

《仪器系统设计基础》第十四讲

动态信号分析仪



仪器科学与工程系专业必修课

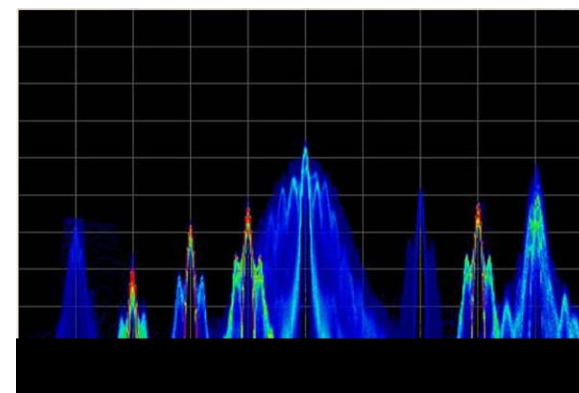
主讲： 宋开臣 教授

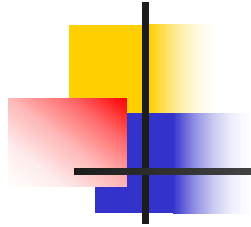
kcsong@zju.edu.cn

13600513662

动态信号分析仪讲座内容

- 一. 信号分析仪概述
- 二. 输入输出通道与接口设计
- 三. 实时信号处理系统设计
- 四. 信号分析仪的PC端软件
- 五. 动态信号分析仪设计实例
- 六. 信号分析仪最新产品





一. 信号分析仪概述

- 1、什么是信号分析仪
- 2、信号分析仪的基本功能
- 3、信号分析仪的种类
- 4、信号分析仪的发展趋势

1、什么是信号分析仪

信号分析仪是以微处理机为中心，由硬件和软件来实现信号分析的一种仪器。它用数字化信号处理技术，对动态随机信号进行实时采样、处理和显示。数字处理技术的数学基础是概率论和傅里叶分析。





2、信号分析仪的基本功能

信号采集功能（DAQ）：

测量信号：±10V电压，ICP加速度计，转速脉冲。

测量通道数：多通道输入+1通道转速+触发通道。

触发源：内触发，外触发。

触发方式：上升，下降，窗口，自动，手动触发。

测试方式：连续示波，频域平均，转速跟踪。

程控放大：多级程控放大器（1，10，100，1000）

动态范围：一般80~130dB

频率范围：10Hz~100kHz



2、信号分析仪的基本功能

动态分析功能：

窗函数：矩形，三角，汉宁，海明。

谱分析：幅值，对数，功率，相干，倒谱。

数值计算：单峰，峰峰，有效值，平均值。

巡检数采功能：

自动诊断功能。

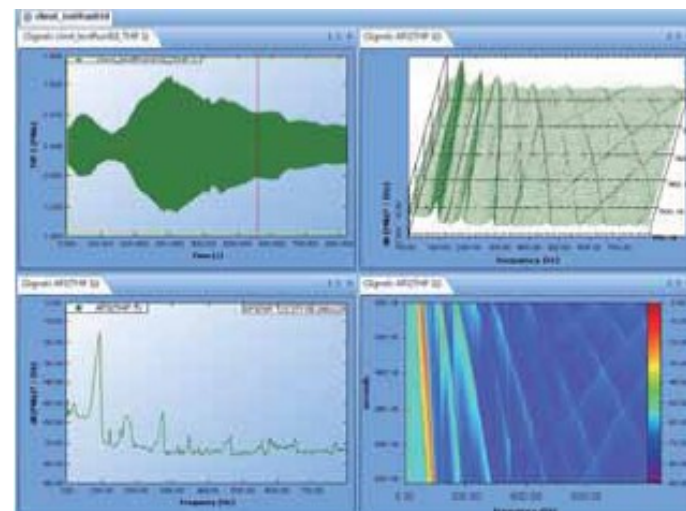
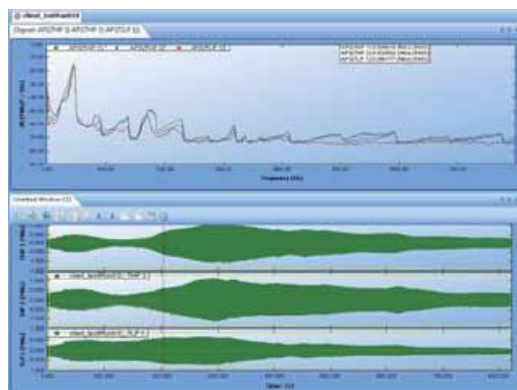
起停车分析。

波形记录与回放（无纸记录仪）。

单双面动平衡。

3、信号分析仪的种类

- 动态信号分析仪。
- 音频信号分析仪。
- 数字信号分析仪。
- 射频信号分析仪。
- 网络信号分析仪。



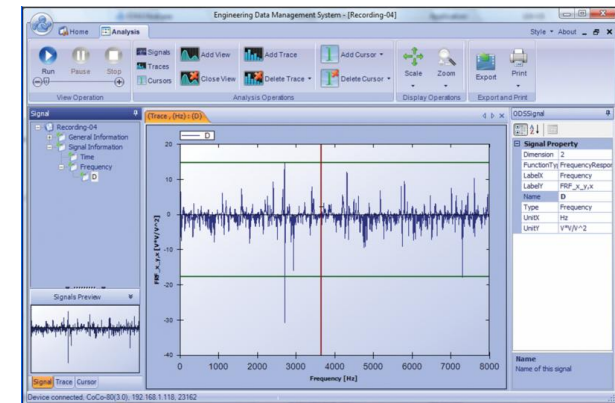


4、信号分析仪的发展趋势

- 采样通道逐渐增多，采样频率分辨率、精度逐步提高。
- 分析功能逐步完善，时域分析、波形分析、模态分析、频谱分析、传递函数分析、相关分析、机械故障分析和诊断等。
- 频率分辨率越来越高，细化功能越来越强，信号分析的结果越来越精确。
- 显示能力进一步加强。
- 集高速数据采集、传输、存储、实时处理、数学分析与估计于一体。

