

基于短时傅里叶变换的异常音检测方法

李宏斌¹, 徐楚林^{1,2}, 温周斌^{1,2}

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032; 2. 浙江中科电声研发中心, 浙江嘉善 314100)

摘要: 提出一种基于短时傅里叶变换的扬声器异常音检测方法, 该方法首先对由扫频信号激励的扬声器声响应信号进行短时傅里叶变换, 然后根据扬声器异常音信号的特点将所获得的时频图分割为若干区域, 并提取各个区域内的时频图所对应的矩阵, 最后通过计算被测扬声器声响应信号所对应区域内的矩阵与黄金样品所对应的矩阵之间的距离来判断该扬声器是否存在异常音。还简要介绍了基于该方法实现的扬声器异常音在线检测仪, 实验室及企业生产线初步检验结果表明, 该方法简单有效, 可用于部分种类扬声器的异常音在线检测。

关键字: 扬声器; 异常音; 短时傅里叶变换; 时频图

中图分类号: TB54

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-02-0145-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.02.010

A STFT based method for detecting Rub & Buzz defects of loudspeaker and its application research

LI Hong-bin¹, XU Chu-lin^{1,2}, WEN Zhou-bin^{1,2}

(1. Shanghai Acoustics Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China;

2. Zhejiang Electro-Acoustic R&D Center, Chinese Academy of Sciences, Jianshan 314115, Zhejiang, China)

Abstract: This paper presents a new method of Rub & Buzz detection for loudspeakers based on Short-Time Fourier Transform(STFT), which is performed as follows: Firstly, the one-dimensional sound signal, which is stimulated by a swept sinusoidal signal, is changed into a two-dimensional time-frequency map; Secondly, the time-frequency map is divided into several segments according to the irregular signals' (Rub & Buzz) characteristics and the corresponding matrix is extracted in each segment; Thirdly, the distances between each matrix and each standard matrix which is extracted from Golden Units are calculated. By comparing the distances with a certain threshold, the tested loudspeaker can be identified whether PASS or FAIL. The experimental results show that this method is simple and effective, and has some practical value in the on-line QC quality control.

Key words: loudspeaker; irregular signals; short-time Fourier transform; time-frequency map

0 引言

扬声器在线质量管控的一种重要方式是人工听音, 它采用正弦扫频信号作为扬声器的激励信号, 由听音员用人耳听测扬声器所发出的声音来判断扬声器是否存在异常音, 该过程亦称为扬声器的异常音检测^[1]。这种依靠听音员人工听音的方法存在一些弊端, 其主观判断的结果会随着听音员的经验、年龄、性别、情绪、注意力及疲劳程度等因素的影响而变化, 即使是同一位听音员对同一只扬声器的两次听音也不尽相同, 难以保证检测结果的一致性。

另外, 长期检听也会对听音员的听觉系统乃至

神经系统造成损伤, 危害其身体和心理健康。因此, 电声业界一直企盼采用仪器设备来识别和判断扬声器是否存在异常音。

正弦扫频信号激励下的扬声器声响应信号是非平稳信号, 其频谱是随时间变化的。传统的傅里叶变换并不适用于对非平稳信号的分析, 而短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)是一种比较有效的处理非平稳信号的方法^[2]。

近十年来, 国内外对异常音检测技术的研究持续不断, 其中不乏有使用短时傅里叶变换的方法。卢学军^[3]、于德敏^[4]采用短时傅里叶变换得到扬声器声响应信号的时频图, 然后以颜色查找表的方式对每幅时频图赋以灰度值, 并通过比较被测扬声器的灰度向量值与黄金单元灰度向量值之间的距离来对各类有缺陷的扬声器的时频图进行分析。王红星同样采用短时傅里叶变换获得扬声器声响应信号的时频图, 但只提取时频图上高次谐波能量作为特

收稿日期: 2013-10-23; 修回日期: 2014-01-22

作者简介: 李宏斌(1989—), 男, 上海人, 硕士研究生, 研究方向为电声技术。

通讯作者: 李宏斌, E-mail: feishastop@gmail.com

征量来判断其是否存在异常音^[5]。王思俊则将短时傅里叶变换与人工神经网络这两种方法相结合,通过选择合适的训练样本来获得用于判断扬声器是否存在异常音的网络^[6],此方法虽然较为准确,但计算复杂度较高。Manuel Davy 等提出通过线性调频信号激励扬声器,并对声响应信号进行短时傅里叶变换来得到声响应信号的时频图,然后从该时频图中提取出特征向量并计算与黄金样品的特征向量之间的 Kolmogorov 距离,并将该距离与设定的门限进行比较,从而判断扬声器是否存在异常音^[7]。上述方法中均使用了短时傅里叶变换,但并没有结合扬声器产生异常音的特点对获得的时频图做更为深入的分析。

