

基于脉冲响应的测量混响时间虚拟仪器的研究

杨春庄, 李文婷, 刘海生

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 利用 Schroeder 反向积分法原理, 基于图形化编程语言 LabVIEW8.6 开发了测量混响时间的虚拟仪器 SoundExpress, 深入研究了脉冲响应的获取、滤波、信号去噪及声压级曲线拟合等关键的信号处理问题, 详细介绍了 SoundExpress 测量系统的组成和程序构架, 并验证了其测量性能。实验表明 SoundExpress 测量结果可靠, 性能稳定。

关键词: 混响时间; 反向积分法; 声压级曲线拟合; LabVIEW

中图分类号: TU112.2+6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-06-0626-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.06.015

Research on visual instrument for reverberation time measurement based on pulse response

YANG Chun-zhuang, LI Wen-ting, LIU Hai-sheng

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to Schroeder backward integration principle, the virtual instrument Sound Express to measure reverberation time is developed based on graphical programming language LabVIEW8.6. The key problems of signal processing such as acquisition of pulse response, filtering, signal denoising and sound pressure level curve fitting are researched in depth. The composition of Sound Express measuring system and the program frame are introduced in detail. The measuring performance of Sound Express is verified by experiments, and it is show that the Sound Express has reliable measurement results and stable performance.

Keywords: reverberation time; backward integration method; SPL curve fitting; LabVIEW

1 引言

混响时间不仅是描述室内音质的一个重要参量, 也是测量无规入射吸声系数和隔声量的重要中间参量。随着数字信号处理技术的不断发展, 脉冲响应法逐渐成为测量混响时间的主要方法, 具有信噪比高、速度快、精度高等优点。本文利用 Schroeder 反向积分原理研制测量混响时间的虚拟仪器 Sound Express。其原理是利用接收到的声信号和发射信号相关获得待测房间的脉冲响应, 然后对脉冲响应进行反向积分, 获得相当于稳态噪声中断后的室内声能密度衰变曲线, 进而计算混响时间。

SoundExpress 虚拟测量仪器是基于美国国家仪器有限公司(NI)推出的图形化编程语言 LabVIEW8.6 开发的测试软件, 在室内脉冲响应的获取、滤波、反向积分上下时限选取、截断误差补偿等信号处理方面吸取了许多学者以往的研究成果, 并遵循 ISO

3382. Acoustics Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters^[1]、GB/T 20247—2006/ISO 354: 2003 声学混响室吸声测量^[2]、GB/T3241—1998 倍频程和分数倍频程滤波器^[3]等规范的要求。

2 反向积分法原理

Schroeder 反向积分法测量混响时间的原理是: 声源发出 δ 脉冲后, 在测点接收到由直达脉冲与反射脉冲序列组成的室内 δ 脉冲响应函数 $p(t)$, 其时间起始点为直达脉冲到达测点的时刻。将 $p^2(t)$ 从时间 t 至 ∞ 作积分, 得到 $E(t)$:

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_{\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau) \quad (1)$$

$E(t)$ 随时间 t 的变化与室内稳态噪声声源中断后声场能量密度随时间的衰减是等价的^[4]。

根据混响时间的定义: 在扩散声场中, 当声源停止后声压级降低 60dB(相当于平均声能密度降为初始值的 10^{-6})所需的时间, 用符号 T_{60} 来表示。通过对 $E(t)$ 拟合, 可得到声压级曲线的平均衰变斜率

收稿日期: 2010-08-20; 修回日期: 2010-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(10774114)

作者简介: 杨春庄(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为建筑声学。

通信作者: 杨春庄, E-mail: 5259young@tongji.edu.cn

K , 然后利用式(2)计算混响时间。

$$T_{60} = \frac{60}{|K|} \quad (2)$$

3 SoundExpress 关于信号处理的研究

利用 Schroder 反向积分法测量混响时间对信号处理有较高的要求, 需要解决如下关键问题: 脉冲响应的获得、倍频程及分数倍频程滤波、信号去噪、声压级曲线拟合等, 本文对这些关键问题进行了深入研究。

3.1 激励信号及脉冲响应的获取

室内脉冲响应的获取方法与声源激励信号有关。常用的信号有脉冲声信号、MLS 伪随机信号及扫频信号等。

脉冲声通常用发令枪、电火花等产生。使用该类信号可直接获得室内脉冲响应, 但由于这类脉冲重复性差、频谱不平、带宽有限和动态范围小等原因, 目前在实验室测量中已很少使用。