二. 输入输出通道与接口设计

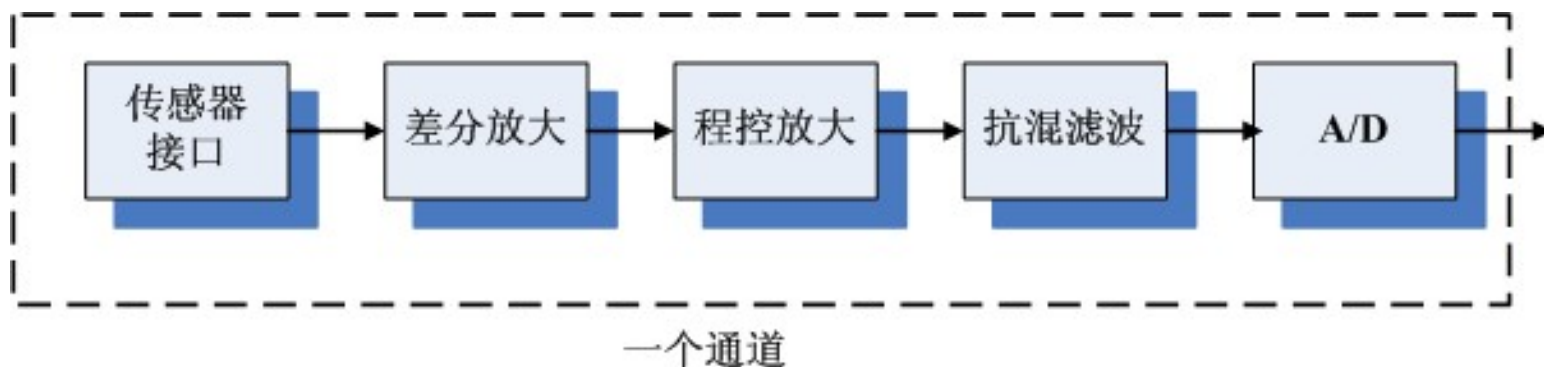
- 1、 输入通道构成
- 2、 信号的获取方法
- 3、 信号调理电路设计
- 4、 A/D转换
- 5、 模拟量输出通道



1、输入通道构成

前端数据采集电路的基本构成：

对于模拟输入通道，输入信号经过传感器选择接口前端处理（隔直、电荷放大、积分等）后，再经过差分放大，程控增益放大，抗混叠滤波，然后通过A/D采样，最后送入数字系统。如下图所示：





2、信号的获取方法

前端传感器接口设计

数据采集是信号分析基础，主要任务就是要在现场获得机器的状态数据。这些数据来自包括振动、温度、压力、电机、电流等种类繁多的信号源，在接口设计时要通盘考虑。动态测试常用电压输入和ICP加速度传感器输入。

1. 电压输入（单端输入、差分输入）
2. 电桥放大器（温度、压力）
3. 电荷放大器（振动传感器）
4. ICP驱动电路（振动传感器）
5. TEDS传感器接口（智能传感器）

2、信号的获取方法

常规传感器接口设计

在信号处理与分析过程中常用的传感器有压电式加速度传感器，温度传感器，压力传感器，转速传感器等。

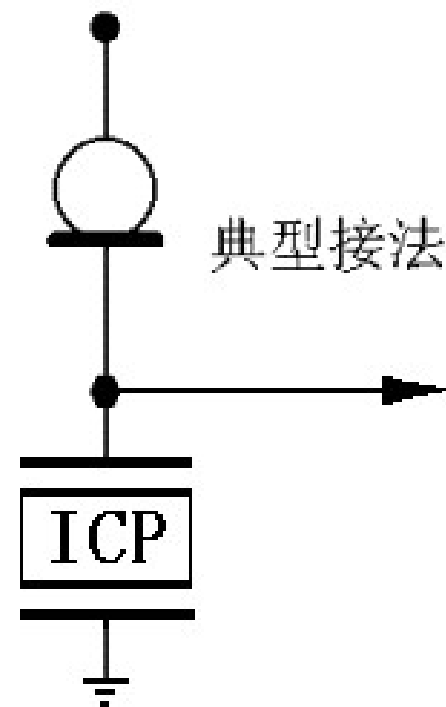
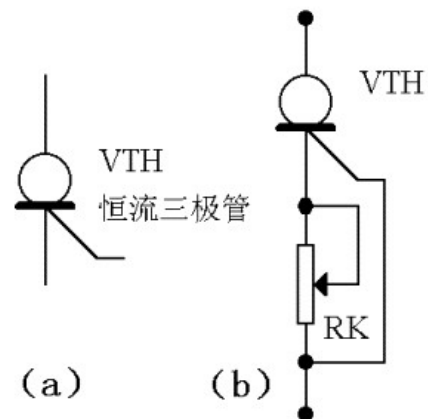
ICP传感器：内置电路压电传感器（ICP Sensor, Internal Electronics Piezoelectric Sensor）



