训练3

扬声器的非线性特性

1 实验目标

- 确定扬声器非线性失真的物理原因
- 用非线性集中参数来对换能器进行建模
- 理解扬声器非线性特性和其结构设计的关系
- 对扬声器的非线性特性进行动态测量
- 通过解读非线性参数来训练实际操作能力
- 在测量中避免常见错误

2 要求

2.1 实验人员所需背景知识

建议能先完成训练1和训练2再来做这次训练。

2.2 最小要求

实验人员将会用到由 KLIPPEL 数据库中 Linear Lumped Parameter Masurement.kdbx （线性集中参数测量）所提供的测量结果，但并不需要对 KLIPPEL 的测量硬件进行完整设置。从 www.klippel.de/training 下载 dB-Lab 并且在 Windows 电脑上安装，在其中观察实验数据即可。

2.3 可选要求

如果实验人员有 KLIPPEL R&D 测量系统，建议能使用指导老师或者其他实验者提供的换能器进行更多的测试。为了能完成这些测试，可能需要以下的软件和硬件：

- 大信号识别模块（LSI）
- 失真分析器 DA2
- 激光传感器
- 功率放大器
- 固定支架

3 训练过程

1. 阅读下面训练相关的理论知识。
2. 看教学视频并学习实际测量操作。
3. 回答预备问题来检验理解程度。
4. 依照教材来解读数据库中的实验结果并且离线回答多选问题。
5. 上传你的答案到匿名评分系统 www.klippel.de/training。
6. 获得一封包含有学习证明的邮件 **Certificate of Mastery, Knowledge or Participation**（根据表现进行评分）。
7. 如果有条件使用硬件，在换能器上进行可选实验。

4 介绍

扬声器在小信号域和大信号域听起来很不相同。扬声器固有的非线性特性在信号强度较高时候产生了额外的信号失真。这些非线性失真直接和换能器物理结构有关，比如磁铁的大小和重量、音圈高度与磁隙深度的比和其他一些悬挂系统的几何特性。因此，第一次实际操作训练的电声等效电路的线性集中参数（比如磁力因数Bl）并不是恒定的，而是和瞬态变量有关，如音圈位移量x。集中参数的变化与非线性曲线的形状相呼应，产生非线性信号失真，其中包括了新的频谱分量，这些就是谐波和互调，他们不存在于扬声器的输入信号中。

一个线性模型可以解释扬声器在小信号域的特性。但现在需要一个非线性模型来研究以下方面：

- 限制声学输出（尤其是低频情况）的因素
- 产生可听到的失真（对音质有很大的影响）
- 过载（产生疲劳和损伤）
- 不稳定行为(产生分叉和动态线圈抵消）
- 理想设计（低重量和大小情况下的性价比）
- 换能器的效率（对可携带的设备的电池很重要）
- 保护扬声器（音圈位移的软限制）

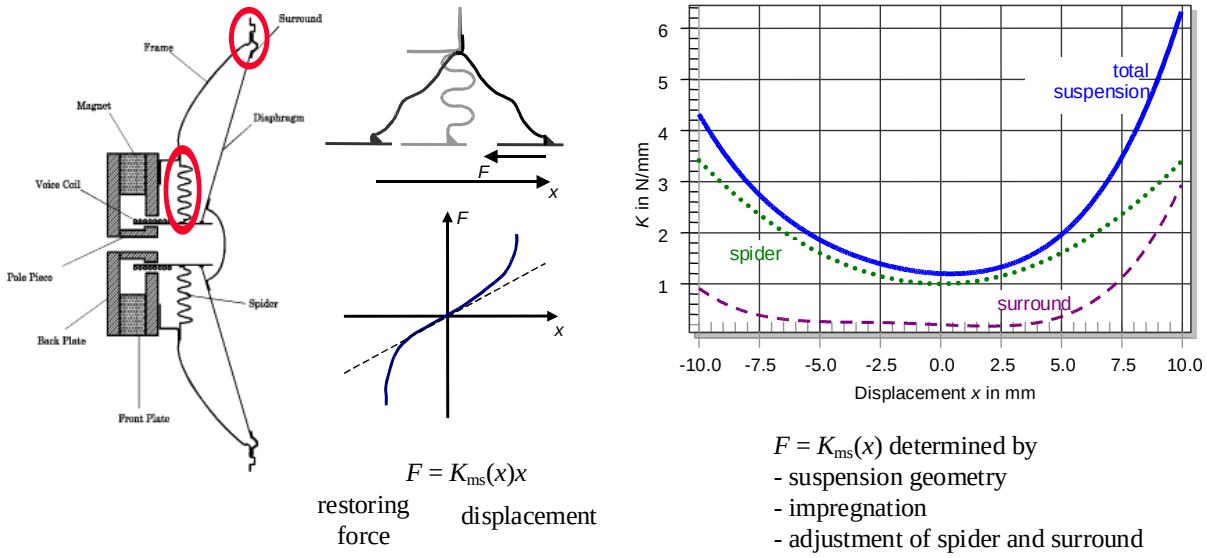
以下的理论部分简单地展示了一个在大信号域工作的的扬声器模型，这对于后面操作训练很有用。

4.1 重要的换能器非线性特性

以下部分会讨论电动扬声器中主要的非线性特性。

4.1.1 刚性 $K_{ms}(x)$

刚性 $K_{ms}(x)$描述了扬声器悬挂系统的恢复力 $F=K_{ms}(x)x$ 和音圈位移 x 的非线性关系。在小信号情况下，刚性基本上是恒定的。在大信号情况下，刚性随着位移增加而显著增大，产生了很大的恢复力，这时候悬挂材料被拉伸，波纹滚筒的外形改变很大（见图1）。非线性柔度是非线性刚性的倒数 $C_{ms}(x)=1/K_{ms}(x)$。



$F = K_{ms}(x)x$

restoring force　　displacement

$F = K_{ms}(x)$ determined by
- suspension geometry
- impregnation
- adjustment of spider and surround

图1：折环和定心支片是造成非线性刚性 $K_{ms}(x)$的主因

4.1.2 磁力因数 *Bl*(*x*)

磁力因数 *Bl*(*x*)描述了电动换能器电气与机械域的耦合，它是磁通密度（或称磁感应响度）*B* 在音圈长度 *l* 上的积分。和线性扬声器模型情况下不一样，磁力因数不是恒定的，在真实换能器中是一个关于音圈位移 *x* 的函数。随着越来越多的线圈离开磁隙（磁隙中磁通密度 *B* 很高），磁力因数 *Bl*(*x*)会在较高的正负位移处减小。在很多应用情况下，需要一个对称的磁力因数 *Bl*(*x*)曲线，它的最大值要在音圈静止位置 *x*=0处（见图2）。

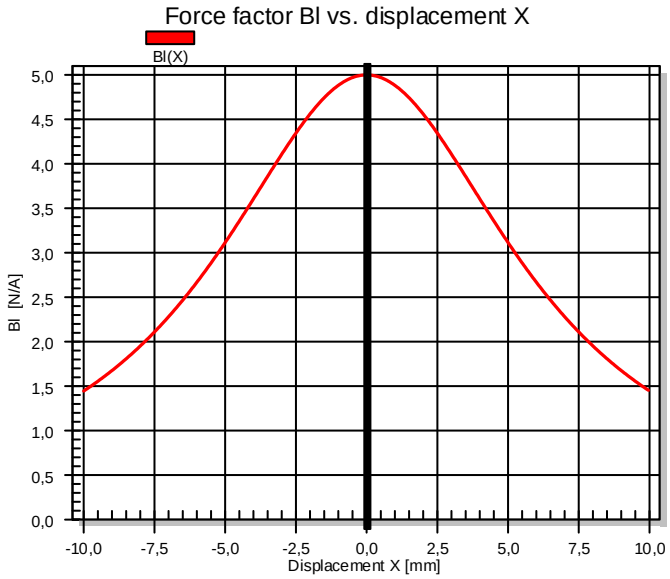


图2：磁力因数 *Bl*(*x*)与音圈位移 x 关系

磁力因数 *Bl*(*x*)对电动换能器有两个非线性影响：

- 磁力 $F=Bl(x)i$ 激励了机械系统并决定了音圈的位置 *x*，它产生了一个音圈电流和位移 *x* 的非线性相互作用。
- 电压（电动势 EMF）$u_{EMF}=Bl(x)v$ 是由电动换能器电气域这一边产生，它产生了一个位移 *x* 和速度 *v* 之间的非线性相互作用。

