

文章编号:1000-582X(2003)12-0018-04

# 虚拟式声强分析仪

李翠薇,秦树人,杨昌祺

(重庆大学机械学院测试中心,重庆 400044)

**摘要:**虚拟式声强分析仪是在克服传统声压测量仪的缺点的基础上,结合虚拟仪器技术,开发出来的一种新型分析仪。虚拟式声强分析仪以傅里叶变换为基础,利用软件和硬件相结合的方法实现了对总声强级及其相应倍频程的实时测量和分析。从硬件部分、软件部分、仪器面板三个方面详细介绍了声强分析仪的设计方法,给出了应用实例并进行了误差分析。该仪器具有成本低、体积小、操作简单的优点,满足了环境监测和机电产品的实时监测需要。

**关键词:**噪声测量;实时分析;虚拟仪器;FFT

**中图分类号:**TH117.21

**文献标识码:**A

传统的噪声测量中,声压测量是测量噪声声级的常用手段,但是因为声压是一个标量,不能确定声源的方向和位置,而且对测试条件要求严格,需要在造价昂贵的消声室或混响室进行<sup>[1]</sup>。而声强是一个矢量,测量不受环境的影响;同时,它属于非接触测量,不受噪声类型的限制。通过声强测量,不仅能够测得声级大小,而且能知道声源的位置、声功率的大小,同时也能测定材料声阻抗率及其振动物体表面的声辐射效率<sup>[2]</sup>。在现场测量和许多机电设备的噪声测量中,声强测量越来越发挥出了重要作用。因此,声强测量已经成为噪声测量的一个重要手段。

传统的声强计,在进行倍频程分析时,一般使用滤波网络,通过切换中心频率进行测量,这种办法完全不能满足环境监测和机电产品的自动实时监测需要。

对于数字式声强分析系统,采用常规的频谱分析方法和频谱分析仪很难一次完成一个标准的1/3倍频程的实时测量。为此,有必要开发出一种快速、易用的实时噪声声强分析仪。

虚拟仪器是虚拟技术在仪器仪表领域中的一个重要应用。它以计算机作为仪器统一的硬件平台,充分利用计算机独具的运算、存储、回放、调用、显示以及文件管理等智能化功能,同时把传统仪器的专业化功能和面板控件软件化,使之与计算机结合起来融为一体,这样便构成了一台从外观到功能都完全与传统仪器相

同,同时又充分享用计算机智能资源的全新仪器系统<sup>[3]</sup>。虚拟仪器以其可靠性、低成本和易用性的优势正不断冲击常规测试领域。作者旨在将虚拟仪器技术引入到噪声声强分析仪的设计和制造中。

## 1 噪声声强及其测量原理

### 1.1 噪声声强级

声强是指在声场中的某一点上,单位时间内通过一个与指定方向垂直的单位面积的平均声能。正常人双耳刚刚能听到的频率为1 000 Hz的纯音的声压为20  $\mu$ Pa,称之为听阈声压。使人耳开始产生疼痛感觉的声压则称为痛域声压,为20 Pa。在自由场中,相应于听阈声压的声强为 $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>,相应于痛域声压的声强为1 W/m<sup>2</sup>。

声强既有大小又有方向,是一个矢量。噪声测量中一般采用测量值与基准值之比的对数来表示噪声的强弱。即声压级、声强级、声功率级。级是相对量,单位是分贝(dB)。

声强级是声强与基准声强之比的常用对数的10倍,记为 $L_I$

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ (dB)} \quad (1)$$

其中, $I_0$ 为基准声强,在空气中取 $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>。

在环境监测和机电产品自动检测中,经常需要了

• 收稿日期:2003-08-08

作者简介:李翠薇(1976-),女,河南平顶山人,重庆大学硕士研究生,研究方向:环境工程。

解噪声的频谱结构。由于声频范围为 20 ~ 20 000 Hz, 有 1 000 倍的变化范围。为了噪声测量和分析的方便快捷, 也为了测试分析仪器设计和制造的可能性, 把这一频率范围分为若干连续频段, 每一频段称为频带, 每一频带都有自己的上限频率和下限频率, 它们遵循倍频程关系式:

$$f_k = 2^m f_i \quad (2)$$

$f_k$ ——第  $i$  个频带的上限频率;  $f_i$ ——第  $i$  个频带的下限频率;  $m$ ——倍频程数, 常用的为 1、1/3、1/12 等。

用 1/3 倍频程表示时, 一共分为 32 个频段。

## 1.2 声强测量原理

由声强定义可知, 声强是单位面积的声功率流, 在流体(包括空气)中, 平均声强

$$I_r = \overline{P(t) \cdot V(t)} \quad (3)$$

$I_r$ ——声场中测量点在  $r$  方向上的声强;  $P(t)$ ——声场中该点的瞬时声压;  $V(t)$ ——该点空气质点在  $r$  方向上的瞬时速度。

