

# 基于 LabWindows/CVI 超声缺陷信号 频谱分析的设计

郭前岗, 薛杏, 周西峰

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 为了避免超声时域检测法本身的局限性, 超声频谱分析技术在无损检测领域中得到了广泛重视。由于被检测工件的缺陷回波会受到缺陷的形状、大小、性质等因素影响, 即频谱特性中隐含了缺陷特性, 既而可以通过频谱分析, 作为缺陷性质的辅助判定。文中在超声信号频谱分析原理和实施方式的基础上, 研究 LabWindows\CVI 在超声缺陷信号频谱分析中的应用, 并分析超声缺陷信号的频谱图, 实现缺陷的定性和分类。本设计体现了虚拟仪器技术应用在超声检测领域中的优势, 提高了对缺陷评价的客观性和可靠性。

**关键词:** 超声检测; 虚拟仪器; LabWindows\CVI; 频谱分析; 缺陷信号

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2012)07-0211-04

## Design of Analysis of Ultrasonic Flaw Signal Spectrum Based on LabWindows/CVI

GUO Qian-gang, XUE Xing, ZHOU Xi-feng

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** In order to avoid the limitations inherent in ultrasonic time-domain detection, the ultrasonic spectrum analysis in the field of nondestructive testing has been extensive attention. Because the defective echo in the detected workpiece is influenced by the shape, size, nature and other factors of defects, which is echo spectral features hidden defect characteristics, by spectral analysis can be used to determine the defective nature of the auxiliary. In this paper, based on ultrasonic signal spectrum analysis principles and implementation methods, research LabWindows\CVI in the application of ultrasonic spectrum analysis, and analyse ultrasonic flaw signal spectrum to achieve defect characterization and classification. The design reflects the advantages of application of virtual instrumentation in the field of ultrasonic testing, improve the evaluation of the objectivity and reliability of defect.

**Key words:** ultrasonic testing; virtual instruments; LabWindows\CVI; spectrum analyzing; ultrasonic flaw signal

### 0 引言

在焊接制造过程中, 焊接结构因焊接工艺的差异等, 往往在焊接中产生不同程度与数量的气孔、夹渣、未熔合未焊透以及裂纹等缺陷。在产品制造过程中遗留的缺陷与运行中引发的裂纹都会不同程度的对产品的失效行为产生影响。金属材料在焊接、锻造等过程中, 会形成各种内部缺陷, 它们的存在和扩大会致使设备使用寿命缩短, 安全性、可靠性降低。超声检测在探伤缺陷时因各种原因, 定性比较困难, 判断准确率受人

为影响较大<sup>[1]</sup>。随着超声检测技术的不断发展, 用户对检测结果的要求也是越来越高。即要求在检测时能检测出金属工件中存在的缺陷, 又要求能检出缺陷的大小、形状和位置, 对检测时的准确度和精度的要求也是越来越高。目前, 对焊接结构的产品进行检测都采用无损检测技术。随着计算机技术、电子技术的发展, 数字化的超声检测仪器得到了长远的发展, 改变了传统超声检测的诸多不足, 为超声成像和缺陷智能识别奠定了良好的基础<sup>[2]</sup>。

频谱分析技术在无损检测领域中的应用是比较早的。不同缺陷的性质和大小也不尽相同, 不同缺陷对超声波的反射情况也是不相同的, 这一特性在频域上是很明显被检测出来的。但在时域上反射波之间的差异却不是很明显。另外, 频域特性经过系统修正之后, 就能达到只和缺陷有关。根据超声回波的频谱特性能够得到缺陷频谱的相关参数和形状等, 既而就能做到

收稿日期: 2011-11-14; 修回日期: 2012-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61105082)

作者简介: 郭前岗(1960-), 男, 教授, 研究方向为智能控制理论与技术及其在电气系统中的应用以及大型分布式复杂工业电气系统的网络控制理论与技术; 薛杏(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为超声波信号研究与处理。

检测缺陷的目的<sup>[3]</sup>。超声检测时,超声信号的频谱结构会因为材料中缺陷类型的不同而发生变化,缺陷特性就会在频谱结构中显示出来,所以依据频谱特性能够区分缺陷类型或结构。

