扬声器的非线性特性

成因　　参数　　症状

Kms(x)劲度-位移特性

扬声器利用悬吊系统来将音圈定位于磁隙中间(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Kms(x)的乘积F=Kms(x)x来进行描述。

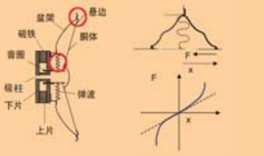

图1:传统扬声器的悬吊系统(剖面图)及非线性力-偏移曲线

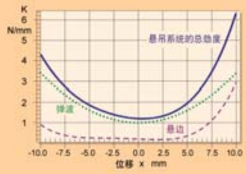

图2:使用类似音频信号动态地测量扬声器单体的总合非线性劲度系数Kms(x)的曲线。悬吊部件(边与弹波)的分别特征可通过第二次测量去掉80%悬边后的特性来加以判定。

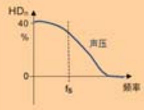

图3:在低频段音圈位移较大处，非线性劲度Kms(x)会产生较高的谐波失真。

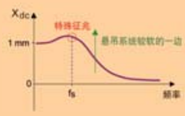

图4:悬吊系统劲度Kms(x)的不对称性将会产生一动态的类直流的偏移。

症状：

- 当f<2fs时，声压有较高的谐波失真(HD)
- 音圈的类直流偏移Xdc朝着劲度较小的方向偏移
- 在谐振频率(f=fs)处，类直流偏移Xdc由劲度Kms(x)主导
- 声压有较低的互调失真(IMD)
- 电流有较低的谐波失真(HD)和互调失真(IMD)

Bl(x)磁力因数-位移特性

磁力因数Bl(x)是描述电动式扬声器机械部份与电气部分的耦合参数。这个参数是磁束密度B对音圈长度l的积分值。磁力因数Bl(x)是一个与音圈位置有关函数，取决于磁体产生的磁场与音圈的几何形状。

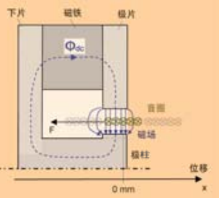

图5：通过静磁场的音圈电流会产生一电动力。

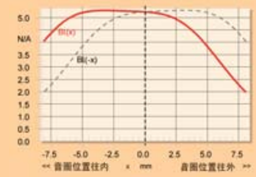

图6:磁力因数Bl(x)对音圈位移x的曲线。虚线表示的是Bl(-x)镜像特性曲线,揭示了非线性特性的不对称性。

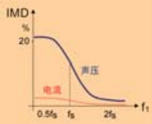

图7:非线性磁力因数Bl(x)在声压和电流上产生的互调失真(IMD)是不一样的。电流有较低失真，此为非线性磁力因数独有的症状。(用低频扫描法,固定高频f2=20fs)。互调失真(IMD)在谐振频率fs以上减少，那是因为低频音f1产生了较小的音圈位移。

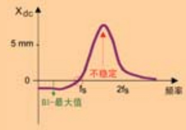

图8:由具有非对称Bl曲线(同图六)的单元(在自由声场)所造成的典型类直流偏移相对于频率的响应。

症状：

- 当f<2fs时，声压有较高的谐波失真(HD)
- 当f1<fs, f2>fs时，声压有较高的互调失真(IMD)
- 类直流偏移Xdc随频率变化的方向:
  - 当f<fs: 类直流偏移Xdc朝着Bl极大值的方向移动
  - 当f=fs(谐振频率处): 没有类直流成分产生(Xdc=0)
  - 当f>fs: 类直流偏移Xdc偏离Bl极大值
  - 当f≈1.5fs: 类直流偏移值X_{dc}较大(→可能变得不稳定)
- 电流有较低的失真

Le(x)电感-位移特性

音圈中的电流会产生一个大小取决于音圈所处位置的交流磁场，当音圈在空气中时，磁通量远低于音圈在磁隙中，因为铁质的导磁回路会降低磁阻(电感变大)。如图9所示，若在磁回中加个铝或铜制成的短路环或短路盖，则在其中感应而生的电流会产生一个反向的磁通将显著地降低了总的交流磁通。

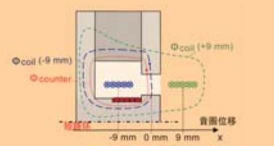

图9：流过音圈的电流分别在音圈正向和负向位移x时产生的交流磁通ΦCoil，以及由短路环产生的反向磁通Φcounter。

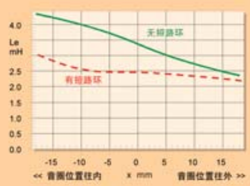

图10：在磁隙下放置的短路环减少了在负位移处的音圈电感量Le(x, i = 0)，并使得电感量接近恒定。

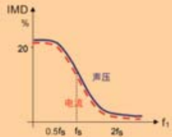

图11:随位移变化的电感Le(x)与在声压和电流上产生的互调失真(IMD)是一样的。在谐振频率之上，低频音f1产生的位移较小，互调失真(IMD)也减少了(用低频扫描法,固定高频f2=20fs)。

