

# 利用激光测振改进小型扬声器系统的声学特性 · 论文 ·

钟 旋, 吴群力, 李晓东

(中国科学院 声学研究所, 北京 100190)

**【摘要】** 小型扬声器箱体振动导致的声辐射是其音质不佳的原因之一;不良的设计会导致频率响应不平缓,且频响随空间角度出现较大变化。利用激光测振仪,测试了箱体振动速度随频率的变化,分析了前几个振动模态的声辐射能力。通过增加板的内阻等方法,试图削弱箱体振动的影响。观察了改进前后振动板表面的速度幅分布;测量了频率响应随空间位置的分布。实验发现最初的3个“奇次,奇次”振动模态对频响均有较大影响。通过加入吸声材料和阻尼材料,则可有效抑制其影响。

**【关键词】** 小型扬声器; 激光测振; 板振动; 电声测量

**【中图分类号】** TN912

**【文献标识码】** A

## Improving Acoustical Performances of Miniature Loudspeaker Systems With a Laser Vibrometer

ZHONG Xuan, WU Qun-li, LI Xiao-dong

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191, China)

**【Abstract】** The sound quality of miniature loudspeaker systems is often affected by the vibration of the loudspeaker enclosures. The poor design of the enclosures could cause the irregularity in frequency responses and directivity patterns. The current study is to investigate the relationship between the sound radiation and enclosure vibration by using a laser vibrometer. The first few vibration modes of the enclosure panel are measured and analyzed for their radiation characteristics. In addition, the modifications are made to the model by adding sound absorbing and damping materials. The vibration patterns on the panel and the sound pressure responses are measured for the difference between the original and modified models. It is found that the first three “odd-odd” numbered modes have a significant negative effects on the frequency response of the systems. However, these modes could be effectively suppressed by adding sound-absorbing and high-damping materials to the enclosure.

**【Key words】** miniature loudspeaker; laser vibrometer; vibration of plates; electroacoustic measurement

## 1 引言

近年来,消费类电子产品中大量采用了小型扬声器<sup>[1]</sup>。这些扬声器系统多采用1cm上下尺度的单体,谐振频率一般在1kHz上下。在频响方面,设计者希望其在工作频段内平坦;另一方面,还希望频响在各个空间角度上不出现大的变化。这是由于小型扬声器发声的开口可在侧面或后面(如在多媒体移动电话中),因而相对扬声器来说,听者可位于不同的空间角度。

实际中,设计不良的小型扬声器音质不佳。原因之一,扬声器箱壁振动导致了不必要的声辐射。首先,小扬声器系统的设计往往是气垫式,采用狭小的封闭箱体;扬声器工作时,箱体内部的声压较高,对箱壁的作用强烈;第二,箱壁不是完全刚性,受到后腔内声压作用产生振动;基于便携性考虑,小扬声器箱体多采用轻

薄的塑料板制作,使这一问题恶化。来自箱体振动的声音和来自单体振膜的声音混合,导致频响曲线出现起伏,同时随空间角度出现一个不理想分布。

普通扬声器音箱的振动问题较早得到注意。Tappan从基本电声原理和设计经验出发<sup>[2]</sup>,认为只有箱壁振动的基频对频响有重要影响;这种影响体现在:(1)基频附近的频率响应不再平坦,出现一个“谷-峰”形分布;(2)瞬态响应不佳,扬声器停止工作后,声音衰减较慢。解决此问题的可行路径,包括添加吸声材料、增加板的内阻,以及通过增加板厚和改变板形状等方式提升其谐振频率。Iverson深入研究了板振动的模态和激发方式<sup>[3]</sup>。近年的工作多采用数值计算,如Matti等人在低频模拟了普通扬声器箱体内部的声压<sup>[4]</sup>,研究了箱体的受力。与之互补的一篇文章来自Bastyr<sup>[5]</sup>,利用激光测振

