



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180191

## 扬声器谐振频率测量的波形追踪法

周振南, 穆瑞林, 许增朴

(天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 提出了波形追踪法(WTM)测量扬声器谐振频率的方法. 该方法采用扫频信号源激励扬声器, 通过传声器获取扬声器的时域响应信号, 并找出最大幅值点, 通过时间关系找出原始激励信号上与之对应的点, 从而得到扬声器的谐振频率. 将波形追踪法、恒压法和恒流法(某商用谐振频率仪)的测量结果分别与单频激励的实验结果对比, 验证了本测量方法的准确性和有效性.

**关键词:** 扬声器; 谐振频率; 波形追踪法

**中图分类号:** TN912

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6510(2019)04-0072-04

## Measuring of Loudspeaker Resonance Frequency with Waveform Tracing Method

ZHOU Zhennan, MU Ruilin, XU Zengpu

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The measurement of the resonance frequency of loudspeaker with waveform tracing method (WTM) was studied in this research. In WTM, the output sound signal of the loudspeaker excited by a frequency sweeping signal was received by using a microphone. Then, the frequency point on the excitation waveform can be found, which corresponds to the maximum amplitude point on the output sound signal waveform of the loudspeaker. So the resonance frequency of the loudspeaker can be obtained. The measurement results of three different methods (WTM, constant voltage method and commercial resonance frequency tester) were compared with that of the single frequency excitation method, and the accuracy of the waveform tracing method was verified.

**Key words:** loudspeaker; resonant frequency; waveform tracing method

扬声器的谐振频率是指扬声器在受到由低频到高频的激励信号激励时, 纸盆振动程度会有所不同, 其中制品振动最剧烈的时刻所对应的频率即为扬声器的谐振频率. 根据 GB/T 12060.5—2011《声系统设备第 5 部分扬声器主要性能测试方法》<sup>[1]</sup>, 常用的扬声器谐振频率检测方法有恒流法和恒压法, 即通过获取扬声器的阻抗曲线<sup>[2-4]</sup>, 从而获得扬声器的谐振频率.

目前, 国外已有多种扬声器参数测量装置, 如丹麦 B&K 公司的 PULSE B&K 3560 扬声器参数测量

系统<sup>[5-6]</sup>、美国 Audio Teknology Incorporation (ATI) 公司的 LMS 测量系统和德国 KLIPPEL 公司<sup>[7-8]</sup>推出的 QC 电声测试仪. 这些测量系统已经在扬声器的研发和测量领域广泛应用, 均是采用恒压法或者恒流法测量扬声器谐振频率. 国内也有研究者基于虚拟仪器设计了扬声器谐振频率的测量系统<sup>[9]</sup>, 该系统通过数据处理过程计算得到扬声器的频率响应曲线, 进而得到扬声器的谐振频率.

本文提出基于波形追踪对扬声器谐振频率进行检测的方法(WTM). 原理是对检测的响应信号的波

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-09-14

基金项目: 天津市建委科技项目(2017-10)

作者简介: 周振南(1992—), 男, 河北秦皇岛人, 硕士研究生; 通信作者: 穆瑞林, 副教授, mrl3667@tust.edu.cn

形进行追踪,找到最大幅值点,进而得到扬声器的谐振频率.因为采用非接触方式采集响应信号,且波形追踪法是信号时域分析方法,无需进行傅里叶变换,所以有效地避免了计算产生的误差,节省了计算时间,进而提高了检测效率.通过与恒压法、商用谐振频率测试仪和单频法的检测数据进行对比,验证了本测量方法的有效性和准确性.

## 1 谐振频率检测方法

谐振频率是扬声器的重要性能参数,在扬声器的设计生产的过程中,谐振频率要根据实际的情况而定.同时,扬声器的谐振频率对总 $Q$ 值品质因数、机械 $Q$ 值和瞬时特性等均有影响.

常用的谐振频率测量方法包括恒压法和恒流法,原理都是通过接触式测量获得扬声器的阻抗曲线,阻抗曲线上最大的阻抗值对应的频率即为扬声器的谐振频率.

