

基于凌华科技 PCI-9846 和 LabVIEW 数据采集分析系统

焦新涛

- **应用领域**

噪声、振动与声振粗糙度 NVH (Noise、VibrATion、Harshness) ,是衡量汽车制造质量的一个综合性问题, 它给汽车用户的感受是最直接和最表面的。它是国际汽车业各大整车制造企业和零部件企业关注的问题之一。有统计资料显示, 整车约有 1/3 的故障问题是和车辆的 NVH 问题有关系, 而各大公司有近 20%的研发费用消耗在解决车辆的 NVH 问题上。对于汽车而言, NVH 问题是处处存在的。研究设计噪声振动信号分析系统, 对于解决相应的 NVH 问题具有一定意义。

- **挑战**

利用凌华科技生产高性能数据采集卡 PCI9846 和美国国家仪器 (NI) LabVIEW8.6 设计数据采集分析系统, 实现信号的采集, 并能对信号进行分析处理。由于在离散频谱分析的过程中不可避免的存在各种误差, 如何提高频谱分析的精度, 对信号进行频谱校正, 是系统需要解决的问题。

- **使用产品**

数据采集分析系统采用凌华科技 PCI9846, 软件采用美国国家仪器 (NI) LabVIEW8.6, 操作系统为 Windows XP

- **解决方案**

基于虚拟仪器的优点, 利用凌华科技生产的具有 4 通道, 16 为采样精度, 最高采样率达到 40MS/s 的高性能数据采集卡 PCI9846 和美国国家仪器 (NI) LabVIEW8.6 设计数据采集分析系统, 在系统中采用比值校正法、能量重心校正法、FFT+FT 连续细化分析傅立叶变换法和相位差法等离散频谱校正方法对信号进行频谱校正分析, 提高信号分析精度。

一个完整的信号分析系统通常由 3 部分组成：信号的获取与采集、信号的分析与处理和结果的输出与显示。传统的测试仪器基本上是以硬件或固化的软件形式存在，仪器由生产厂家来定义、制造。传统仪器的设计较复杂，灵活性差，没有摆脱独立使用，手工操作的模式，整个测试过程几乎仅限于简单的模仿人工测试的步骤，不适于一些较为复杂及测试参数较多的场合^[1]。与传统仪器相比，虚拟仪器（Virtual Instrument）具有高效、开放、易用灵活、功能强大、性价比高、可操作性好等明显优点，具体表现为：智能化程度高，处理能力强，复用性强，系统费用低，可操作性强等^[2]。基于虚拟仪器的优点，利用 PCI9846 和 LabVIEW 设计数据采集分析系统，用于汽车 NVH 分析。

1 系统组成

虚拟仪器正在成为当今世界流行的一种仪器构成方案。虚拟仪器以计算机为基础，结合相应的硬件和软件，完成数据的采集和处理。其结构是开放式的，它把计算机平台与具有标准接口的硬件模块以及与开发测试软件结合起来构成仪器系统，这种系统具有通用性、灵活性，便于开发测试应用。

1.1 硬件构成

硬件系统以计算机为主体，以插入其中的数据采集卡为主要功能部件。被测信号由数据采集卡接收后，传入计算机内部，由相应的软件进行后续的分析处理工作，因此数据采集卡是虚拟仪器能否成功设计的关键所在^[3]。

本系统采用的数据采集卡是凌华科技生产的 PCI9846。PCI9846 是凌华科技的一款具有 4 通道，采样精度达到 16 位，采样频率达到 40MS/s 的高速数字化仪，提供高精度、低噪音及高动态范围性能，高密度且高精度度，专为输入信号频率高达 20MHz 的高频和高动态范围的信号而设计。模拟输入范围可以通过编程设置为 $\pm 1V/\pm 0.2V$ 或 $\pm 5V/\pm 0.4V$ 。配备了容量高达 512MB 的板载内存的 PCI9846，摆脱了 PCI 总线的约束，使之能储存更长时间的波形^[4]。

1.2 软件平台

软件部分是虚拟仪器的核心，目前，应用较广泛的基于虚拟仪器的图形化编程软件开发平台主要是美国国家仪器公司 NI（National Instrument）开发的 LabVIEW（Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench，实验室虚拟仪器工程平台）。LabVIEW 是一种基于 G（Graphic）语言的图形编程开发环境，它广泛地被工业界、学术界和研究实验室所接受，用作开发数据采集系统、仪器控制软件和分析软件的标准语言，使用这种语言编

