

振动信号多通道同步整周期数据采集卡设计*

杨世锡^{1,2}, 梁文军^{1,2}, 于保华^{1,2}

(1. 浙江大学液压传动及控制国家重点实验室 杭州, 310027) (2. 浙江大学机械工程学系 杭州, 310027)

摘要 对汽轮发电机组转子的振动信号进行整周期采集有利于提高频谱分析的精度、提高设备状态监测的水平。研究了整周期采集技术,提出了一种基于现场可编程门阵列(field programmable gate array,简称FPGA)的转子振动信号多通道同步整周期数据采集卡的设计方案。该方案采用FPGA技术设计了基于键相信频法的整周期采集控制算法,对两片高速A/D转换芯片进行整周期采集控制,采用乒乓操作的方式将A/D转换数据保存在双口RAM中,以PC104总线协议与主机进行通信。测试结果表明,该采集卡可以准确实现多通道信号的同步整周期采集及键相信号频率测量,且具有体积小、集成度高、采集频率广泛和频率测量精度高等特点,可以广泛应用于转子振动信号的数据采集领域。

关键词 自动控制技术; 振动信号; 数据采集卡; 整周期; PC104总线; 乒乓操作

中图分类号 TH825; TH113.1

引言

汽轮发电机组是国家电力系统中最主要的设备,正朝着大型化和自动化的方向发展^[1],对这类设备进行在线状态监测与故障诊断具有重要意义。机组在线状态监测与故障诊断中,转子的振动信号包含了机组运行状态信息,做故障分析和推理时需要有大量的振动信息,通过振动分析得出机组当前的工作状况,确定运行和维修计划^[2];因此,需要根据转子振动信号的特点设计一款适用于转子振动信号采集的高速、可靠的数据采集卡来满足这种需求。

对于汽轮发电机组这类大型旋转机械设备,转子在运行过程中产生的振动信号既有一定的周期性,又具有一定的随机性,信号的频率分布很广泛,对这种信号进行采集时需要满足采样定理和整周期截断要求,以减少或避免由于频谱泄露和栅栏效应造成的影响;因此,可以对振动信号进行整周期采集来提高频谱分析的精度。整周期采集控制既可以通过软件实现,也可以通过硬件电路实现。基于软件的方法是指重采样法^[3],因为通常数据采集卡都不具备整周期采集控制的功能,所以需要转子的键相信号和振动信号同时进行采集,然后在计算机中利用软件对采集的数据进行分析。根据计算得出的键

相信号频率对振动信号数据进行整周期截断和插补运算,得到整周期采集的数据。这种方法虽然硬件成本较低,但是计算量大、实时性差。

基于硬件电路的方法主要是指设计专门的硬件电路,实现信号整周期采集的功能。这种专门的硬件电路包括两部分:键相信频电路和数据采集电路。由于数据采集卡不具备整周期采集功能,因此需要另外设计键相信频电路以产生键相信频脉冲,用于触发整周期采集。键相信频电路通常采用分立数字元器件^[4]或者以单片机、复杂可编程逻辑器件(complex programmable logic device,简称CPLD)为核心的小型控制电路来实现。这样独立设计的键相信频电路存在以下不足:a. 电路比较复杂,可靠性较低,且设计调试不方便;b. 增大了整周期采集系统的体积;c. 电路开发的成本较高。

为了克服这些不足,笔者提出一种基于FPGA的小体积、紧凑型转子振动信号多通道同步整周期数据采集卡的设计方案。该方案采用FPGA技术设计了键相信频电路和数据采集控制电路,将两种功能集成在一块采集卡上。该数据采集卡以乒乓操作的方式将A/D转换的数据保存在双口RAM中,采用PC104总线协议^[5]与主机进行通信,电路尺寸按照PC104总线规范设计。与传统的整周期数据采集电路相比,该方案具有体积小,集成度高,开发周期

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2009AA04Z410);国家自然科学基金资助项目(11072214)
收稿日期:2011-04-18;修改稿收到日期:2011-08-18