## 1 超声信号的频谱分析原理

### 1.1 频谱分析原理

频谱分析主要是指离散傅里叶变换的谱分析。其变换和反变换公式如式(1)和(2):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad (1)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W_N^{-nk} \quad (2)$$

式中,  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ ,  $W_N = e^{-j2\pi/N}$ , 称为旋转因子,其频谱具有谐波性、离散性和周期性<sup>[4]</sup>。

对信号进行频谱分析,可以获得其频域的各种特征信息和频率组成信息。最常用到的方法便是傅里叶变换和其反变换,傅里叶变换包括短时傅里叶变换、快速傅里叶变换和加窗傅里叶变换。利用 LabWindows/CVI 软件中自带函数库中的 FFT 变换函数 ReFFT( ) 与其对应的 ReInvFFT( ) 函数来实现短时傅里叶变换;利用 FFT( ) 函数及对应的 InvFFT( ) 函数来实现快速傅里叶变换。通常情况下,所处理的都是实序列信号,所以一般用  $N$  点复序列的离散傅里叶变换来实现  $2N$  点实序列离散傅里叶变换,如式(3)所示:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{2N-1} x(n) W_{2N}^{nk}, k = 0, 1, \dots, 2N - 1 \quad (3)$$

式中  $x(n)$  是长度为  $2N$  的实序列。为了计算式中的傅里叶变换  $X(k)$ , 将  $x(n)$  序列分为奇、偶两个数组,分别用  $f(n)$  和  $g(n)$  表示。 $h(n)$  即为序列  $f(n)$  和  $g(n)$  组合成的,用快速傅里叶变换法计算  $h(n)$  的  $N$  点傅里叶变换,即  $H(k)$ , 先求得  $F(k)$  和  $G(k)$ , 然后再利用表达式(4)来计算离散傅里叶变换:

$$\begin{cases} X(k) = F(k) + W_{2N}^k G(k) \\ X(k + N) = F(k) - W_{2N}^k G(k), k = 0, 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (4)$$

上述实序列 FFT 算法在同等情况下比复序列 FFT 算法的计算量减少了很多。在获得超声信号的频谱图后,可以利用 LabWindows/CVI 库函数中的函数 AutoPowerSpectrum( ) 和函数 AmpPhaseSpectrum( ) 获得其功率谱、相位谱和幅值谱<sup>[4]</sup>。

### 1.2 超声信号频谱分析过程

超声波频谱分析是指在超声检测过程中融合频谱分析的理论和方法。通常,原始的超声回波中含有的有用信息不多,依据这有限的信息不足以进行频谱分析和缺陷识别。而通过对超声波进行频域分析、提取并分析特征值、识别谱函数等一系列处理,就能获得很

多隐含的有用信息,对于实际工程实践具有很好的指导作用。另外,根据这些特征性便可以针对不同缺陷进行缺陷定性、定量和定位。

超声波频谱分析过程主要包括两部分:首先将超声时域信号转换为频域信号,这里采用的是离散傅里叶变换;然后依据频谱特性进行缺陷特性的分析。当探头扫描被测金属试件时,便可以将该试件作为超声波的传输通道,超声波在通道中传输时,会产生信号的吸收、衰减等作用。通常采集到的超声波为反射波、表面波、透射波、散射波等,特征量包括振幅、相位、功率谱、倒频谱和相关谱等。

### 1.3 超声频谱与缺陷的对应关系

对于表面缺陷,通常有线状缺陷和孔状缺陷。对于线状缺陷,如裂纹缺陷,当缺陷伸展方向平行于波束方向时,其反射频谱的低频成分丰富;当裂纹的伸展方向垂直于超声波束的传播方向时,高频成分丰富。对于孔型缺陷而言,如果孔较小时,其反射回来的能量基本上集中在原来发射频谱的中心频率附近;如果孔较大时反射回波的频谱低频部分会被增强。因此可以得出,依据超声反射波频谱的高、低频分量,便可以区别被检测缺陷的类型。

## 2 虚拟超声波探伤仪

### 2.1 虚拟仪器的系统结构

通常一台仪器由三大模块组成:信号采集模块、信号的分析与处理模块、测试结果处理模块。在传统的仪器中,以上功能都是由硬件来实现的。所以传统仪器的功能与结构不能被用户改变,只能由该仪器制造厂来定义和改变,给用户带来了许多不便。虚拟仪器的出现便可以解决这些问题,用软件决定仪器的性能。通过在计算机上插入的数据采集卡采集数据,信号的分析与处理功能是由软件来实现,并完成各种测试功能。另外,由软件产生的虚拟仪器界面,可以输出各种形式的检测结果<sup>[5,6]</sup>。虚拟仪器通常由硬件和软件两大系统构成,其系统结构图如图 1 所示。