本文将结合扬声器异常音的特点对由短时傅里叶变换所获得的时频图做进一步分析,以提高扬声器异常音检测的正确率。

1 扬声器异常音的特点

扬声器分为动圈式扬声器、静电式扬声器、压电式扬声器、平膜式扬声器和数字式扬声器等,本文只针对应用广泛的动圈式扬声器。

导致扬声器产生异常音的主要原因除设计缺陷之外,就是工厂生产线的制作工艺和组装失误。图 1 给出了四种典型异常音产生的物理机理的示意图^[8,9],分别为由于磁路、音圈与磁隙不同轴导致的擦圈音(图 1(a)),由于胶水粘接等原因导致折环与纸盆发生撞击所产生的 Buzz 音(图 1(b)),由于引入电信号的引线过长导致音圈大振幅运动中碰触扬声器振膜而产生的打线声(图 1(c)),以及在长音圈或超长音圈设计时因设计缺陷等造成的音圈撞击扬声器上下夹板所产生的撞击音(图 1(d))。

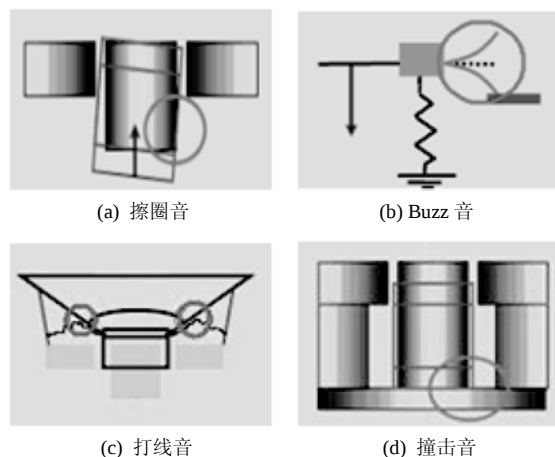


图 1 扬声器异常音产生的物理机理示意图

Fig.1 The physical mechanism which causes loudspeaker's Rub & Buzz

分析产生上述四种典型异常音的物理机理可以发现,其最有可能发生的情况均出现在扬声器振动位移最大时,也即扬声器的谐振频率附近。

由于灰尘、铁屑等颗粒掉入扬声器磁隙内部而产生的“松散颗粒异常音”,其无明显特征,具有较强的随机性^[10]。

研究表明扬声器的常规参数不能清晰地表征异常音^[9]。以频率响应为例,检测 6 个同一型号的微型扬声器,其中 3 个有异常音,另外 3 个则为良品,它们的频响曲线如图 2 所示。由图 2 可知,6 条频响曲线的差异微乎其微,通过它们是难以检测出扬声器是否存在异常音的。

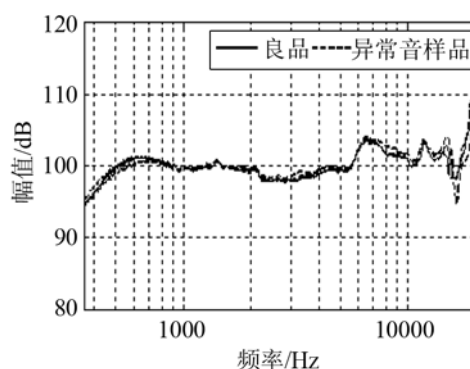


图 2 良品与异常音样品的频响曲线

Fig.2 Frequency response curves of PASS and FAIL Units

人工听音检测异常音的方法是基于人耳所具有的特殊听觉生理特点——掩蔽效应和听觉响度曲线^[11],如图 3 所示。掩蔽效应分为频域掩蔽和时域掩蔽,从频域掩蔽效应来说,一个强纯音会被掩蔽在其附近同时发声的弱纯音之下;而从时域掩蔽讲,如果两个声音在时间上特别接近,人类在分辨它们的时候也会产生困难。听觉响度曲线则指人耳对不同频率声音的敏感程度是不同的。听音员在听音时表现为低阶次谐波被基频响应所掩蔽,而高阶次谐波恰好落入人耳听觉敏感区域,故人耳对具有高阶次谐波的异常音较为敏感。