2、信号的获取方法

ICP传感器接口设计

ICP传感器用恒流电路供电，直接输出电压。

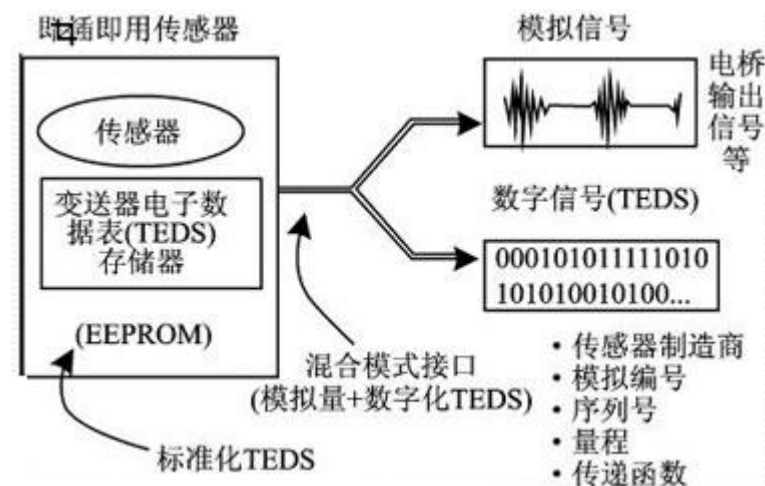


2、信号的获取方法

智能传感器（TEDS）接口设计

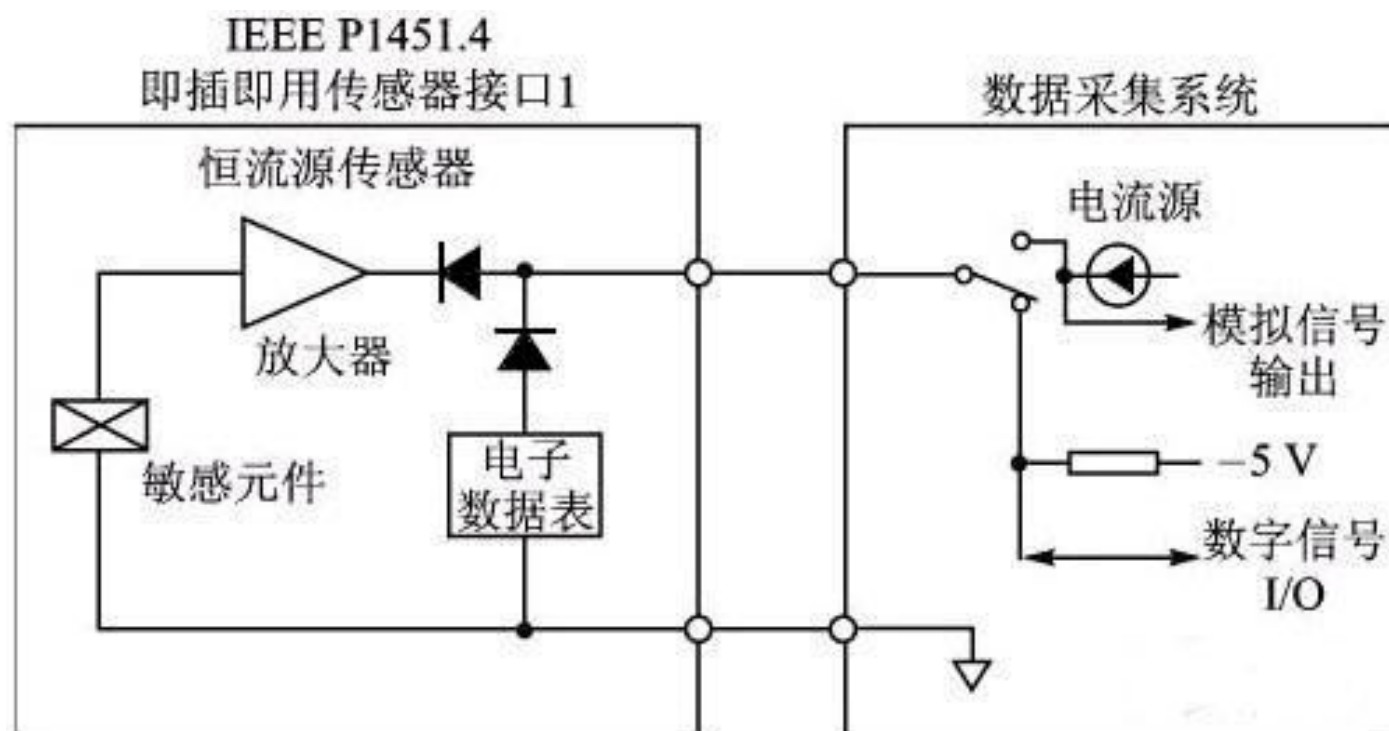
基于**IEEE1451. 4标准**[关于传感器电子数据表(**TEDS**)]的传感器即插即用硬件产品。将数字信息调制在模拟信号上。

TEDS技术是在传感器内部，利用一个嵌入式**EEPROM**芯片，以数字化方式存储比例参数、校准和传感器厂商信息等数据，从而消除纸上记录的传感器数据表，简化传感器配置，消除数据输入时出错的可能。



2、信号的获取方法

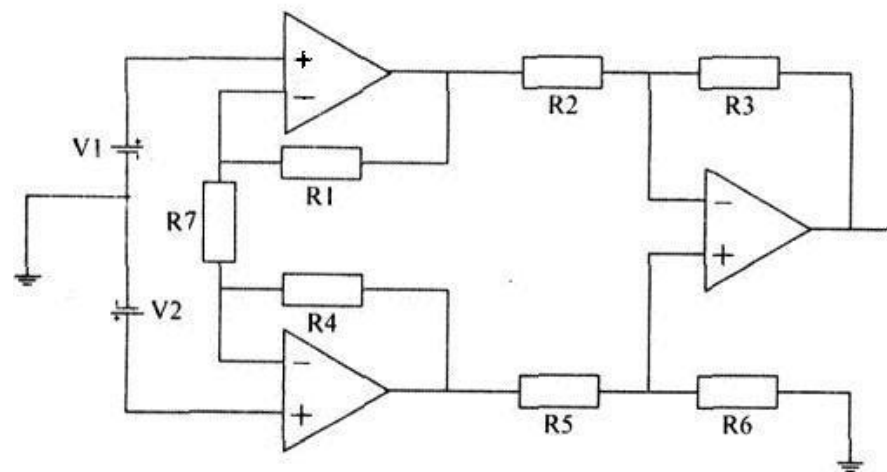
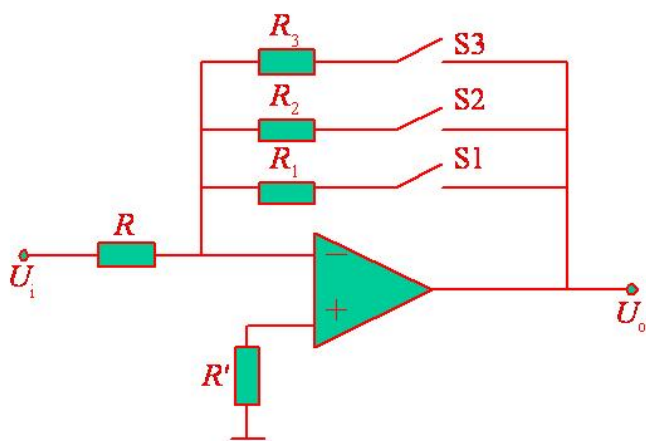
智能传感器（TEDS）接口电路原理