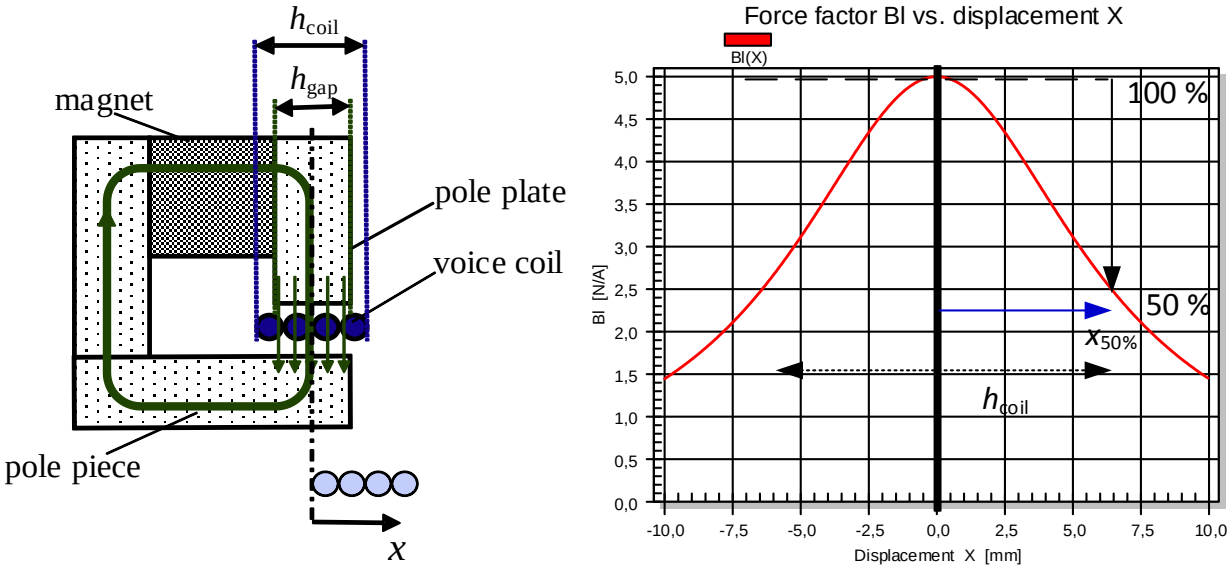


图3：等长结构的非线性磁力因数 *Bl*(*x*)

电机拓扑结构（音圈高度和磁隙深度）直接关联于磁力因数 $Bl(x)$对位移的曲线形状。图3中的对称结构在静止位置提供了很高的 Bl 值，但是也有曲线的早期衰减。图4中的长音圈会在 $Bl(x)$曲线产生一个平直区域，因为在比较小的音圈位移情况下，在磁隙中总是有着恒定数量的线圈。不考虑磁隙之外的边缘场，音圈位移 $x_{50\%}$（即磁力因数减小到了50%的位移）与两种拓扑结构中的音圈高度 h_{coil} 是相对应的。

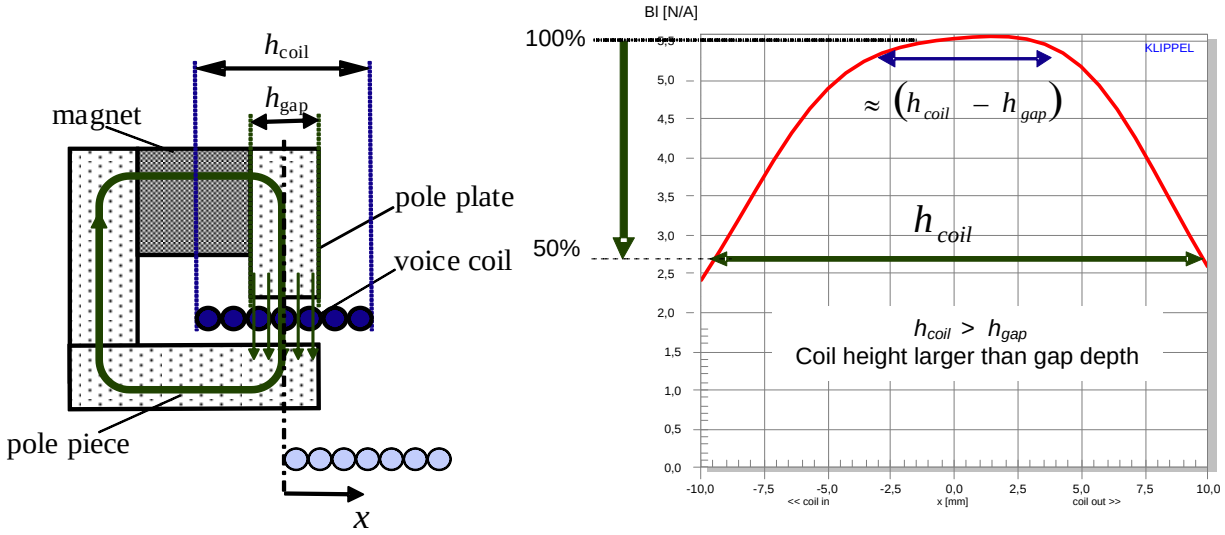


图4: 长音圈的非线性磁力因数 *Bl(x)*

4.1.3 音圈电感 $L_e(x, i=0)$

音圈电感L_e也是低音扬声器和低音炮很重要的非线性特性，因为电流会产生一个由音圈位置决定的磁交流电场。

如果音圈向正向移动，线圈就会在空气中产生一个磁通Φ，这个磁通量比音圈负向移动到磁隙的金属内壁所产生的磁通量要小很多。这个非线性特性可以通过添加导电材料来减少，比如短路环或者靠近音圈的铝质或铜质罩子，见图5。这样会产生一个反向的磁通$\Phi_{counter}$，它能在负向位移处减少总磁通量。

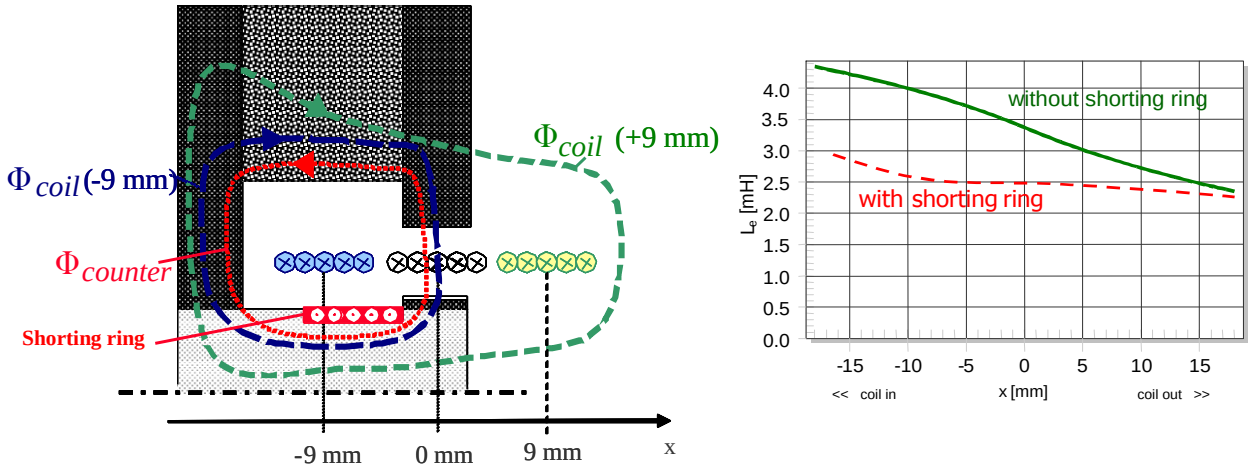


图5: 在间隙下方植入短路环可以减少音圈负向位移时的电感 $L_e(x, i=0)$使之几乎恒定。

4.1.4 音圈电感 *Le(i, x=0)*

音圈电感$L_e(i)$还取决于电流i，因为在铁质材料中磁场强度H和磁通密度B之间的关系是非线性的。图6展示了在位移x=0时候三个不同音圈电流值的总磁通密度的变化。在i=0A时，磁铁产生的磁场强度H_2决定了B(H)图中工作点。当电流升高（i=10A）时整个磁场强度H_3升高了，铁质材料工作在高饱和态下进而使磁导率μ下降。磁导率$\mu(i)$的变化导致电感$L_e(x, i)$也与电流i有关。

