◇ 研究报告 ◇

# 振膜与音圈粘结间隙对高频截止的影响\*

王世伟<sup>1,2†</sup> 陈 进<sup>1,2</sup> 谢守华<sup>1,2</sup> 陈维菲<sup>1,2</sup>

(1 国光电器股份有限公司 广州 510800)

(2 广东省电声电子技术研发与应用企业重点实验室 广州 510800)

摘要:利用声学理论及 Comsol 仿真对电动式高音扬声器声压级高频进行分析,重点研究了高音振膜与音圈的 粘结状态对声压级高频截止的影响。根据实例分析,当音圈与振膜之间的粘结间隙被中心胶填充时, Klippel 测试的声压级高频提前截止。通过对中心胶粘结位置相关的类比线路图分析可知, 扬声器高频截止频率主要 受振膜和中心胶的刚性影响, 当中心胶粘结位置存在间隙时, 因中心胶材料与骨架材料比模量的差异, C<sub>glue</sub> 变大, 此时整体刚性变小, 会使振动能量由音圈骨架传递到振膜材料时的传递速率受到削减, 表现为高频截止 频率降低。Comsol 仿真分析表明, 音圈骨架与振膜粘结位置存在间隙时, 高频振动模态发生弯曲, 影响振动能 量的传递, 高频提前截止, 与实例分析的结果一致。

关键词: Comsol; Klippel; 粘结位间隙; 比模量; 高频截止

中图法分类号: TN643 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2021)05-0684-07 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.05.005

# Analysis on the influence of the gap between diaphragm and voice coil on high frequency cutoff

WANG Shiwei<sup>1,2</sup> CHEN Jin<sup>1,2</sup> XIE Shouhua<sup>1,2</sup> CHEN Weifei<sup>1,2</sup>

(1 GuoGuang Electric Company Limited, Guangzhou 510800, China)

(2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Electroacoustic Electronic Technology R & D and Application,

Guangzhou 510800, China)

Abstract: The high frequency of sound pressure level (SPL) of electric tweeter was analyzed based on acoustic theory. The influence of the bonding state between the tweeter diaphragm and the voice coil on the high frequency cutoff of SPL was studied. The example analysis showed when there was a large gap between the voice coil and the diaphragm filled by the center glue, the Klippel tested SPL high frequency cutoff. According to the electromechanical and acoustic analysis of the position of the center glue, the cutoff frequency of the loudspeaker was mainly affected by the rigidity of the diaphragm and the center glue. When there was a gap in the central glue bonding position, due to the difference in the specific modulus between the central glue and the bobbin material, the  $C_{glue}$  became larger, and the overall rigidity became smaller. As a result, the transfer rate of vibration energy from the voice coil bobbin to the diaphragm material would be reduced, high frequency cutoff frequency was reduced. The simulation analysis of Comsol showed that when there was a gap between the bond position of voice coil bobbin and diaphragm, the high frequency vibration mode would be bent, which affected the transmission of vibration energy, and the high frequency was cut off in advance, which was consistent with the results of example analysis.

Keywords: Comsol; Klippel; Bonding gap; Specific modulus; High-frequency cut-off

†通信作者 E-mail: 1321581483@qq.com

<sup>2020-11-17</sup> 收稿; 2021-04-07 定稿

<sup>\*</sup>科技部 2018"现代服务业共性关键技术研发及应用示范"重点专项项目 (2018YFB1403800, 2018YFB1403803)

作者简介: 王世伟 (1990-), 男, 河南周口人, 硕士, 工程师, 研究方向: 扬声器应用领域的轻质夹层复合材料、振膜材料等。

# 0 引言

扬声器是将电信号转换为声信号的换能器件。 电动式扬声器广泛应用于智能音箱。电动扬声器主 要分为磁路系统和振动系统,当磁路中的音圈有电 流通过时,产生的安培力作用于振膜并带动振膜振 动产生声波,该"力学装置"也可看作为低通滤波 器。参与振动系振动的音圈与振膜通过胶黏剂(文 中统称为中心胶)粘结,中心胶的粘结状态<sup>[1-2]</sup>会 直接影响到音圈至振膜的能量传递。