程时，基本上不写程序代码，对于科学研究和工程应用来说是很理想的语言。它尽可能利用了技术人员、科学家、工程师所熟悉的术语、图标和概念，因此，LabVIEW 是一个面向最终用户的工具。LabVIEW 集成了与满足 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。它还内置了便于应用 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数^[5]。这是一个功能强大且灵活的软件，利用它可以方便地建立自己的虚拟仪器，其图形化的界面使得编程及使用过程都生动有趣。它可以增强构建使用者的科学和工程系统的能力，提供了实现仪器编程和数据采集系统的便捷途径。使用它进行原理研究、设计、测试并实现仪器系统时，可以大大提高工作效率。

LabVIEW 含有种类丰富的函数库, 在很大程度上缩短了开发周期, 而且开发的应用程序易于维护和扩展功能。应用 LabVIEW 开发环境进行数据采集与分析应用软件的开发, 将数据采集卡 PCI9846 和灵活方便的应用软件开发平台 LabVIEW 结合起来, 可以降低开发成本, 又可以缩短开发周期, 使开发变得方便高效。

1.3 LabVIEW 控制采集卡

PCI9846 提供了 LabVIEW 驱动，安装驱动时会自动查找 LabVIEW 目录，然后将必要的文件复制到相应的文件夹中去，如果系统中没有安装 LabVIEW 或者其版本低于 6.0，驱动安装程序会弹出一个对话框提示更新 LabVIEW 的版本。LabVIEW 驱动程序安装完成后，就可以在 LabVIEW 中使用 PCI9846 来进行数据采集了^[4]。

LabVIEW 驱动安装完成后，在函数选板会增加如图 1 所示相应的项，在本文中直接使用其中的“DAQPilotExpressVI”，根据提示完成相应设置后即可实现数据采集（图 2）。