### 1.1 恒流法

李佳<sup>[10]</sup>采用恒流法设计了一个扬声器谐振频率检测系统.考虑到系统的成本,系统中采用串联电阻实现了检测系统的恒流回路.电压表读数最大时对应的频率值即为扬声器的谐振频率.恒流法检测电路如图1所示.

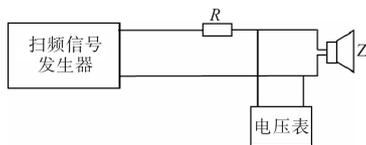


图1 恒流法检测电路

Fig. 1 Circuit diagram of the constant current method

当电路中的电流偏移度 $n \leq 10\%$ 时, $n$ 的数值对谐振频率检测几乎没有影响,根据式1计算,当电路中串联一个阻值为 $600 \Omega$ 的电阻时, $n \leq 9\%$ .该谐振频率检测系统的误差在 $15 \text{ Hz}$ 以内.

$$n = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $I_{\max}$ 表示对应音圈直流电阻处的电流; $I_{\min}$ 表示最大阻抗处的电流.

### 1.2 恒压法

孟淦<sup>[11]</sup>使用过恒压法对扬声器的谐振频率进行检测.恒压法的检测电路如图2所示.为了减小扬声器阻抗对检测结果的影响,在检测电路中串联一个阻值大于扬声器阻抗10倍的定值电阻.以被检测的扬

声器电阻 $R_Z = 8 \Omega$ 为例,则电路中串联的定值电阻不应小于 $80 \Omega$ ,经过实验验证当检测电路中的定值电阻为 $120 \Omega$ 时,响应信号的频率带窄,调频时的电压幅值明显.该测量方法中使用的电压表读数最大时的频率即为扬声器的谐振频率.

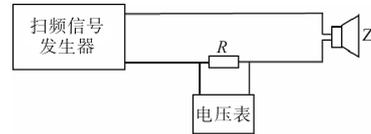


图2 恒压法检测电路图

Fig. 2 Circuit diagram of the constant voltage method

### 1.3 波形追踪法

扬声器系统可以简化成为一个单自由度欠阻尼系统,当通过扫频信号激励扬声器时,其物理模型如图3所示.

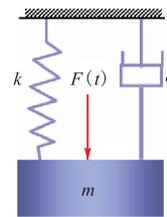


图3 单自由度欠阻尼系统解析模型

Fig. 3 Analytical model of the single-degree-of-freedom system with damping

运动微分方程可由简谐激励强迫振动方程表示:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Fe^{j\omega t} \quad (2)$$

该系统最大振幅处的频率应为

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (3)$$

式中: $\omega_d$ 为有阻尼固有角频率; $\omega_n$ 为无阻尼固有角频率; $\xi$ 为阻尼比.机械系统测量固有频率时通常将时域信号经傅里叶变换转换为频域信号,找出频域信号波形的最大幅值点,从而得到系统固有频率.

采用波形追踪法检测扬声器,可通过扫频信号源激励扬声器,获取扬声器的时域响应信号,根据时间关系在原始号的波形上搜索响应信号波形上的最大幅值点所对应的频率,得到扬声器的谐振频率.

与恒压法、恒流法比较,波形追踪法采用的是非接触式采集,且采集的信号为声压响应信号,因此可避免测量电器回路系统带来的影响.波形追踪法采用的是时域信号分析处理方法,无须进行傅里叶变换,因此可避免傅里叶变换带来的误差以及计算时间.而且,较之于恒压法和恒流法,采用波形追踪法测量谐振频率,更利于系统的集成,便于开发扬声器

参数一体化测量系统. 以对扬声器正负极性的测量为例, 在采用波形追踪法测量扬声器谐振频率同时, 可以通过追踪响应声压信号的起振方向得出其正负极性.

检测扬声器谐振频率时使用的激励信号为正弦扫频信号, 是在指定的频率范围内, 频率遵循指数特性连续变化的正弦信号, 公式见式(4). 扫频信号时长为 2 s, 扫频范围是 50 ~ 1 510 Hz.

$$y = A \cos \left[ \frac{f_1}{\ln \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} \left( e^{\frac{t}{T} \ln \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中:  $A$  为激励信号的幅度;  $T$  为激励信号的周期;  $f_1$  和  $f_2$  分别为激励信号的起始频率和终止频率.