电动式扬声器高频截止在材料方面主要受到 振膜材料的杨氏模量与密度的限制,当振膜材料的 模量较高且密度低时,高频延展性能好;另一方面, 高频截止也会受到振膜结构设计的影响,当振膜材 料不变时,在设计端对振膜的结构进行加强也有助 于高频的延展。

为了不断的优化设计以及提前发现设计过程 中的问题,ANSYS<sup>[3]</sup>、Comsol多物理场等软件在 声学仿真中逐步得到应用,并在声学领域涉及到 的热学<sup>[4]</sup>、频响及失真分析<sup>[5]</sup>、吸声仿真<sup>[6]</sup>等方 面得到了较广泛的应用。本文主要探讨的是高 频截止处的衰减特性,而轴向频响以及指向性因 数频响领域的高频轴向截止频数不在本文应用 研究范围之内。本文重点探究了中心胶的粘结 状态对电动扬声器高频截止的影响,对中心胶 粘结状态的探讨包括中心胶与音圈骨架材料模 量、密度、粘结位置有无间隙或间隙大小对高频 截止的影响,为高音扬声器声压级(Sound pressure level, SPL)高频截止的分析提供了实例及数值模拟 参考。

#### 1 试验方法

采用 Klippel 公司 (德国) Material Parameter Measurement (MPM) 模块测试音圈骨架材料的 杨氏模量,每种材料测试3片样条取算术平均值(尺 寸10 mm×60 mm,厚度0.075 mm),其测试原理 及样条装夹方式如图1所示。利用动态热机械分 析仪(DMA7100,日立)对实例中的A型号中心胶 的模量进行表征分析,测试条件为:定频1Hz,温 度范围为-50~120℃。选用国光电器股份有限 公司 (GGEC) 某项目的高音扬声器, 使用 GGEC 消 声室的Soundcheck 14.0系统(90 kHz 带宽)进行频 率响应测试,对中心胶粘结位进行电力声类比分 析,并利用电路模拟软件 microcap 获取辐射阻和辐 射抗两端的电压;通过Comsol软件进行振动模态 的仿真及频响的实例分析,仿真条件为电压2 V, BL=1.05 Wb/m。采用YMP-2型金相试样磨抛机 (上海光学仪器一厂)对音圈与振膜的粘结位置做金 相切片,并用电荷藕合器件(CCD)放大40×观察中 心胶的粘结状态。

# 2 分析讨论

#### 2.1 高音扬声器的基本结构

电动式高音扬声器主要由磁路系统、支架、音 圈、振膜(音膜)通过胶黏剂粘结而成,振膜粘结在 支架上,音圈通过胶黏剂与振膜粘结,音圈骨架与振 膜粘结位置直接接触,其结构如图2所示,通电后的 音圈线切割磁力线产生的动能会由音圈骨架传递 到振膜,向周围环境辐射声场。



(a) Klippel MPM 测试杨氏模量原理图

(b) Klippel MPM 测试杨氏模量示意图

图 1 Klippel MPM 测试示意图 Fig. 1 Klippel MPM test diagram





Fig. 2 Structure diagram of tweeter loudspeaker

#### 2.2 球顶扬声器高频谐振频率与比模量的关系

根据扬声器频响的特性,有如下经验公式<sup>[7]</sup>:

$$f_h = 0.38 \sqrt{1 + 0.52 \frac{m_d}{m_v}} \cdot \frac{H}{D} \sqrt{\frac{E}{\rho}} (1 + 4390t), \quad (1)$$

式(1)中, $f_h$ 为扬声器的高频谐振频率(Hz),t为 振膜厚度(mm),E为杨氏模量(MPa), $\rho$ 为密度 (g/cm<sup>3</sup>),H为球项高度(mm),D为球项直径(mm),  $m_d$ 为振膜质量(g), $m_v$ 为音圈质量(g)。

本文探究的范围为中心胶粘结状态对高频截 止的衰减特性,在其他力学参量基本不变的情况下, 式(1)可简化为<sup>[8]</sup>

$$f_h \propto t \sqrt{E/\rho} = tc,$$
 (2)