3、信号调理电路设计

前端调理电路---增益调节电路设计

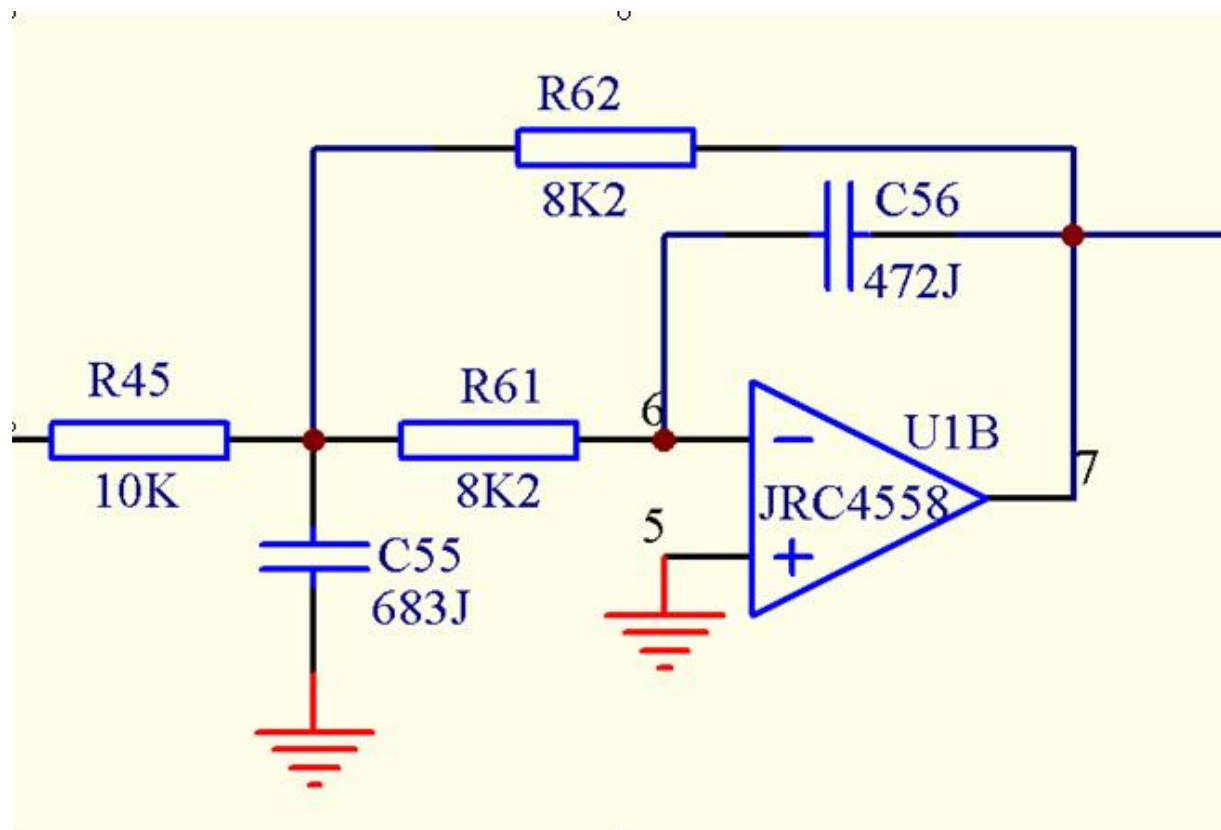
各种传感器采集的信号最终转变为电压信号，其幅值大小各异。为了获得更好的动态测量范围，增加增益调节环节，多用程控增益放大器和可变增益仪表放大器实现。



3、信号调理电路设计

前端调理电路---抗混滤波设计

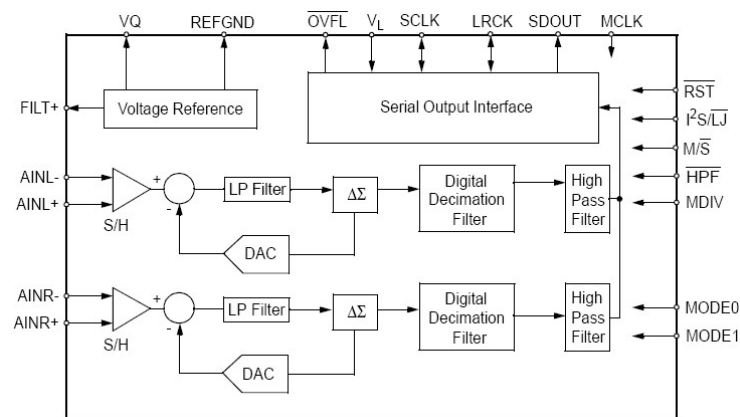
截止频率为 **100kHz** 模拟滤波器防止发生混叠现象



3、信号调理电路设计

A/D转换器的性能是信号分析仪的重要指标

多采用**24位音频A/D转换器**，最高可达 **96kHz** 实时分析频率(采样频率为 **192kHz**)



CS5361

114 dB, 192 kHz, Multi-Bit Audio A/D Converter

Features

- Advanced Multi-bit Delta-Sigma Architecture
- 24-Bit Conversion
- 114 dB Dynamic Range
- -105 dB THD+N
- System Sampling Rates up to 192 kHz
- Less than 150 mW Power Consumption
- High Pass Filter or DC Offset Calibration
- Supports Logic Levels Between 5 and 2.5V
- Differential Analog Architecture
- Linear Phase Digital Anti-Alias Filtering
- Overflow Detection

General Description

The CS5361 is a complete analog-to-digital converter for digital audio systems. It performs sampling, analog-to-digital conversion and anti-alias filtering, generating 24-bit values for both left and right inputs in serial form at sample rates up to 192 kHz per channel.

The CS5361 uses a 5th-order, multi-bit delta-sigma modulator followed by digital filtering and decimation, which removes the need for an external anti-alias filter. The ADC uses a differential architecture which provides excellent noise rejection.

The CS5361 is ideal for audio systems requiring wide dynamic range, negligible distortion and low noise, such as A/V receivers, DVD-R, CD-R, digital mixing consoles, and effects processors.



4、模拟量输出通道

模拟电压输出电路设计

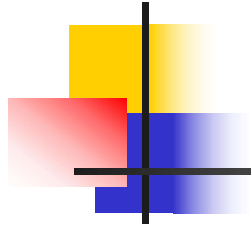
D/A转换设计:

采用**24**位分辨率的音频**D/A**转换器, 可高达**100kHz** 模拟输出频率(刷新频率为 **200kHz**)

滤波器设计:

截止频率为 **100kHz** 模拟滤波器。

电压输出范围: $\pm 10\text{V}$ 。



三. 实时信号处理系统设计

- 1、数字处理系统设计
- 2、**DSP**和**FPGA**的选择
- 3、程序加载方式
- 4、**DSP**软件设计

1、数字处理系统设计

内嵌DSP系统:

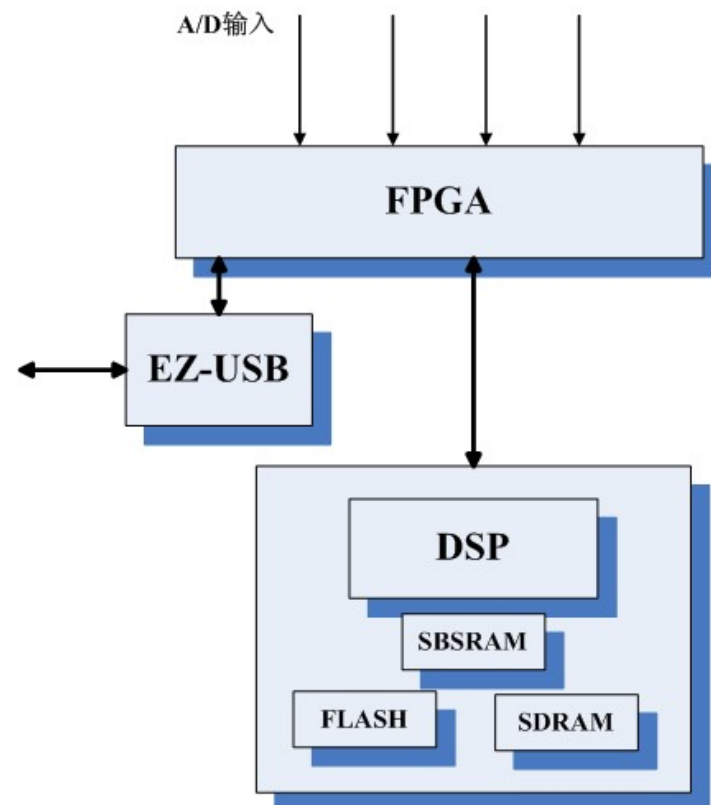
主要完成信号实时处理，包括控制数据采集、数据存储和传输、FFT运算、控制与PC机通信等。