将牛顿第二定律应用于流体, 得到流体力学中的欧拉方程

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (4)$$

式(4)中:

$\frac{\partial P}{\partial r}$ ——瞬时声压沿  $r$  方向随距离的变化率, 即压力梯度;  $\rho$ ——媒质密度;  $\frac{\partial V_r}{\partial t}$ ——媒质质点在  $r$  方向的加速度分量。

将式(4)对时间积分就可以得到媒质质点的速度, 即

$$V_r = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial P}{\partial r} dt \quad (5)$$

设  $P_a$  和  $P_b$  分别是声场中测量点处沿  $r$  方向相距一小间隔  $\Delta r$  的两点瞬时声压, 则压力梯度可用有限差分近似表示为

$$\frac{\partial P}{\partial r} \approx \frac{P_b - P_a}{\Delta r} \quad (6)$$

测量点的声压可以用这两点的瞬时声压  $P_a$  和  $P_b$  的平均值表示  $P \approx (P_a + P_b)/2$

由此可得声强计算的基本公式如下:

$$I_r = -\frac{1}{2\rho\Delta r} (P_a + P_b) \int (P_b - P_a) dt \quad (7)$$

以此为原理的声强探头就是测量声强的强有力的工具。

## 2 噪声声强信号分解与合成

### 2.1 噪声声强信号的分解

噪声信号为随机信号, 在理论上不满足傅里叶变换的条件, 但由于噪声测量的信号为有限长样本的能量有限信号, 满足傅里叶变换条件, 可以进行傅里叶变换<sup>[4]</sup>。

对于一个有限长声强信号样本  $I(t)$ , 设样本长度为  $T$ , 其有傅里叶变换为

$$I(f) = \int_0^T I(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

当信号  $I(t)$  经过 A/D 采样后, 形成离散数据系列  $I(nt_s)$ ,  $t_s$  为采样间隔, 样本的数据点为  $N$ , 则对应式(8)的归一化的离散形式为

$$I[k] = \sum_{n=0}^{N-1} I[n] e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk} \quad (9)$$

$k, n \in \{0, 1, \dots, N-1\}$

根据离散傅里叶变换可知,  $I[n]$  经离散傅里叶变换后得到的离散数据  $I[k]$  是一个长度为  $N$  的复数序列, 其第  $k$  个数据可写成如下形式

$$I[k] = a_k + jb_k \quad (10)$$

可以表示为  $I(t)$  中频率为  $k/T$  的简谐分量  $I_k(t)$ 。

$$I_k(t) = I_{ck} \cos(2\pi kt/T + \phi_k) \quad (11)$$

式中:

$$I_{ck} = \frac{1}{N} \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \text{ 为 } I_k(t) \text{ 的幅值, } \phi_k = \arctan(b_k/a_k)$$

为  $I_k(t)$  的相位角。

因此, 可写成简谐函数形式

$$I(t) = \sum_{k=0}^{N-1} I_k(t) = \sum_{k=0}^{N-1} I_{ck} \cos(2\pi kt/T + \phi_k) \quad (12)$$

由此可知, 对于一个特定地点的噪声声强, 在很弱的条件下, 可以分解成若干不同频率的纯音源的声强之和。同样道理, 其声压也可以分解成若干不同频率的声压之和。

### 2.2 噪声声强级的合成

当声场中有几个声源, 或同一声源中存在多种频率成分时, 任何一点的声强是所有声源共同作用的结果。而噪声测量是以声强级表示, 而声强级是声强经比例运算和对数运算的结果。所以合成总声强级与各个声源单独作用时的声强级的关系不是简单的求和。

设媒质中有  $n$  个独立声源, 第  $k$  个声源的声强为  $I_{ck}$ , 根据声波的线性叠加性, 声场中某一点的合成瞬时声强等于各个声源单独作用时该点瞬时声强之和。即

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} + \dots + I_{cn} = \sum_{k=1}^n I_{ck} \quad (13)$$

多频噪声总声强级可以表示为

$$L_I = 10 \lg \frac{\sum_{k=1}^n I_{ck}}{I_0} \quad (14)$$

由此可见,只要能够测出或分解出噪声的每一个单纯音的声强,就可求出一定频段内的声强级和总声强级。由声强测量原理可知,只要从声强探头测得的 2 个声压信号中分别分解出其各个单一频率的声压信号,再由声强与声压的关系,利用它求出各个单一频率的声强值,就很容易实现倍频程分析和总声强级的测量。