短,采集频率广泛,信号频率测量精度高,兼容工业控制计算机和PC04 嵌入式主板等优点。

1 整周期采集的原理

转子的振动信号通常是周期信号,在对其进行快速傅里叶变换^[6]分析时,希望分析谱线能落在信号的频率上以避免栅栏效应的影响。设某周期信号为 $x(t)$,频率为 f_0 ,采样频率为 f_s ,采样点数为 N ,时间长度为 T ,频率采样间隔为 Δf ,根据DFT变换的原理, Δf 与 T 存在以下关系

$$\Delta f = f_s/N = 1/T \quad (1)$$

为了使分析谱线落在信号频率 f_0 处,从DFT变换的原理来看,频率采样间隔 Δf 与信号频率 f_0 必须满足

$$f_0/\Delta f = Z \quad (2)$$

其中: Z 为正整数。

由式(1)和式(2)计算可得

$$f_0/\Delta f = f_0/(1/T) = T/T_0 = Z \quad (3)$$

其中: T_0 为信号 $x(t)$ 的周期。

式(3)说明采集信号的时间长度 T 与信号周期 T_0 必须满足关系 $T/T_0=Z$ (Z 为正整数),即只有截取的信号长度 T 正好等于信号周期 T_0 的整数倍时,才可能使分析谱线落在周期信号的频率上,获得准确的频谱。

所谓的整周期采集是指采集系统的采样频率动态地跟踪信号频率的变化,以确保每次采集都能采到信号周期固定倍数的数据量,且采样间隔均匀。采用硬件电路实现整周期采集的原理如图1所示。

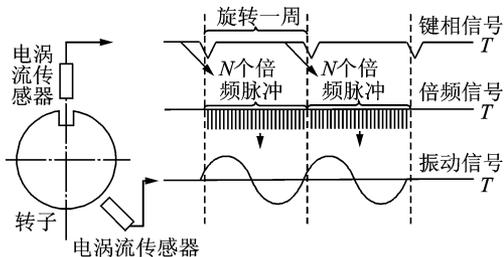


图1 整周期采集原理图

转子旋转一周便产生一个键相脉冲和一个周期的振动信号,利用电涡流传感器可以分别测量得到转子的键相信号和振动信号。基于FPGA的键相倍频电路计算得出键相信号的周期,并根据该周期长度在转子的下一个旋转周期内产生 N 个等间距的键相倍频脉冲信号(N 为2正整数次方),将该脉冲信号用于触发振动信号的A/D采样和转换,即可实

现振动信号的整周期采集。

2 基于FPGA的多通道同步整周期数据采集卡的设计

由于FPGA(现场可编程门阵列)芯片具有集成度高、功耗低、I/O端口多、编程调试方便,内部有丰富的逻辑资源和存储资源等优点^[7],所以选择FPGA作为采集卡的主控芯片,该数据采集卡主要需要实现的功能为:键相信号倍频功能、振动信号整周期采集功能、多通道大容量数据存取功能及基于PC104总线协议的通信功能。

2.1 数据采集卡的硬件电路设计

数据采集卡硬件电路主要由DC-DC电源、稳压芯片、高速A/D转换芯片、增益控制芯片、FPGA主控芯片、电平转换芯片、状态指示灯、拨码开关、PC104总线接口及信号输入接口组成,如图2所示。