FPGA:

USB 和 DSP 之间的高速数字接口，完成全部逻辑电路功能和DSP Bootloader 管理。

EZ-USB:

负责与上位机通信，FPGA程序加载。



2、DSP和FPGA的选择

DSP:

选择TI公司的
TMS320VC33。



TMS320VC33 DIGITAL SIGNAL PROCESSOR

SPRS087B – FEBRUARY 1999 – REVISED JULY 2000

- High-Performance Floating-Point Digital Signal Processor (DSP):
 - TMS320VC33-150
 - 13-ns Instruction Cycle Time
 - 150 Million Floating-Point Operations Per Second (MFLOPS)
 - 75 Million Instructions Per Second (MIPS)
 - TMS320VC33-120
 - 17-ns Instruction Cycle Time
 - 120 MFLOPS
 - 60 MIPS
- 34K × 32-Bit (1.1-Mbit) On-Chip Words of Dual-Access Static Random-Access Memory (SRAM) Configured in 2 × 16K plus 2 × 1K Blocks to improve Internal Performance
- x5 Phase-Locked Loop (PLL) Clock Generator
- Very Low Power: < 200 mW @ 150 MFLOPS
- 32-Bit High-Performance CPU
- 16-/32-Bit Integer and 32-/40-Bit Floating-Point Operations
- Four Internally Decoded Page Strobes to Simplify Interface to I/O and Memory Devices
- Boot-Program Loader
- EDGEMODE Selectable External Interrupts
- 32-Bit Instruction Word, 24-Bit Addresses
- Eight Extended-Precision Registers
- On-Chip Memory-Mapped Peripherals:
 - One Serial Port
 - Two 32-Bit Timers
 - Direct Memory Access (DMA) Coprocessor for Concurrent I/O and CPU Operation
- Fabricated Using the 0.18-μm (l_{eff}-Effective Gate Length) TlmeLine™ Technology by Texas Instruments (TI)
- 144-Pin Low-Profile Quad Flatpack (LQFP) (PGE Suffix)
- Two Address Generators With Eight Auxiliary Registers and Two Auxiliary Register Arithmetic Units (ARAUs)
- Two Low-Power Modes
- Two- and Three-Operand Instructions
- Parallel Arithmetic/Logic Unit (ALU) and Multiplier Execution in a Single Cycle
- Block-Repeat Capability
- Zero-Overhead Loops With Single-Cycle Branches
- Conditional Calls and Returns
- Interlocked Instructions for Multiprocessing Support
- Bus-Control Registers Configure Strobe-Control Wait-State Generation
- 1.8-V (Core) and 3.3-V (I/O) Supply Voltages
- On-Chip Scan-Based Emulation Logic, IEEE Std 1149.1† (JTAG)

2、DSP和FPGA的选择

FPGA:

选择XILINX公司的Spartan-II。

Spartan® FPGA 为成本敏感型应用提供了最佳的低风险、低成本、低功耗和高性能均衡。第六代 **Spartan** 系列产品基于公认的低功耗 **45nm**、**9-金属铜层**、**双栅极氧化层** 工艺技术，提供了高级功耗管理技术、**150,000**个逻辑单元、集成式 **PCI Express®** 模块、高级存储器支持、**250 MHz DSP slice** 和 **3.125Gbps** 低功耗收发器。





3、程序加载方式

1. EZ-USB 枚举:

当PHOTON的USB电缆与上位机PC相连接时，EZ-USB开始枚举过程，枚举成功后将其8051内核执行代码从上位机下载到本地EZ-USB内存中，并开始运行，完成第一步加载。

2. FPGA 逻辑加载:

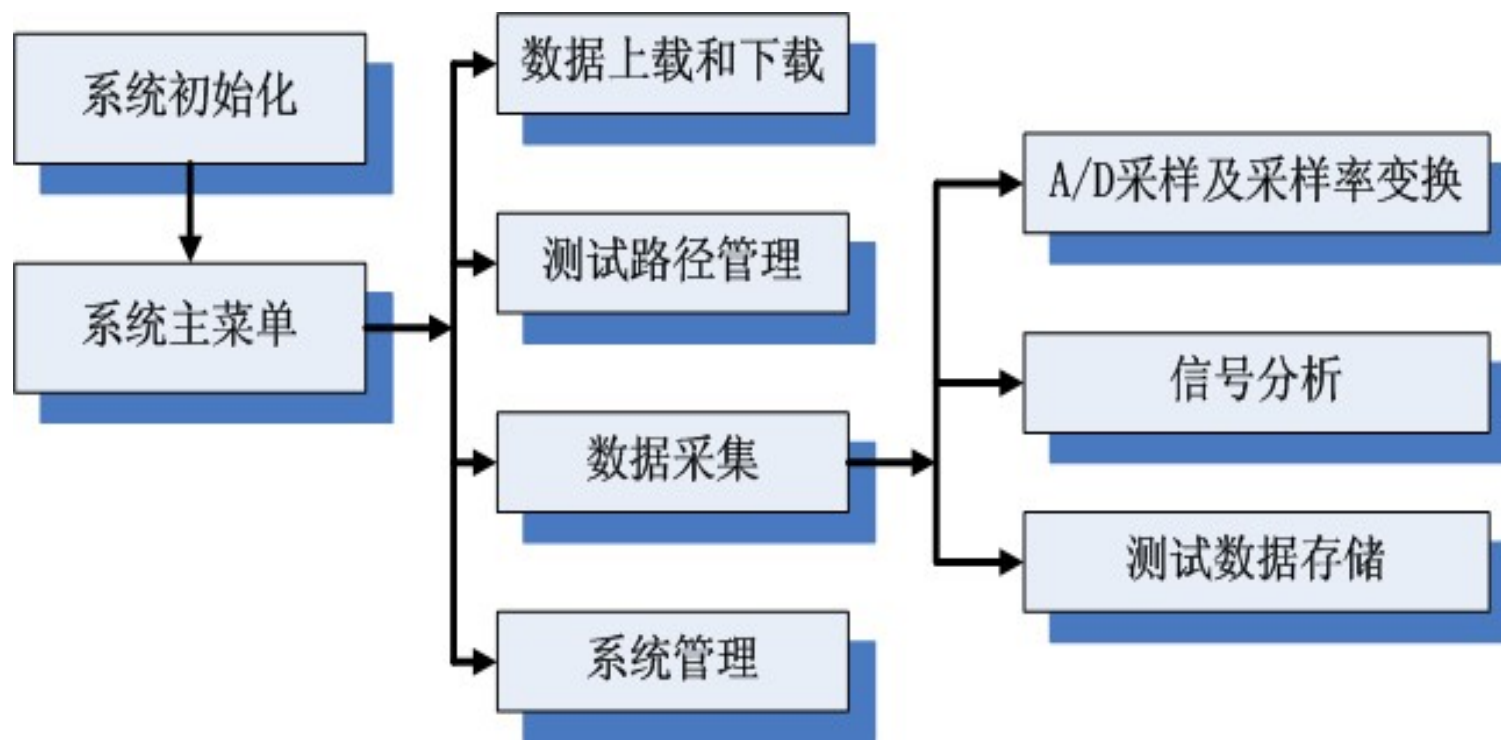
PHOTON系统中的FPGA选择Xilinx公司的Spartar-II系列芯片，并采用从串模式加载。在EZ-USB启动成功后，其8051内核执行代码开始从上位机下载FPGA逻辑代码，将其装订到FPGA中，完成装订后开始启动FPGA运行，完成第二步加载。

