扬声器的非线性特性

成因　　参数　　征兆

$K_{ms}(x)$ 劲度-位移特性

扬声器使用悬挂系统使音圈位于磁隙中间位置(定心作用)，并产生一个使音圈回到静止位置的回复力。只有在小振幅情况下，位移x和恢复力F才近似于线性关系。回复力可以通过位移x及随位移变化的劲度系数$K_{ms}(x)$的乘积$F=K_{ms}(x)x$来进行描述。

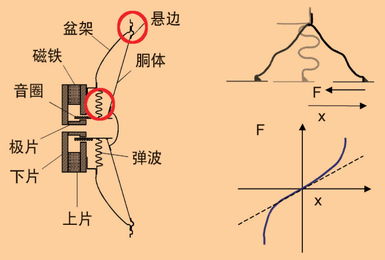

图1: 传统扬声器的悬挂系统(剖面图)及非线性力-偏移曲线

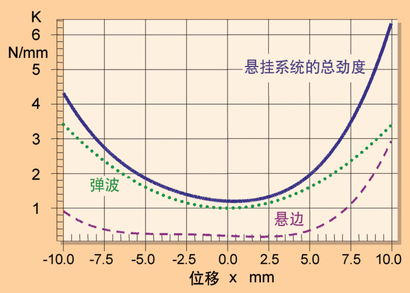

图2: 使用类似音频信号动态地测量扬声器单体的总合非线性劲度系数为$K_{ms}(x)$的曲线。悬挂系统的分别特征可通过第二次测量去掉80% 悬边后的特性来加以判定。

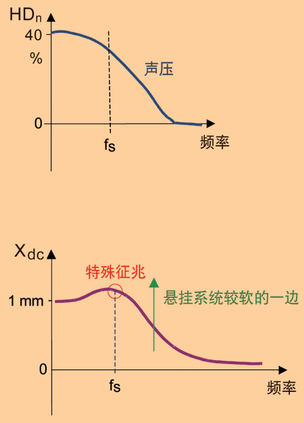

图3: 在低频段音圈位移较大处，非线性劲度$K_{ms}(x)$会产生较高的谐波失真。

图4: 悬挂系统的劲度$K_{ms}(x)$的不对称性将会产生一动态的类直流的偏移。

征兆:

- 当$f < 2f_s$ 时，在声压上将得到较高的谐波失真(HD)
- 音圈的类直流偏移X_{dc}沿着劲度曲线上较小的方向偏移
- 在谐振频率($f = f_s$)处，类直流偏移X_{dc}由劲度$K_{ms}(x)$主导
- 在声压方面表现出较低的互调失真(IMD)
- 在电流方面表现出较低的谐波失真(HD)和互调失真(IMD)

$Bl(x)$ 磁力因数-位移特性

磁力因数Bl(x)描述的是电动式换能器的机械与电气间的耦合。这个参数是磁束密度B沿着音圈长度方向l的积分值。磁力因数Bl(x)是一个与音圈位移相关的函数，它与音圈及磁体产生的磁场的几何形状有关。