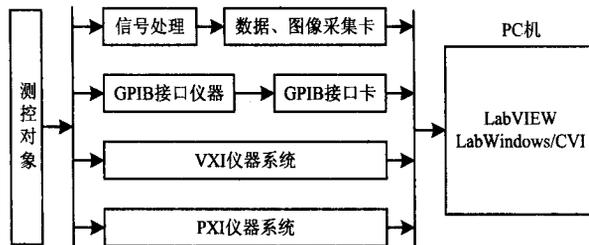


图 1 虚拟仪器构成框图

### 2.2 虚拟仪器在超声无损检测领域的发展与应用

虚拟仪器技术在无损检测应用之一就是实现系统集成、降低成本。以超声波为例,在对金属材料进行超

声探伤时,以往需要信号发生器、示波器等单独仪器,操作不便、系统可靠性不高。如果需要做频谱分析等一系列分析,就需要频谱分析仪,整个系统成本较高。采用虚拟仪器技术后,只需内置功能卡的便携计算机一台即可,其具体功能全部用软件编程来实现,由于有频谱分析功能,该系统还能对超声探头性能进行性能分析,实现超声波检测综合平台的作用。

### 2.3 超声检测的工作原理

常规超声检测的工作原理主要有三种:脉冲反射法、穿透法、共振法。文中所使用探伤系统的检测原理是脉冲反射法。使用一个探头进行检测,该探头具有又收又发的功能,将超声波束垂直或以一定的角度倾斜入射。如果被测工件内无缺陷,显示屏上就只有始波和底波,无其它波;如果被测工件中有小缺陷,始波和底波之间会出现缺陷回波,且底波幅度有所下降;如果被测工件中有大缺陷时,显示屏上只有始波和缺陷回波,而没有底波。

## 3 超声信号频谱分析系统软件的设计

### 3.1 LabWindows/CVI 的概念及其应用

本频谱分析仪的软件平台是 NI 公司开发的 LabWindows/CVI,是 Measurement Studio 软件组中的一员。CVI(C for Virtual Instrumentation)就是“用于虚拟仪器的 C 语言”的英文缩写,是面向计算机测控领域的虚拟仪器软件平台,在多操作系统下也可以运行。可形成独立安装的软件包,安全脱离 LabWindows/CVI 软件开发环境独立运行,安装方便、实用性强。LabWindows/CVI 是基于 C/C++ 的可视化编程语言,是专门用于虚拟仪器开发的。LabWindows/CVI 提供的控件库让人们能很容易地设计出新颖美观并符合实际要求操作的界面。LabWindows/CVI 还提供了丰富的库函数,可以用于数据采集、数据处理分析和结果显示等功能,为用户开发不同的应用软件带来了很大方便<sup>[7-10]</sup>。

NI 公司的 LabWindows/CVI 是一个久经验证的用于各种测试、控制、故障检测分析以及信号处理的 ANSI C 开发环境,很大程度上提高了科学家和工程师们的生产效率。与 NI 公司研发的另一虚拟仪器软件 LabVIEW 比较,LabWindows/CVI 适合用于规模较大、复杂度较强的测控领域,已经成为测控领域中最受欢迎的开发平台之一。例如,LabWindows/CVI 在无损检测、自动测试系统、故障诊断、医疗、军事、航空、流程控制系统等一系列领域中都发挥着极其重要的作用。

### 3.2 频谱分析仪的软件设计

本系统由 PC 机、LabWindows/CVI 软件平台、数据采集卡、探头和超声波探伤仪等组成。该系统设计了超声信号频谱分析的显示界面和数据采集参数设置的

界面。所有的信号处理、测试和显示功能均在计算机上实现,其精度和准确度可依据调节参数来提高,不受仪器本身的限制。所以在超声缺陷信号的分析和处理过程中,其可靠性和准确性得到了大大的提高。