3.DSP 逻辑加载:

PHOTON系统中的FPGA运行后，EZ-USB通过FPGA可控制DSP进入Bootloader状态。程序从上位机依次经过EZ-USB，FPGA装订到DSP中，然后启动DSP运行，完成第三步加载。

4、DSP软件设计

DSP软件功能框图：





4、DSP软件设计

DSP软件功能1

测试路径管理

测试路径定义现场每一测点处所需的传感器类型、测试参量及分析要求,完整反映测试的条件和技术要领。测试路径管理完成路径的定义、修改、存储、删除及巡航。

无需对现场操作仪器的人员提出较高的技术要求,简化测试过程,加快测试速度,同时也使测试结果长期保持一致。



4、DSP软件设计

DSP软件功能2

测试数据存储管理

测试数据是与某一测点相关联的,每一存储的测试数据都有一个短小的数据结构,类似 **PC** 机文件系统的文件控制块(**FCB**),定义数据的细节。

对已存储的数据,可以进行数据的查询、回放,如需删除,要用密码授权,保证数据安全。存储的数据可通过 **USB**通讯口上载到 **PC**机中。



4、DSP软件设计

DSP软件功能3

数据上载、下载通讯及管理

它提供了仪器和 **PC**机数据交换通道。

测试前 ,用下载功能 ,仪器从 **PC**机获得预先定义好的路径数据 ,直接用于测试。

测试时 ,用上载功能 ,仪器将从现场获得的数据传回 **PC**机中。同时，也可以实时获得**PC**机发出的相关指令，并作出响应。

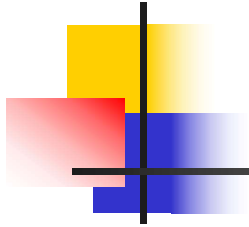


4、DSP软件设计

DSP软件功能4

数据采集和多采样率变换

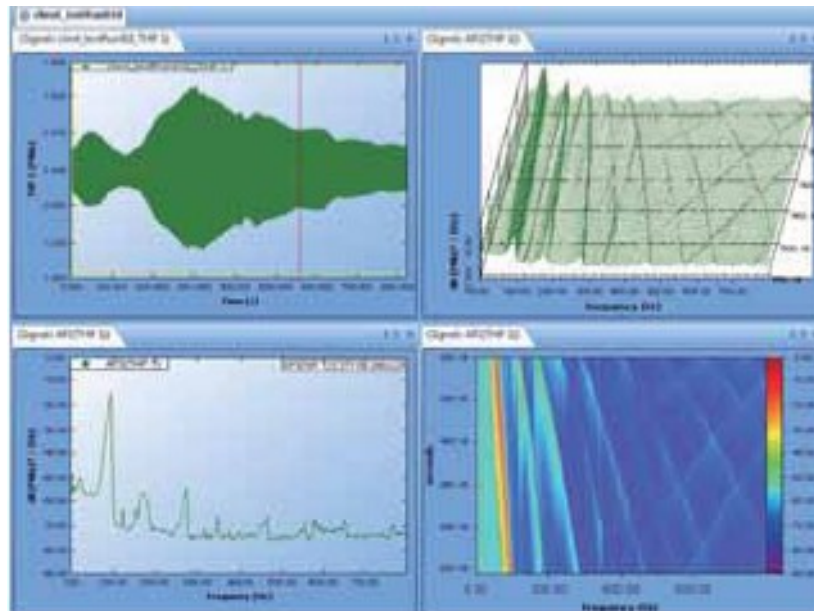
PHOTON仪器中的分析带宽高达**21KHz**，可以采用多种分析带宽。设定**A/D**转换器的采样率远高于信号最大上限频率，用多采样变换技术实现各种频带的信号分析，采样率变换器中的滤波器采用**FIR**线性相位滤波器，以满足振动分析中对幅度和相位精度的双重要求。