MLS(The Maximum Length Sequence)信号是由 0 和 1 组成的周期性二进制伪随机序列。用该信号获得脉冲响应的方法是将接收到的声压信号与输入信号做快速 Hadamard 变换。随着研究的深入, MLS 信号的缺点被逐渐认识, 如受时变影响大^[5-7]、抗非线性畸变能力差^[7,8]、调制频谱时会使波峰因数降低很多而很难提高信噪比等^[7,9]。

扫频信号以其对系统时变要求较低、抗畸变能力强的优点, 在计算机技术飞速发展的今天逐渐成为测量脉冲响应常用的激励信号, 因此 SoundExpress 采用了扫频信号作为声源激励信号。

利用扫频信号获得脉冲响应的原理是: 用信号 $e_0(t)$ 激励声场, 再与测点所接收的声压信号 $y(t)$ (含噪声 $n(t)$) 作相关, 获得该点关于房间的声压脉冲响应 $p(t)$ ^[10]:

$$y(t) * e_0^{-1}(t) = e_0(t) * p(t) * e_0^{-1}(t) + n(t) * e_0^{-1}(t) = p(t) \quad (3)$$

式(3)假定电声系统的脉冲响应为理想的 δ 脉冲。相对于室内时长较大的脉冲响应, 这个假定通常是合理的。

为了避免滤波过程的频谱泄露^[11], 降低频域幅值的震荡^[12]以及电声系统响应过程的平顺性, SoundExpress 在时域上对扫频信号进行了调制, 使信号的幅值在起始端和结束端平滑地衰减至零。调制的原则是保证调制后的信号在测量要求的频带范围内能量基本没有衰减。

图 1 为在时域上经过调制的线性扫频信号的起

始端和结束端的部分信号, 信号长度为 10s; 扫频范围 20Hz~20kHz。图 2 为线性扫频信号调制前后的频域幅值对比, 从图中可以看出调制后信号的频谱在 100~5000Hz 1/3oct 测量所要求的频带范围内是平坦的。图 3 为调制前后的扫频信号自相关获得的脉冲能量对数曲线, 对比中可以看出, 调制后的扫频信号相关后得到的脉冲更为尖锐。

3.2 滤波方式

对脉冲响应进行 $1/n$ 倍频程滤波, 就可得到不同频带的脉冲响应。SoundExpress 的滤波器选取 Butterworth 数字滤波器, 输入适当的参数可满足 GB/T3241—1998 规范中对一级滤波器要求。图 4 为 Bottworth1/3 倍频程滤波衰减曲线与规范规定的一级滤波衰减曲线的比较。

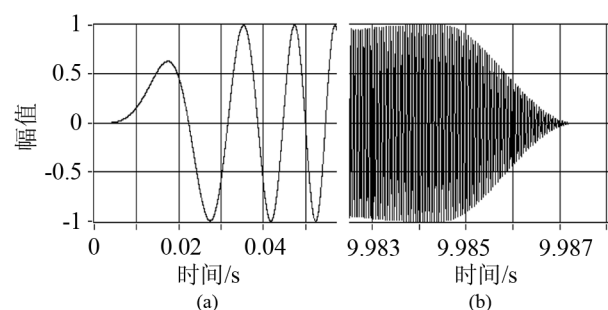


图 1 时域上被调制的线性扫频信号(a)起始端, (b)结束端

Fig.1 Modulated linear frequency sweeping (LFS) signal in time domain(a) start, (b) end

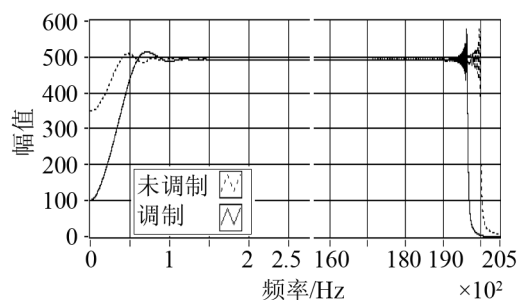


图 2 线性扫频信号调制前后的频域幅值对比

Fig.2 Comparison of the LFS signal spectrums before and after being modulated

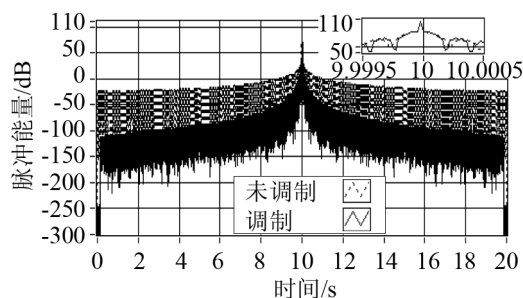


图 3 线性扫频信号调制前后自相关获得的脉冲能量对数曲线比较

Fig.3 Comparison of the logarithm pulse energy curves obtained from the auto-correlation of LFS signal before and after being modulated