检测时, 首先打开数据采集卡的 A/D 采集通道, 由数据采集卡的数模转换器输出扫频信号激励扬声器; 然后, 同时关闭数据采集卡的输入、输出通道, 利用软件对采集到的响应信号进行数据分析. 为了减少环境噪声对测量结果的影响, 经反复实验确定, 将第 1 个幅值 > 0.05 V 的测量值作为信号起点. 激励信号的原始波形如图 4 所示.

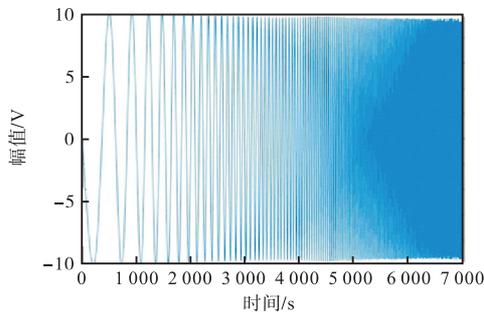


图 4 激励扬声器的扫频信号波形图

Fig. 4 Waveform of the frequency sweeping signal for exciting loudspeaker

## 2 谐振频率检测系统

### 2.1 硬件系统

搭建了利用波形追踪法的扬声器谐振频率检测系统, 硬件系统主要包括计算机、功率放大器、传声器和消音箱等. 其中, 计算机中配置有美国国家仪器公司的 PCI-6036E 型数据采集卡. 系统工作原理如图 5 所示.

### 2.2 软件系统

采用 VC++6.0 编写扬声器谐振频率检测系统软件, 软件流程见图 6.

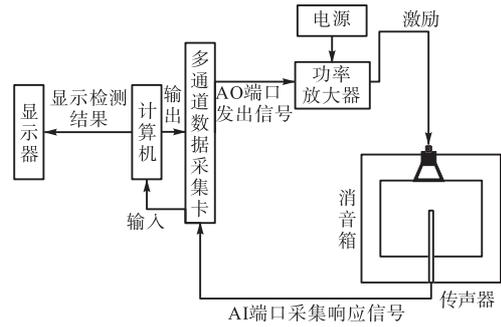


图 5 波形追踪法测量谐振频率的原理图

Fig. 5 Principle of measuring resonance frequency by WTM

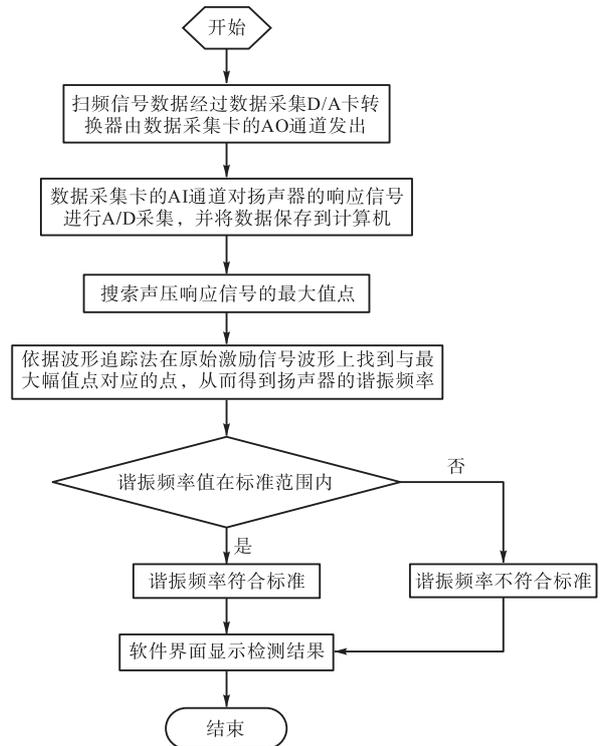


图 6 谐振频率检测系统流程图

Fig. 6 Flowchart of resonant frequency test system

谐振频率检测系统的软件界面见图 7. 点击检测按钮后, 系统首先激励扬声器, 然后采集响应信号进行分析, 从而得到扬声器的谐振频率, 并记录和显示.