式(2)中,c为材料的声速(m/s)。

以上经验公式常被用来评价振膜材料对频响 的影响,尤其是被用来判断模量和密度对高频截止 的影响,此处被用来参考分析振动系中心胶位置相 关材料特性间的差异。

音圈骨架与中心胶的密度、模量、材料声速的 参数如表1所示。 从表1可知,在铝骨架材质中的声速比在中心 胶高出约7.3倍,在TIL骨架的声速也比中心胶的 高出约2.24倍。高音扬声器振膜在振动时,随着频 率的增加且达到第二共振区以上时,扬声器单元的 振膜不再像低频那样可视为一个刚性活塞振动。音圈 到振膜的振动传递、以及从振膜中心部位到振膜边缘 的传播时间就不可以忽略不计,扬声器单元振膜不 同部分的振动相位也不同,呈现复杂的分割振动<sup>[9]</sup>。

表1 高音扬声器中心胶和音圈主要骨架材质的模量 Table 1 Center glue and voice coil bobbin modulus of tweeter loudspeaker

材料类别	中心胶	铝骨架	Kapton 骨架	TIL 骨架
杨氏模量 E/GPa	$0.05{\sim}0.7$	48.1	3.5	2.6
密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$0.9 {\sim} 1.1$	2.37	1.41	1.34
$c = \sqrt{E/\rho} / (\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	0.62	4.51	1.58	1.39

注:中心胶模量数据来源于 GGEC 使用的中心胶规格;骨架厚度 0.075 mm,表面涂覆 8~15 µm 的 SV 胶水,便于和醇溶音圈 线粘结。此处选用的铝骨架牌号为 5052; Kapton 是杜邦品牌,材质为 PI; TIL 是玻纤材质。

# 3 实例分析

#### 3.1 实例扬声器的频率响应分析

对实例进行分析,图3为音圈与振膜正常粘结状态的局部图示,可以看到音圈骨架(实例是0.075 mm铝骨架)与振膜材料(实例是0.12 mm蚕丝膜)直接接触;图4为异常粘结状态图示,骨架与振膜未直接接触,间隙是由中心胶填充。



图 3 中心胶粘结状态良好的图示 (40×) Fig. 3 Diagram of center adhesive in good condition (40×)



图 4 中心胶粘结位间隙图示 (40×) Fig. 4 Diagram of gap in the center bonding position (40×)

图5是所用A型中心胶的DMA表征结果,可 知23℃时中心胶杨氏模量的数值为458 MPa,与 实例选用的音圈铝骨架模量及材料声速的差异较 大(见表1)。

对于音圈骨架与振膜粘结状态良好的扬声器 (图6),所对应的SPL高频延展良好。对于粘结异 常的扬声器,表现出SPL高频的提前衰减。结合公 式(2)进行分析,高频的提前截止可能与材料声速 较小的中心胶填充了骨架与振膜间的空隙有关,需 要结合数值模拟做进一步的分析。









图 6 实例扬声器粘结位间隙对 SPL 及其 Delta 值 的影响示意图

Fig. 6 Diagram of the influence of the bond gap on SPL and its Delta value of the example loudspeaker

## 3.2 音圈与振膜粘结的仿真分析

#### 3.2.1 中心胶粘结位置相关的类比线路图分析

图7为中心胶粘结位置图示,图中C表示力顺、 M 是质量、R 是力阻, dome 表示球顶音膜、glue 表 示中心胶、sur(surround)表示折环。图8为仅考虑 力学部分的导纳型类比线路图,音圈受到洛伦兹力 F作用,从力F出发,引出一条力线,力线到达M<sub>coil</sub> 时分成3支:一支穿过 $M_{coil}$ ,一支穿过 $M_{glue}$ ,这两 支与惯性力相平衡,终止于刚性壁,另一支同时穿过  $C_{\text{glue}}$ 和 $R_{\text{glue}}$ ,  $C_{\text{glue}}$ 和 $R_{\text{glue}}$ 可以看作是一个"弹 簧",弹簧有储存能量的作用,力线到这里不开支路, 力线经过弹簧后,分成两支,一支分给折环(sur)部 分;折环部分分别有 $C_{sur}$ 、 $R_{sur}$ 、 $M_{sur}$ ,这部分最后终 止于刚性壁;另一支分给球顶(dome)部分,球顶部 分先经 $C_{\text{dome}}$ 和 $R_{\text{dome}}$ ,再经 $M_{\text{dome}}$ 终止于刚性壁。 图9是由图8转换得到的阻抗型类比线路图。扬声 器高频截止频率主要受球顶和中心胶(glue)的刚性 影响,对于中心胶粘结状态良好的情形(不存在间 隙),  $C_{\text{glue}}$  很小, 图9中 $C_{\text{glue}}$  的支线相当于断路状 态;对于有粘结间隙并由中心胶填充的情形,当球顶 刚性一定时,中心胶的刚性越小,即Cglue 越大,则整 体刚性变小,表现为高频截止频率降低。