四. 信号分析仪的PC端软件

1、PC端软件概述

2、PC端软件功能



1、PC端软件概述

PC 主要实现图形显示与用户接口。软件提供在线测试状态、文档处理、按钮、显示等，具有丰富的应用软件。

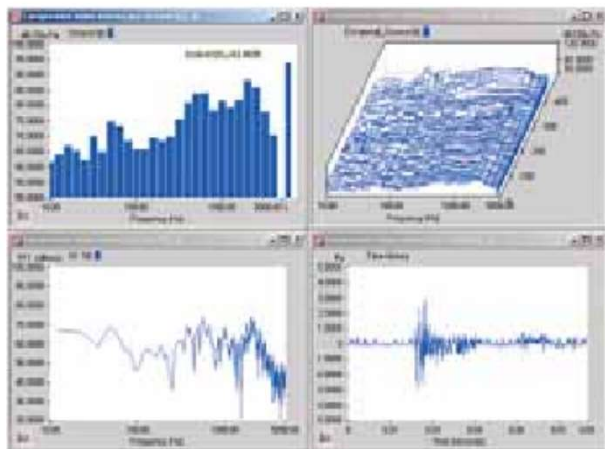


为用户振动、噪声分析提供了丰富应用软件和友好用户界面，可应用于：

1.频谱分析、2.模态分析、3.实时倍频程分析、3.阶比跟踪、4.三维瀑布谱分析、5.瞬态捕捉和冲击响应谱分析等。

2、PC端软件功能

PC端软件功能1



频谱分析

将信号源发出的信号强度按频率顺序展开，使其成为频率的函数，并考察变化规律，称为频谱分析。信号分析仪最基本的功能就是频谱分析。

研究噪声的频谱是为了深入了解噪声源的特性帮助寻找主要的噪声污染源，为噪声控制提供依据，为噪声控制提供依据。

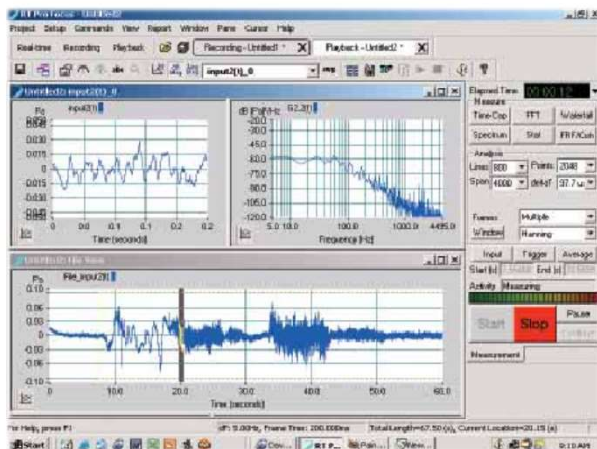
2、PC端软件功能

PC端软件功能2

模态分析

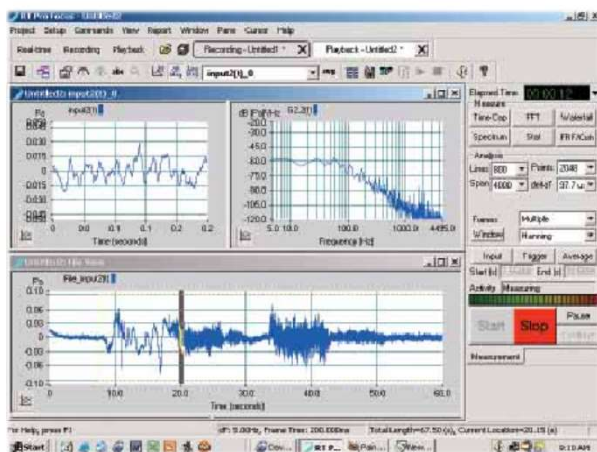
模态是机械结构的固有振动特性，每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。这些模态参数可以由计算或试验分析取得，这样一个计算或试验分析过程称为模态分析。大致均可分为四个基本过程：

- (1) 动态数据的采集及频响函数或脉冲响应函数分析
- (2) 建立结构数学模型
- (3) 参数识别
- (4) 振形动画



2、PC端软件功能

PC端软件功能3



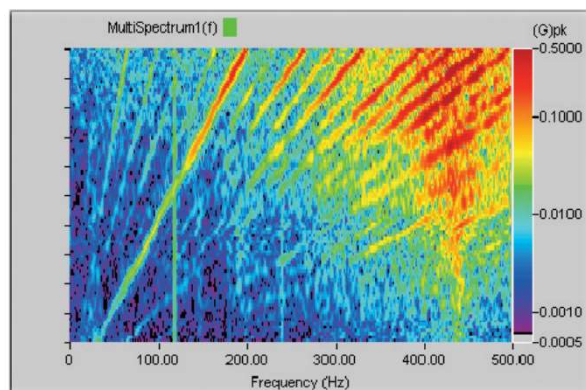
实时倍频程分析

人们把20Hz到20kHz的声频范围分为几个段落，每个频带成为一个频程。频程的划分采用恒定带宽比，即保持频带的上、下限之比为一常数。实验证明，当声音的声压级不变而频率提高一倍时，听起来音调也提高一倍。若使每一频带的上限频率比下限频率高一倍，即频率之比为2，这样划分的每一个频程称1倍频程，简称倍频程。如果在一个倍频程的上、下限频率之间再插入两个频率，使4个频率之间的比值由小到大，依次排列。这样将一个倍频程划分为3个频程，称这种频程为1 / 3倍频程。

所以我们通常使用的31段均衡器也称为1 / 3倍频程均衡器。

2、PC端软件功能

PC端软件功能4



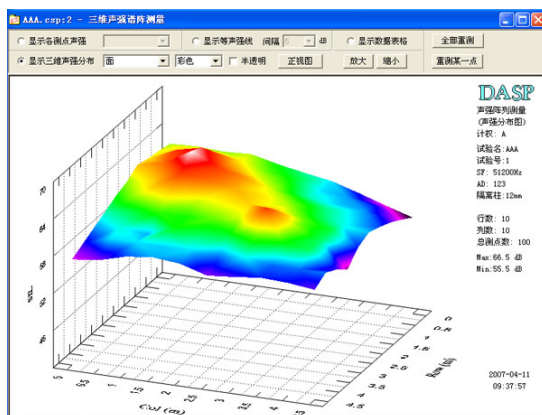
阶比跟踪

常用的谱估计技术一般是基于振动信号时间序列的离散傅里叶变换(DFT),而在原理上**DFT**仅适用于平稳信号,如果时域采样信号是非平稳信号,就会产生"频率模糊"现象.在旋转机械运行时,其转速在严格意义上是波动的,特别在升,降速阶段尤其明显,这些状态下对应的振动信号属于非平稳信号,并不满足傅里叶变换对信号的平稳性要求。

阶比分析通过等角度采样把时间域的非平稳信号转换成角度域的平稳或准平稳信号,这种方法能很好地反映与转速相关的振动。

2、PC端软件功能

PC端软件功能5



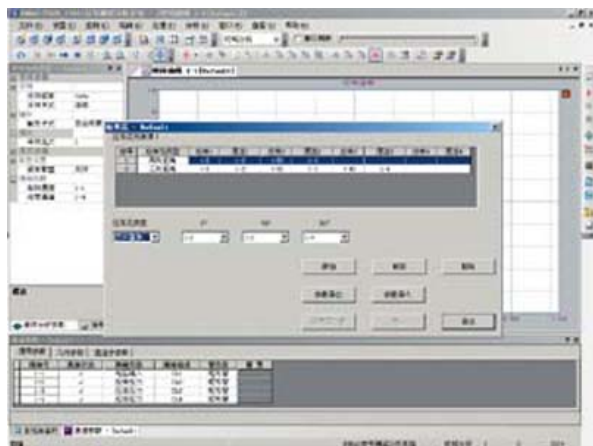
三维瀑布谱分析

三维瀑布图由转速、倍频量、幅值组成，三维谱振图由频率、时间、倍频量组成。

三维谱分析方法可以有效地应用于非平稳信号的分析,弥补了传统的傅里叶分析方法的缺陷,能较好的提取声学信号特征。

2、PC端软件功能

PC端软件功能6



冲击响应谱分析

冲击响应谱通常简称“冲击谱”，所谓冲击谱，是将冲击源施加于一系列线性、单自由度质量-弹簧系统时，将各单自由度系统的响应运动中的最大响应值，作为对应于系统固有频率的函数而绘制的曲线，即称为冲击谱。