仪测试了箱体的振动速度分布,用边界元方法模拟了外部声场,认为加强筋有利于减少箱体声辐射。但是,目前还没有针对小型扬声器箱体振动问题的专门研究。

笔者从早期研究工作的结论出发,利用激光测振仪,定量研究和修正以前的观点。通过对简化模型的分析,计算出了可能的影响位置。

## 2 研究背景

扬声器的箱体由板状材料拼接而成。在板振动的“奇数,奇数”模态,板的声辐射能力较强<sup>[6]</sup>。原因在于,在基频以下,板的各部分振动相位相同;在基频时发生谐振,达到最大振幅,其声辐射能力最强。高阶模态对应的振型由一些相邻而反相的振动区域构成。由于相邻部分的声辐射倾向于相互抵消,造成能有效辐射声波的范围减小。在“奇数,奇数”模态,振型将板面划分为奇数个部分,因此总有一部分的辐射不被抵消而辐射出来。

Tappan 提到,木质音箱中板振动的影响体现在基频,高阶“奇数,奇数”模态对频响基本无影响;这是针对木板而言,应是木板内阻较高所致。小型扬声器所采用的箱体材料,如塑料、金属等,多属内阻较低的材料。这时,板振动的高阶模态也可能影响频响。

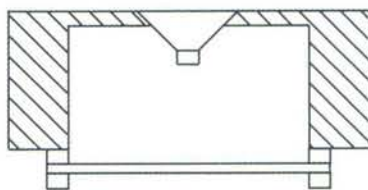
为验证这个观点,将实际系统简化为实验模型,方便计算和测试。采用简单形状的箱体,且只允许一部分(后部)的箱体发生振动。后腔尺寸为 31 mm×31 mm×5 mm(对应坐标  $x-y-z$ );采用的单体为 NXP Ra 型(谐振频率 440 Hz,振膜为长方形 8 mm×11 mm),布置于  $x-y$  面的中央,如图 1 所示。采用这种扁平长方形后腔,一方面是防止出现后腔内的  $z$  方向模态,这些空气振动的模态会干扰实验;另一方面,实际的小型扬声器后腔亦多为扁平形状。用厚不锈钢板制作前面板(放置单体)和侧面板,这部分箱体是没有显著振动的。后面板是待测的振动板,为 0.33 mm 铝板,边界条件固支。采用薄金属板,是出于参数易于取得的考虑。

在固支条件下,板基频表示为<sup>[1]</sup>

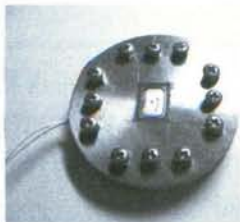
$$f = \frac{12}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \sqrt{\frac{7}{2} \left( \frac{1}{a^4} + \frac{4}{7} \frac{1}{a^2 b^2} + \frac{1}{b^4} \right)} \quad (1)$$

其中,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}$ ;  $a, b$  分别为板的长度和宽度;  $\rho$  为密度;  $E$  为杨氏模量;  $h$  为厚度;  $\sigma$  为泊松常量(以上采用国际单位制)。

更高阶的振动模态与基频的比例可以查得<sup>[7]</sup>。经计算,实验模型中待测振动板的最初几个谐振频率在 kHz



(a) 剖面图



(b) 前面板图片显示



(c) 后面板图片显示

图 1 测试用小型扬声器

级别,位于扬声器的工作范围内,可能造成影响。研究重点关注的是基频,以及紧邻的(1,3)和(3,1)模态。

## 3 实验设置

激光测振仪是测量运动的精密设备<sup>[8]</sup>,其工作原理为激光干涉现象,通过处理和分析待测物体表面与参考面的位相、光强变化,实现高精度的振动测量。运用于工业界,可以实现大到汽车车身,小到微机械系统的测量<sup>[9]</sup>。研究振动声学问题的研究者不容易对振动程度和分布有直观感知;声压测试提供了场点上的信息,但不能把振动体各部分的声辐射贡献区分开。借助激光测振仪,研究人员可以快速而直观地了解板的振动情况。