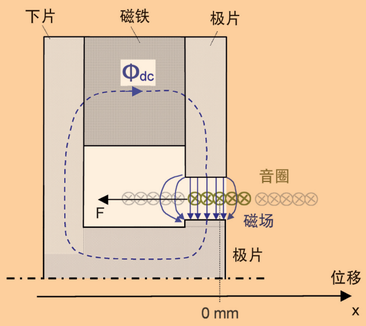

图5: 流经静磁场的音圈电流产生电动力。

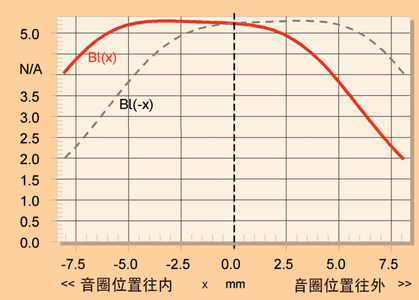

图6: 力因数Bl(x)对音圈位移x的曲线。该虚线表示的是Bl(-x)镜像特性曲线，揭示了非线性特性的不对称性。

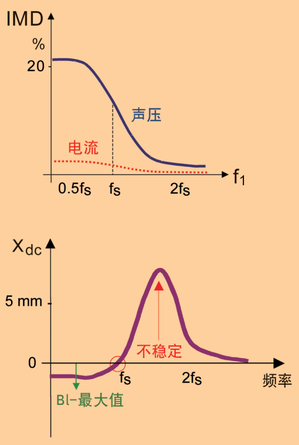

图7: 声压输出上的和由于非线性磁力因数Bl(x)引起的输入电流上的互调失真(IMD)的特征频率响应曲线(使用低音扫频技术，$f_1 = 20f_s$)。互调失真(IMD)在谐振频率f_s以上减少，那是因为低频音f_1产生了较小的音圈位移。

图8: 典型的类直流偏移X_{dc}相对于频率的响应，是由于在自由场中的扬声器单体存在着如图6所示的非对称Bl曲线

征兆:

- 当$f < 2f_s$ 时，声压上存在着较高的谐波失真(HD)
- 当$f_1 < f_s, f_2 > f_s$ 时，声压上存在着较高的互调失真(IMD)
- 类直流偏移X_{dc}随频率变化的方向:
  - 当$f < f_s$: 类直流偏移X_{dc}朝着Bl曲线极大的方向移动,偏移量较小
  - 当$f = f_s$: (谐振频率处): 没有类直流成分产生($X_{dc} = 0$)
  - 当$f > f_s$: 类直流偏移X_{dc}偏离Bl最大值
  - 当$f \approx 1.5f_s$: 类直流偏移值X_{dc}较大(→可能变得不稳定)
- 在电流方面表现出较低的失真

$L_e(x)$ 电感-位移特性

音圈中的电流会产生一个随音圈位置变化的磁场。如果音圈跳出气隙，穿过它的磁通量要比音圈在气隙中低得多，因为音圈在气隙内时，它周围的铁磁物质会减小磁阻。如图9示，在导电材料(如铝制或铜制短路环)中生成的感应电流却会产生一个反向的磁通量，这就能显著地减少总的变化的磁通量。

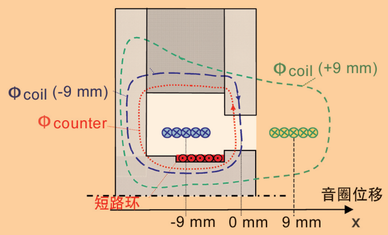

图9: 流过音圈的电流分别在音圈正向和负向位移x时产生的变化磁场的磁通Φ_{coil}，以及由短路环产生的反向磁通$\Phi_{counter}$。

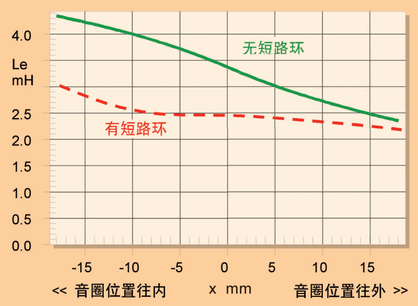

图10: 在磁隙下放置的短路环减少了在负位移处的音圈电感量$L_e(x, i = 0)$，并使得电感量接近恒定。

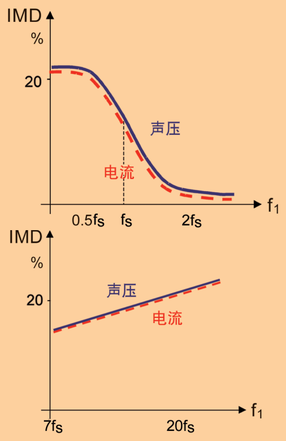

图11: 随位移变化的电感$L_e(x)$与在声压上及电流上测得的互调失真(IMD)有着相同的特征频率响应。在谐振频率之上，低频音f_1产生的位移较小，互调失真(IMD)也减少了(以$f_2 = 20f_s$的低音扫频技术测量)。