然而,受人耳听觉生理的时域掩蔽特性的限制,人耳听音很难检测出持续时间极短的异常音。除此之外,由于人耳听音受技术熟练程度、身体与情绪状况以及工作疲劳程度等因素影响,听测结果的正确性难以保证。另一方面,由于异常音的显著程度不同,人耳听音也很难用一个稳定而一致的标准来判断扬声器是否存在异常音。

综上所述,扬声器异常音通常发生在扬声器振动位移最大的时候(即扬声器的谐振频率附近),且具有较高的稳定性;而根据人耳的听觉特性及实际听音经验,扬声器异常音信号的另一特点体现在高

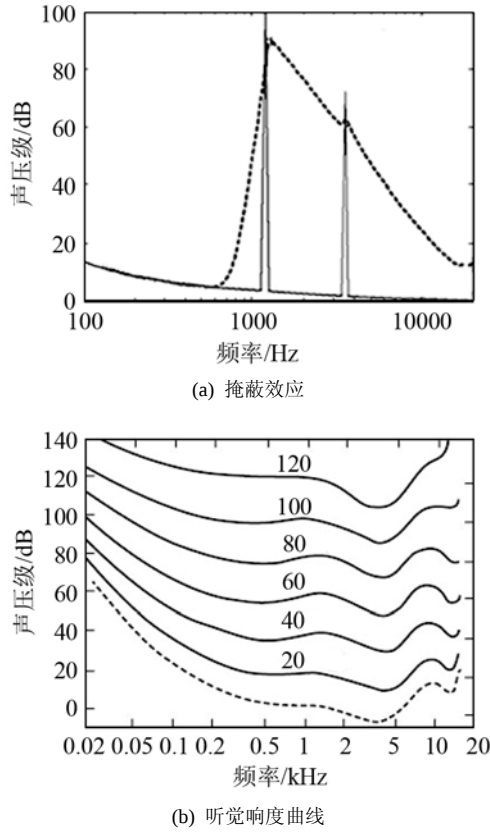


图3 人耳听觉生理特点

次谐波上。采用扬声器的常规曲线参数难以判别是否存在异常音，必须充分考虑扬声器的异常音信号特点对症下药。

2 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换是利用适当宽度的窗函数，在时间上把信号划分成若干小段，对每一段数据进行傅里叶变换，得到其局部频谱特性，局部频谱的综合组成短时傅里叶变换谱^[12]，所以，短时傅里叶变换能反映频率成分随时间变化的规律。

对于信号 $x(t)$ ，其短时傅里叶变换定义为

$$STFT_x(\tau, f) = \int [x(t)\omega^*(t-\tau)]e^{-2\pi f t} dt \quad (1)$$

其中， $\omega(t)$ 为窗函数。

对 $x(t)$ 和窗函数 $\omega(t)$ 进行离散化处理，其离散短时傅里叶变换定义为

$$STFT[m, n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k) \times W(kT - mT) e^{-j2\pi n F k} \quad (2)$$

其中， T 、 F ($T > 0, F > 0$) 分别为时间和频率的采样周期， $X(k)$ 是离散的原始信号， m 为时频图的横坐标(对应时间)， n 为时频图的纵坐标(对应频率)。

短时傅里叶变换通过选取固定的窗函数，克服了传统傅里叶变换不能及时反映信号时间信息的

缺陷。窗函数长度越大，时间分辨率越差，频率分辨率越好。然而，短时傅里叶变换的窗函数受到 Heisenberg 不确定准则的限制，其时频窗的面积不能小于 2。并且，一旦选定了窗函数，其频率分辨率就确定了。因此，根据对时间分辨率和频率分辨率的双重要求选取合适的函数窗对短时傅里叶变换尤为重要，更为详细的内容可参阅文献[13]。

3 基于短时傅里叶变换的异常音检测方法

根据第 1 节所分析的扬声器异常音的特点，本文提出的扬声器异常音检测方法将重点分析扬声器谐振频率附近所对应时间段的时频图特征，同时兼顾其他频段的时频图特征对扬声器是否存在异常音进行判断。