与接触式仪器(如 Tappan 的研究利用的电吉他的拾音装置)相比,激光测振仪的优点包括:操作简单,毋须安装速度传感器等;结果准确,不改变被测物体的表面状态;此外,作为光学测试设备,激光测振仪对被测物体表面的光反射能力要求不苛刻,能适应大部分表面情况。实验采用的激光测振仪为 Metrolase VibroMet™ 500 V,可测量单个点上 5  $\mu\text{m/s}$ ~800 mm/s 的速度,覆盖 0 Hz~20 kHz 的频率范围,符合电声工程测试的需要。

在振动板上描绘了网格,如图 1 所示。激光测振仪的激光光斑大小约为 1~2 mm;网格划分太细将不利于定位。因而采用了 5 mm 边长的正方形网格。实验设置图如图 2 所示。测试时,调整激光头位置,令激光束垂直于振动板,并使激光光斑对准待测试的点。调整板和激光头的相对位置,使激光测振仪获得的信号强度最大。向扬声器提供 1 V 的扫频信号,由测量系统记录数据。实验中,共测量了 25 个振动点在 200 Hz~15 kHz 频率范围内的速度响应。根据前文所述,笔者关心的模态均分布在此范围以内。

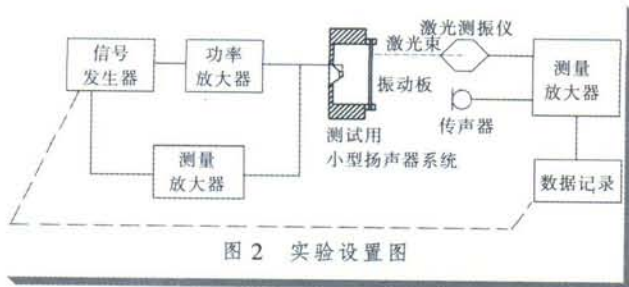


图2 实验设置图

为了评价优化设计的效果,另在全消声室内测试了扬声器的频响。测试中,向扬声器提供1V扫频信号,记录距离扬声器30cm处的声压级。记录的角度距离扬声器轴向分别为 $0^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 、 $180^{\circ}$ ,不设障板。近似认为模型在 $x-y$ 方向对称,只给出一条侧面的频响曲线。

场点处的声压是来自单体的声波与来自后方振动板的声波叠加的结果<sup>[10]</sup>。为了说明两者的贡献程度和相对强弱,另做了一组实验。将箱体安放在障板上,在障板前后测试声压。由于模型的前面板和侧面板都相对固定,前方测得的是扬声器单体发出的声信号,后方测得的是振动板的声信号。

板振动模式在高频更加集中。为方便看图,采用线性频率坐标。

#### 4 实验结果

典型的振动测试结果如图3所示。该测试点位于振动板的中心。由前面的算式可以得到,待测的0.33mm的铝板的(1,1)模态出现在3042Hz,简并的(1,3)(3,1)模态出现在11164Hz。

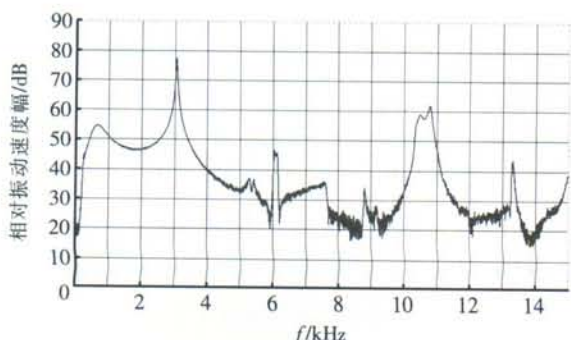


图3 扬声器箱体振动板中心点的振动频响曲线

测试所得的相对振速幅值的频响曲线显示,板的前几个模态为(1,1)3053Hz,(1,3)(3,1)简并,最高点在10803Hz,基本符合计算。测试点处在“偶数-偶数”和“奇数-偶数”振型的波节部位,可见这些模态上的振动并不强烈。

观察图4的障板测试结果,发现在(1,1)模态和(1,3)(3,1)模态处,障板前后的声压基本相同。这意味

着,当这两部分声波在空间中叠加,在相位相同的场点上,将形成一个声压峰值;在相位相反的场点,形成曲线上的谷。频响随空间分布不均,如图5所示,正面、侧面、后面各点受的影响程度不同。