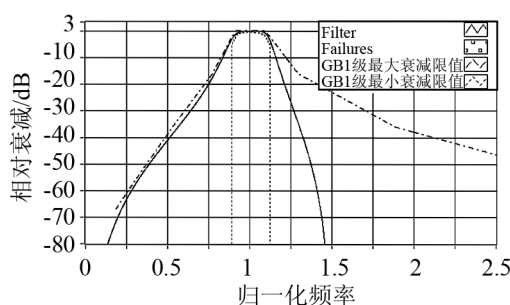


图4 Bottworth 滤波器与一级滤波器衰减曲线比较(1/3oct)

Fig.4 Comparison of attenuation curves of 1/3oct filter between Bottworth and Class 1 filters

3.3 信号去噪与声压级曲线的获得及拟合

任何测量系统所获得的信号都不可避免地含有环境和测量系统本身所产生的背景噪声。因此在获得各频带的脉冲响应信号之后的关键是对信号进行去噪处理。只有提高信噪比,倒积分所获得的等价于稳态中断后声压级衰减曲线才能真实地反应室内声能密度的衰减。脉冲响应去噪、倒积分时域的选取和声压级曲线的拟合三个步骤紧密相关。根据 ISO3382 和许多学者的研究成果,三个步骤综合处理方法有滑动窗曲线平滑化、脉冲截断法及非线性拟合等方法。去噪的方法不同,声压级曲线的拟合方法有差异。上述三种方法分别介绍如下。

3.3.1 滑动窗曲线平滑化

将一固定长度为 T_0 的时间窗(ISO3382 建议时间窗的长度大约为混响时间的 1/5)在时间轴上逐点连续滑动,对窗内脉冲响应的平方进行积分,积分后得到的声能衰减曲线为:

$$E(t) = \int_t^{t+T_0} p^2(\tau) d\tau \quad (4)$$

将平滑后的声能衰减曲线取对数再进行最小二乘法线性拟合,可进一步计算混响时间。

3.3.2 脉冲响应截断法

该法将被背景噪声淹没的脉冲响应信号截断丢弃,只对保留部分进行反向积分,同时对被截断丢失部分的能量进行补偿,得到完整的声能衰减曲线。使用该法需要解决反向积分上下限确定和截断误差补偿等问题。

(a) Schroeder 反向积分上下限的确定

Schroeder 反向积分的上限是时间变量 t , 其起始时刻为直达声到达的时刻。该时刻通常并非声压脉冲响应幅值最大的时刻,因而根据脉冲响应确定这一时刻是不确定的。根据以往研究成果,相对于声能比如 C_{50} 、 C_{80} 、 D_{50} 、 D_{80} 等音质参量的测量,直达声到达时刻的误差对混响时间的测量值影响不大^[7]。Sound Express 确定这一时刻为脉冲响应声

压级小于最大声压级 20dB 所对应的最早时刻。

反向积分的理论表达式(1)的积分下限是时间的无穷远处。在实际测量中,反向积分的下限是脉冲响应截断点 t_1 时刻,式(1)可表示为:

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C \quad (5)$$

式中: $t < t_1$, C 为脉冲响应平方在 t_1 至 ∞ 间积分的可修正值,即截断误差补偿项。

根据 ISO3382 和 GB/T20247—2006, 以及一些学者的研究成果,积分下限 t_1 的选取方法为: 如果背景噪声的声压级已知,则积分下限 t_1 为下面两条线的交点: 一条是背景噪声声压级对时间平均的水平线; 一条是脉冲响应声压级对时间平均的衰变曲线。SoundExpress 确定 t_1 的方法为: 首先对脉冲响应声压级衰减曲线采用滑动的时间窗进行初步平滑化,再对平滑后的曲线进行分段最小二乘线性拟合,便得到图 5 中的曲线 2(注: 为方便显示,图 5 中曲线 2 及曲线 3 在纵向上作了适当的平移),由曲线 2 来确定 t_1 时刻。