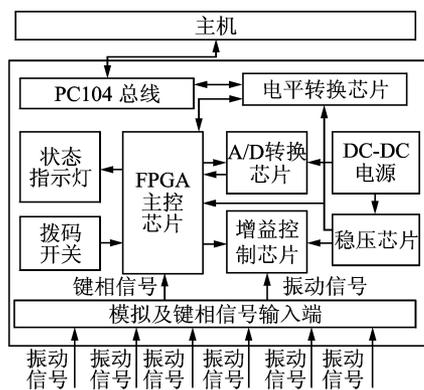


图2 基于FPGA的多通道同步整周期数据采集卡硬件电路方案

2.1.1 硬件电路的工作过程

DC-DC电源和稳压芯片为板卡上的所有其他芯片提供电源。板卡上有一路键相信号输入端和16路振动信号输入端,键相信号输入到FPGA后,由FPGA计算产生倍频脉冲,该脉冲用作振动信号的整周期采集触发脉冲。振动信号经过增益控制芯片后,送入A/D转换芯片的模拟信号输入端,A/D转换芯片在FPGA的控制下,对多路振动信号进行同步整周期采集,A/D转换后的数据首先保存在FPGA内部的双口RAM中,最后通过PC104总线将数据传送给主机。板卡上的电平转换芯片用于匹配FPGA的引脚电平和主机的TTL电平,拨码开关用于设置板卡的基地址,状态指示灯用于显示板卡是否正常工作。

2.1.2 主要芯片选型

FPGA 主控芯片选用 Altera 公司型号为 EP1C6Q240 的 FPGA,其内部拥有 5980 个逻辑单元,20 个 128×36 位的 RAM 块,外部管脚总数达 240,最大可支持 185 个用户 I/O;因此,该芯片非常适用于具有复杂逻辑及存储数据量大的高速数据采集系统。

A/D 转换芯片采用两片 Maxim 公司的 14 位 8 通道高速 A/D 转换芯片 Max1320,一个通道 A/D 转换可在 $1.6 \mu\text{s}$ 内完成,最多可同时对 16 个通道进行采集,16 通道同时采集的最大采样频率达 260 kHz。该芯片的数字供电电压范围为 $3 \sim 5 \text{ V}$,故可以使用与 FPGA 相同的工作电压 3.3 V ,可以免去两者之间为了匹配电平而增加的电平转换芯片,减小电路开销,使电路更加精简和可靠。

2.2 数据采集卡的控制软件设计

为了实现数据采集卡的各项功能,在完成硬件电路设计后还需要编写采集卡的控制软件。该软件在 QUARTUS II 环境中开发,采用模块化的设计思想和自顶向下的设计方式,各模块用 VHDL 语言编程,顶层文件用原理图的方式设计,在顶层文件中将各模块按照接口间的关系连接起来,编译成功后下载在采集卡上的配置芯片中。采集卡的控制软件模块划分如图 3 所示,包括键相倍频模块、定时控制模块、RAM 读写控制模块、双端口 RAM 存储器、增益控制模块、A/D 转换控制模块和 PC104 总线通信模块。

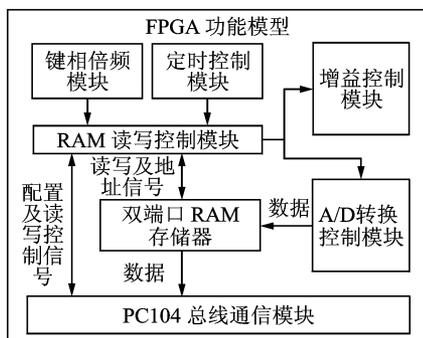


图3 基于FPGA的多通道同步整周期数据采集卡控制软件方案

各模块的功能如下:

1) 键相倍频模块对输入的键相信号进行数字倍频操作,输出的倍频信号用于触发振动信号的整周期采集,倍频系数可根据实际需要设定;

2) 定时控制模块实现采集卡的定时采集功能,

即通过设置采样频率对信号进行固定频率的采样;

3) RAM 读写控制模块,是整个控制软件的协调枢纽,主要对双端口 RAM 存储器的 A/D 转换数据输入、输出进行控制;

4) 双口 RAM 存储器是 FPGA 内部的两个存储宽度和深度为 16×2048 位的存储器宏模块,输入和输出端都有独立的控制信号线和地址信号线;

5) 增益控制模块对增益控制芯片进行控制,可选增益为 1,2,4,8;

6) A/D 转换控制模块对两片高速 A/D 转换芯片 Max1320 进行控制,A/D 转换的控制时序采用状态机编程,主要状态的作用为复位、A/D 芯片初始化、等待 A/D 启动信号、等待触发采样信号、向 A/D 芯片发送采样保持信号、等待 A/D 转换完毕信号、读取 A/D 转换数据和向 RAM 读写控制模块发送一次 A/D 转换完毕信号等;