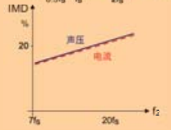

图12:电感Le(x)所产生的互调失真IMD将随着语音频率f2以约6dB/Octave斜率上升（用语音扫描法，固定低频f1=0.5fs）

症状：

- 当1.5fs<f<4fs时，声压和电流有中度的谐波失真HD
- 当f1<fs, f2>7fs时，声压和电流有较高的互调失真IMD
- 类直流偏移Xdc总是朝着Le(x)极大值偏移，但偏移量较小
- 在谐振频率fs处，类直流偏移Xdc最小

Le(i)电感-电流特性

图13 显示了在3种不同音圈电流下，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H2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H3，此时铁芯已处于较高饱和状态，导磁率也下降了。导磁率μ(i)的变化导致了电感Le(x,i)对电流i的依赖性。

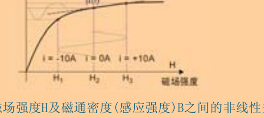

图13:铁芯材料的磁场强度H及磁通密度(感应强度)B之间的非线性关系引起的导磁率μ(i)随着音圈电流i变化的特性。

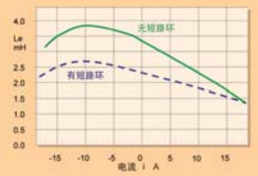

图14:带短路环和不带短路环的音圈电感Le(i,x=0)对电流i的特性。使用短路环时，总的交流磁通量Φac(i)大小降低了，“磁通调制失真”也就减少了。

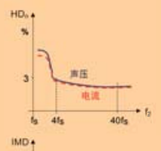

图15:随电流变化的电感Le(i)在声压和电流上产生的高频段谐波失真(HD)是一样的。而随位移化的非线性特性Kms(x),(Bl(x)及Le(x))由于在高频段的位移较小，就不会产生较为显著的谐波失真(HD, THD)。

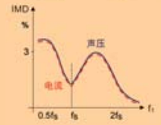

图16:随电流变化的电感Le(i)在声压和电流上产生的互调失真(IMD)是一样的。且在电流较小的谐振频率fs处，有一个特征谷(用低频扫描法，固定高频f2=20fs)。

症状：

- 当f>2fs 时,声压和电流有中度的谐波失真(HD)
- 当f1>0.5fs, f2时，声压和电流有中度的互调失真(IMD)
- 当f1=fs时，声压和电流的互调失真(IMD)有一极小值

大信号模型

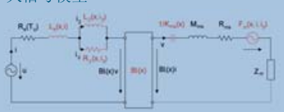

图17:电动换能器的等效电路。扬声器的主要非线性特性可以通过带有变量参数的集中元件来描述。

集总参数:

- 电动式磁回的磁力因数Bl(x)
- 悬吊系统的劲度K_{ms}(x)
- 音圈电感L_e(x, i), L2
- 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, i2)
- 音圈温度T_v

曲线形状的影响

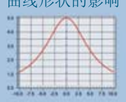

图18:对称的非线性

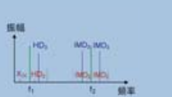

图19:对称的非线性产生较高的三次失真（三次谐波失真HD_3，三次互调失真 IMD_3）。

图20:不对称的非线性

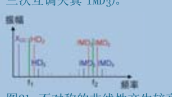

图21:不对称的非线性产生较高的二次失真（二次谐波失真HD_2，二次互调失真IMD_2）。

失真测量

使用双音激励信号(f_1<<f_2)

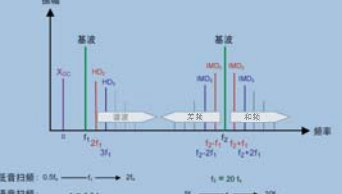

图22:通过改变低频音f_1（低频扫描）或者是改变高频音f_2（语音扫描），来测量互调失真。

症状综述

扬声器主要的非线性产生了诸如谐波失真(HD),互调失真(IMD),调幅失真(AMD),类直流偏移(Xdc)等症状。

非线性特性	监测状态变量获得的症状							
	声压				电流			位移
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	X_{dc}
K_{ms}(x) 劲度 [illegible]	X							X*
Bl(x) 力因数 [illegible]	X	X	X	X				X*
L_e(x) 电感 [illegible]		X	X	X		X*	X	
L_e(i) 电感 [illegible]	X	X	X	X	X*	X*	X	
[illegible]	X	X	X	X				
[illegible]	X	X	X	X				
[illegible] R_a(V)	X							
多普勒效应 [illegible]		X	X					
波形畸变 高声音下的声音传播	X		X					

*提供了足以辨识该非线性特性的特有症状。

KLIPPEL
www.klippel.de

参考

分步介绍（KLIPPEL应用操作说明）:

01 最佳音圈位置
02 分辨定心支片与悬边的特性
03 调整机械悬吊系统
04 最大峰值振幅X_{max}的测量
05 单元非线性的振幅极限Xbl, Xc, Xle
06 调幅失真的测量
07 Hi2改良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 扬声器的调幅和调频失真
11 检查主要的磁通调变失真
12 幅度压缩的成因
13 类直流偏移的动态生成
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 通过调整音圈定位来减少失真
22 无参考标准品的 Rub & Buzz异音检测
23 有参考标准品的 Rub & Buzz异音检测
24 测试通讯用扬声器

翻译: Fei Zhu、Danny Wang
编辑: James Zeng
监制: Eric Chu/EAV Audio