图 7 中心胶粘结位置示意图 Fig. 7 Diagram of center bonding position



图 8 中心胶粘结位置相关的力学导纳型类比线路图

Fig. 8 Mechanical admittance analog circuit diagram with respect to the position of the central adhesive



图 9 中心胶粘结位置相关的力学和阻抗型类比线路图

Fig. 9 Mechanical and impedance-type analog circuit diagram of the location of the central adhesive bond



图 10 中心胶粘结位置相关的力学和声学阻抗型类比线路图

Fig. 10 Mechanical and acoustic impedance-type analog circuit diagrams of central bonding locations

为了直观对比不同*C*glue 在声学频响曲线上的 差异,图10为增加了声辐射阻抗元件的类比线路 图,图中*S*<sub>1</sub>与*S*<sub>2</sub>的和为扬声器的等效振动面积,*S*<sub>1</sub> 看作折环部分的等效振动面积,*S*<sub>2</sub>看作球顶部分的 等效振动面积;*R*<sub>a</sub>和*X*<sub>a</sub>分别为无限大障板条件下 的辐射阻和辐射抗。

利用电路模拟软件 microcap 获取  $R_a$ 、 $X_a$ 两端的电压,并计算出距离扬声器1 m 处的 SPL曲线,图 11 为两种  $C_{glue}$  取值的 SPL 曲线 (结合图 9 对  $C_{glue}$ 的分析),可见  $C_{glue}$ 较大时,高频截止频率降低。

#### 3.2.2 中心胶粘结间隙对高频影响的仿真分析

为了探究中心胶粘结间隙对高音扬声器频率 响应的影响,使用Comsol软件对所选实例扬声器 进行仿真分析并设计实验(DOE)进行仿真验证,中 心胶粘结间隙分别为0 mm、0.2 mm、0.4 mm,间隙 由A型中心胶填充,如图12所示(为了对支架支撑 结构设计进行保密,对实例与仿真示意图中支架的 结构做了些简化,不影响本文的分析及论述)。



图 11  $C_{glue}$  取值对 SPL 的影响示意图

Fig. 11 Diagram of the influence of  $C_{\rm glue}$  value on SPL



Fig. 12 DOE diagram of central adhesive gap

对仿真的振动模态进行分析对比(图13~ 图15),当频率为11.8 kHz、音圈骨架与振膜充分 接触时,粘结位置的模态形变比较小,协同振动效 果好,说明音圈至振膜的能量传递比较好;当音圈 骨架与振膜的粘结位间隙增加至0.2 mm和0.4 mm 时,粘结位置的骨架、振膜模态形变较大,发生了明 显分割振动,对应的SPL响应也表现出高频提前截 止(图16)。 对于粘结异常的扬声器,结合公式(1)的经验 公式及实例分析,当中心胶粘结位置有间隙存在且 间隙由中心胶填充时,因中心胶材料与骨架材料比 模量的差异(材料声速的差异),胶黏剂"良好"阻尼 性能对振动能量的传递起到了副作用,同一频率下, 图13~图15情形中音圈从活塞振动变成分割振动, 分割振动的加剧不利于振动系的能量传递,对应的 SPL 响应表现出高频提前截止。









图 14 中心胶粘结位间隙为 0.2 mm 时的扬声器模态仿真







Fig. 15  $\,$  Modal simulation of loudspeaker when the center adhesive gap was 0.4 mm