该系统软件部分的结构流程如下:当按下运行键时,将会自动弹出运行界面,即数据采集与频谱分析和显示界面,调用初始化程序来初始化该界面。进入消息循环后,按下某个控件,程序便会接收到相关的消息既而产生响应并调用相应的回调函数来完成相关的执行动作。当按下退出控件时,程序就会接收到退出命令并令消息循环结束。这种基于事件触发而产生响应的循环机制会使该系统的结构兼容性更加完整,而且会使得模块添加处理部分更加简便。主程序编制好后,可以在前面板界面上添加相关绘制闸门线,在程序中设置好起点、终点、闸门幅度等参数,并调用程序中相应的回调函数便可以实现特征信号的分析与处理。其中闸门幅度可以用来判断缺陷信号的幅值有没有超标,如果超标便会产生报警提示。采用模块化的设计思想整个系统分为数据采集模块、时域分析模块、频谱分析模块、测试结果处理模块。

#### 3.2.1 数据采集模块

超声信号的数据采集采用的是纵波直接接触法,软件采用的是 NI 公司开发的 LabWindows/CVI 软件平台,从已有数字式超声波金属探伤仪的超声信号发射端获取超声信号,对采集的超声回波信号进行动态波形显示。

对金属材料进行超声波检测时,由于超声波在金属中传播时间比较短,所以,正常情况下需要采用较高的检测频率,尤其对薄壁材料的检测,采样频率高时,才能得到足够的分辨率。整个系统为了能满足不同检测要求的需求,采样频率是需要可调的,在检测频率不是很高时,降低采样速率,可以减小缓冲容量的需求。

#### 3.2.2 时域、频域分析模块

将采集到的超声信号数据保存在计算机中,然后对超声信号进行时域和频域分析,并且提取相关的特征信息。特征量的提取过程如下:首先利用闸门设置,调出原先已经存入硬盘中的缺陷回波信号,并选择好缺陷回波对其进行检波,提取出缺陷波形的时域特征值。时域特征值包括幅值、脉冲宽度、峰值、峰度系数等等;同时对该缺陷信号进行离散傅里叶变换,提取其频域特征信息。频域特征量包括频谱波形的峰值和半高度、相位谱、倒频谱等。对于任何一个缺陷回波信号,都可以同时提取所有的特征值。

#### 3.2.3 测试结果处理模块

测试结果处理模块包括数据存储、word 测试报表的生成及面板打印。数据存储是为了在系统离线之

后,在用户需要时能将数据提取出来,供用户进行相关分析。这里主要用到了 LabWindows/CVI 库函数中的 ArrayToFile() 函数。函数中,VALBINARY 表示存储采样数据采用的是二进制方式,也可以用 ASCII 码方式存储数据。数据读取和面板打印分别采用函数 FileToArray() 和函数 PrintPanel() 来实现。

## 4 缺陷特征值的选取以及处理结果

### 4.1 数据预处理

所谓预处理是指在现场信号采集之后模式特征量提取之前进行的某些相关工作,包括信号的编码、过滤、复原和增强等。对超声无损检测而言,预处理的主要目的是去除噪声、剔除异点,加强有用的信息量,并对输入测量仪器或其他因素所造成的误差进行复原。

### 4.2 缺陷的定性及其分类

缺陷定性一直以来都是一个技术性很强的问题,超声信号在时域中只能提供幅度和频率方面的信息,仅仅根据这些少量的信息很难对缺陷进行定性。而利用频谱中的相关缺陷信息便可以实现对缺陷的定性。缺陷的性质决定了其危害程度,缺陷性质不同其危害程度也不同,所以超声检测既要确定缺陷的位置和大小,又要尽可能地判断出该缺陷的性质。通常缺陷可被分为 2 类:气孔、夹渣物等为体积型缺陷;裂纹、折叠、夹层、未熔合等称为平面型缺陷。正常情况下,平面型缺陷会比体积型缺陷的危害要大得多<sup>[11-13]</sup>。

