化谱分析结果

经过细化谱分析,齿轮啮合频谱很容易被分离出来,通过啮合频谱的能量情况可以定性判断齿轮轮齿的啮合状况。

6 结束语

本研究设计了一种基于 DSP 与 FPGA 混合结构的便携式齿轮传动噪声测量系统,它能现场采集和实时处理齿轮噪声信号,并通过人机交互界面实时显示信号分析结果;系统还可以通过上位机信号处理软件对比分析现场与历史噪声信号,并保存信号处理的结果。

测试实验结果表明:该系统采集精度高,实时处理能力,界面显示直观;在包含背景噪声的情况下,能有效分析出齿轮传动噪声信号中的特征频率,具有一定的工程应用价值。

参考文献 (References):

- [1] SMITH J D. Gear Noise and Vibration[M]. 2nd ed. England: Cambridge University, 2003.
- [2] 庄葆华,李真. 齿轮近代测量技术与仪器[M]. 北京:机械工业出版社,1986.
- [3] YOON K. Analysis of Gear Noise and Design for Gear Noise Reduction[D]. West Lafayette: Purdue University, 1993.
- [4] 张绍栋,孙家麒. 声级计的原理和应用[M]. 北京:中国计量出版社,1986.
- [5] 包瑞新,栗佳,李帆. 基于虚拟仪器技术的齿轮噪声监测仪的开发[J]. 机械振动, 2009, 33(3): 78-82.
- [6] ZHAN Yi-min, MAKIS V, JARDINE A K S. Adaptive state detection of gearboxes under varying load conditions based on parametric modeling[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2006(20): 200-205.
- [7] MILLER A J. A New Wavelet Basis for the Decomposition of Gear Motion Error Signals and Its Application to Gearbox Diagnostics[D]. PA: The Pennsylvania State University, 1999.
- [8] 丁康,李魏华,朱小勇. 齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [9] 刘甜,吴小平,陈洪芳,等. 基于 DSP 和 FPGA 的锥齿轮传动噪声测试分析系统设计[J]. 机械传动, 2010, 34(5): 65-67.
- [10] 丁春香. MAX274 有源滤波器的设计应用[J]. 集成电路通讯, 2007, 25(2): 13-14.
- [11] 李石亮,杨俊安,叶春逢. 基于 AD7656 的多路并行同步音频数据采集系统设计及实现[J]. 现代电子技术, 2008, 31(10): 167-168.
- [12] 孙丽明. TMS320F2812 原理及其 C 语言程序开发[M]. 北京:清华大学出版社,2008. [编辑:张翔]