图12: 电感$L_e(x)$产生的互调失真IMD将随着音频f_2以大约6dB/octave斜率上升(以$f_1 = 0.5f_s$的语音扫频方式测量)。

征兆:

- 在$1.5f_s < f < 4f_s$之间，声压及电流上得到的谐波失真HD较为适度
- 在$f_1 < f_s, f_2 > 7f_s$范围内，声压及电流上获得的互调失真IMD较高
- 类直流偏移X_{dc}总是朝着$L_e(x)$极大值偏移，但偏移量较小
- 在谐振频率f_s处，类直流偏移X_{dc}最小

$L_e(i)$ 电感-电流特性

图13显示了，在3种不同的音圈电流下，磁场强度H及磁束密度(感应强度)B之间的非线性关系。当i=0时，磁体产生的磁场强度H_2决定了在B(H)特性曲线上的工作点。一个较高的正向电流(如i = 10A)将总的磁场强度升高到H_3，此时铁芯已处于较高饱和状态，磁导率也下降了。导磁率μ(i)的变化导致了电感$L_e(x, i)$对电流i的依赖性。

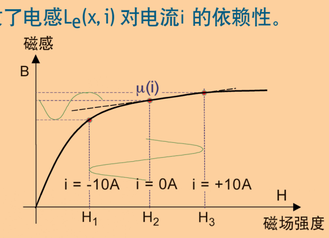

图13: 铁芯材料的磁场强度H及磁束密度(感应强度)B之间的非线性关系引起的导磁率μ(i)随着音圈电流i变化的特性。

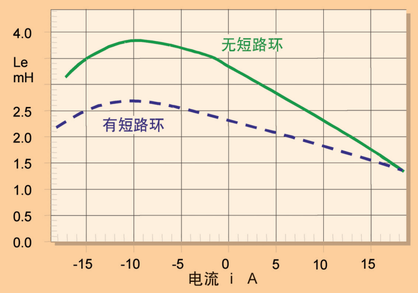

图14: 带短路环和不带短路环的音圈电感$L_e(i, x = 0)$对电流i的特性。由于使用了短路环，总的磁通量$\Phi_{ac}(i)$大小降低了，“磁通调制”也就减少了。

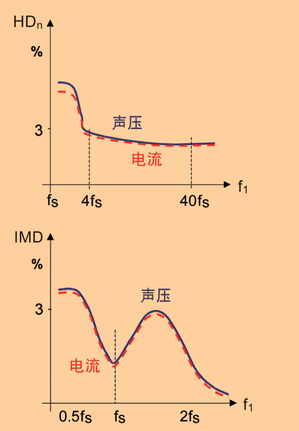

图15: 随电流变化的电感$L_e(i)$在声压和电流上产生的高频段谐波失真(HD)是相等的。而随位移变化的非线性特性(Bl(x), $K_{ms}(x)$及$L_e(x)$)由于在高频段的位移较小，就不会产生较为显著的谐波失真(HD, THD)。

图16: 随电流变化的电感$L_e(i)$在声压和电流上产生的互调失真(IMD)是完全相同的。且在电流较小的谐振频率f_s处，有一个特征谷(使用低音扫频技术$f_2 = 20f_s$)。

征兆:

- 在$2f_s < f$时，声压和电流上得到的谐波失真(HD)将有所减弱
- 在$0.5f_s < f_1, f_2$时，声压和电流上得到的互调失真(IMD)将有所减弱
- 在$f_1 = f_s$时，声压和电流上得到的互调失真(IMD)表现出一极小值

大信号模型

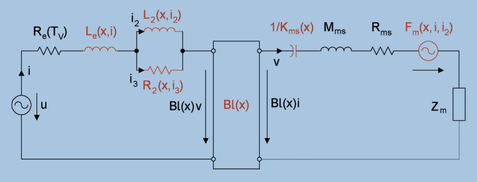

图17: 电动换能器的等效电路。扬声器的主要非线性特性可以通过带有变量参数的集中元件来描述。

集总参数:

- 电动式驱动器的力因数Bl(x)
- 悬挂系统的劲度$K_{ms}(x)$
- 音圈电感$L_e(x, i)$, $L_2(x, i)$
- 涡流损耗阻$R_2(x, i)$
- 音圈的直流电阻$R_e(T_v)$
- 代表其它力学及声学元件的阻抗Z_m

状态变量:

- 位移x
- 速度v
- 电流i
- 电压u
- 磁阻力$F_m(x, i, i_2)$
- 音圈温度T_v

曲线形状的影响

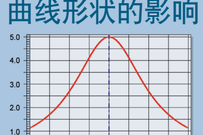

图18: 对称的非线性

图19: 对称的非线性产生较高的三次失真 (三次谐波失真HD_3, 三次互调失真 IMD_3)。

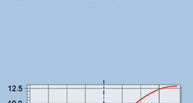

图20: 不对称的非线性

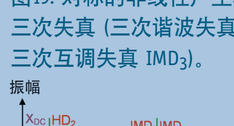

图21: 不对称的非线性产生较高的二次失真 (二次谐波失真HD_2, 二次互调失真IMD_2)。

失真测量

使用双音激励信号($f_1 << f_2$)

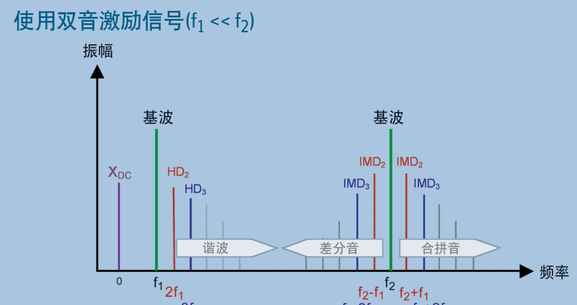

图22: 通过改变低频音f_1(低音扫频技术)或者是改变高频音f_2(语音扫频技术)，来测量互调失真。

征兆综述

诸如谐波失真(HD)，互调失真(IMD)，幅度调制失真(AMD)，类直流偏移(X_{dc})等的产生都是源于扬声器主要的非线性特性。

非线性特性	监测状态变量获得的征兆							
	声压				电流			位移
	谐波失真	互调失真(低音扫频)	互调失真(语音扫频)	幅度调制失真(语音扫频)	谐波失真	互调失真(低音扫频)	互调失真(语音扫频)	X_{dc}
$K_{ms}(x)$ 劲度 悬挂系统(定心支片+折环)	X							X*
Bl(x) 力因数 电动式驱动器	X	X	X	X				X*
$L_e(x)$ 电感 音圈在气隙中的位置		X	X	X		X*	X	
$L_e(i)$ 电感 磁通调制	X	X	X	X	X*	X*	X	
纸盆和悬挂系统的几何形状改变	X	X	X	X				
纸盆和悬挂系统的桶氏模量	X	X	X	X				
开口箱中倒相管内空气的流阻 $R_A(V)$	X							
多普勒效应 声波的辐射		X	X					
波形畸变 大高声压下的声音传播	X		X					

*提供了足以辨识非线性特性的特有症兆。

KLIPPEL

参考

分步介绍 (KLIPPEL 应用操作说明):

01 最佳音圈位置
02 分离的定心支片和折环
03 调整机械悬挂系统
04 位移峰值X_{max}的测量
05 由扬声器非线性引起的位移限制
06 幅度调制的测量
07 计权谐波失真的测量
08 3D 互调失真的测量
09 3D 谐波失真的测量
10 扬声器的幅度调制和频率调制失真
11 检查起主导的磁通调制
12 幅度压缩的成因
13 直流位移的动态生成
14 磁路的稳定性
15 顺性不对称性的检查
16 多音失真测量
17 非线性参数测量的可信性
18 热学参数测量
19 扬声器的空气对流冷却
20 等效输入失真的测量
21 通过偏移音圈来减少失真
22 不带Golden Unit 的 Rub & Buzz 检测
23 带Golden Unit 的 Rub & Buzz 检测
24 测试通讯用扬声器

www.klippel.de