### 3 基于 FFT 的噪声声强倍频程分析方法

常规的声强计一般是用声强探头同步拾取声压信号,并转换为电压信号,再用运算器、积分器和滤波器一步一步来实现。进行倍频程分析时,需再接入中心频率和带宽可变的滤波网络。

由上述分析可知,对于噪声信号的声强,利用 FFT 技术可以将其分解为若干不同频率的纯音源的声强之和。又由于声强是由声强探头同步测得的两声压信号经过计算所得,所以声强的测量最终归结于声强探头所测声压的值,不同频率纯音源的声强最终也可归结于不同频率纯音源的两声压的计算所得。用 FFT 技术通过对噪声两声压的分解,最终获得其对应的声强值。

又由式(13)可知,由于多声源合成声强的能量与各纯音的能量成线性关系,利用由 FFT 技术获得的倍频程分析各频段内的声强能量,利用式(14),即可得到相应频段内的声强级和总声强级。

下面考虑如何获得倍频程分析的频率。

噪声倍频程分析范围一般在 12.5 ~ 20 Hz,传统的数字信号测试分析方法中只需滤去大于 20 Hz 的部分,再进行采样分析即可。由噪声倍频程定义可知,随着频率的增加,倍频程带宽也成倍增加。若采用同一采样频率,会造成低端分辨率不足,高端分辨率过剩。为保证所得数据的精度,并且不造成必要的浪费,分段设置采样频率是十分必要的。

在作者所设计的仪器中,采用分段并行抗混滤波,抗混滤波后的信号并行输入到多路 A/D 采样板进行离散化。然后分别对各分段对应的离散信号进行常规的 FFT 变换,得到各分段对应的离散序列,然后利用声强计算软件程序得出各分段对应的声强。根据式(13)和(14),即可进行分段声强级和总声强级的计算。流程图如下所示:

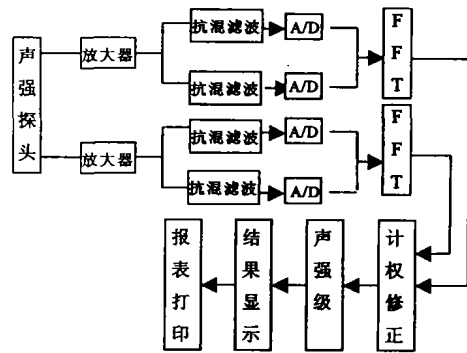


图 1 虚拟式声强分析仪流程图

成本考虑上,计算机采用通用微机而不是专用计算机,这样可以一机多用,大大降低硬件设备的综合成本;同时,由于声强测量属相位型检测系统,对高频声测量误差较大,一般都用于中低频,故不必选用频响范围很广的贵重传声器,选择频响范围适中的精密传声器就可以了。仪器一次测量就可以完成 1、1/3 倍频分析,各频段声强级、A 计权声强级及总声强级的测量。

仪器的软件部分,主要有两部分构成,一部分为应用程序,另一部分为 I/O 接口仪器驱动程序。用 VC++ 语言开发。应用程序又分为两部分,一部分为虚拟仪器的面板开发。将仪器界面设计成一个不可移动,不能改变大小、也不能随意关闭的窗口的封闭系统,通过仪器面板上的开关、按钮完成各项任务的操作。另一部分为仪器的功能模块,完成虚拟仪器的各项功能。在本仪器中,主要是根据采集到的声压利用 FFT 技术进行分解、计算声强及其声强级,并绘出声强频谱图<sup>[6]</sup>。在界面接口设计中,完全采用图形控件来完成测试参数的设定和显示。为了保证系统的稳定性和测试的可靠性,软件采用了单一进程、中断屏蔽、控件间的互连互锁以及鼠标导航等多种方法。系统由鼠标完成控制,光标移到按钮控件上时,自动变为指形光标。移到旋钮类控件上时,自动出现旋钮光标,通过鼠标的左右键实现旋钮的左右旋转。在其他区域,无论采取什么动作,系统均无响应。图 2 为声强分析仪的面板图。

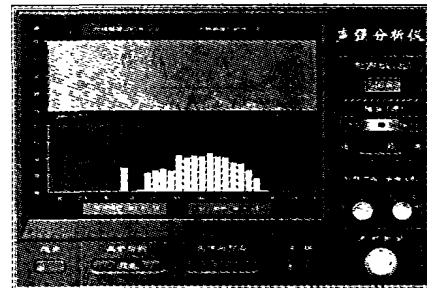


图 2 仪器面板图

## 4 虚拟实时噪声声强分析仪的设计

### 4.1 仪器的构成

仪器包括模拟信号处理和数字信号处理两大部分。硬件部分主要解决模拟信号处理、A/D 转换和与计算机数据交换的问题。仪器采用 2 块 12 位 16 通道 100 Hz 的通用 A/D 板,2 块多通道抗混滤波器,利用计算机及声强探头构成了噪声声强倍频程分析仪的硬件环境<sup>[5]</sup>。