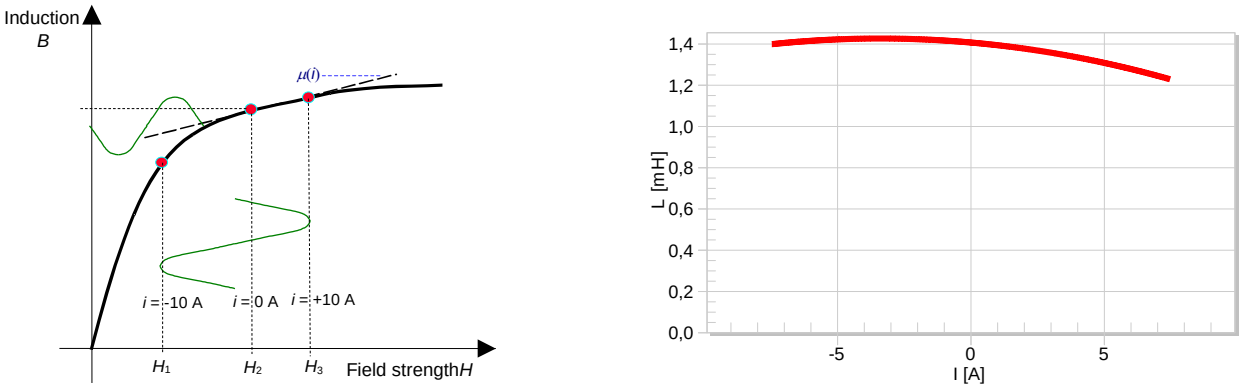


图6: 音圈电感 $L_e(i, x=0)$和音圈电流 $\underline{I}$关系

非线性电感 *Le(i, x=0)*可以用短路环（优化设计的铁质线路）或者在音圈附近放置短路材料来减少。

4.2 非线性集中参数模型

扬声器主导的非线性特性之间的相互作用可以通过建立一个集中参数模型来研究，见图7。

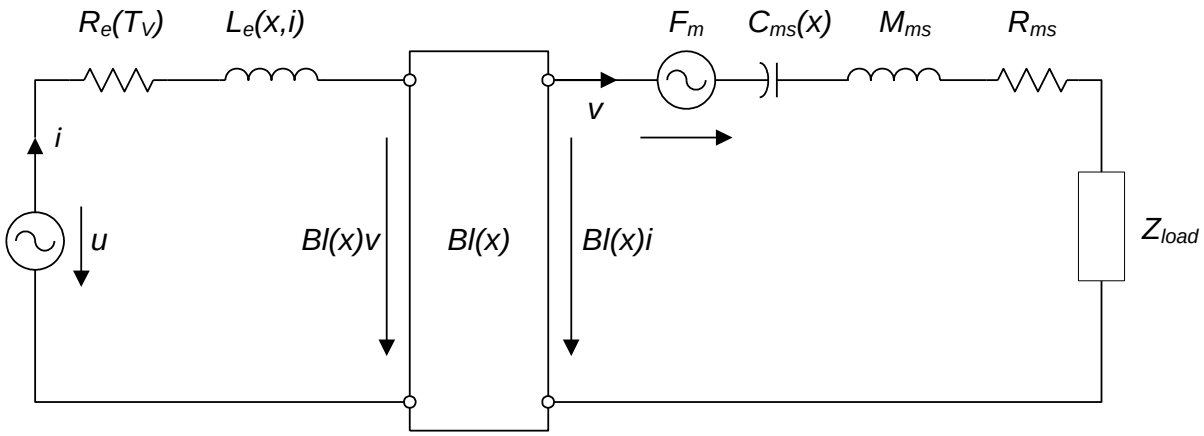


图7: 包含非线性集中参数的电动换能器的等效电路

该等效电路的电气域展示了电阻 R_e、非线性电感 $L_e(x,i)$和由速度与磁力因数产生的反向电动势的影响。电动驱动力 $Bl(x)\underline{i}$ 和磁阻力 F_m（非线性电感 $L_e(x,i)$的第二非线性效应）激发了右边的机械系统，包括非线性柔度 $C_{ms}(x)=1/K_{ms}(x)$、移动质量 M_{ms}、机械阻抗 R_{ms} 和负载 Z_{load}。

5 扬声器非线性实验

扬声器非线性可以通过不同方法测量，可参见IEC standard 62458。

5.1 静态测量

静态测量，如图8，使用了一个直流信号作为激励信号（比如一个恒力）来测量扬声器在稳态下的状态变量（比如音圈的位移）。这个测试可以用不同大小的直流信号重复。最终得到力-偏差曲线（force-deflection curve），这是计算非线性刚性的基础。因为需要对非线性曲线采样很多点，这个测量很耗时。而且它还有两个在高频情况下不可见的缺点，即悬挂材料的黏弹效应会导致位移过程中的蠕变和滞后效应。静态测量技术不太适合确定电感的非线性，因为直流电不产生磁通量的时间导数，在端口没有反向感应电压。

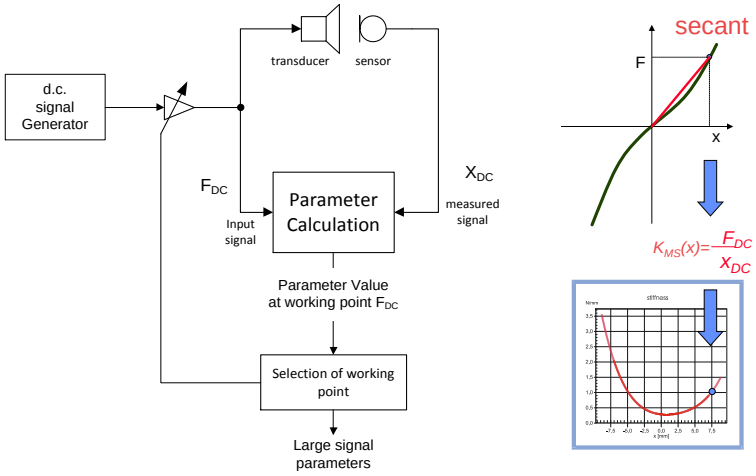


图8: 扬声器非线性的静态测量

5.2 动态方法

动态方法采用了足够大小和带宽的交流激励信号，比如音乐或者一个类音频信号（噪音），一般情况下它们不会有直流分量。

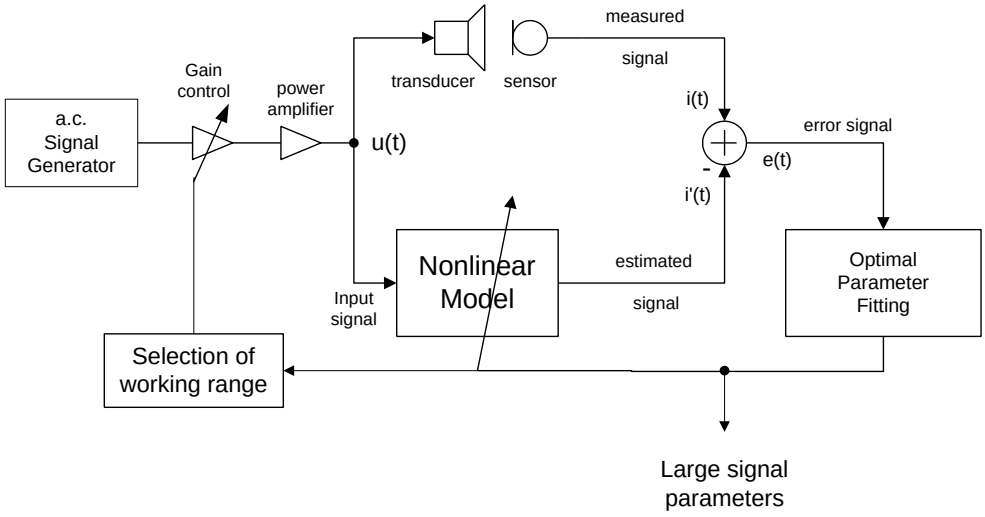


图9: 全动态方法测量非线性集中参数模型，在扬声器端口测量电压 *u*(*t*)和电流 *i*(*t*)

5.2.1 确定参数

在扬声器终端测量电压和电流可以确定电气域的扬声器集中参数模型（图7）。这些参数估计值可以通过不断缩小错误信号$e(t)=i(t)-i'(t)$，也就是缩小测量值和估计值之差，来逼近真实值。在一个更新时间间隔（1s）中最大误差和最大电流值的比率E_i代表了系统识别的精确度。功率放大器的增益可以通过自适应技术得到，相对误差E_u代表了终端电压测量值和估计值的差异。

电阻 R_e 和电感 $L_e(x_{rel})$的非线性特性可以直接得到以欧姆（Ohm）和亨利（Henry）为单位的值。由 $Bl(x)v$ 定义的反向电动势可以被用来监测机械系统，还能被用来确定静止点 x=0处的谐振频率 f_s $(x=0)$和品质因数 Q_{ms}(x=0)、$Q_{es}(x=0)$ 以及 $Q_{ts}(x=0)$。电学测量还提供了相对磁力因数非线性 $Bl(x_{rel})/Bl(x=0)$和刚性非线性 $K_{ms}(x_{rel})/K_{ms}(x=0)$，由此可以给出非线性曲线与相对位移 x_{rel}（$-1<x_{rel}<1$）的关系。

5.2.2 状态识别

系统识别（基于电压和电流监测）给出了瞬间音圈位移$x_{rel}(t)$和其他派生出的机械信号（速度、加速度），甚至在测量时任意时间的预测输出声压$p(t)$。机械和声学信号是相关信号。

一个可选激光传感器可以用来测量音圈的位移和确定磁力因数$Bl(x=0)$ （作为物理量，以N/A校准）。精确度可以通过测量音圈位移和模拟音圈位移的相对误差E_x来评价。误差E_x说明模型不够精确（比如一个二阶模型被用于音箱系统），而且在激光测量中有光学故障。建议用激光信息来检查扬声器的极性和换能器终端与扬声器导线的正确接法，这与位移方向相关（负向位移应该是音圈朝着导磁下板方向运动）。

还有，激光头提供了所有机械参数和状态变量的粗略估计值。导入一个用小信号测试（线性参数测量，LPM）得到的已知小信号参数（$Bl(x=0)$或者M_{ms}）可以对上面估计值进行精确的校准。

确定直流电阻$R_e(t)$与测量时间的关系也是计算测量期间音圈温度上升ΔT_v的基础。

5.2.3 保护换能器

换能器的测量始于小信号域，这时激励信号不会让音圈显著发热，非线性也可以忽略。信号的大小是缓慢提升到增强模式“Enlargement Mode”，这时，输入功率、音圈温度、非线性磁力因数$Bl(x)$和非线性刚性$K_{ms}(x)$都可以得到确认。激励信号的最大值就是输入功率、音圈温度或者非线性参数的变化刚好不超过用户定义的门限值，否则会造成过热或者机械过载。在确定了特定换能器的工作范围后，非线性模式“Nonlinear Mode”将采用一个慢学习速度来确保自适应参数识别的最高精确度。

5.2.4 失真分析

集中参数模型的非线性参数识别是计算失真峰值比 D_B、 D_C、D_L 和 $D_{L(i)}$的基础，他们分别来自于预测声压输出信号 p_{total} 的 $Bl(x)$、$C_{ms}(x)$、$L_e(x)$ 和 $L_e(i)$。