图 16 中心胶粘结位间隙对 SPL 及其 Delta 值的仿 真图示

Fig. 16 Diagram of the SPL and its Delta value between the center adhesive gap

需要说明的是,以上分析是基于分析频率还没 有达到球顶分割振动频率(即第一阶简正频率)的 高频,将球顶看作整体运动以简化分析,如果频率 高于球顶第一阶简正频率以后,以上分析将会产生 误差。

# 4 结论与展望

音圈骨架材质中的声速远高于中心胶,在铝骨架和TIL材质中的声速比在中心胶分别高出约7.3倍和2.24倍。

通过对中心胶粘结位置相关的类比线路图分 析可知,扬声器高频截止频率主要受球顶和中心胶 的刚性影响,当粘结间隙由中心胶填充时,*C*glue变 大,此时整体刚性变小,表现为高频截止频率降低。

结合实例及仿真分析,当音圈与振膜粘结存在 间隙时,由于材料比模量的差异,胶黏剂"良好"阻 尼性能对振动能量的传递起到了副作用,会导致高 频振动模态发生弯曲,间隙越大所产生的分割振动 越强烈,导致了高频延展的提前截止。

不同音圈骨架材料因模量和密度的差异,对应 不同粘结位置间隙对SPL高频截止的影响以及粘 结间隙的临界值可以作为后续研究的展望。中心胶 所粘结球顶的顶角(也即球顶直径确定后的切割深 度)与扬声器高频辐射截止频率是相关的,需要做 空间三维辐射积分运算,亦可以作为后续的研究拓展,相应地,对失真的影响也值得研究。本研究为限制辐射频带的解决提供了方案参考,需要说明的是,扬声器高频辐射衰减并不是一件"坏事情",高于球顶第一阶简正频率的声辐射是有害的,因为这些辐射声不但频响峰谷参差引来"声染色",也会带来不规则的相位(时延),有时对电声系统做必要的频带限制,反而是掩盖信号缺欠的有效方法。

参考文献

- Klasco M, Tatarunis S, 俞锦元,等. 扬声器胶粘剂接口的声 音质量和锥盆处理 [J]. 电声技术, 2013, 37(1): 23-25.
- [2] 李志平. 胶粘剂在扬声器中的应用 [J]. 电声技术, 2012, 36(3): 21-23, 28.

Li Zhiping. Application of the adhesive in loudspeaker[J]. Audio Engineering, 2012, 36(3): 21–23, 28.

- [3] 廖宁波,周静雷.基于 ANSYS Workbench 的微型扬声器振 膜的有限元分析 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 45–49.
  Liao Ningbo, Zhou Jinglei. Finite element analysis of diaphragm for micro loudspeaker based on ANSYS workbench[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(9): 45–49.
- [4] 周静雷, 王源. COMSOL Multiphysics 在微型扬声器热效应 分析中的应用 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 29–32.
   Zhou Jinglei, Wang Yuan. COMSOL Multiphysics application in the micro loudspeaker thermal effect analysis[J].
   Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2): 29–32.
- [5] 田琪, 凡凯, 徐逢秋, 等. 基于 COMSOL 的三维扬声器多物 理场仿真 [J]. 电视技术, 2019, 43(2): 46-51.
  Tian Qi, Fan Kai, Xu Fengqiu, et al. Multiphysics simulation analysis of 3D speaker based on COMSOL[J]. Video Engineering, 2019, 43(2): 46-51.
- [6] 李子楠. 多孔金属材料声学性能测试系统声源设计与研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [7] 王以真. 实用扬声器工艺手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 92-95.
- [8] 王世伟,陈进,司景航. 碳纤/聚甲基丙烯酰亚胺复合夹层材料的结构及模量表征 [J]. 造纸科学与技术, 2020, 39(4): 14–18.
  Wang Shiwei, Chen Jin, Si Jinghang. Microstructure and modulus characterization of carbon fiber/polymethacrylimide sandwich composite[J]. Paper Science and Technology, 2020, 39(4): 14–18.
- [9] 沈勇. 扬声器系统的理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 81-90.