图 1 LabVIEW 函数选板新增项

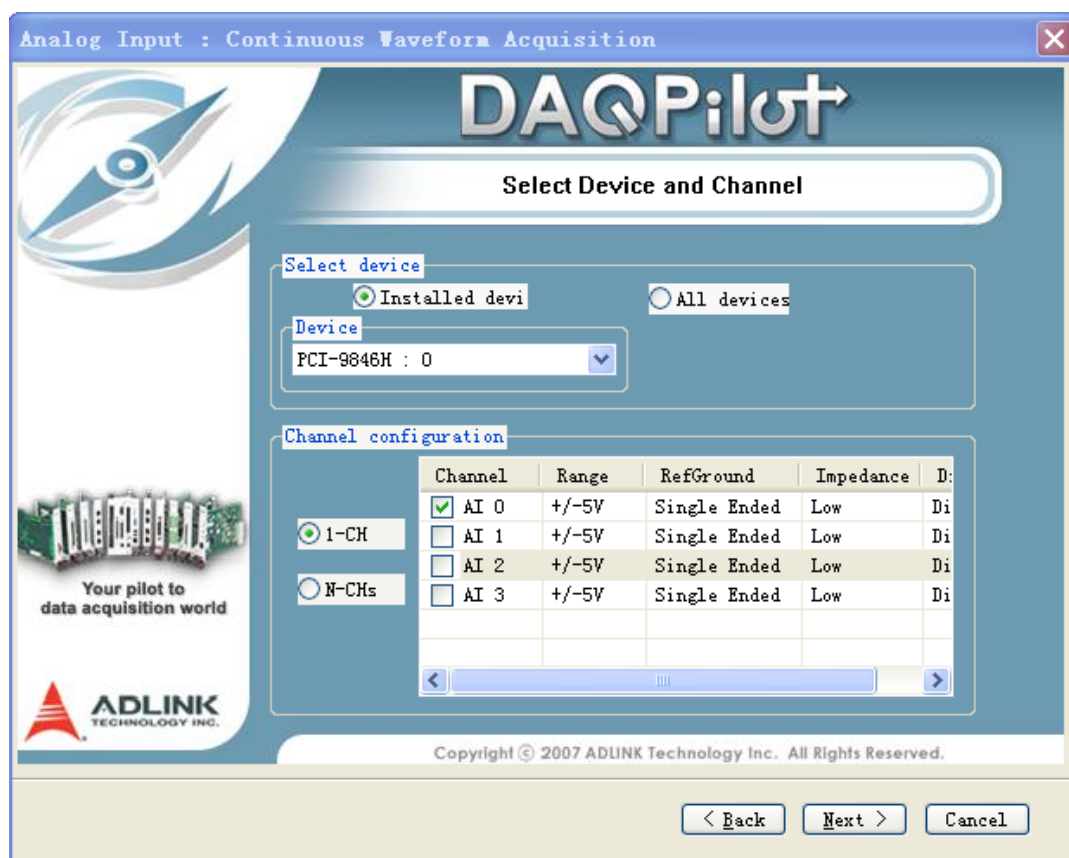


图 2 配置向导

2 信号分析

数据采集完成后，必须对数据进行分析，以从中提取相应信息。本系统数据分析主要集中在频域。信号分析处理是LabVIEW的一个重要组成部分，它提供了大量的专业性很强的信号分析处理函数，对于信号的常见分析直接利用LabVIEW现成函数即可满足要求，但用来对信号进行较复杂处理时需自行编写函数。

谐波信号离散傅立叶变换和频谱分析的频率、幅值和相位都可能存在较大误差，从理论上分析单频率谐波信号加矩形窗时离散频谱分析的幅值最大误差可达 36.4%；即使加其它窗时，也不能完全消除此误差，加 Hanning 窗并只进行幅值恢复时的最大幅值误差仍高达 15.3%；不论加何种窗函数，离散频谱分析的相位最大误差高达 $\pm 90^\circ$ ，频率最大误差为 ± 0.5 个频率分辨率。因此，频谱分析的结果在许多领域只能定性而不能精确地定量分析和解决问题，大大限制了该技术的工程应用，特别是在机械振动和故障诊断中的应用受到极大限制。所以要对离散频谱分析得到的各频率成分参数进行校正，以得到较为精确的频率、幅值和相位估计值。所以需要研究离散频谱的校正理论和技术以消除或大幅度减小这个误差，提高分析精度。对于单频率成分或间隔较远的多频率成分的离散频谱进行校正

目前国内外有四种对幅值谱或功率谱进行校正的方法^[6]：比值校正法(内插法)，能量重心校正法，FFT+FT 连续细化分析傅立叶变换法和相位差法；相位差法又分为时移法、改变窗长法和综合法。从理论上分析，在信号不含噪声的情况下比值法和相位差法是精确的校正方法，而能量重心法和 FFT+FT 谱连续细化分析傅立叶变换法是精度很高的近似方法。

随着离散频谱校正技术的发展和不断完善，越来越广泛地被应用于分析各种实际问题 and 各类动态信号分析系统中。离散频谱校正理论已在或将在下列领域得到广泛的应用：

- (1) 各类动态信号分析仪及计算机辅助测试系统；
- (2) 旋转机械振动信号，具有滑动轴承的旋转机械，工作转速大多很稳定，且需要相位作为分析参数，此时采用比值校正法最佳；
- (3) 发动机等扭振信号，对于稳态扭振信号，只需要精确求出各谐次幅值，由于三点卷积校正法不受转速有小波动的影响，是稳态扭振信号的最佳选择；
- (4) 仪器仪表领域中的应用，已经应用到涡街流量计和电力系统电参量等需要精密频率测量计算出物理量的仪器仪表中；
- (5) 电力系统谐波分析；
- (6) 激光多普勒测速中提高精度；
- (7) 高精度的频率与幅值校准系统，目前国内在精确标定动态信号的频率和幅值的仪器方面还是空白，利用比值校正法配合高精度 A/D 板可以研制出标定仪器，填补这方面的空白；
- (8) 精密分析各类振动信号频谱；
- (9) 循环平稳解调分析，采用离散频谱来校正解调后的调制频率和幅值，大幅度提高分析精度，能够更准确的提取故障信息；
- (10) 雷达精密测距和电子对抗的军事领域。

2.1 比值校正法(内插法)

这种方法利用频率归一化后差值为 1 的主瓣峰顶附近二条谱线的窗谱函数比值，建立一个以归一化校正频率为变量的方程，解出归一化校正频率，进而进行频率、幅值和相位校正；这种方法适用于已知所加对称窗函数傅立叶变换的理论表达式情况下的离散频谱校正。