根据分析冲击响应谱，可以为设计产品的抗冲击能力提供依据。

五. 动态信号分析仪设计实例

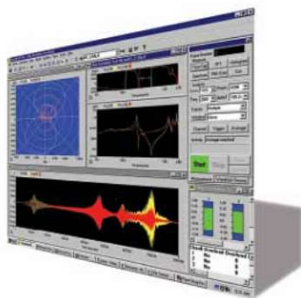
PHOTON DYNAMIC SIGNAL ANALYZER

动态信号分析仪



五. 动态信号分析仪设计实例

PHOTON 动态信号分析仪应用



基本功能和应用

- 模态测试 (Modal Testing)
- 阶比跟踪 (Order Tracking)
- 谱分析 (Spectrum Analysis)
- 波形记录 (Waveform Recording)
- 数据采集 (In-Vehicle Data Acquisition)
- 旋转机械分析 (Rotating Machinery Analysis)
- 瞬态捕捉 (Transient Capture and SRS)
- 实时倍频程分析 (Real-time Octave Analysis)
- 声学分析 (Sound Quality)

五. 动态信号分析仪设计实例

技术参数



输入通道	
模拟通道	差分输入，输入阻抗 $220\text{k}\Omega$ ，每个通道可分别设置增益 ($\times 1$ 、 $\times 10$)、传感器灵敏度、传感器类型 (加速度、力...)、耦合方式。
电气特性	差分放大器，程控放大器，抗混叠滤波器，24 位 A/D 转换器。
滤波特性	截止频率为 300kHz 模拟滤波器和 160dB/Octave 线性相位数字滤波器，防止混叠和相位误差。
分析频率	高达 21kHz 实时分析频率 (采样频率为 48kHz)
信号调理	模拟电压信号或 ICP 传感器调理电路 (2.4mA , 25V 开路)
动态范围	110dBfs (100 次线性平均，单正弦信号测试)
信噪比	$>90\text{dB}$ (DC 至 1000Hz 范围，输入信号幅值为满量程的 50%)
通道间串扰	$<-100\text{dB}$
频率精度	0.01%
输入电压	$\pm 10\text{V}$ (最大输入 $\pm 40\text{V}$ 不损坏)
分辨率	24 位
混叠保护	$>117\text{dB}$ 阻带

五. 动态信号分析仪设计实例

技术参数



输出通道	
模拟输出	一个标准程控信号源
电气特性	24 位 D/A 转换器
滤波特性	160dB 数字滤波器 + 模拟滤波器消除非线性相位失真和成像
频率范围	21KHz 的输出频率 (采样频率为 48KHz)
电压范围	±10V
动态范围	110dBfs
谐波分量	<0.00032%
通道间串扰	<-100dB
分辨率	24位
输出阻抗	50Ω

五. 动态信号分析仪设计实例

技术参数



软件功能	
操作系统	Windows 98/2000/ME
软件框架	120MHz 的 DSP 芯片完成信号实时处理， PC 实现图形显示与用户接口。软件提供在线测试状态、文档处理、按钮、显示等
应用	通用信号分析和信号源；模态信号采集；声压分析；旋转机械分析；瞬态捕捉和冲击响应谱分析；波形记录；瞬态冲击分析；校验；
特性	在线帮助，用户定义工程单位，测试结果和图表在线生成 WORD 文档；

五. 动态信号分析仪设计实例

主要特点:

轻小型便携式振动分析仪、**FFT**分析仪、信号分析仪。重量只有**230g**。

USB接口设备供电方式。

数据记录,数据后处理,实时数据采集。

实时数据处理结果的快速建立。



六. 信号分析仪最新产品

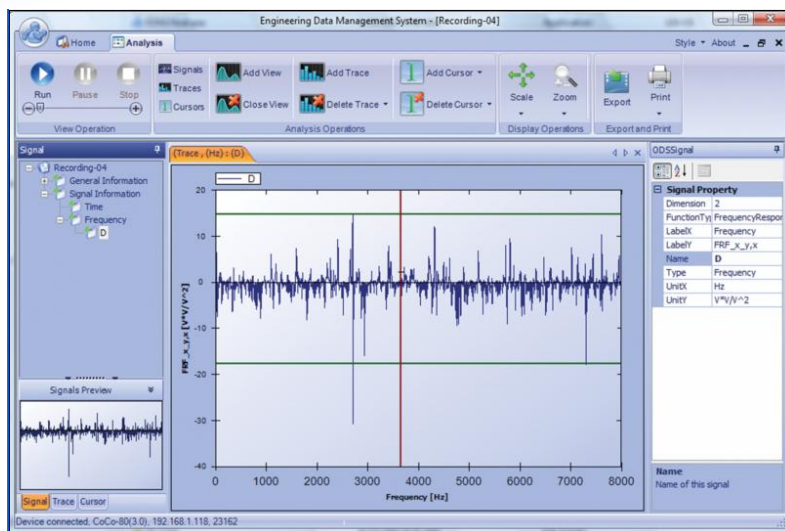
CoCo-80



手持式

數據記錄動態信號分析儀

便攜 手持
簡易 堅固
準確 可靠
多通道





六. 信号分析仪最新产品

CoCo-80 动态信号分析仪配置

电压或IEPE的8个BNC连接器

单端或者差分输入方式

交流或者直流电耦合

130分贝动态范围

24位A/D转换器

+/-10伏特输入范围

输出3.5 mm音频插口立体声连接口，100dB动态范围

24位D/A转换器

3.5 mm音频插口立体声连接器，

内置扬声器和麦克风

尺寸231 mm × 170 mm × 69 mm

重量包括电池重1.71公斤，不带电池重1.23公斤



六. 信号分析仪最新产品

CoCo-80 动态信号分析仪配置

交流适配器100-240伏特交流电

最大功率消耗14W

电池操作自动化模式下可工作6小时

主机接口2个USB端口/100BaseT以太网/SD卡无线连接器

最大采样率每通道最大102.4kHz

可8个通道同时工作

闪存2GB用于系统和数据存储

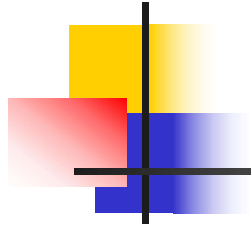
液晶显示器5.7吋 背光显示, 320×240 分辨率

典型的实时分析功能数学运算 (+、-、*、/)、积分、微分、FFT、平均、加窗、自功谱、互谱、传递函数功能 (FRF)、相干、实时滤波器、均方根 (RMS)、趋势分析、阈值报警等



参考资料

- 1、《现代传感器集成电路》赵负图主编 人民邮电出版社
- 2、《传感器与信号调节》张伦 译 清华大学出版社
- 3、《基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计》刘树棠等译
西安交通大学出版社
- 4、《仪器电路设计与应用》郝晓剑等 电子工业出版社
- 5、《数字信号处理教程》程佩青 清华大学出版社



课后作业

- 1、检索各种动态信号分析仪产品的技术参数，比较性能优劣。

(不交作业)