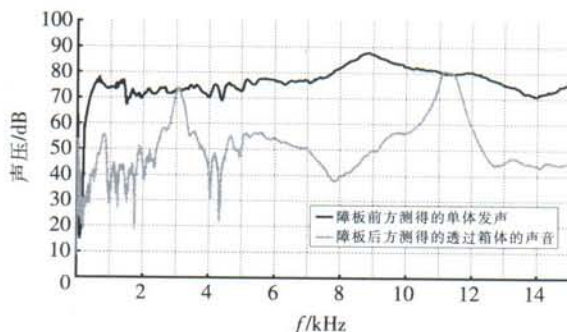
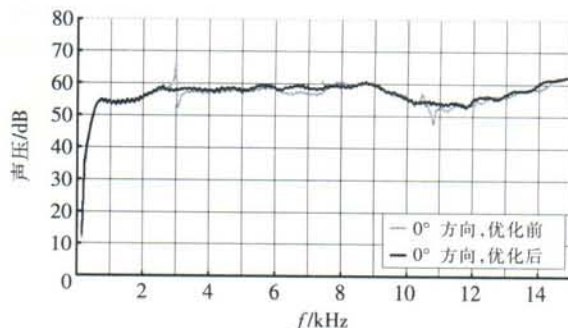
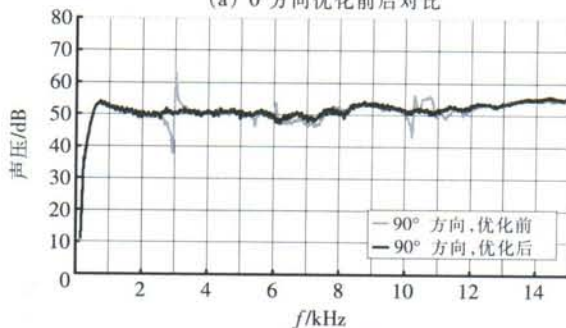


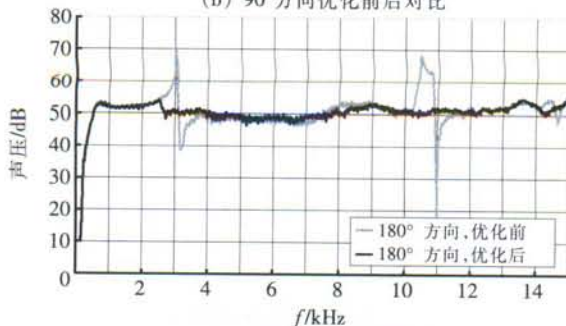
图4 将测试用扬声器放置在障板上测得的声压



(a)  $0^{\circ}$ 方向优化前后对比



(b)  $90^{\circ}$ 方向优化前后对比



(c)  $180^{\circ}$ 方向优化前后对比

图5 优化前后扬声器系统的频率响应随空间位置的变化

此外,需要指出,以上实验中(1,3)(3,1)模态显示出与基频相同的声辐射能力。在某些位置,(1,3)(3,1)

模态对频响的影响还要大于基频。在小扬声器设计中,这两个模态应得到关注。原因首先在于金属材料的内阻较小;此时,高阶模态处的振幅较大,导致的辐射也较木箱强烈;其次,本研究中正方形板的(1,3)(3,1)模态发生了简并。

## 5 扬声器系统的优化

实践中,影响频响的因素可有多。用如下简便办法可找出箱体振动的影响位置:首先测试扬声器系统的频响,并观察其形状;之后在怀疑有振动问题的板上粘上一点橡皮泥,再次测试频响曲线。曲线上向低频位置略微移动的峰和谷就是受箱体辐射声的影响产生的;因为橡皮泥增加了板的振动质量。如果这种影响大到不能接受的程度,就应当考虑修改设计。