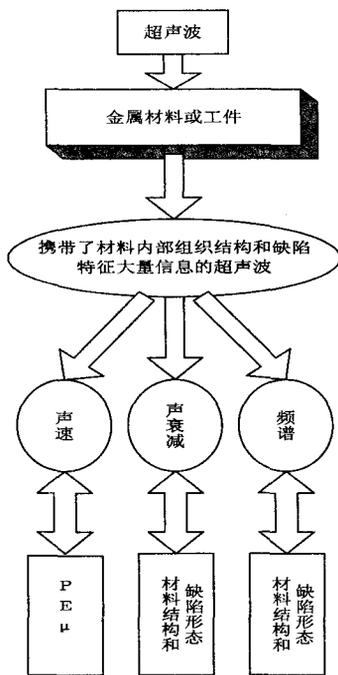


图 2 超声波与金属材料相互作用及特征信息提取示意图

如果在金属材料中存在缺陷,那么在超声检测时可以通过缺陷回波表现出来。金属材料 and 超声波之间

的作用及其特征信息提取的示意图如图 2 所示。长期以来,主要在时域中分析工件和金属材料的缺陷。而在频域中进行进一步的超声缺陷检测,能够确定被测金属材料的哪些特性是依赖于频率,充分利用提取的超声回波信号的特征信息。

### 4.3 特征值的选取及分析处理

特征值选取的基本原则是在保持原始信息基本不变、不降低分类精度的前提下尽量能减少特征的位数,这样可以降低运算的复杂度,从而提高了系统的精度和速度。用频谱分析法区分平面型和体积型缺陷是可行的。首先对获取的超声缺陷信号进行快速傅里叶变换,再求出频谱中有效带宽内的最大幅值,与其他频率分量的幅值相除,得出的值便可作为频谱的特征值。

已有超声波探伤仪探头的中心频率大约为 2.5MHz。现在对人工平面型缺陷和体积型缺陷进行定性分类分析。这里平面型缺陷以裂纹为代表,体积型缺陷选用气孔为代表。取得的 2 类缺陷特征值见表 1 和表 2。

表 1 体积型缺陷(气孔为代表)

编号	1	2	3	4	5
孔径/mm	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
特征值	7.1	7.4	8.9	7.6	9.4

表 2 平面型缺陷(裂纹为代表)

编号	1	2	3	4	5
长度/mm	2.4	3.5	4.6	4.9	6
倾角/(°)	0	10.5	20.4	29.6	0
特征值	10.8	24.9	36.7	45.1	10.6

可以看出:气孔的特征值较小,裂纹的特征值较大。可以推断出一般趋势:体积型缺陷的特征值较小,平面型缺陷的特征值则较大,分类识别准确度较高。

## 5 结束语

虚拟仪器的出现对于测量、测试领域是一个重要的转变,是仪器领域一场重要的技术变革。因为有了虚拟仪器,人们可以根据自己的需求随时随地地改变仪器的性能,而只需通过对虚拟仪器软件的更改便可实现。虚拟仪器凭借其低廉的价格,强大的软件功能和兼容性,已经渐渐地代替了传统硬件仪器。作为虚拟仪器中常用的软件,LabWindows/CVI 软件具有友好的人机界面,用户可以根据自己的需求,设计仪器面板,选择数据处理方法。虚拟超声波探伤仪是把虚拟仪器技术引入超声测试的一次有意义的试验,其完整地继承了虚拟仪器的优点,充分利用了计算机巨大的数据处理能力和图像显示功能,体现了虚拟测试仪器的人性化、智能化的特点。

(下转第 218 页)

际焊接到电路板上所指示的外观和焊点的位置。导入网络表生成 PCB 图后,进行手动连线,设置布线参数。本系统做的是双面板,在 Top layer 层中,走线设置为水平的,在 Bottom player 层中,走线设置为垂直的,这样避免了两个层面连线的平行,减少耦合。

### 3.3 实物连接

制作好 PCB 板,并检测电路可以正常工作后进行实物的连接。先大致布局好核心板和 OV6620 的排放位置,然后焊接插座。焊好后,根据核心板各管脚的位置和 OV6620 管脚的布置,用导线将相应管脚连接。主要是 OV6620 的 Y0 ~ Y7 连接到核心板上的 PA0 ~ PA7;UV0 ~ UV7 连接到核心板上的 PC0 到 PC7;SDA 连接到核心板上的 PD1;SCL 连到 PD0;HREF 连到 PD3;PCLK 连到 PD2;VSYN 连到 PB6。另外,将核心板上集成的 MAX232 引出的 RXD, TXD 和 GND 连到接电脑的 10 口插座上。全部连好之后,用万用表检测各个管脚的电气特性。可先用 ISP 下载线,对单片机进行初始化,然后将软件程序下载到芯片,使软硬件正常工作。