5.3 解读非线性参数

非线性参数的曲线包含了关于非线性特性的物理原因和性质的重要信息。它和扬声器组件的属性直接相关。

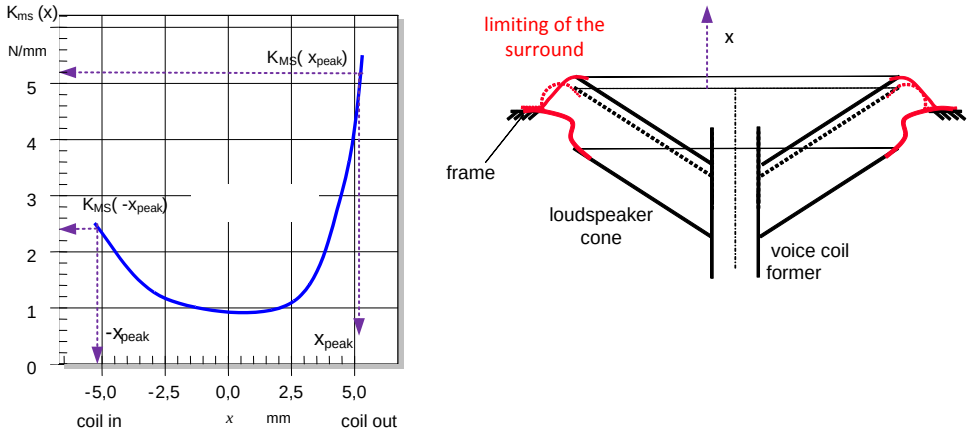


图10：由悬挂系统的限制导致的刚性 $K_{ms}(x)$的非对称特性

5.3.1 刚性的非对称性

定心支片和折环中波纹圈的非对称形状以及不同悬挂组件的组合会导致刚性曲线 $K_{ms}(x)$的非对称性。举例来说，折环正向偏移（见图 10 右边）产生了一个非对称刚性曲线（见图 10 左边）。这样的非对称性不是想要的悬挂系统性能，因为它提升了非线性失真，并且当交流信号上加载了直流位移分量以后音圈会朝着悬挂系统柔软的一边移动。

刚性曲线的非对称性可用一个量来描述：

$$A_K(x_{peak}) = \frac{2\left(K_{ms}(-x_{peak}) - K_{ms}(x_{peak})\right)}{K_{ms}(-x_{peak}) + K_{ms}(x_{peak})} 100\%$$

上面公式使用了所测 K_{ms} 曲线中负向和正向最大位移$\pm x_{peak}$ 处的刚性。A_K 的正负号与非线性整流过程动态产生的直流位移的正负号相同。

刚性值$K_{ms}(x=0,\ x_{peak})$在静止位置$x=0$处不是恒定值而是取决于之前激励信号产生的位移峰值。这个特性可以解释为悬挂材料(橡胶、纤维、泡沫……)的黏弹效应。此效应会造成材料属性的瞬间变化。

5.3.2 磁力因数的非对称性

磁力因数 $Bl(x)$的非对称性也启动了交流信号的整流，产生一个直流分量，把音圈从 Bl 最大值处移开，并且动态提升非对称性。这个过程是扬声器不稳定和过度二阶谐波失真与互调失真的原因。用对称点 x_{sym} 可以简单评估磁力因数的非对称性。这个值由下定义：

$$Bl(x_{sym} - x_{ac}) = Bl(x_{sym} + x_{ac})$$

其中 x_{sym} 是音圈的虚拟偏移 x_{off}，它们在正负最大位移$\pm x_{ac}$ 处产生相同的 Bl 值，见图11。如果曲线不是按固定的偏移量移动而是扭曲的，那么对称点 x_{sym} 会随着峰值位移 x_{ac} 变化。

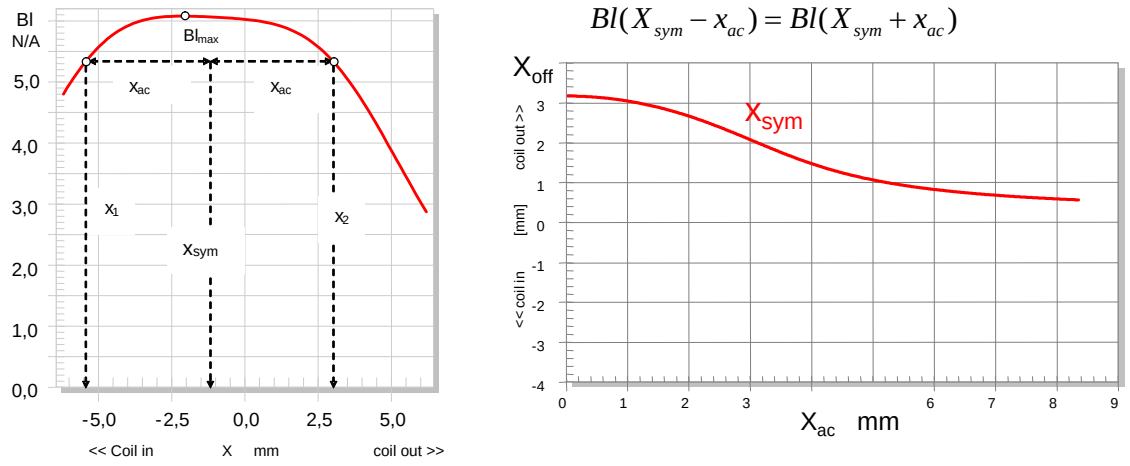


图11：对称点 $x_{sym}(x_{ac})$与激励信号产生的峰值位移 x_{ac}

对于产生很小峰值位移的信号，对称点所在处就是 $Bl(x)$的最大值。对于很大的峰值位移 x_{ac}，对称点 x_{sym}给出了让 $Bl(x)$衰减曲线对称的虚拟位移 x_{off}。Bl 对称点是确定音圈最佳静止点的有效判断标准。关于 Bl 的非对称性 A_{Bl}，定义如下：

$$A_{Bl}\left(x_{ac}, x_{off}\right) = \frac{Bl(x_{off}+x_{ac}) - Bl(x_{off}-x_{ac})}{Bl(x_{off}+x_{ac}) + Bl(x_{off}-x_{ac})}$$

A_{Bl} 描述了相对于 x_{off}（即音圈偏移的静态位置）距离为峰值位移 x_{ac} 的两个对称点的 Bl 值的相对差值。

如果 A_{Bl} 小于5%，非对称性可以忽略，不需要改正静止位置。这个情况取决于峰值位移 x_{ac} 和中心工作点 x_{off}（即音圈偏移的静止位置），见图12中灰色区域。对于小的峰值位移 $x_{ac}<x_{Bl\text{-}asym}$，对称区域相对较宽，并且因为图12左上方的 $Bl(x)$图中平稳区域，对称区域还包括了当前音圈静止位置 $x_{off}=0$。蓝色虚线表示了音圈当前静止位置 $x_{off}=0$，此处临界峰值位移为 $x_{Bl\text{-}asym}$，超过了就会离开灰色区域。对于高幅度 $x_{ac}>x_{Bl\text{-}asym}$ 下，当前静止位置超出了对称区域，音圈应该移动到新的静止位置 x_{off}=-2mm。这样就确保了在大信号时，线圈离开磁隙的正负位移是对称的。因为 $Bl(x)$曲线下降处很陡，对称区域在峰值位移 x_{ac} 很大的时候非常窄。

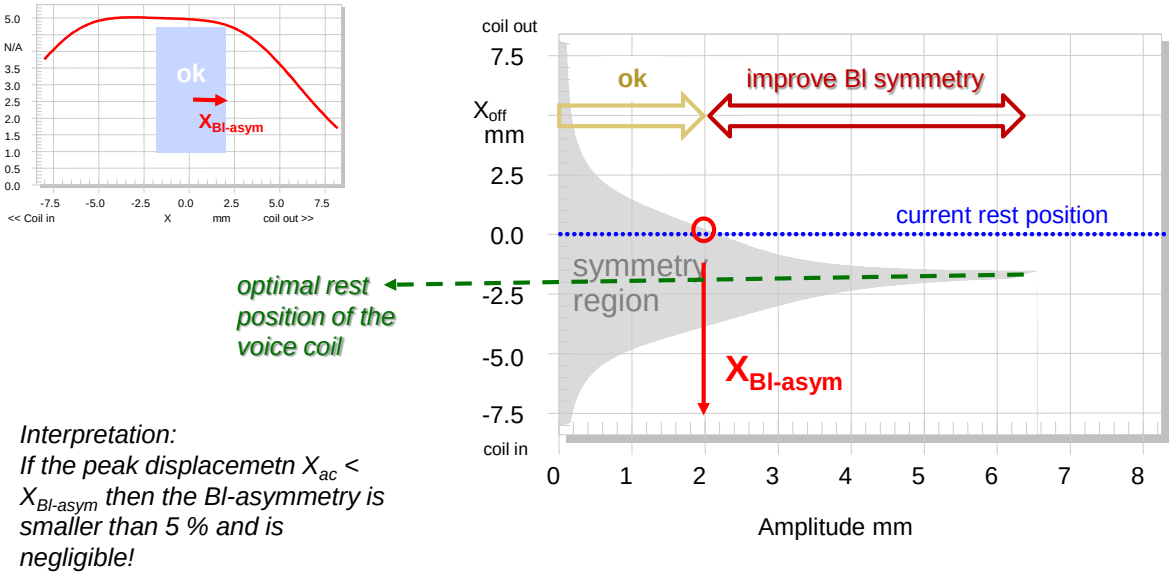


图12：评估 *Bl*(*x*)的对称性，找到最佳的音圈静止位置

图3中那种等长对称结构电动换能器只有很窄的*Bl*对称区域，并且需要很仔细地调整音圈静止位置。这是因为*Bl*(*x*)没有平台区域，向正负移动时*Bl*值都会从最大值迅速衰减。

