

训练4

扬声器失真测量

1 训练目标

- 对重要的失真分析技术有一个总体认识
- 理解产生主要非线性失真的条件
- 研究激励信号和状态变量的影响
- 解读实验结果（频谱特性和时域特性）
- 操作精确测量试验，锻炼实际操作能力
- 优化测量设置

2 实验要求

2.1 预备知识

建议首先完成前面三个训练再开始本次训练。

2.2 最小要求

学员需要 Klippel 数据库 *Training 4_Loudspeaker Distortion Measurements.kdbx* 提供的测量结果。本次训练不需要使用 KlippelR&D 测量系统。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

如果学员有 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：

- 传递函数测量模块(TRF)
- 3D 失真测量模块 (DIS)
- 失真分析仪 (DA2)
- 激光传感器+控制器
- 放大器
- 支架

3 训练过程

1. 阅读教程。
2. 观看演示视频。
3. 回答准备问题。
4. 依照教程，解读数据库中的结果并且离线回答多选题。
5. 上传你的答案到匿名评价系统 www.klippel.de/training。
6. 收到一封邮件，包含了 **Certificate of Mastery, a Certificate of Knowledge** 或者 **a Certificate of Participation**（根据你的表现进行评分）。
7. 如果有条件使用硬件，在换能器上完成可选测量。

4 介绍

电动换能器有内在非线性特性，它限制了大信号输入下的声压输出，并且在重放声音中产生了失真。信号失真的产生可以用图1中的流程图表示。

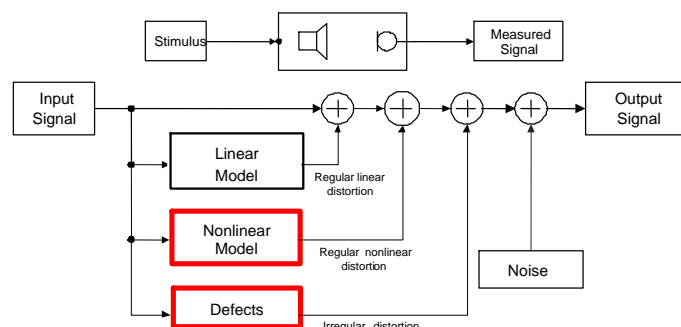


图1: 音响系统中产生信号失真的流程图

导致非线性失真的主要非线性特性集中在电动换能器的电动机和悬挂部分。比如，非线性特性主要存在于当音圈位移相对音圈-磁隙结构尺寸较大时以及音圈位移相对于定心支片与折环的尺寸较大时。

不规则失真主要是因为生产过程中的缺陷、产品老化和其他外部因素，比如过载或者气候，都在产品未来长期使用时产生影响。

本次训练会讲述，如何通过一系列测量来解读失真并评估扬声器性能。3D失真(DIS)和传递函数(TRF)模块提供了换能器测量和寻找关键失真的特殊方法。

这些测量的目的是确定与扬声器非线性特性相关的典型特征或症状。

4.1 测量激励信号

一个由激励信号激发的非线性系统产生的输出信号也会有非线性特征。由于电动机和悬挂的非线性特性仅仅在大激励信号情况下出现，扬声器在足够小的输入激励信号时基本上是线性的。在小信号域，音圈位移极小，几乎所有非线性特征都不明显。非线性特性取决于输入信号的幅度和相应的音圈位移大小，这是一个非线性特性的可靠指标。

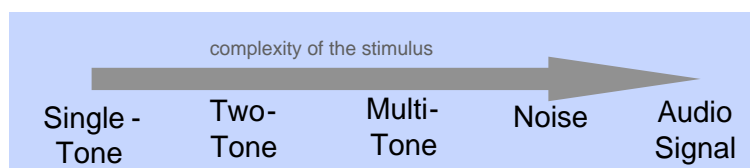


图2:非线性失真测量的激励信号

非线性失真的产生是一个复杂多维过程。一个单音激励信号未必能激活所有非线性特性，结果就是，只有一部分失真特征被发现。

另一方面，一个更加复杂的激励信号会需要复杂的测量结果分析。因此，对特定测量使用不同的激励信号是明智的办法。

如图3所示，最简单的测量激励信号是一个频率为 f_1 的正弦音频信号，它可以在音频带上离散或者连续。被测设备的输出声信号则由传感器（比如麦克风）接收，进而进行频谱分析。