首先，采用连续对数扫频信号^[14]激励被测扬声器。如图 4 所示，连续对数扫频信号的频率随时间以对数形式增长。使用该信号作为激励信号，不仅可以不遗漏地测试所有频率点，还可以在总的测量时间中给每个倍频程的频段分配均匀的测量时间，以加快测试速度。

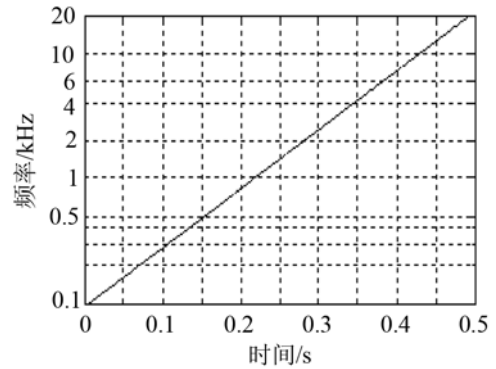


图4 连续对数扫频信号频率变化图

必须将采集到的被测扬声器的声响应信号做归一化处理后再进行短时傅里叶变换，得到被测扬声器声响应信号的时频图。经典的线性归一化公式如下：

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

其中： x 、 y 分别为转换前、后的值； $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为样本的最大值和最小值。

然后，结合第 1 节所述的扬声器异常音的特点对时频图做分割：取时频图中基频以上的部分作为分割对象，以横轴(测试时间)为参考在谐振频率附近所处的时间段进行细致的分割，而在其余时间段

内进行粗略的分割, 分割示意图如图 5 所示, 每个方框表示一个分割区域。提取分割后的各个区域内的时频图所对应的矩阵, 然后计算该矩阵与黄金样品所对应的矩阵之间的 Kolmogorov 距离, 以此作为扬声器是否存在异常音的特征量。Kolmogorov 距离公式为

$$D = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left| \frac{|G(i, j)|}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M G(i, j)} - \frac{|T(i, j)|}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M T(i, j)} \right| \quad (4)$$

其中: D 表示黄金样品与被测样品的某个分割区域内的距离; G 表示黄金样品某个分割区域内的矩阵; T 表示与黄金样品所对应的分割区域内的被测样品的矩阵。

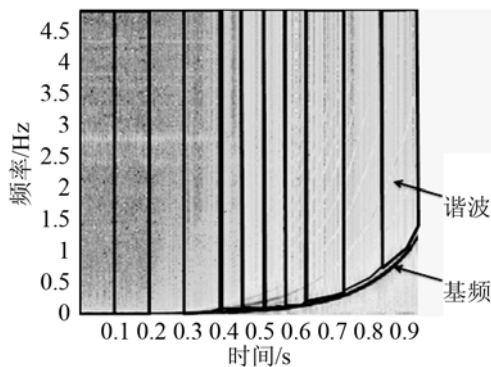


图 5 时频图分割示意图

Fig.5 The schematic diagram of partitioning the time-frequency map

采用 Kolmogorov 距离作为特征量的原因是多方面的: 一方面, Kolmogorov 距离相较于欧氏距离具有更好的归一化特性, 便于设定门限; 另一方面, 相较于二维相关系数, 它具有计算速度快的特点; 并且, 实验结果亦表明采用 Kolmogorov 距离作为特征量具有较低的漏检率。

另外, 考虑到某些异常音的持续时间极短, 而短时傅里叶变换又存在时间分辨率不足的问题, 故在谐振频率附近取能量的平均值来反映扬声器的振动情况, 以弥补时间分辨率不足的缺点。因此, 将被测样品谐振频率附近的能量平均值的 2 倍除以黄金样品谐振频率附近的能量平均值的比值亦作为一特征量。

最后, 将所有分割区域内的矩阵与黄金样品所对应的矩阵之间的多个 Kolmogorov 距离以及谐振频率附近的能量比值连成一特征曲线, 并与设定的门限进行比较, 若特征曲线超过设定的门限值则判定为存在异常音; 反之, 则无异常音。