7) PC104 总线通信模块定义了多个 16 位的功能寄存器,包括数据寄存器、状态寄存器、工作模式寄存器、倍频系数寄存器、采样频率寄存器、采样点数寄存器和增益控制寄存器等,主机可以根据这些寄存器各自的功能对其进行 16 位的读或者写操作,从而实现通信功能。

3 数据采集卡的关键技术

3.1 基于FPGA的键相倍频技术

基于FPGA的整周期数据采集卡的关键技术之一在于利用FPGA实现键相倍频算法,采用FPGA来实现该功能的优势在于:键相倍频的范围广,信号频率跟踪速度快,电路精简,编程、调试方便,开发效率高。本设计采用VHDL语言描述键相倍频电路,电路的设计方案如图4所示,主要包括时钟同步处理器、分频器、加法计数器、线性预测器和减法计数器。

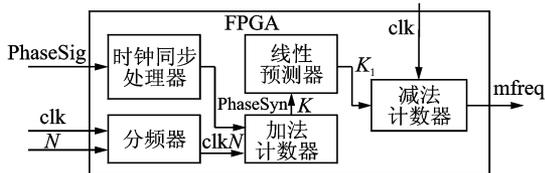


图4 基于FPGA的键相倍频电路方案

基于FPGA的键相倍频电路工作流程为:a. 时钟同步处理器对输入的不规则键相信号PhaseSig进行预处理,使其输出信号PhaseSyn的高电平脉冲

宽度只有一个时钟周期的宽度;b.分频器对系统时钟 clk 进行 N 分频,得到时钟分频信号 $clkN$;c.加法计数器对 PhaseSyn 信号一个周期内的时钟分频信号 $clkN$ 进行计数,得到计数值 K ;d.线性预测器根据当前输入的 K 值和键相信号上一周期的 K 值利用线性插值法计算出键相信号下一个周期的周期预测值 K_1 ;e.将 K_1 值送入减法计数器作为计数器的初始计数值,减法计数器做减法运算的溢出信号即为所需的倍频信号 $mfreq$,该信号即可用作 A/D 转换的时钟触发信号,实现整周期采集控制。

数据采集卡采用的系统时钟为 20 MHz,倍频系数可以设置为 32,64,128 等 2 的整数次方。假定设置倍频系数为 64,则该模块理论上可实现对频率高达 30 kHz 的脉冲信号进行倍频操作,频率跟踪范围很广,可以满足大型旋转机械转子振动信号的整周期采集控制要求。

3.2 基于双口 RAM 的数据存取乒乓操作技术

为了满足多个通道振动信号同时采集时数据量大、需要快速存取的需求,本设计采用基于双口 RAM 的乒乓操作策略来保存和读取 A/D 转换的数据。乒乓操作是一种经常用于数据流控制的处理技术,典型操作方法如图 5 所示。数据缓冲模块可以为任何存储器,常用的包括先进先出(FIFO)存储器、双口 RAM(DPRAM)存储器和单口 RAM(SPRAM)存储器等^[8]。

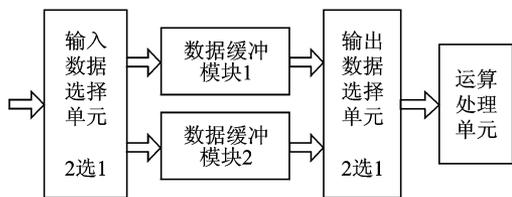


图5 乒乓操作的原理图

乒乓操作的工作流程如下:在第 1 个缓冲周期将输入的数据流缓存到数据缓冲模块 1,在第 2 个缓冲周期通过输入数据选择单元的切换,将输入的数据流缓存到数据缓冲模块 2,同时,将数据缓冲模块 1 缓存的第 1 个周期的数据通过输出选择单元的选择,送到运算处理单元进行处理。在第 3 个缓冲周期,再次切换数据的进入与输出缓冲模块。乒乓操作系统即按照这种循环方式一直工作。