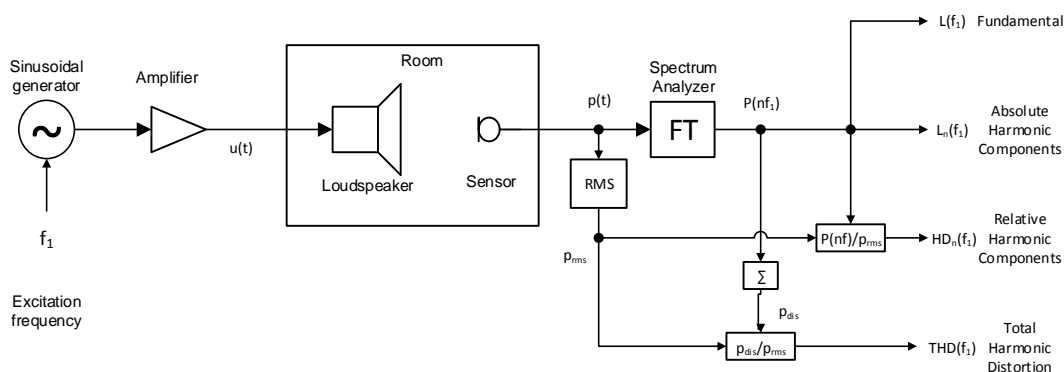


图3: 用激励频率为 f_1 的正弦输入信号测量谐波失真

图4显示输入信号 $u(t)$ 产生的输出声信号 $p(t)$ 的频谱 $P(f)$ 。基波分量 $P(f_1)$ 在正弦输入信号的激励频率 f_1 处。其他谐波是额外不需要的频率分量 $P(nf_1)$ ($n > 1$)，他们是 f_1 的整数倍。每个谐波失真分量的幅度都可以用绝对或者相对值表示出来。绝对值一般是以dB为单位对比与参考声压20 uPa的声压级 $L_n(f_1)$ 。相对值则是以dB为单位相对于总输出声信号 $p(t)$ 的均方根 p_{rms} 。总谐波失真THD定义为所有谐波失真分量 ($n \geq 2$) 的均方根 $P(nf)$ 与输出信号均方根 p_{rms} 的比值。