### 4.2 仪器的应用及误差分析

为检测仪器的使用效果,对某大型客车后部的噪声进行测量,所得频谱图及相应倍频程如图 3 与图 4 所示。

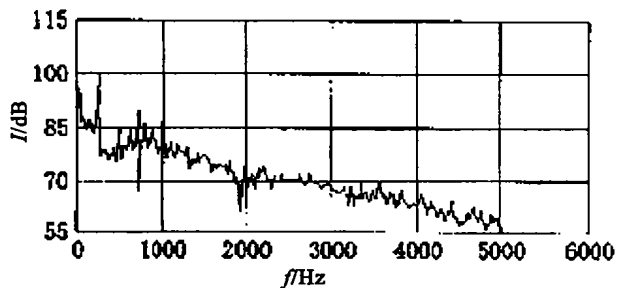


图3 车体后部声强频谱图

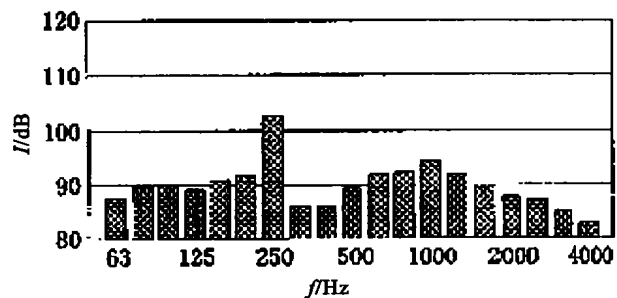


图4 车体后部 1/3 倍频程图

声强测量系统的误差主要由系统误差和随机误差构成。为减少系统的有限差分误差,对高频噪声采用较小的声强探头间隔;为减少相位失配误差,在测量低频噪声时,采用较小的声强探头间隔;为减少近场效应误差,应保证声强探头距声辐射表面距离大于二到三倍的声强探头间隔;同时为保证测量精度在 1 dB 以内,应使压 - 强指数趋近于零,残留压 - 强指数大于 7 dB。在具体的处理上,可以在数字信号处理部分进行相位失配标定、指向性能标定、和测量精度标定。

随机误差主要取决于当时的测量状况、操作工人的熟练程度等,这些可以通过多段采集平均来处理。

## 5 结束语

声强测量作为一种先进的声测量技术,具有十分广泛的应用领域。如声功率测定、声源定位和排序、机械表面声辐射效率、结构的振强和声场空间变换等。作者设计的声强分析仪充分发挥虚拟仪器的优势,融合计算机强大的硬件资源,突破了传统仪器在数据处理、显示、存储等方面的限制,大大增强了传统仪器的功能。同时利用计算机丰富的软件资源,一方面实现了部分仪器硬件的软件化,节省了物质资源,增加了系统的灵活性;一方面通过软件技术和相应的数值算法,实时、直接地对测试数据进行各种分析和处理;另一方面,通过图形用户界面技术,真正做到了界面友好、人机交互。具有成本低、精度高、可靠性好、测量速度快、操作简单等优点。较之传统仪器是一个大的进步。

## 参考文献:

- [1] 马大猷. 声学手册[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [2] 蒋孝煜,连小珉. 声强技术及其在汽车工程中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [3] 秦树人. 机械工程测试原理与技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [4] 杨昌祺,秦树人,何辉. 基于 FFT 的虚拟实时噪声倍频程分析仪[J]. 测控技术,2000,19(9):25-27.
- [5] 杨昌祺,张跃俊,秦树人. 面向图元对象的虚拟试验模态分析系统[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2003,26(5):6-10.
- [6] 郭瑜,秦树人,梁玉前. 时频分析防比跟踪技术[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2002,25(5):97-101.

## Virtual Sound Intensity Analyzer

LIE Cui-wei, QIN Shu-ren, YANG Chang-qi

(Test Center, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The Virtual Sound Intensity Analyzer is a new instrument which has more advantages than the traditional Sound Analyzer. This Analyzer is based on fast Fourier transformation and virtual instrument technique. As an application, combining software and hardware, all kinds of weight noise sound level measurement and real-time noise octave analyzes realized synchronously. The design method has been introduced from three ways, which includes hardware, software and panel. An applied example and error analyze of Virtual Sound Intensity Analyzer are given. This Analyzer is low cost, small volume, and it is also easy to operate. It can be widely used in actual applications.

**Key words:** noise measurement; real-time analyzer; virtual instrument; FFT

(编辑 成孝义)