校正频率为：

$$f_x = (k + \Delta k) f_s / N \quad (1)$$

式中， k ($k=0, 1, 2, \dots, N/2-1$) 为谱线号， N 为分析点数， f_s 为采样频率。设窗函数的频谱模函数为 $f(x)$ ，则幅值校正为：

$$A = y_k / f(\Delta k) \quad (2)$$

由频谱校正得到谱线校正量后，相位校正量为：

$$\Delta\varphi = -\Delta k\pi \quad (3)$$

当实部为 R_k ，虚部为 I_k 时，真实相位角为：

$$\theta = \tan^{-1}(I_k / R_k) + \Delta\varphi \quad (4)$$

比值校正法的特点：

- (1) 适用于已知归一化窗函数频谱解析表达式的一种通用离散频谱校正方法；可以精确校正单频率谐波信号离散频谱的频率、幅值和相位，大大提高离散谱分析的精度；
- (2) 从理论和实践上系统地解决了间隔较大(5 个频率分辨率以上)的多频率成分的参数(频率、幅值和相位)精确求解的问题；
- (3) 算法简单，计算速度快；
- (4) 不考虑信号中噪声的影响，比值法是一种精确的校正方法，校正后频率、幅值和相位为理论值，但会在数字计算中受到数字截断误差的影响而产生很小的误差；
- (5) 不适用于频率成分过于密集的信号和连续频率成分信号离散频谱分析的校正。

2.2 能量重心校正法

该方法是根据对称窗函数离散频谱的能量重心无穷逼近坐标原点或在原点附近的这一特性推导出的一种离散频谱校正方法，是一种适用于加各种对称窗的通用离散频谱校正方法。以 Hanning 窗为例，由于其窗旁瓣的功率谱值很小，根据其能量重心的特性，若令 X 为 $[-0.5, 0.5]$ 范围内，就可以用主瓣内功率谱值较大的几条谱线精确地求得主瓣的中心坐标。设采样频率为 f_s ，作谱点数为 N ，主瓣内峰值的谱线号为 m ， Y_i 为功率谱第 i 条谱线值， x_0 为主瓣中心，其频率校正公式为：

$$x_0 = [\sum_{i=-n}^n Y_i \cdot (m+i) \cdot f_s / N] / \sum_{i=-n}^n Y_i \quad n = 0, 1, \dots, \infty \quad (5)$$

设能量恢复系数为 K_t ，则校正后的幅值为：

$$A = \sqrt{K_t \sum_{i=-n}^n Y_i} \quad (6)$$

归一化频率的校正量为 Δx ，则有：

$$\Delta x = (x_0 - m f_s / N) / (f_s / N) \quad (7)$$

结合式 (3)、式 (4) 即可求出校正相位。

能量重心校正法的特点：

- (1) 适用于任何加对称窗函数频谱的一种通用离散频谱校正方法，可大幅度提高离散频谱的分析精度；
- (2) 与其它校正方法相比，其能对多段平均功率谱直接进行校正；
- (3) 算法简单，计算速度快；
- (4) 负频率成分和间隔较近的多频率成分产生的干涉现象所带来的误差对精度的影响小；
- (5) 校正精度与窗函数有关，加 Hanning 窗时具有较高的校正精度；
- (6) 校正精度与参与校正的点数有关，点数越多，对单频率成分的校正精度越高，但要求相邻两个谱峰的频率间隔越大；
- (7) 不考虑信号中噪声的影响，能量重心法是一种精度较高的近似校正方法，校正后频率、幅值和相位不是理论值，但误差很小；
- (8) 不适用于频率成分过于密集的信号和连续频率成分信号离散频谱分析的校正。

2.3 FFT+FT 连续细化分析傅立叶变换法

该方法实质是用 FFT 作全景谱，针对要细化的局部再用改进的连续傅立叶变换 FT 进行运算，以得到局部细化精度极高的频谱。对采样信号作 FFT 后，在指定的一个频率区间 $[f_1, f_2]$ ，包含在区间 $[0, f_s]$ 内，进行 L 点等间隔谱分析。

$$X_R(f) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos(2\pi k f / F_s) \quad 0 < f \leq F_s / 2 \quad (8)$$

$$X_I(f) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \sin(2\pi k f / F_s) \quad 0 < f \leq F_s / 2 \quad (9)$$

确定频率分辨率 $\Delta f = (f_2 - f_1) / L$ 后, 计算频率序列 $\{ f_1, f_1 + \Delta f, f_1 + 2\Delta f, \dots, f_1 + M\Delta f = f_2 \}$, 依据式 (8)、式 (9) 进行 $L+1$ 点实部和虚部计算, 并合成幅值谱和相位谱, 从而校正出频率、幅值和相位。