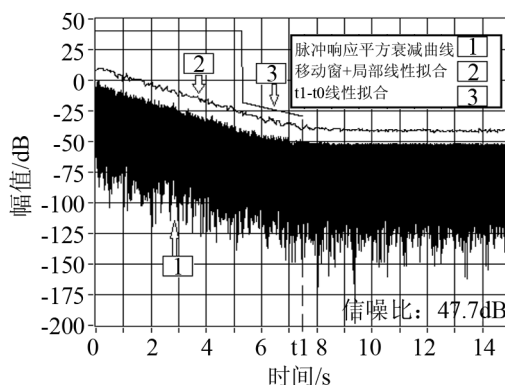


图5 脉冲响应声压级曲线

Fig.5 Sound pressure level of pulse response

(b) 截断误差补偿

如果忽略(5)中的补偿项 C , 则会造成混响时间测量结果系统性低估。SoundExpress 采用 ISO3382 中建议的补偿方法, 计算方法如下:

$$C = \int_{\infty}^{t_1} p^2(\tau) d(-\tau) = \int_{\infty}^{t_1} p^2(t_1) 10^{[(t-t_1)k/10]} d(-\tau) \quad (6)$$

$p^2(t_1)$ 是 t_1 时刻脉冲响应能量, k 是 t_0 至 t_1 之间脉冲响应声压级曲线平均下降斜率, t_0 是比截断点时刻 t_1 的声压级高 10dB 的点所对应的时刻。

理论上 C 值计算的积分下限取值应趋近于无穷大, 考虑到系统的计算速度, 在满足测量精度的前提下, 式(6)的积分下限为一合理数值即可。

对式(5)得到的声能衰变曲线取对数得到声压级衰变曲线。根据 ISO3382 规定, 对各个频带 -5~-25dB 间声压级衰变曲线进行最小二乘线性拟合, 计算出拟合直线斜率 K 值, 由式(2)求混响时间 RT_{60} 。

表 1 数据是某混响室 1/3 倍频程 1000Hz 在不同信噪比条件下有、无补偿项的混响时间测量结果对比。

表 1 不同信噪比条件下有无补偿项计算的混响时间(1000Hz 1/3oct)
Table 1 Compensated and uncompensated Reverberation time for different SNR (1000Hz 1/3oct)

信噪比/dB	T_{20}/s	
	未补偿	补偿
35.7	4.919	5.267
39.9	4.680	4.700
45.2	4.531	4.532
50.3	4.530	4.530
61.7	4.530	4.530

从表 1 数据可以看到，当信噪比大于 45dB 时，补偿(补偿时长为 3s)与未补偿所计算的混响时间只在千分位上有较小的差异，因此 SoundExpress 计算截断误差补偿 C 项的原则是：当信噪比小于 45dB 时进行 C 项补偿，否则省略 C 项。

3.3.3 非线性拟合

该法假定室内声场声能按照单一指数衰变，背景噪声为稳态噪声，那么室内声场声能密度 $F(a, t)$ 可表达为^[11]：

$$F(a,t)=E(0)e^{(-13.8t/T60)}+N(T-t) \tag{7}$$

式中 $a=[E(0), T60, N]$ 为待拟合的参量，其中 $E(0)$ 、 $T60$ 和 N 分别为声能衰减曲线的初始声能、待计算的混响时间及噪声的平均功率， t 为时间变量(离散的时间序列)， T 为拟合声能衰减曲线的总时长。

对式(7)取对数运算即得声场声压级的非线性模型：

$$10\log_{10}^{F(a,t)}=10\log_{10}[E(0)e^{(-13.8t/T60)}+N(T-t)] \tag{8}$$

由式(1)可得实测的声场声能为：

$$E(t)=\int_t^Tp^2(\tau)d\tau=\int_T^Tp^2(\tau)d(-\tau) \tag{9}$$

对式(9)取对数运算即得 0~ T 时间段内的含有噪声的声场声压级衰变曲线：

$$10\log_{10}^{E(t)}=10\log_{10}\left[\int_T^Tp^2(\tau)d(-\tau)\right] \tag{10}$$

对式(10)按照式(8)的模型进行声压级残差最小二乘拟合来估算参量 a ，从而估算混响时间。在声场扩散较好及稳态噪声的条件下，当拟合时长 T 大于待测混响时间， T 长度的变化对混响时间估值的影响不大。