在本设计中,乒乓操作的数据源为多个通道 A/D 转换的数据,两个数据缓冲模块都采用 FPGA 内部的存储大小为 16×2048 位的双口 RAM 存储器宏模块,运算处理单元为 PC104 总线通信模块,多个通

道的 A/D 转换数据在双口 RAM 中按照通道采样的先后顺序依次保存和读取。基于双口 RAM 的数据存取乒乓操作的主要优点在于:通过输入和输出数据选择单元按节拍相互配合切换,将经过缓冲的数据流没有停顿地送到运算处理单元,保证 A/D 转换的数据保存工作和上位机读取数据工作连续不断进行,提高数据采集速度。

4 基于FPGA的多通道同步整周期数据采集卡测试

4.1 测试系统的搭建

整个测试系统主要由以下几部分组成:基于 FPGA 的多通道同步整周期数据采集卡(如图 6 所示)、两台信号发生器及带 ISA 插槽的工业控制计算机(如图 7 所示)。两台信号发生器中,一台为美国泰克公司的 AF G3021B 任意波形发生器,用于产生标准的正弦信号;另一台为我国台湾省固纬公司的 SFG-2120 函数信号发生器,用于产生具有一定占空比的方波信号。

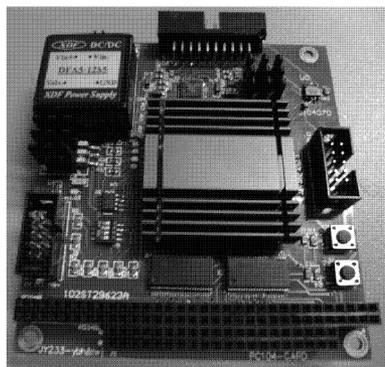


图6 基于FPGA的多通道同步整周期数据采集卡实物

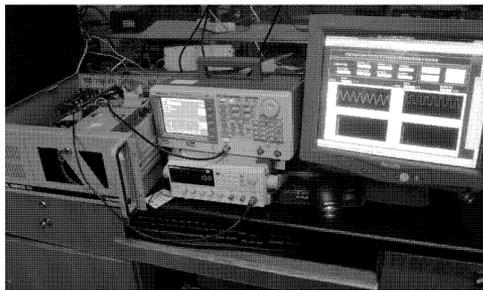


图7 信号发生器及工业控制计算机构建的测试系统

基于PC104 总线的数据采集卡经过接口转换后可以插在工业控制计算机的 ISA 总线上,利用 ISA 总线的读、写函数来访问。笔者采用 LabVIEW 编程语言^[9]开发了数据采集卡的测试程序,包括数据采

集、数据处理及波形显示。LabVIEW 是图形化编程,且开发软件中自带了多种总线的驱动函数,包括 ISA 总线的读、写函数,开发周期短,非常适用于工业测控场合。基于 LabVIEW 的数据采集卡测试程序的采集方式为全满查询方式,即采集卡完成一次采集任务后,乒乓操作的双口 RAM 中的一个数据缓冲模块便已存满数据,此时采集卡的状态寄存器中的全满标志位便会置1,上位机通过查询读取到该信号后,紧接着将读取采集卡中的 A/D 转换数据并且将状态寄存器的全满标志位清零,数据读取完毕后,上位机对采集的数据进行后续处理和显示。

4.2 系统测试实验及结果

信号设置:正弦信号幅度设置为 2 V,用作采集卡的模拟信号输入,连接到第零通道;方波信号幅度设置为 3.3 V,用作采集卡的键相信号输入,同时也作为一路模拟信号输入连接到第 1 通道。将两种信号设置成相同的频率,依次设置为 10 Hz,100 Hz,1 kHz。

采集参数设置:采样通道数为 2,起始通道为 0,结束通道为 1,单通道采样点数为 512,触发方式为 1,即键相倍频触发,倍频系数为 64。理论上测试系统采集不同频率下的信号时,每次每个通道应采集 8 (512/64)个周期的数据。