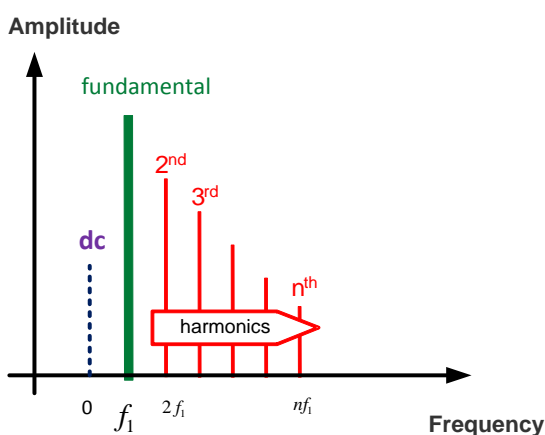


图4: 输出声信号的频谱显示了由频率为 f_1 的单音激励信号激发的非线性特性产生的谐波

在输出频谱中的谐波失真分量表明非线性特性是受测设备中固有的。但是使用一个单音输入激励信号测量得到的输出谐波对非线性系统的描述并不全面。

4.2 基波抑制

在大信号域，温度和非线性影响限制了换能器的声音输出。因此，在激光信号中基波振幅分量的幅度不是与扬声器终端的正弦输入电压幅度成比例地改变的，见图5。

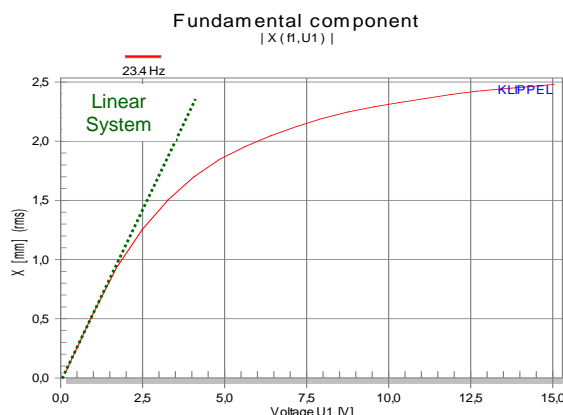


图5: 基波抑制

在低输入电压情况下，输入电压和音圈位移之间的关系基本上是线性的，符合线性参数模型的要求。在高输入电压情况下，电动机和悬挂的非线性特性限制了音圈位移幅度，这就限制了最大声输出。

4.3 DC 分量的产生

如图6所示，电动机和悬挂系统非线性的非对称性在音圈位移中产生了 DC 偏移分量，这可以用激光传感器探知。举例来说，一个非对称刚性 $K_{ms}(x)$ 产生一个 DC 分量，其会将音圈朝着悬挂系统柔软的一边移动。当激励频率高于谐振频率，一个非对称磁力因数 $Bl(x)$ 产生显著 DC 分量，这会将音圈从 $Bl(x)$ 最大值处移开。有两侧陡降的非线性磁力因数 $Bl(x)$ 和低悬挂刚性的扬声器设计会产生不稳定驱动行为，这会增大产生大量 DC 的风险。

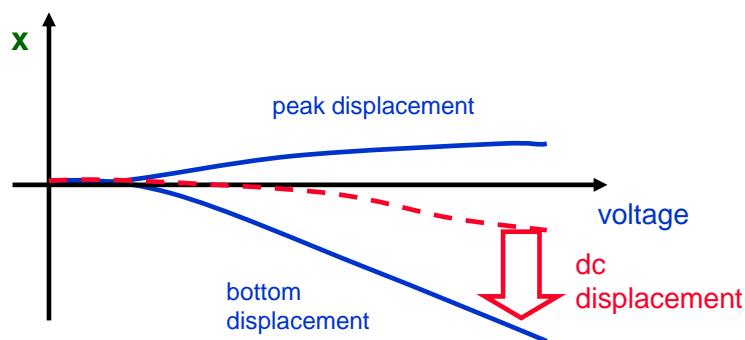


图6: 非对称磁力因数导致的 DC 位移

DC 分量非常重要，因为它改变所有与位移相关的非线性特性的工作点。因此，由一个非线性特性产生的 DC 位移能够导致其他非线性特性产生更多的非线性症状。

4.4 谐波失真解读

谐波失真一般都是相对激励频率 f_1 来画的，而且它一般会以绝对或相对的值显示。举例来说，由频率为 f_1 的正弦激励信号在 $3f_1$ 处产生的三阶谐波的幅度，会画在三阶谐波图中 f_1 处。但是，谐波响应的解读一般不这么简单。图7显示的是典型扬声器的绝对失真，在两种声学环境下基波、2阶和3阶谐波与激励频率的关系。