表 2 是某混响室内 1/3 倍频程 5000Hz 在不同拟合时长条件下混响时间的估值对比。

3.3.4 三种去噪方法的比较

固定滑动窗曲线平滑化在本质上未对信号进

表 2 不同拟合时长时混响时间估值对比(信噪比：35.48dB)
Table 2 Comparison of reverberation time for different fitting duration(SNR: 35.48dB, $t_1=1.995s$)

拟合时长/s	4	7	12	16
混响时间/s	2.454	2.452	2.446	2.451

行去噪，只是采用固定平滑窗的办法使得通过积分得到的早期声能信号相对少地含有噪声信号，而不能提高后期受噪声污染严重的数据的信噪比，因此使用该法时需要较高的信噪比。同脉冲响应截断法相比，其优点是不必对脉冲响应进行截断，测量结果不受截断时刻点的影响。

脉冲响应截断法的优点是最大限度地利用有效信号，并避免后期噪声的干扰，在一般信噪比的条件下仍可获得可信的测量结果。其缺点是测量结果易受截断点位置的影响^[13]，而且由于积分的累积作用，早期的声能信号内含有较多的噪声。

非线性拟合法的优点是彻底地将信号与噪声进行分离，受信号截断时刻的影响小，在较小的信噪比条件下也可取得准确的测量结果。其缺点是使用条件比较严格：声场能量必须按单一指数方式衰减，背景噪声是稳态噪声，若非如此，拟合会产生较大的误差。

SoundExpress 可选择上述任一种方式进行去噪和声压级曲线拟合，默认脉冲响应截断法。SoundExpress 对该法进行了改进：即先截断，然后使用固定滑动窗平滑化以减少噪声积分累积效应对早期声能信号的影响。

3.4 信噪比的要求

在测量中应当尽量提高信噪比，对于高的信噪比，上述三种处理方法的测量结果基本一致，对于低的信噪比，如果噪声是非稳态的(如交通噪声、间歇性的施工噪声等)，那么上述三种去噪方法得到的测量结果会有较大的差别，将无法断定哪种方法更为准确。

ISO3382 规定各个频带声压级衰变曲线的取值取值范围是-5~-25dB，其下限应比测量系统的整体背景噪声高出至少 10dB，即测量系统的信噪比应高于 35dB。SoundExpress 计算信噪比的方法是：用脉冲响应声压级曲线上最大值减去截断点处的声压级。SoundExpress 默认的信噪比为 35dB，当信噪比低于 35dB 时，SoundExpress 会亮起红灯报警。

4 SoundExpress 虚拟仪器简介

该系统的最大特点为数据处理的可视化及良好的开放性。相对传统模拟仪器，SoundExpress 可

以图形化地显示声压级曲线衰变的线性程度,进而判断测量数据的有效性^[14]。SoundExpress 具有良好的后期可开发性^[14],声学工作者可根据工作的需要添加或更改软件的功能模块,从而达到特定的功能。

SoundExpress 测量系统是由信号发射、采集和数据处理三部分组成的,均由电脑中的虚拟仪器控制,其程序框架、硬件系统及操作界面介绍如下。

4.1 程序框架

程序流程主要部分如图 6 所示。其中“数据处理”框图中的 1OCT 和 3OCT 模块为 SoundExpress 内置的功能模块,集倍频程滤波、反向积分、截断误差补偿计算、 $T_{15}/T_{20}/T_{30}$ 选择、曲线拟合、混响时间计算、信噪比显示及报警等功能于一体。

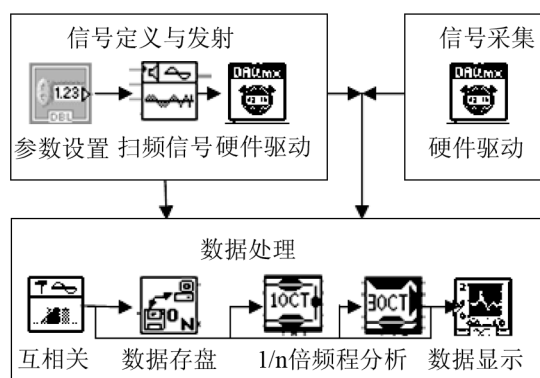


图 6 SoundExpress 测量系统的程序框架

Fig.6 Program frame of SoundExpress measuring system

4.2 硬件组成

SoundExpress 测量系统的硬件主要由信号发射、采集和控制三部分组成。发射部分由 D/A 转换卡(NI-6733)、功放及扬声器组成。采集部分由传声器、前置放大和 A/D 转换卡(NI-4496)组成。D/A 和 A/D 转换卡以及控制系统集成在 NI-1042Q 机箱内。图 7 为 SoundExpress 测量系统的硬件照片。