图 8~10 分别是频率为 10 Hz,100 Hz 和 1 kHz 时系统某次采集到的正弦信号和方波信号的时域波形及频谱分析图。可以看出,在不同的信号频率下,测试系统两个通道都采集到 8 个周期的数据,采集信号幅度与信号发生器产生的信号幅度基本相同。信号频谱分析的结果显示,采集信号频率与实际信号频率一致,且当信号频率分别为 10 Hz,100 Hz,1 kHz 时,键相信号的测量频率分别为 10.000 3,100.064 和 998.403 Hz,频率测量误差百分比分别为 0.00%,0.06%,0.15%。若将键相信号的频率换算

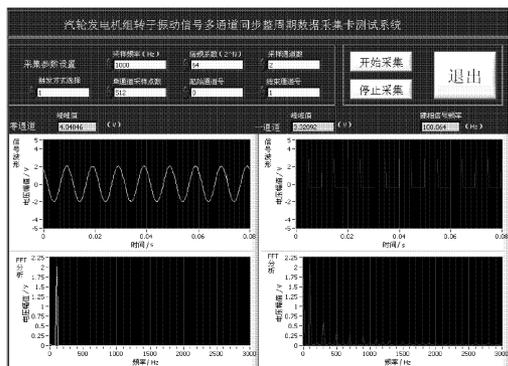


图9 信号频率为 100 Hz 时系统测试结果

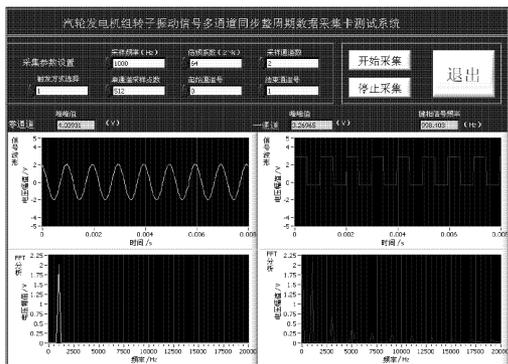


图10 信号频率为 1 kHz 时系统测试结果

成转子的转速,则 3 种频率分别对应 600 r/min,6 kr/min,60 kr/min,按照以上频率测量误差百分比计算分别可得转速测量误差为 0,3.6,90 r/min。可以发现,键相信号的频率测量误差百分比随着信号的频率增大而增大,其原因在于使用的信号频率测量方法为测周期长度法,即在周期信号的一个周期内对采集卡的系统时钟信号脉冲进行计数,若信号周期越长,则计数值越大,频率测量精度越高;若信号周期越短,即信号的频率越高,则计数值越小,信号频率测量的误差也将增大。

参考汽轮机安全监视装置技术条件国家标准的规定^[10]:对于数字式转速表,量程为 0~9.999 kr/min,对于转速测量精度,静态误差范围为 $\pm 0.25\%$,动态误差范围为 $\pm 0.5\%$ 。

从试验结果可知,当转速高达 60 kr/min 时,转速测量的动态误差百分比仅为 0.15%,符合汽轮机安全监视装置技术条件国家标准的规定,且一般大型汽轮发电机组转子的正常工作转速为 3 kr/min,0.15% 以内的转速测量误差百分比完全可以接受。测试结果表明,笔者设计的基于 FPGA 的多通道同步整周期数据采集卡能准确实现周期信号的多通道同步整周期采集及键相信号频率、转速测量,采集频