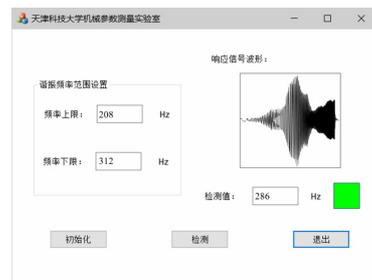


图 7 谐振频率检测系统软件界面

Fig. 7 Parameter measurement interface of resonant frequency test system

### 3 实验

对 100 个 PM318-9AU 型、50 个 PM1218 型和 50 个 PM0104 型, 共计 200 个扬声器, 分别用波形追踪法、恒压法(根据文献[11]搭建实验环境)、恒流法(某商用谐振频率测试仪)进行测量. 同时, 采用信号发生器利用 200 ~ 330 Hz 单频正弦信号进行测量, 并对比.

单频信号激励扬声器测量其谐振频率是根据扬声器谐振频率的原理提出的误差最小的测量方法, 其测量结果可以作为测量标准与其他测量方法进行对比分析. 鉴于用于实验的扬声器样本的谐振频率集中分布于 250 ~ 290 Hz, 所以按表 1 所示的步长在 200 ~ 330 Hz 范围内由信号发生器发出 39 个单频信号, 形成精细、离散的扫频过程. 采集到的响应信号幅值见表 2.

表 1 步长设置表

Tab. 1 Setting of step length

频率范围/Hz	200 ~ <250	250 ~ <290	290 ~ 330
步长/Hz	5	2	5

表 2 某扬声器样本的幅频数据

Tab. 2 Amplitude-frequency data of a certain loudspeaker sample

频率/Hz	响应信号幅值/V	频率/Hz	响应信号幅值/V
200	0.110	270	0.136
205	0.105	272	0.149
210	0.108	274	0.153
215	0.098	276	0.186
220	0.113	278	0.218
225	0.106	280	0.255
230	0.112	282	0.305
235	0.120	284	0.370
240	0.107	286	0.464
245	0.113	288	0.442
250	0.125	290	0.364
252	0.113	295	0.323
254	0.109	300	0.213
256	0.112	305	0.192
258	0.120	310	0.121
260	0.107	315	0.118
262	0.113	320	0.115
264	0.145	325	0.118
266	0.136	330	0.116
268	0.128		

根据表 2 数据可绘制图 8 所示的幅频特性曲线, 即采用不同频率单频信号激励扬声器时, 扬声器的响应信号的幅值变化. 从图 8 中可以明显看出扬声器

的频率响应特性, 频率响应曲线的最大值点所对应的频率值即为扬声器的谐振频率.

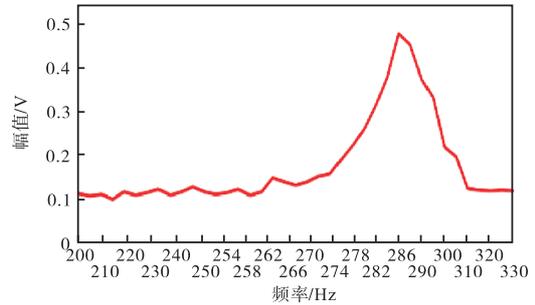


图 8 扬声器响应信号的幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude-frequency diagram of the response signal from a certain loudspeaker

将波形追踪法、恒压法和恒流法的测量数据与信号发生器发出单频信号测量得到的数据进行比较, 绘制图 9 所示的误差散点图.