5.4 峰值位移 $X_{max10\%}$

音圈的最大峰值位移$X_{max10\%}$是一个评估换能器机械性能很重要的参数，这些机械性能限制低频段声音重放。该值根据IEC标准62458定义为音圈的峰值位移。在该值处总的谐波失真或者调制失真最大值达到定义的门限值d = 10 %。另外，这个值可以由音圈位移*x*决定的扬声器非线性的形状得到。对每个主导的非线性都引入了一个单独的位移极限：

- X_C 由非线性柔顺度决定的位移*x*
- X_{Bl} 由非线性磁力因数决定的位移*x*
- X_L 由非线性电感决定的位移*x*

最小的位移限制大约对应于产生10%失真的最大峰值位移$X_{max,10\%}$。

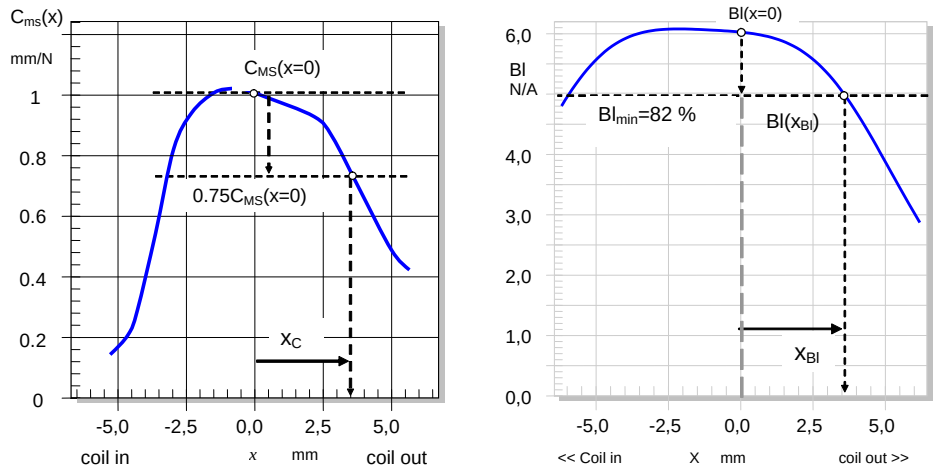


图13：由非线性柔度 $C_{ms}(x)$和磁力因数 *Bl*(*x*)计算位移限制 X_C和 X_{Bl}

5.4.1 位移限制 X_{Bl} 和 X_C

图13左侧是由非线性柔顺度 $C_{ms}(x)$的限制来计算峰值位移 X_C。这个限制是柔顺度降到静止位置时柔顺度的75%即 $C_{ms}(X_C) = 0.75\ C_{ms}(x = 0)$时的最小位移。对于一个单音激励信号，如果音圈位移极值达到 X_C，换能器会在声压输出产生10%谐波失真。

右侧图是峰值位移 X_{Bl}，是由磁力因数限制来计算的，此时磁力因数降低到了静止位置时的82%即 $Bl(X_{Bl}) = 0.82\ Bl(x = 0)$。峰值位移为 $x_{peak} = X_{Bl}$ 的换能器在双音激励信号的声压输出产生10%的互调失真。

6 准备问题

在正式训练前检查理论知识。选择所有正确的答案，有时候答案不止一个。

QUESTION 1: 扬声器的非线性特性有没有正面影响？

- □ **MC a:** 在电机和悬挂系统中的非线性特性会限制音圈的峰值位移，防止音圈撞底板。
- □ **MC b:** 磁力因数的非线性与换能器在通频带($f > f_s$)的效率直接相关。举例来说，一个等长结构相比于长音圈可以在静止位置产生一个较高的 Bl 值，对于正常的声音信号则能有更多的声能输出。这减少了可携带音响设备的耗能，延长电池寿命。
- □ **MC c:** 有非线性磁力因数和刚性的扬声器可能比更线性的扬声器更小、更轻和更便宜。
- □ **MC d:** 有些扬声器的非线性特性（比如低音炮的刚性非线性）会产生可以接受甚至在特定情况下有益的非线性特性。

QUESTION 2: 为什么需要在扬声器诊断和设计时直接测量非线性特性？

- □ **MC a:** 非线性参数显示了失真的物理原因，而失真测量显示了非线性系统的症状。
- □ **MC b:** 非线性参数不需要对扬声器物理建模，但是失真测量需要精确的模型。
- □ **MC c:** 非线性参数与零部件的几何尺寸和材料直接相关。
- □ **MC d:** 非线性参数描述了换能器性能，并且很大程度上与激励信号的属性无关（与失真测量相反）。

QUESTION 3: 动态和静态测量非线性参数的不同在哪里？

- □ **MC a:** 动态测量方法可以用一个普通声音信号（比如音乐）作为激励信号加载到扬声器上。静态测量方法一般用一个直流信号（比如恒定的力）作为测试信号，由于材料的黏弹效应，这会导致不同的变化行为（比如悬挂系统的蠕变）。
- □ **MC b:** 静态测量比动态测量更耗时。
- □ **MC c:** 测量扬声器非线性参数的动态和静态测量方法没有什么区别。

QUESTION 4: 什么特性（参数和状态信息）可以通过仅仅测量扬声器电压和电流得到。

- □ **MC a:** 监测直流阻抗 R_e 的变化得到音圈温度的增量。
- □ **MC b:** 谐振频率，品质因数 Q_{ms}、Q_{es} 和 Q_{ts}。
- □ **MC c:** 代表了振动质量、柔顺度和机械以及声学损耗的电气参数。
- □ **MC d:** 相对机械特性，比如非线性的磁力因数 $Bl(x_{rel}) / Bl(x = 0)$相对于音圈位移 $x_{rel} = x / x_{peak}$ 的曲线形状。
- □ **MC e:** 单位为 mm 的音圈位移（不需要来自激光传感器的信息或者导入机械参数）

QUESTION 5: 用于电动换能器(比如 LSI 低音扬声器)的动态参数测量方法也可以用于确定静电换能器的非线性参数么？

- □ **MC a:** 可以，所有电声换能器都有显著的非线性特性。

- □ **MC b:** 不行，换能器原理不同，考虑到物理模型的特点需要不同测量方法。

7 用数据库测量（不需要硬件）

Step 1: 观看演示视频 ***Loudspeaker Nonlinearities*** 来看如何实际操作线性集中参数测量实验。

Step 2: 从网站 www.klippel.de/training 下载软件 ***dB-Lab*** 并且安装到电脑上。

建议：推荐离线做以下练习，将答案记录在一张纸上。

7.1 选择扬声器模型

Step 3: 打开数据库***"Training 3_Loudspeaker Nonlinearities.kdbx"***。对象 ***"woofer4inch in free air small woofer*** 包含了在空气中夹在激光测量支架上且没有任何外壳的小低音扬声器的 LPM 和 LSI 测量。观察实验***"1 LPM TS-Parameters"***的小信号测量结果，并且读出谐振频率 f_s，选出有正确换能器模型的大信号识别模块(LSI)。

QUESTION 6: 哪个模型能够更好地对所测量的换能器建模？

- □ **MC a:** LSI 低音扬声器单元，(f_s < 400 Hz)，空气。
- □ **MC b:** LSI 低音扬声器音箱，(f_s < 400 Hz)，封闭外壳。
- □ **MC c:** LSI 低音扬声器音箱，(f_s < 400 Hz)，外壳开孔。
- □ **MC d:** LSI 高音扬声器单元，(f_s > 200 Hz)。

7.2 测量步骤

Step 4: 第一次测量的结果保存在实验***"2a LSI Clim 50% without laser"***中。打开结果窗口***"Temperature, Power"***，往左拖动粉红色垂直光标线（在开始时是黑色的）到实验开始时间(t = 0)来看实验过程。同时按住 SHIFT 和右方向键来沿时间轴向后移动光标，观看整个测量过程。

Step 5: 在窗口***"Temperature, Power"***中移动时间光标到"Linear Mode 3(7)"结束、"Enlargement Mode 4(7)"开始的时刻，看结果窗口***"State"***和磁力因数***"Bl (X)"***，

QUESTION 7: 两种模式有什么区别？

- □ **MC a:** "Linear Mode 3(7)"提供了精确的线性参数(T/S parameters).
- □ **MC b:** 在"Linear Mode 3(7)"里非线性曲线是平的，并且假定换能器是工作在足够小幅度的信号情况下，这时非线性特性可以忽略不计。对扬声器防止机械过载的保护在"Enlargement Mode 4(7)"时被激活，这时候非线性参数可以识别。
- □ **MC c:** 在"Linear Mode 3(7)"时音圈温度增量 Delta T_v是0，因为瞬时音圈电阻 R_e被测量并被用作表示实验起始时间时温度的参考值。过热保护在"Enlargement Mode 4(7)"时变得活跃，这时候可以得到音圈温度增量 Delta T_v。
- □ **MC d:** 输入功率在"Linear Mode 3(7)"结束时候基本恒定。但是在"Enlargement Mode 4(7)"时缓慢增长直至达到允许工作范围的门限（由保护参数确定）。

7.3 保护限制

Step 6: 在结果窗口***"Temperature, Power"***中调整光标到测量的最后（光标变黑）。打开结果窗口***"Bl (X)"***，展示了相对磁力因数比 $Bl(x) / Bl(x = 0)$与相对位移 x / x_{prot} 的关系。读取在工作区域中负位移$-x_{prot}$和正峰值位移 x_{prot}之间的最小磁力因数比 Bl_{min} = MIN {$Bl(x) / Bl(x = 0)$}。

Step 7: 打开结果窗口柔顺度***"Cms (X)"***，描述了相对柔顺度比 $C_{ms}(x) / C_{ms}(x = 0)$与相对位移 x / x_{prot} 的关系。读取工作区域中负位移$-x_{prot}$和正峰值位移 x_{prot} 之间的最小柔顺度比 C_{min} = MIN $\{C_{ms}(x) / C_{ms}(x = 0)\}$。

Step 8: 在结果窗口***"Temperature, Power"***中读取实际电气输入功率 P_{real} 和音圈温度增量***"Delta Tv"***。

Step 9: 分别比较结果窗口***"State"***里的 Delta T_v, Bl_{min}, C_{min}, P_{real} 和在属性 property 页面下***"Protection"*** 里定义的相应的门限值 T_{lim}, Bl_{lim}, C_{lim} 和 P_{lim}。

QUESTION 8: 什么参数限制工作区域?