## 4 结束语

ATmega128 单片机是目前最新的单片机系列之一,其突出特点在于速度快、片内硬件资源丰富。文中基于这些优点,设计了一种基于 Atmega128 及数字摄像头 OV6620 完成图像的采集和处理的硬件系统,很好地解决了 AVR 单片机的频率与摄像头图像采集频率不一致的问题,而且数字摄像头避免了模拟的缺点,

数字图像比较稳定。

### 参考文献:

- [1] 李晓峰. AVR 单片机原理与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010.
- [2] 王振煜,葛万成. 嵌入式高分辨率图像采集系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2008,18(2):167-169.
- [3] 金钟夫. AVR ATmega128 单片机 C 程序设计与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [4] 槐创锋. Protel 99 SE 电路设计基础与典型范例[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [5] Fryza T. Basic C Code Implementations for AVR Microcontrollers[C]//2007 14th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing and 6th EURASIP Conference Focused on Speech and Image Processing, Multimedia Communications and Services. [s. l.]:[s. n.], 2007:434-437.
- [6] 赵国锋,邱作雨,张毅. 基于单片机的嵌入式 TCP/IP 协议栈的设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2009,19(3):137-140.
- [7] 何永泰,李莹. AVR 单片机 Atmega128 在 FPGA 配置中的运用[J]. 微处理机,2006,4(2):5-6.
- [8] 汤剑锋. ATmega128 单片机仿真系统设计及实现[J]. 荆楚理工学院学报,2009,24(7):25-31.
- [9] O`Cull L. Embedded C Programming and the Atmel AVR [M]. Beijing:Tsinghua University Press,2003:208-284.
- [10] 田佩,王磊,陆敏. 基于 ATmega128 的调光控制器方案设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2010(10):62-64.
- [11] Korbel S, Janes V. Interesting applications of Atmel AVR microcontrollers[C]//Euromicro Symposium on Digital System Design. Rennes, France:[s. n.], 2004:499-506.

(上接第 214 页)

### 参考文献:

- [1] 弓乐,曹康,吴森. 金属材料超声探伤缺陷分类辅助系统的研究[J]. 仪器仪表学报,2005,26(10):1085-1088.
- [2] 马宏伟,黄良兵,杜功儒. 超声检测虚拟仪器研究[J]. 仪器仪表学报,2005,26(8):436-438.
- [3] 刘静. 超声检测信号的频谱分析与软件设计[D]. 西安:西北工业大学,2002.
- [4] 程乃平,席有猷,赵阳. 基于 LabWindows/CVI 的虚拟频谱分析仪设计[J]. 电子测量技术,2009,32(7):109-111.
- [5] 张宏群,蔡国英. 基于虚拟仪器技术的信号测量分析仪的设计[J]. 计算机技术与发展,2008,18(2):244-246.
- [6] 岳若蒙,张海南. 基于 LabWindows/CVI 的虚拟数字滤波器设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2010,20(8):65-68.
- [7] 张梦麟,李念强,王正生. 基于 LabWindows/CVI 网络虚拟仪器实验平台设计[J]. 计算机技术与发展,2008,18(2):211-214.
- [8] 孙晓云,郭立炜,孙会琴. 基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器设计与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2005:1-6.
- [9] 王建新,杨世凤,隋美丽. LabWindows/CVI 测试技术及工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [10] Yuan Qichuan, Kang Jianbin, Yuan Ye, et al. Design for Axis-angle Virtual Instrument Based on LabWindows/CVI Platform [C]//Proc of Third International Conference on Information and Computing. [s. l.]:[s. n.], 2010:241-243.
- [11] Iizuka Y, Komiya Y, Nakazawa S, et al. Real time digital signal processing of on-line ultrasonic flaw detection[C]//Proc of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. Orlando, FL, USA:[s. n.], 1995:867-871.
- [12] Lita I, Visan D A. Virtual Instrumentation Application for Vibration Analysis in Electrical Equipments Testing[C]//2010 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology. Warsaw:[s. n.], 2010:216-219.
- [13] 蒋志峰. 超声检测频域分析对缺陷识别应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.