NI-4496 主要参数:采样率高达 204.8kHz/s, 16 路同步采样模拟输入, 24 位分辨率, 具有 114dB 动态范围, 抗混叠滤波器等。NI-6733 主要参数: 8 路 1MS/s 的高速模拟输出, 16 位分辨率。

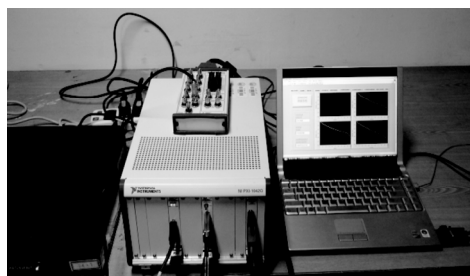


图 7 SoundExpress 测量系统硬件

Fig.7 Hardware of SoundExpress measuring system

4.3 操作界面简介

SoundExpress 既可以现场实时测量,也可以后期调用存盘数据进行更深入的分析。其操作界面由测量模式、参数设置区与数据显示区构成,见图 8。测量模式、参数设置区由两个子面板构成。其中面板一设置了实时测量/调用分析、单通道/双通道测量模式、声压级曲线拟合模式、分析模式选项。在面板二中设置了采样率、信号幅值、发射信号时长、采集信号时长、信号发射及采集通道选择等信号参数设定按钮。

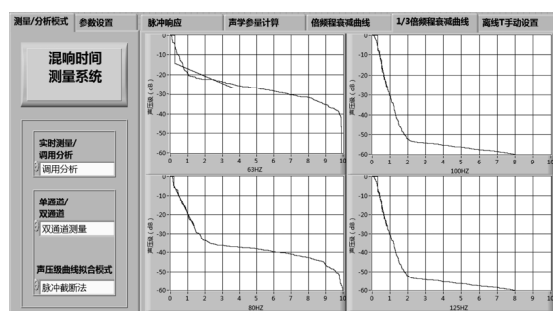


图 8 SoundExpress 测量系统软件界面

Fig.8 Software interface of SoundExpress measuring system

数据显示区由脉冲响应显示面板、声学参量计算面板、倍频程和三分之一倍频程衰减曲线显示面板及离线手动分析面板构成。

5 SoundExpress 性能验证

为了检验 SoundExpress 测量性能,用 B&K PULSE 及 DIRAC 系统对长、短混响场分别进行了对比测试。B&K PULSE 系统是利用稳态噪声中断法,对数次测量结果取平均值的方式得到混响时间的。DIRAC 系统采用脉冲响应法。图 9 是三个系统测量结果的比较。在 100~5000Hz 内 SoundExpress 与 DIRAC 测量值吻合很好,在 100~400Hz PULSE 与 SoundExpress 及 DIRAC 的测量值略有偏差。

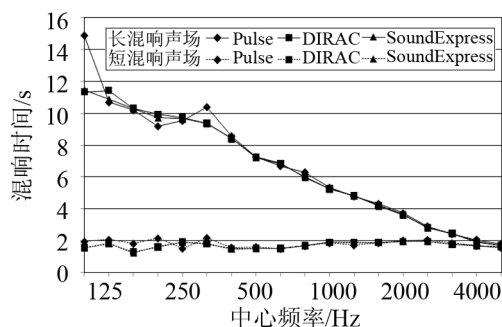


图 9 三个测量系统混响时间测试结果对比

Fig.9 Comparison of reverberation time measurement results acquired by three different measuring systems

表3是SoundExpress在混响室内六个测点关于10次测量结果的标准偏差RSD统计。各1/3倍频带的RSD均小于0.01。

以上对比及重复测量实验表明 SoundExpress 的测量结果是可靠的, 系统具有很好的稳定性。

表3 SoundExpress 测量数据相对标准偏差比较(每点测量10次)

Table 3 RSD comparison of 6 point data measured by SoundExpress(10times per point)