- □ **MC a:** 音圈温度增量 Delta T_v
- □ **MC b:** 最小磁力因数比 Bl_{min}
- □ **MC c:** 最小柔顺度比 C_{min}
- □ **MC d:** 实际输入功率 P_{real}

7.4 激光传感器

Step 10: 打开实验***"2b LSI Clim 50%"***，这是用一个激光传感器得到音圈位移来测量的。比较结果窗口***"State"***, ***"Bl (X)"***, ***"Kms (X)"***和***"Temperature, Power"***与***"2a LSI Clim 50% without laser"*** 里相应的结果窗口。

QUESTION 9: 实验***2a*** 和***2b*** 有什么区别?

- □ **MC a:** 实验2a 用相对量表示机械参数，这是因为没有用到激光，没有机械参数导入。实验2b 从测量位移信号中得到磁力因数，并且以绝对值形式给出机械参数（用机械单位，比如磁力因数 $Bl(x)$用 N/A）。
- □ **MC b:** 非线性参数 $Bl(x)$ 和 $K_{ms}(x)$的相对曲线形状有很大的不同。
- □ **MC c:** 状态结果窗口“State”中 Delta T_v、 Bl_{min}、C_{min}、 P_{real} 各自允许的工作范围有显著地不同。
- □ **MC d:** 实验2b 用到了激光传感器，有标签音圈进“coil in”和标签音圈出“coil out”，显示了关于音圈移动的非线性曲线的方向。这个信息在不用激光的实验2a 中没有。

Step 11: 打开实验***"4c LSI Error"***的结果窗口***"Cms (X)"***，检查标签“coil in”是否按照一般惯例指向了负向位移。

QUESTION 10: 为什么标签“coil in”指向正向的位移呢?

- □ **MC a:** 激光没有正确校准（校准过程中，距离不是减少而是提升了）。
- □ **MC b:** 激光器指向了振膜的后部。
- □ **MC c:** 扬声器装配了短路环。
- □ **MC d:** 扬声器终端连接失真分析仪时候极性反了。

7.5 测量可靠度

Step 12: 打开结果窗口***"Error (t)"***然后看识别错误 $E_i(t)$、$E_x(t)$和 $E_u(t)$与时间的关系。

QUESTION 11: 错误 $E_i(t)$展示了什么?

- □ **MC a:** $E_i(t)$描述了输入电流 i 与时间关系的测量值和预测值的不匹配。
- □ **MC b:** 很高的错误值 $E_i(t)$也许是由于选取的模型和被测换能器的不匹配。
- □ **MC c:** 很高的错误值 $E_i(t)$也许是由于电压和电流传感器在高幅值情况下的限制（还会产生一个额外的警告）。

- □ **MC d:** $E_i(t)$显示了功率放大器的线性和非线性失真。

QUESTION 12: 错误 $E_u(t)$说明了什么？

- □ **MC a:** $E_u(t)$描述了功率放大器的输入和输出信号间的差异。
- □ **MC b:** $E_u(t)$显示了由于高通滤波器的削波、时延、截止频率导致的功率放大器产生的线性和非线性失真以及噪音。
- □ **MC c:** 高错误值 $E_u(t)$也许是由选取的模型和被测换能器不匹配导致。
- □ **MC d:** 没有连接激光。

QUESTION 13: 错误 $E_x(t)$说明了什么？

- □ **MC a:** 激光传感器没有正确校准（测量的位移要么太小要么太大）。
- □ **MC b:** 使用激光传感器测量位移失败（错误距离、光学阻碍、目标表面不反射）。
- □ **MC c:** 功率放大器的线性或者非线性失真（比如门限）不会影响位移错误 E_x。这是因为音圈位移 x 是由扬声器终端测量的电压和电流计算得到的。
- □ **MC d:** 没有连接激光。

QUESTION 14: 如何检查参数识别的精度？

- □ **MC a:** 很低的错误值 E_i(E_i < 30 %)表示模型的输入电流与测量得到的电流 i 一致。
- □ **MC b:** 很低的错误值 E_x (E_x < 20 %)显示模型机械位移与测量位移 x 一致。但是，这个标准需要激光传感器在保证足够信噪比情况下精确地测量位移。
- □ **MC c:** 一个高错误值 E_u (E_u > 50 %)显示终端测量电压与功率放大器输入的信号不一致。但是放大器产生的适度失真对参数测量精度没有影响，这是因为扬声器终端的电压和电流被用作系统识别。

7.6 从 LPM 导入校准参数

Step 13: 选择实验 ***"1 LPM TS-Parameters"***，打开属性页面 ***"Im/Export"***。点击 ***"Export to Clipboard"***。选择实验 ***"2a LSI Clim 50% without laser"*** 然后在属性页面 ***"Im/Export"***里点击***"Import from Clipboard"***。相对机械参数和相对位移会被导入的参数的绝对数值代替。

QUESTION 15: 为什么推荐导入磁力因数 $Bl(x = 0)$和振动质量 M_{ms}?

- □ **MC a:** 线性参数测量(LPM)以最高精度给出了在小信号域的集中参数，它考虑到了低频段的黏弹效应（蠕动）和高频段阻抗（损耗电感）的不规则情况。
- □ **MC b:** 大信号识别(LSI)使用了激光传感器，得出了一个比传统小信号测量方法更精确的 $Bl(x = 0)$值和 M_{ms} 值。
- □ **MC c:** 没用到激光传感器的大信号识别(LSI)本质上是一个电学测量，可以用于扬声器或任何工作在恶劣环境（气候室）中的电动换能器。这种情况下可以通过导入扬声器型号规格中至少一个机械参数($Bl(x = 0)$ 或 M_{ms})来对机械参数进行校准。

7.7 扬声器非线性的后果

Step 14: 在实验 ***"2b LSI Clim 50%"***中打开结果窗口***"Cms (X)"***，然后检查非线性柔顺度。单击右键并启动交叉光标然后寻找对应于柔顺度 $C_{ms}(X_C) = 0.75\ C_{ms}(x = 0)$时的最小位移 X_C，其对正弦声音信号($f_1 = f_s$)产生10%谐波失真。

QUESTION 16: ***"2b LSI Clim 50%"***中测量的扬声器的位移 X_C 多大?

- □ **MC a:** 1.2 mm
- □ **MC b:** 0.5 mm
- □ **MC c:** 2.0 mm
- □ **MC d:** 0.1 mm

Step 15: 打开***"2b LSI Clim 50%"***中结果窗口***"Bl (X)"***然后观察非线性磁力因数。鼠标右键启动交叉光标然后寻找对应于 $Bl(X_{Bl}) = 0.82\ Bl(x = 0)$的最小位移 X_{Bl}，其对正弦双音信号（$f_1 = f_s$ and $f_2 = 1.5\ f_s$)产生10%互调失真。

QUESTION 17: ***"2b LSI Clim 50%"***中测量的扬声器位移 X_{Bl} 多大？

- □ **MC a:** 0.3 mm
- □ **MC b:** 1.7 mm
- □ **MC c:** 2.0 mm
- □ **MC d:** 3.0 mm

Step 16: 打开***"2b LSI Clim 50%"***中结果窗口***"Nonlinear Parameters"***然后比较所读数据和位移限制 X_C、 X_{Bl} 和 X_L 的大小，在这些位置处非线性柔顺度 $C_{ms}(x)$、磁力因数 $Bl(x)$和电感 $L(x)$产生了10%的谐波失真或者互调失真。

QUESTION 18: 确定位移门限最低的非线性参数，它给出了扬声器的 $X_{max10\%}$值。

- □ **MC a:** 折环柔顺度 $C_{ms}(x)$
- □ **MC b:** 磁力因数 $Bl(x)$
- □ **MC c:** 多普勒效应
- □ **MC d:** 电感 $L(x)$

7.8 激励信号的影响

打开***"2b LSI Clim 50%"***中结果窗口***"Distortion"***，然后看声压输出中由各非线性特性导致的非线性失真。比较极大值 D_C、D_B、D_L 和 $D_{L(i)}$随时间的变化。

QUESTION 19: 为何失真的数值随着时间一直增加？

- □ **MC a:** 激励信号的电压在增强模式"Enlargement Mode"下增加了，状态变量（位移、电流）的高幅值导致了扬声器非线性。
- □ **MC b:** 自适应参数估计需要一些时间来收敛最佳参数值。系统识别在非线性模式"Nonlinear Mode"结束时给出了最高精度的非线性参数。

QUESTION 20: 在测量的最后，哪个非线性特性导致了声压输出的非线性失真的最大峰值？

- □ **MC a:** D_C 代表的折环的柔顺度 $C_{ms}(x)$。
- □ **MC b:** D_B 代表的磁力因数 $Bl(x)$。
- □ **MC c:** D_L 代表的电感 $L(x)$与位移的关系。
- □ **MC d:** $D_{L(i)}$代表的电感与电流关系。