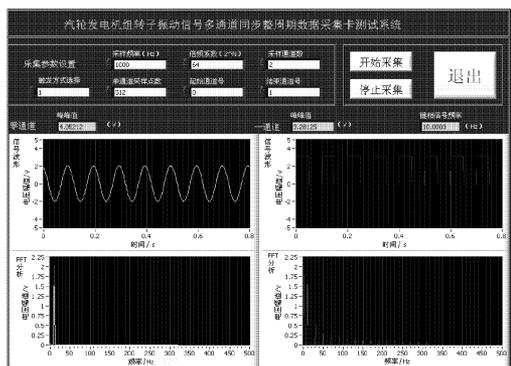


图8 信号频率为 10 Hz 时系统测试结果

率范围完全适用于汽轮发电机组转子振动信号的工作频段,可以广泛应用于汽轮发电机组的状态监测中。

5 结 论

基于多通道、大容量、小型化和集成化的设计理念,设计了基于FPGA的转子振动信号多通道同步整周期数据采集卡及其测试软件。在设计开发的过程中,攻克了基于FPGA的键相倍频控制整周期采集技术、基于双口RAM的大容量数据存取乒乓操作技术和基于PC104总线的数据通信技术等相关。基于FPGA的键相倍频技术,使该数据采集卡非常适用于汽轮发电机组转子振动信号的整周期采集及转速测量,且具有相当高的采集精度。数据存取采用乒乓操作策略提高了数据存取的速度。采用PC104总线规范设计的数据采集卡有效减小了数据采集系统的电路体积,降低了系统功耗,提高了系统集成度,兼容工业控制计算机和PC104嵌入式主板。经过测试表明,笔者设计的数据采集卡能够准确实现周期信号的多通道同步整周期等相位采集及键相信号频率测量功能,可以广泛应用于汽轮发电机组转子振动信号的数据采集当中。

参 考 文 献

[1] Xu Qingyang, Meng Xianhao, Wang Ning. Gas turbine fault diagnosis based on ART2 neural network [C]//WCICA 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing: [s. n.], 2008: 5244-5248.

[2] 何青,李红,何子睿. 基于CAN总线远程振动监测系统研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4): 398-400.
He Qing, Li Hong, He Zirui. Study on the CAN bus-based remote vibration monitoring system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 398-400. (in Chinese)

[3] 胡劲松,杨世锡. 转子振动信号同步整周期重采样方法的研究[J]. 动力工程, 2008, 28(3): 488-492.
Hu Jingsong, Yang Shixi. Study on method of vibration signal's full period synchronous re-sampling for rotor [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(3): 488-492. (in Chinese)

[4] 牛玉广,侯维宁. 多通道信号的同相位整周期采样[J]. 数据采集与处理, 1997, 12(2): 114-117.
Niu Yuguang, Hou Weining. Multi-channel signal's full period and synchronous sampling[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1997, 12(2): 114-117. (in Chinese)

[5] 陈勇,刘晓平,应怀樵. 基于PC104的高性能便携式数据采集系统[J]. 测控技术, 2009, 28(1): 24-27.
Chen Yong, Liu Xiaoping, Ying Huaiqiao. High quality and portable data acquisition system based on PC104 bus[J]. Measurement and Control Technology, 2009, 28(1): 24-27. (in Chinese)

[6] Rapuano S, Harris F J. An introduction to FFT and time domain windows [J]. Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE, 2007, 10(6): 32-44.

[7] Rodriguez-andina J J, Moure M J, Valdes M D, et al. Features, design tools, and application domains of FPGAs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 1810-1823.

[8] 林辉,苏振强. 一种基于VHDL的乒乓操作控制法的研究[J]. 电子测量技术, 2008, 31(9): 170-173.
Lin Hui, Su Zhenqiang. Research on pipeline control method based on VHDL[J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(9): 170-173. (in Chinese)

[9] 罗光坤,张令弥. 多通道虚拟动态测试分析系统的设计[J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27(1): 40-44.
Luo Guangkun, Zhang Lingmi. Design of multi-channel virtual dynamic test and analysis system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007, 27(1): 40-44. (in Chinese)

[10] 国家标准化工作委员会. GB/T 13399-1992. 汽轮机安全监视装置技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.



第一作者简介:杨世锡,男,1968年1月生,教授、博士生导师。主要研究方向为机械系统状态监测与故障诊断、智能检测、机电系统控制等。曾发表《旋转机械故障特征提取与模式分类新方法》(北京:科学出版社,2012)等论著。
E-mail: yangsx@zju.edu.cn