具体的扬声器异常音检测流程图如图 6 所示, 详细过程可参阅笔者已申请的专利^[15]。

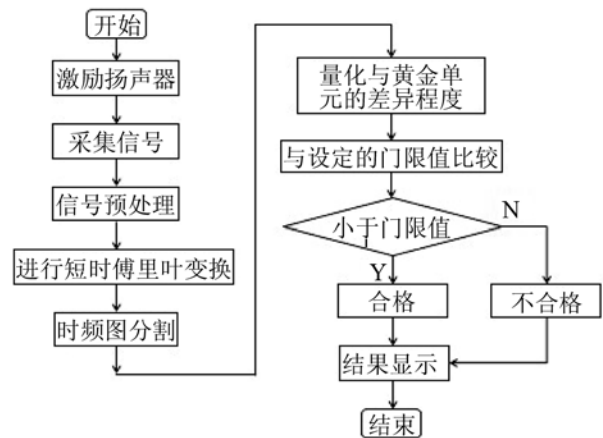


图 6 扬声器异常音检测流程图

Fig.6 The flowchart of Rub & Buzz detection

4 系统实现及实验结果

为了验证本文所提出的扬声器异常音检测方法, 设计并实现了如图 7 所示的扬声器异常音检测系统。由计算机产生的连续对数扫频信号经声卡的 D/A 转换输出, 再由功率放大器放大后激励被测扬声器。由传声器采集得到的被测扬声器的声响应信号和被测扬声器的电信号(为测试 T/S 参数)同时送声卡做 A/D 转换后送交计算机处理。计算机根据信号处理的结果判断扬声器是否存在异常音。

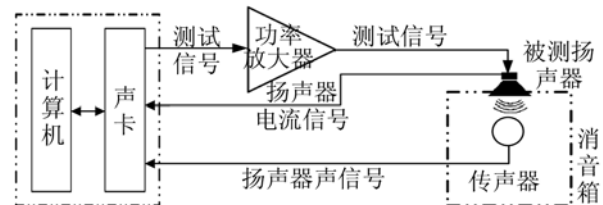


图 7 扬声器异常音检测系统框图

Fig.7 The diagram of Rub & Buzz detection system

图 8 给出了某一型号的微型扬声器的典型时频图, 其中图 8(a)为良品的时频图, 而图 8(b)为不良品(严重擦圈音)的时频图。比较图 8(a)和 8(b), 本检测系统可准确区分扬声器是否存在异常音。图 9 为图 8 所对应的扬声器异常音曲线及其门限值。

采用本系统针对某款微型扬声器进行异常音

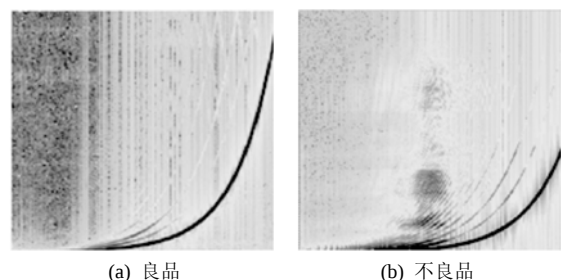


图 8 典型样品的时频图

Fig.8 The time-frequency maps of typical samples

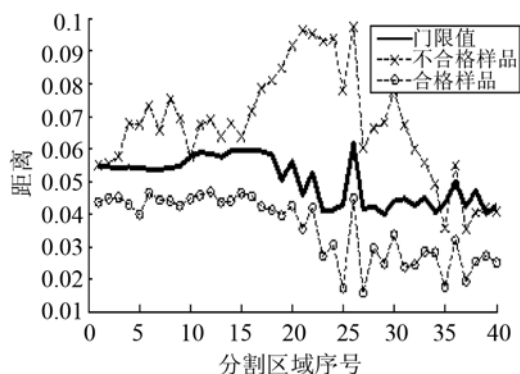


图9 典型样品的异常音曲线和门限值

Fig.9 The Rub & Buzz curve of the typical samples and their threshold

检测, 被测样品 249 个。由专业的听音员进行人工检测, 其中良品 108 个, 存在异常音的不良品有 141 个。采用的激励信号的频率范围为 20~20000 Hz, 电压有效值为 1.5V, 扫频时长为 0.7s。扬声器和传声器采用垂直对准方式, 两者之间距离为 3.5 cm。整个测试共计用时 0.97 s, 其中扫频信号激励用时 0.7s, 计算用时 0.05s, 特征曲线绘图用时 0.2s。测试时间满足企业对测试用时的要求。

表 1 给出了采用本文所提出的将时频图分割并对谐振频率对应区域更为细致分割处理方法, 与不分割时频图的方法进行异常音检测的检测结果对比统计表。由表 1 可知, 前者相较于后者可更加有效地降低漏检率。