Step 17: 打开测量***"3 LSI Clim 50% white noise"***的结果窗口***"Distortion"***，这里用频段从75Hz 到1.5KHz 的带通滤波器滤波后的白噪声作为激励信号（见属性页面***"Generator"***）。把 D_C、D_B、D_L 和 $D_{L(i)}$的最大峰值和***"2b LSI Clim 50%"***（用粉红噪声作为激励信号）里相应数值比较。

QUESTION 21: 激励信号的频谱属性会影响失真的产生么？

- □ **MC a:** 不会，失真分量的产生与激励信号的属性无关

- □ **MC b:** 会，非线性电感 $L(x)$产生的失真很大程度上取决于激励的频谱特性。***"3 LSI Clim 50% white noise"***用到的白噪声激励信号显著增加了 $L(x)$产生的互调失真，导致 $L(x)$成为失真主要来源。

7.9 扬声器非对称性

Step 18: 打开***"2b LSI Clim 50%"***里的结果窗口***"Bl (X)"***然后比较 $Bl(x)$和翻转曲线 $Bl(-x)$

QUESTION 22: 把音圈静止位置朝着导磁下板(coil in)移动会减少 $Bl(x)$曲线的非对称性么？

- □ **MC a:** 不，改正音圈静止位置对 $Bl(x)$曲线形状没有影响。
- □ **MC b:** 不，音圈应该朝外移动（朝外）。
- □ **MC c:** 会，朝内移动音圈静止位置可以减少非对称性。

Step 19: 打开***"2b LSI Clim 50%"***的结果窗口***"Bl Symmetry Range"***，这里描述了 Bl 曲线非对称性是一个关于激励信号大小 x_{ac}（x 轴）和静止位置偏移 x_{off}（y 轴）的函数。在对称区域（灰色区域）中 Bl 的变化很小（小于5 %），非对称性可以忽略。

QUESTION 23: 对称区域取决于激励信号的幅值 x_{ac} 么？

- □ **MC a:** 是，对称区域取决于幅度 x_{ac}，它在小信号时候（例如 x_{ac} = 0.1 mm）更大。这是因为静止位置有一个偏移，会让 Bl 值产生极小的不对称变化（在磁隙中线圈数量不变）。
- □ **MC b:** 不，对称区域与幅值无关 x_{ac}。
- □ **MC c:** 是，对称区域取决于幅度 x_{ac}。它在高幅度(如 x_{ac} = 1.5 mm)下较小。这是因为一个小偏移会导致正向和负向位移最大值时 Bl 值得显著变化，这时 Bl 曲线很陡（音圈就要离开磁隙了）。

Step 20: 在***"2b LSI Clim 50%"***中打开结果窗口***"Bl Symmetry Range"***。确定峰值位移 $x_{Bl\text{-asym}}$，它是音圈产生5%Bl 变化的最大幅度（静止位置仍在对称区域内时允许的最大幅度）。

QUESTION 24: Bl 曲线非对称性可以忽略的音圈位移 $x_{Bl\text{-asym}}$的最大的幅度是多少？

- □ **MC a:** 0.3 mm
- □ **MC b:** 0.8 mm
- □ **MC c:** 1.5 mm

Step 21: 结果窗口***"Bl Symmetry Range"***中红色线代表了真正的对称点，与特定强度正弦激励信号下的最佳音圈静止位置一致。用这一点作为静止位置，会根据信号的交流幅值在正、负向位移处产生相同的 Bl 值。在***"2b LSI Clim 50%"***中打开结果窗口***"Bl Symmetry Range"***，比较小交流信号（0.2 mm 幅度）的对称点位置和大交流信号（1.8 mm 幅度）的对称点位置。

QUESTION 25: 哪个对称点应该用来修改音圈的静止位置?

- □ **MC a:** 音圈静止位置应该准确地移动到-0.42 mm 处，因为只有这个值满足小信号域（小幅值 $x \approx 0$）的完美对称 Bl 曲线。
- □ **MC b:** -0.36到-0.2之间的一个值，其取决于特定应用中的最大幅值 x_{ac}。如果位移幅值 x_{ac} 比 $x_{Bl\text{-asym}}$ 小，静止位置的偏移就可以忽略。

QUESTION 26: $Bl(x)$曲线的显著非对称性能减少位移门限 X_{Bl} 的最大峰值么？

- □ **MC a:** 是，非对称性让 *Bl* 曲线的一边较早衰减，另一边较晚衰减并使最大峰值位移变小。这是因为这个值被定义为产生静止位置处 *Bl* 大小的82%的最小位移。工作范围因此也小了，同样的位移，一边的 *Bl* 值会大于另一边。
- □ **MC b:** 不，*Bl* 曲线非对称性对产生约10%谐波失真的最大峰值位移没有任何影响。

Step 22: 打开"2b LSI Clim 50%" 的结果窗口**"Kms (X)"，**比较刚性曲线 Kms(x)和其翻转曲线 Kms(-x)。用交叉光标在来读取在 xpeak = 2 mm 和 x-peak = -2 mm 的 Kms 值。用下式计算刚性非对称系数：

$$A_K(x_{\text{peak}}) = \frac{2\left(K_{\text{ms}}(-x_{\text{peak}}) - K_{\text{ms}}(x_{\text{peak}})\right)}{K_{\text{ms}}(-x_{\text{peak}}) + K_{\text{ms}}(x_{\text{peak}})} 100\%。$$

QUESTION 27: 刚性非对称性 A_K 多大？

- □ **MC a:** 20 %
- □ **MC b:** 47 %
- □ **MC c:** -47 %
- □ **MC d:** -400 %

QUESTION 28: 非对称刚性 A_K 的符号给出了有用信息么？

- □ **MC a:** 没有，它的符号总是正号
- □ **MC b:** 是，它与刚性非对称性产生的直流位移的符号一致（正的 A_K 会产生正直流位移，背离导磁下板）。
- □ **MC c:** 是，它展示了悬挂较柔软的一边。一个正 A_K 说明悬挂系统在正位移方向更柔软。

Step 23: 打开***"2f LSI Clim 20%"***里的结果窗口***"Displacement"***。把预测的位移峰值 x_{peak} 和位移谷值 x_{bottom} 与相应的激光测量得到的 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别进行比较。

QUESTION 29: 结果窗口***"Displacement"***展示了什么？

- □ **MC a:** 预测的位移峰值和谷值与激光测量值非常吻合，说明扬声器模型与测试的换能器匹配。
- □ **MC b:** 在较高信号幅度情况下，正向峰值位移(x_{peak})大于负向峰值位移(x_{bottom})。这意味着正 DC 位移是由扬声器非线性特性的非对称性动态产生的。
- □ **MC c:** 在较高信号幅度情况下，正向峰值位移(x_{peak})大于负向峰值位移(x_{bottom})。这意味着负 DC 位移是由扬声器非线性特性的非对称性动态产生的。

Step 24: 打开"2f LSI Clim 20%"中结果窗口 PDF (X)"，这里展示了"Nonlinear mode"中的位移 x 的概率密度函数 PDF(x)。这个曲线展示了决定激励信号特性和扬声器性能的位移分布。音圈大部分时候接近于静止位置，大偏移很少见。这解释了为什么线性系统和小位移时的非线性识别可以在几秒钟内完成，而在工作范围两端的非线性测量就需要几分钟。比较原曲线和翻转曲线 PDF(-x)来检查位移概率函数的非对称性。在结果窗口"PDF Voltage"中检查换能器终端的电压信号的对称性。

QUESTION 30: 什么导致了位移的 *PDF*(*x*)的不对称？

- □ **MC a:** 扬声器的非线性（特别是刚性 K_{ms} 的非对称性）使 *PDF*(*x*)形状非对称，这和直流位移以及位移最大值和最小值的差值一致。
- □ **MC b:** 测量系统的激励信号电压的 *PDF*(*u*)是非对称的，这也会影响音圈的位移。

7.10 参数随时间的变化

Step 25: 在 ***"2f LSI Clim 20%"*** 中打开结果窗口 ***"fs (X)"***。这里展示了瞬间谐振频率 $f_s(x) = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{ms}(x)}{M_{ms}}}$，其考虑了随位移变化的悬挂系统的刚性。

Step 26: 在 ***"2f LSI Clim 20%"*** 中打开结果窗口 ***"Kms (t), fs (t)"*** 来观察刚性 $K_{ms}(x = 0, t)$ 的变化和静止位置 $x = 0$ 处的谐振频率 $f_s(x = 0, t)$ 随时间的变化。

Step 27: 比较 ***"2f LSI Clim 20%"*** 中大信号测量结束时的刚性 $K_{ms}(x = 0)$ 和谐振频率 $f_s(x = 0)$ 与 ***"1 LPM TS-Parameters"*** 中在较低幅度测量的刚性 K_{ms} 和谐振频率 f_s。

QUESTION 31: 静止位置的刚性 $K_{ms}(x = 0)$ 是不变的么？

- □ **MC a:** 不，静止位置 $x = 0$ 处的悬挂系统的刚性 $K_{ms}(x = 0)$ 在 "Enlargement Mode"(150 s < t < 300 s) 显著降低，在此阶段音圈位移幅度增加了。在 "Nonlinear Mode" (300 s < t < 550 s) 刚性 $K_{ms}(x = 0)$ 仅仅稍微降低，此时幅度是基本恒定的。悬挂材料的黏弹机制导致静止位置的刚性 $K_{ms}(x = 0)$ 受峰值位移影响。
- □ **MC b:** 是，静止位置的刚性都是不变的。