针对普通扬声器的优化方法有多种<sup>[2]</sup>。在结构方面,可以通过改变板的材料和厚度、改变结构(设加强筋)、改变形状等。此外,可以在后腔中加入吸声棉,并在面积较大的振动板上粘着高内阻材料。这些方法也可沿用到小型扬声器的设计中。在振动板上粘着阻尼材料可以有效降低振动板的辐射能力;在后腔中添加吸声棉的意义不仅在于降低谐振频率和消除腔体内的驻波,也在于减小后腔内声压对箱体的作用,从而降低箱体的振动幅度。

在对比实验中,仍采用 0.33 mm 铝板,但加入了吸声棉和阻尼。用电工胶布覆盖了板的大部分面积,以增加内阻。实验结果在图 5 中展示了频响的改善情况。笔者所关注的前几个板振动模态分布在扬声器频响平坦的工作区,因此只测量了 1~15 kHz 范围内的频响。在此范围内,扬声器前方的频响不均匀度由 $\pm 9$  dB 减至 $\pm 3$  dB。同时,频响随空间的分布得到改善。在扬声器的侧向和后向,也获得了相对一致的频响。

此外,根据激光测振仪获得的各点上的振动数据,可以绘制速度幅的分布图如图 6 所示。在谐振频率附近,增加内阻使得板振动的振幅明显减小。这是其声辐射能力下降的原因。

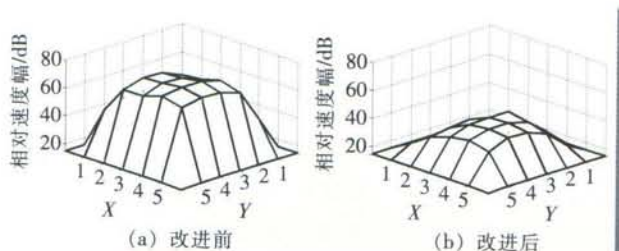


图 6 改进前、后振动板相对速度幅分布(3 kHz 处)

上面这个优化示例的意义还在于,设计者可在不改变已有产品结构的情况下改善音质。

## 6 结论

以上研究显示,利用激光测振仪分析箱体的振动是快速有效的。之前的研究认为,只有板振动的基频辐射能力强。笔者发现,在材料内阻较低的情况下,板振动更高的“奇数,奇数”模态也会有较强的声辐射能力。对于正方形板而言,简并的(1,3)(3,1)的模态表现出了与基频相同的声辐射能力。通过在箱体内添加吸声棉、在板上附着阻尼材料等手段,可以有效抑制板振动导致的声辐射,使频率响应趋于平滑,且在空间有较理想分布。

致谢:感谢北京声望声电技术有限公司提供激光测振和 VA-Audio 电声测量系统。感谢恩智浦(NXP)公司提供小型扬声器样品。

### 参考文献

- [1] BAI M R, LIAO J. Acoustic analysis and design of miniature loudspeakers for mobile phones[J]. Journal of Audio Engineering Society, 2005, 53(11): 1061-1076.
- [2] TAPPAN P W. Loudspeaker enclosure walls[J]. Journal of Audio Engineering Society, 1962, 10(3): 224-231.
- [3] IVERSON J K. The theory of loudspeaker cabinet resonances[J]. Journal of Audio Engineering Society, 1973, 21(3): 177-180.
- [4] KARJALAINEN M, IKONEN V, ANTSALO P, et al. Comparison of numerical simulation models and measured low-frequency behavior of loudspeaker enclosures[J]. Journal of Audio Engineering Society, 2001, 49(12): 1148-1166.
- [5] BASTYR K J, CAPONE D E. On the acoustic radiation from a loudspeaker's cabinet[J]. Journal of Audio Engineering Society, 2001, 51(4): 234-243.
- [6] CREMER L, HECKL M. Structure-borne sound[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [7] LEISSA A W. Vibration of plates[R]. Washington: NASA Report SP-160, 1969.
- [8] 张力, 薛景峰. 激光测振技术的最新进展[J]. 航空计测技术, 2004, 24(5): 1-3.
- [9] 刘习军, 贾启芬. 工程振动理论与测试技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [10] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬, 等. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.

[责任编辑] 史丽丽

[收稿日期] 2008-04-28