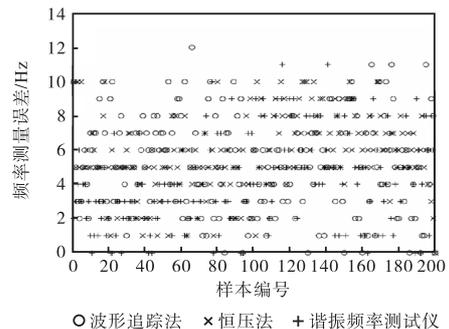


图 9 三种谐振频率测量方法的误差分析散点图

Fig. 9 Scatter diagram of deviation analysis of three resonance frequency measurement methods

由图 9 可以看出: 三种测量方法的测量误差均在 15 Hz 以内, 均满足企业生产的需求. 其中, 恒压法的测量误差小于 10 Hz, 谐振频率测试仪的测量频率误差小于 14 Hz, 波形追踪法的测量误差小于 12 Hz. 虽然波形追踪法测量谐振频率比恒压法的测量误差大, 但是波形追踪法利于扬声器参数一体化测量方法的实现, 例如扬声器的正负极性的测量, 而且波形追踪法所搭建的测量硬件系统的结构简单, 数据处理的速度快, 测量系统运行稳定、可靠, 更能满足企业生产的要求.

### 4 结语

本文提出了采用波形追踪法测量扬声器谐振频率的方法, 并搭建了谐振频率检测系统. 通过扫频信

(下转第 80 页)

网水力分析模型构造了故障诊断训练集,以节点液位为输入变量,经训练的神经网络模型能够准确识别堵塞管段位置,方法有效.从预测过程和结果分析,基于径向基神经网络污水管网堵塞故障诊断方法操作简单,运行速度快,具有自学习能力.进一步研究时,可构建基于现场液位实测数据训练的污水管网堵塞诊断神经网络模型,推广应用于工程实际.

#### 参考文献:

- [1] 孙红卫. 浅谈我国污水管网建设运营改革之路[J]. 给水排水, 2010, 36(z1): 373-375.
- [2] Almeida M C, Brito R S. System diagnostics using flow data: Quantifying sources and opportunities for performance improvement[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage. Portland: American Society of Civil Engineers. 2002: 1-13.

- [3] 常田, 刘书明, 王敏, 等. 基于 BP 神经网络的城市供水管网健康状态评估[J]. 给水排水, 2016(6): 138-141.
- [4] 陆健, 陈卫, 吴志成. 基于 BP 神经网络的供水管网分时段宏观模型研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(3): 99-101.
- [5] 严熙世, 刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [7] Kang D, Lansley K. Real-time demand estimation and confidence limit analysis for water distribution systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(10): 825-837.
- [8] 苏小红, 侯秋香, 马培军, 等. 强神经网络的混合学习算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(9): 132-136.

责任编辑: 常涛, 周建军

(上接第 75 页)

号源激励扬声器, 获取扬声器的时域响应信号, 根据时间关系确定响应信号波形上的最大幅值点所对应的频率, 便可得到对扬声器的谐振频率. 实验表明, 谐振频率检测系统的误差在 12 Hz 以内, 检测系统可以快速准确地测定扬声器的谐振频率.

#### 参考文献:

- [1] 韩捷, 张坡, 尤国雷. 国家标准《扬声器主要性能测试方法》解读[J]. 电声技术, 2012, 36(11): 86-90.
- [2] 沈金颖. 扬声器音质检测系统概述[J]. 西部广播电视, 2013(5): 109-112.
- [3] 朱德铭, 邝永辉, 艾晓晓. 电动式扬声器阻抗曲线分析与测量[J]. 电声技术, 2015, 39(6): 15-19.
- [4] 袁振才. 扬声器阻抗曲线及其应用[J]. 电声技术, 2013, 37(6): 17-21.
- [5] 邓巧玲. PULSE: 多分析仪系统 B&K3560[J]. 日用电

器, 1998(1): 44.

- [6] 朱德寿. 基于 PULSE 系统的声级计自动检定测试系统[J]. 电声技术, 2006(9): 67-69.
- [7] Klippel W. Assessment of voice-coil peak displacement Xmax[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2003, 51(5): 307-324.
- [8] Klippel W. Nonlinear large-signal behavior of electrodynamic loudspeakers at low frequencies[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1992, 40(6): 483-496.
- [9] 龙帆, 钱利民, 李迎春. 基于 LabVIEW 和声卡的扬声器检测系统的设计和实现[J]. 微计算机信息, 2006, 22(7-1): 90-92.
- [10] 李佳. 扬声器谐振频率测量系统的开发[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- [11] 孟涂. 扬声器产品三参数集成测量系统的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.

责任编辑: 常涛, 周建军