FFT+FT 连续细化分析傅立叶变换法的特点:

- (1) 适用于任何加对称窗函数频谱的一种通用离散频谱校正方法, 可大幅度提高离散频谱的分析精度; 可以在不增加采样长度的前提下, 大大提高频率分辨率以及幅值和相位的计算精度;
- (2) 计算速度比其它方法慢得多, 不适合用作实时频谱分析与校正;
- (3) 与复调制细化选带频谱分析方法不同, 由于没有加大窗的长度, 所以仅能对信号局部频率的幅值和相位进行细化运算, 而不能将已经非常密集、发生主瓣重叠和干涉的多频率信号分离成没有发生主瓣重叠和干涉的多个单频率成分信号, 所以也不适用于频率成分过于密集的信号和连续频率成分信号离散频谱分析的校正。

2.4 相位差法

相位差法分为时移法、改变窗长法和综合法。其实质是对同一信号进行连续采样得到两段时间序列, 其中第二段时域序列比第一段滞后一定的点数, 对这两段时域加相同或不同的窗函数, 分别进行两次不同或相同点数的 FFT(或 DFT) 分析, 利用对应峰值谱线的相位差进行离散频谱校正, 该方法适用于加各种对称窗情况下的离散频谱校正。相位差校正法有三种方法: 第一种方法是改变窗长法, 第二种方法是时域平移法, 第三种方法是综合校正法, 即时域平移+改变窗长+加不同窗函数法, 该方法适用于加各种对称窗情况下的离散频谱校正。

这种方法是用两段时间序列 FFT 后的相位之差进行频谱校正, 原始单频率成分信号采连续两段样本, 然后对这两段作傅利叶变换, 利用其对应离散谱线的相位差校正出谱峰处的准确频率和相位的校正方法。对两段信号都是加相同的窗函数后再进行离散傅里叶变换, 变换后的相频函数在窗函数主瓣内不但都具有线性关系, 而且斜率相同, 则有:

$$\theta_0 = \theta_{k_0} - \Delta k \pi \quad (10)$$

$$\theta_1 = \theta_{k_1} - \Delta k \pi \quad (11)$$

相位差 $\Delta \theta$ 为:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0 = \theta_{k1} - \theta_{k0} \quad (12)$$

归一化后的频率校正量:

$$\Delta k = (\theta_{k1} - \theta_{k0}) / 2\pi = \Delta\theta / (2\pi) \quad (13)$$

校正频率为:

$$f_x = (k + \Delta k) f_s / N \quad (14)$$

校正幅值为:

$$A = y_k / f(\Delta k) \quad (15)$$

相位差校正法的特点:

- (1) 通用性好, 其校正方法不受所加窗函数不同的影响, 是适用于加任何对称窗函数的一种通用离散频谱校正方法;
- (2) 算法简单, 计算速度快;
- (3) 抗噪声干扰的能力较强;
- (4) 不考虑信号中噪声的影响, 相位差法是一种精确的校正方法, 校正后频率、幅值和相位为理论值, 但会在数字计算中受到数字截断误差的影响产生很小的误差;
- (5) 不适用于频率成分过于密集的信号和连续频率成分信号离散频谱分析的校正。

在本系统中, 为了提高数据分析精度, 根据比值校正法、能量重心校正法、FFT+FT 连续细化分析傅立叶变换法和相位差法四种常用频谱校正方法原理, 在 LabVIEW8.6 中编写相应函数, 对数据进行频谱校正处理。

3 总结

利用凌华科技高性能数据采集卡 PCI9846 和 LabVIEW, 结合四种最新频谱校正方法, 设计数据采集与分析系统, 用于汽车振动数据分析。

参考文献

- [1] 陈隆道, 周箭, 许昌. 虚拟仪器——测试技术的新领域[J]. 科技通报, 1999(1):24-29.
- [2] http://oabbs.zol.com.cn/1/9_4850.html
- [3] 康泉, 张之敬等. 基于 LabVIEW 的数字信号控制及检测技术[J]. 新技术新工艺, 2004(8):6-8

[4] 凌华科技. PCI9846 使用手册

[5] 张民, 徐讯. 用 LabVIEW 和数据采集卡实现信号检测[J]. 北方交通大学学报
2000(5), 78-81

[6] 丁康, 谢明, 杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 科学出版社