表 1 微型扬声器检测结果
Table 1 The detection results of micro speakers

是否进行分割	良品数	不良品数	漏检数	漏检率/%	虚警数	虚警率/%
否	109	140	20	7.63	19	8.03
是	98	151	6	2.41	16	6.43

与此同时, 采用本系统还对该款微型扬声器进行了工厂生产线检验测试。由有经验的听音员检测认为有异常音的 1106 个的不合格样品, 经本系统检测判定为良品的有 52 个, 不良品的有 1044 个, 而根据工厂统计, 该款产品的实际不合格率约为 3%, 因而, 初步估计本系统的漏检概率约为 0.14%。

值得说明的是表 1 中所列漏检的 6 个不良品和工厂生产线上判为良品的 52 个样品均为轻微异常音, 其人工听音判别标准亦可松可紧, 因而, 亦可视作本系统判断正确。

5 结论

本文针对典型扬声器异常音特征提出一种基于短时傅里叶变换的异常音检测方法, 将傅里叶变换所得扬声器声响应信号转化为二维时频图, 并根

据异常音特点对该时频图进行分割后再与“黄金单元”进行比较。最后, 综合考虑多个参量并通过设定合理门限值对扬声器是否存在异常音进行判断。该方法计算简单, 检测快速。实验室及工厂生产线检验结果表明, 所研制的检测系统基本可替代人工听测某一特定类型的微型扬声器。

参考文献

- [1] 张再荣. 扬声器纯音检听及故障分析[J]. 电声技术, 2000(8): 31-33.
ZHANG Zailong. Rub and buzz detection and fault analysis[J]. Audio Engineering, 2000(8): 31-33.
- [2] 董建华. 几种时频分析方法的比较及应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(4): 312-316.
DONG Jianhua. A comparison of time-frequency analysis methods and their applications[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(4): 312-316.
- [3] 卢学军. 基于信号处理的扬声器故障诊断方法研究[J]. 声学电子工程, 2007(86): 45-48.
LU Xuejun. Research of loudspeaker fault diagnosis method based on signal processing[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2007(86): 45-48.
- [4] 于德敏. 基于时频分析的扬声器异常故障诊断方法[D]. 天津: 天津科技大学, 2007.
YU Demin. Loudspeaker fault diagnosis method based on time-frequency transform of acoustic signal [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2007.
- [5] 王红星. 一种基于高阶频率能量均值的扬声器异常故障诊断方法[J]. 天津科技大学学报, 2010, 25(6): 46-49.
WANG Hongxing. A diagnosis method for loudspeaker sound fault based on the higher-order frequency energy[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2010, 25(6): 46-49.
- [6] 王思俊. 基于时频分析的扬声器故障在线检测方法研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2008.
WANG Sijun. Research on the fault-detection method based on the time frequency analysis for the loudspeakers[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2008.
- [7] Manuel Davy, Doncarli Christian. A new nonstationary test procedure for improved loudspeaker fault detection[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2002, 50(6): 458-469.
- [8] Klippel W. Can an instrument compete with a human ear at end-of-line testing[R]. University of Technology Dresden, 2009.
- [9] Klippel W. Loudspeaker Nonlinearities Causes, Parameters, Symptoms[J]. Audio Eng. Soc., 2006, 54(10): 901-939.
- [10] Pascal Brunet, Evan Chakroff, Steve Temme. Loose particle detection in loudspeakers[C]// Audio Engineering Society Convention Paper, 2003.
- [11] Temme S, Brunet P. Practical measurement of loudspeaker distortion using a simplified auditory perceptual model[C]// Audio Engineering Society Convention Paper, 2009.
- [12] 科恩 L. 时-频分析: 理论与研究[M]. 白居宪, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
Cohen L. Time-Frequency Analysis: theory and applications[M]. BAI Juxian, trans. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [13] Zhong J. Time-frequency representation based on an adaptive short-time fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(10): 5118-5128.
- [14] Farina A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique[C]// Audio Engineering Society Convention Paper, 2000.
- [15] 李宏斌, 温周斌, 徐楚林, 等. 基于短时傅里叶变换的扬声器异常音检测方法: 中国, CN201310428075.5[P]. 2013-09-18.
LI Hongbin, WEN Zhoubin, XU Chulin, et al. A method for detecting rub and buzz defects of loudspeaker based on STFT: China. CN201310428075.5[P]. 2013-09-18.