Step 28: 在实验 ***"2f LSI Clim 20%"*** 打开结果窗口 ***"Re (t)", "Qes (t)"*** 然后比较阻抗 $R_e(t)$ 和结果窗口 ***"Temperature, Power"*** 中的音圈温度 $T_v(t)$。

QUESTION 32: 为什么电阻 $R_e(t)$ 和音圈温度的增加 $T_v(t)$ 有相似的曲线形状？

- □ **MC a:** 音圈温度的增加是由直流电阻 R_e 的增加计算得到。
- □ **MC b:** 音圈温度的增加与电阻 R_e 无关。任何相似性都是偶然的。

Step 29: 选择 ***"2e LSI Clim 30%"***，其展示的是非常"过激"的实验(保护参数非常弱)的结果。打开结果窗口 ***"Bl (X)"***。复制曲线"$Xp- < X < Xp+$"到粘贴板，并且粘贴这个曲线和 ***2b - 2d*** 里的曲线到 ***"2f LSI Clim 20%"*** 的结果窗口 ***"Bl (X)"*** 中，比较 *Bl* 曲线的形状。

Step 30: 在结果窗口 ***"K_{ms} (X)"*** 重复以上操作，比较 K_{ms} 曲线的变化和 *Bl* 曲线的变化。

QUESTION 33: $K_{ms}(x)$ 曲线的非线性形状取决于位移的峰值 x_{peak} 吗？

- □ **MC a:** 不，曲线比较稳定，而且不会随着峰值位移 x_{peak} 改变。
- □ **MC b:** 是的，悬挂系统的黏弹效应会导致暂时的刚性改变。尤其是静止位置的刚性 $K_{ms}(x = 0)$ 会在激励信号强度增加时减少。
- □ **MC c:** 是，因为磨合(第一次把换能器暴露在激励信号中)导致的刚性的永久变化和负载型疲劳（悬挂系统的老化）。

8 测量试验（需要硬件）

下面的教程提供了一些扬声器实际测量的建议，推荐使用相对较小的低音炮(4-6 寸)。

8.1 硬件设置

LSI 手册中，第二个教程的黄页提供了硬件设置的详细信息。下面是重要要点的简短总结：

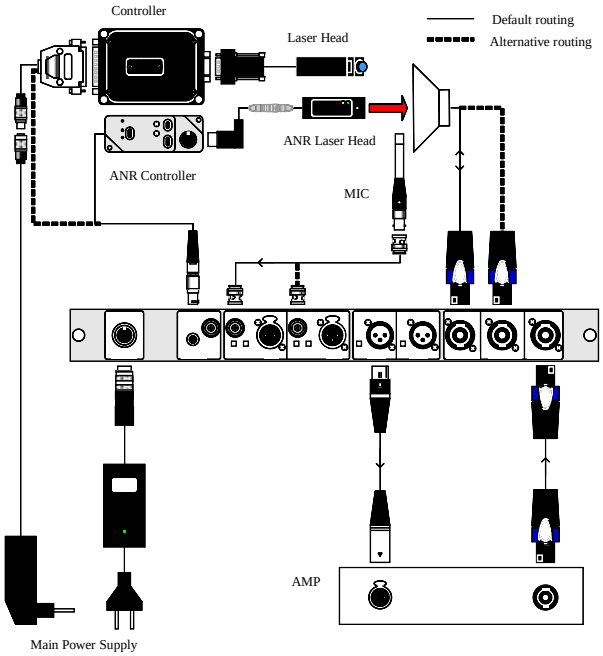


图13：失真分析仪 DA2的引脚分配

Step 31: 连接 XLR 的输出端到失真分析仪 *(DA)*后侧的 ***OUT1***端口，XLR 的输入端到放大器。连接放大器的输出端到 *DA* 的 Speakon 输入端“ ***AMPLIFIER***”。用特制扬声器测量导线连接 *DA* 的 Speakon 输出端“***Speaker1***”（大电流通道）到扬声器的终端。

Step 32: 连接激光头（如果有）和控制器，连接控制器的 LEMO 插头到失真分析仪背后的标有 ***LASER*** 的输入端口。

Step 33: 连接失真分析仪正面的 ***USB*** 输入端到 PC 电脑上。

Step 34: 把扬声器垂直于激光束方向紧紧夹在固定支架上。在振膜中间点一个白点（涂改液或者白贴纸）。将激光束指向白点，然后把激光头调整到工作范围：黄色 LED 灯一直亮（ANR-Laser）或者绿色 LED 亮（LD-Laser）（大约6cm）。

1.1 实验任务

Step 35: 打开 R&D 的测量软件 *dB-Lab*。创建一个新的数据库：点击***“Project”→ “Select Database”***，然后***“New”***。选择存储路径和名字。创建测量实验名称 'my driver's name。

Step 36: 选择**“New Operation“**。现在 *dB-Lab* 提供了不同的测量模板，让第一次测量更加简单。选择 LSI Woofer Driver 来测量一个谐振频率 $f_s < 600$ Hz 的低音单元或者选择 LSI Tweeter Driver 来测量一个谐振频率 $f_s > 100$ Hz 的高频扬声器。

Step 37: 右键点击实验选择属性***“Properties“***，在属性页面***“Driver”***中输入驱动器的直径 ***diameter***。

Step 38: 检查属性页面***"Protection"***的门限。默认的门限一般都会保护扬声器不被毁坏。如果你有一个激光传感器，集中参数就会自动在线性模式"Linear Mode"得到（你可以在***"Protection"***页面通过 G_{small} 调整电压大小），但是我们建议从之前的 LPM 实验中导入数据，这样测量更精确。

Step 39: 如果没有连接激光，你可以导入线性参数测量（训练1）中测量过的 $Bl(x = 0)$或者 M_{ms}。

Step 40: 点击绿色箭头开始测量。

Step 41: 如果你进入了增强模式 "Enlargement Mode"，打开结果窗口***"State"***并且检查建模电流信号的相对误差 $E_i(t)$。如果模型与测试的扬声器匹配，这个值应该低于25%。

Step 42: 如果你在用激光位移传感器，检查位移信号 $x(t)$的错误 $E_x(t)$。如果这个值大于20 %，打开结果窗口 $L(x)$并且检查"COIL IN"是显示在位移负轴上。如果它出现在位移正轴上，点击暂停按钮，改变扬声器终端导线的极性。然后再次点击暂停按钮继续试验。观察非线性电感曲线的变化。"coil in"标签应该出现在位移负轴上。

Step 43: $L(x)$曲线的最大值出现在负位移处吗？你觉得被测扬声器使用了短路环来减少电感 $L(x)$并使之线性化么？

Step 44: 如果测量结束了，打开结果窗口 **Temperature, Power**。在测量中音圈温度的增加限制了激励信号的最大幅值了么？

Step 45: 打开结果窗口***"Nonlinear Parameters"***。通过寻找最小位移门限 X_{Bl}、X_L、X_C 来找到最大峰值位移 $X_{max10\%}$。哪个非线性特性限制了扬声器的位移峰值？

Step 46: 打开结果窗口***"Distortion"***然后搜索在声压输出里产生最高失真的非线性特性。该非线性也限制了最大位移么？

Step 47: 观察结果窗口 $Bl(x)$中 $Bl(x)$曲线的对称性。$Bl(x)$曲线对称性能够通过移动音圈静止位置来提升么？为了提升 $Bl(x)$曲线的对称性，音圈静止位置应该被远离还是朝着导磁下板移动呢？

Step 48: 找到 $Bl(x)$达到峰值时的位移值 x_{maxBl}。

Step 49: 打开结果窗口***"Bl-symmetry Range"***。读取幅度最大值(x 轴)时的对称点（红色曲线）。这个值与结果窗口***"Nonlinear Parameter"***里面的 x_{sym} 吻合么？x_{sym} 值与 x_{maxBl} 值相同么？这个 x_{maxBl} 值或者 x_{sym} 值对以音圈移动来改善 $Bl(x)$曲线的对称性是一个很好的判断指标么？

Step 50: 在结果窗口 $K_{ms}(x)$中观察 $K_{ms}(x)$曲线的对称性，悬挂系统哪边更软？

Step 51: 打开结果窗口***"PDF (X)"***观察位移的概率密度函数。这个曲线对称么？有哪些非线性因素会导致不对称？

9 参考文献

KLIPPEL R&D SYSTEM 操作手册– *Large Parameter Identification* 大参数识别

规范 S1 *Large Signal Identification* (LSI)大信号识别

http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Bilder/Our_Products/R-D_System/PDF/S1_LSI.pdf

海报*"Loudspeaker Nonlinearities: Causes, Parameters, Symptoms"* "扬声器非线性：原因，参数，症状"

论文 *Loudspeaker Nonlinearities: Causes, Parameters, Symptoms* 扬声器非线性：原因，参数，症状

http://www.klippel.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Klippel_Nonlinearity_Poster.pdf

论文 *Assessing Large Signal Performance of Transducers* 评估换能器大信号性能

http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Literature/Papers/Assessing_the_large_Signal_performance_of_Loudspeakers_02.pdf

论文 *Measurement of Large Signal Parameters of Electrodynamic Transducer* 电动换能器的大信号参数测量

http://www.klippel.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Measurement_of_Large-Signal_Parameters_01.pdf

论文 *Large Signal Performance of Tweeters, Microspeakers and Horn Drivers* 高频扬声器、微型扬声器和喇叭驱动器的大信号性能

http://www.klippel.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Large_signal_performance_of_tweeters_01.pdf