频率	点1	点2	点3	点4	点5	点6
125Hz	0.0032	0.0011	0.0016	0.0002	0.0015	0.0009
250Hz	0.0083	0.0003	0.0006	0.0011	0.0005	0.0005
500HZ	0.0031	0.0006	0.0011	0.0012	0.0006	0.0010
1kHz	0.0019	0.0006	0.0012	0.0010	0.0008	0.0009
2kHz	0.0015	0.0020	0.0019	0.0013	0.0012	0.0013
4kHz	0.0015	0.0020	0.0016	0.0016	0.0018	0.0020

6 结论

本文基于 Schroeder 反向积分法和图形化编程语言 LabVIEW8.6 开发了测量混响时间的虚拟仪器 SoundExpress, 该仪器由信号发射、接收和数据处理三部分组成, 具有如下特点:

(1) 该系统可将数据处理结果图形化, 可以通过观察声压级曲线衰变形态, 判定测量结果的有效性; 可根据使用者的需求方便地增加个性化的数据处理功能, 具有良好的开放性;

(2) 采用扫频信号和相关运算获得室内脉冲响应。同其他信号相比, 该信号具有对系统时变要求低、抗畸变能力强和可重复的优点, 经过时域调制后, 可减少滤波过程的泄漏, 获得更加精确的脉冲响应。

(3) 采用 Butterworth 数字滤波器。输入合适参数后, 该滤波器满足 GB/T3241—1998 规范对一级滤波器的要求。

(4) 默认脉冲响应截断法和最小二乘法作为信号去噪和声压级曲线拟合方法, 同时可根据信噪比和噪声特性选择滑动窗法和非线性拟合法, 从而得到最佳测量结果。

对比实验和重复试验表明 SoundExpress 具有测量结果稳定、可靠和速度快、精度高的特点。

7 致谢

上海现代建筑设计(集团)有限公司现代都市设

计院的章奎声声学设计研究所宋拥民博士提供 DIRAC 声学测量系统, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] ISO3382. Acoustics measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters[S]. 1997.
- [2] GB/T 20247—2006/ISO 354:2003. 声学 混响室吸声测量[S]. GB/T20247--2006/ISO 354: 2003, IDT. Acoustics--Measurement of sound absorption in a reverberation room[S].
- [3] GB/T 3241—1998. 倍频程和分数倍频程滤波器[S]. 1998. GB/T 3241--1998. Octave-band and fractional-octave-band filters[S]. 1998.
- [4] M. R Schroeder. New method of measuring reverberation time[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1965, **37**: 409-412.
- [5] Vorlander M, Kob M. Practical aspects of MLS measurements in building acoustics[J]. Applied Acoustics, 1997, **52**(3/4): 239-258.
- [6] Svensson U P, J L Nielsen. Errors in MLS measurements caused by time variance in acoustic systems[J]. Audio Eng. Soc., 1999, **47**(11): 907-927.
- [7] Beranek L L, Hidaka T, Nishihara N. Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied stat[J]. Acoust. Soc. Am., 2001, **109**(3): 1028-1042.
- [8] Mateljan I. Signal selection for the room acoustics measurement[C]. Proc. 1999 IEEE Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics, New York, 1999: 199-202.
- [9] Mommertz E, S Muller. Measuring impulse responses with digitally pre-emphasized pseudorandom noise derived from maximum-length sequences[J]. Applied Acoustics, 1995, **44**(3): 195-214.
- [10] 赵跃英. 室内声学测量中声源性能的研究以及扬声器响应影响的消除[D]. 同济大学, 2003. ZHAO Yueying. Research on source performance and elimination of its response in room acoustics measurement[D]. Tongji University, 2003.
- [11] 莫方翔. 室内界面无规入射散射系数测量方法的研究[D]. 同济大学, 2004. MO Fangshuo. Study on the Measurement of the random-incident scattering coefficient of surfaces in room[D]. Tongji University, 2004.
- [12] Farina A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique[J]. Audio. Eng. Soc, 2000, **48**(4): 350.
- [13] Morgan D R. A parametric error analysis of the back ward integration method for reverberation time estimation[J]. J Acoust Soc Am, 1997, **101**(5): 2686-2693.
- [14] 杨春庄, 刘海生. 混响时间测量虚拟仪器研究[J]. 声学技术, 2009, **28**(5): 311-312. YANG Chunzhuang, LIU Haisheng. Visual instrument research on reverberation time measurement[J]. Technical Acoustics, 2009, **28**(5): 311-312.