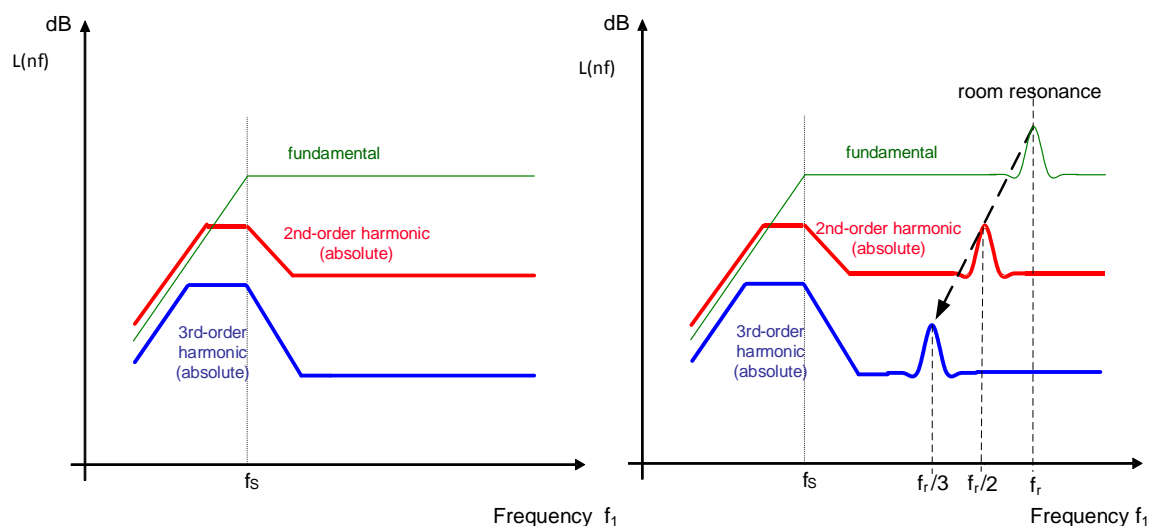


图7: 在自由空间（左）和听音室（右）中测量的同一个扬声器的绝对谐波失真与激励频率 f_1 的关系

左图显示了在自由场（消声室）中工作的扬声器的基波响应和谐波失真响应。而右图则显示了在混响环境且房间谐振频率在 f_r 的同一个扬声器的响应。

房间就像一个线性后置滤波器，它在房间谐振频率 f_r 处增强所有信号分量。这在基波分量的声压响应中产生一个峰值，位于激励频率 $f_1 = f_r$ 。n阶谐波失真分量的响应也有峰值，但是他们出现在较低激励频率 $f_1 = f_r/n$ 。这是因为在自由场输出频谱中，n阶谐波失真分量是在n倍激励频率处通过房间的线性后置滤波器的。这个例子说明声学环境的线性传递特性增加了谐波响应解读的复杂性。因此建议在扬声器近场处放置麦克风，因为房间的影响在这种情况下基本可以忽略，测量可以在很高信噪比情况下进行。

图8与图7有相同的扬声器和声学条件。但是，n阶谐波失真分量 $P(nf_1)$ 是相对于激励频率为 f_1 的输出信号（包括基波分量）的均方根值 $p_{rms}(f_1)$ 画出的。

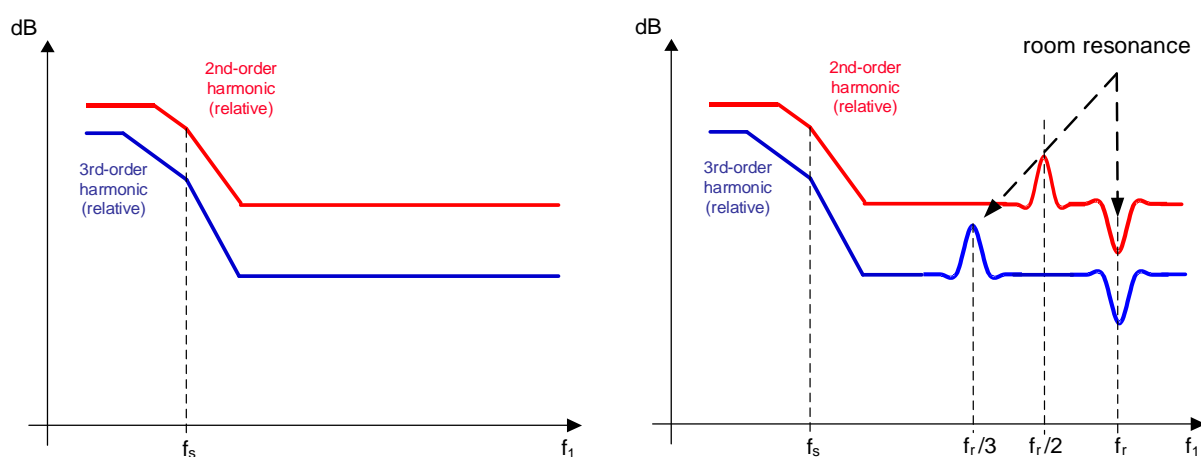


图8: 相对谐波失真与激励频率的关系

房间谐振频率导致n阶谐波失真分量在 f_r 处增加一个谷值，因为基波分量大小在此频率处增大了，且绝对谐波失真是恒定的。这个例子说明了相对失真的计算增加了谐波响应的复杂性和解读的难度。

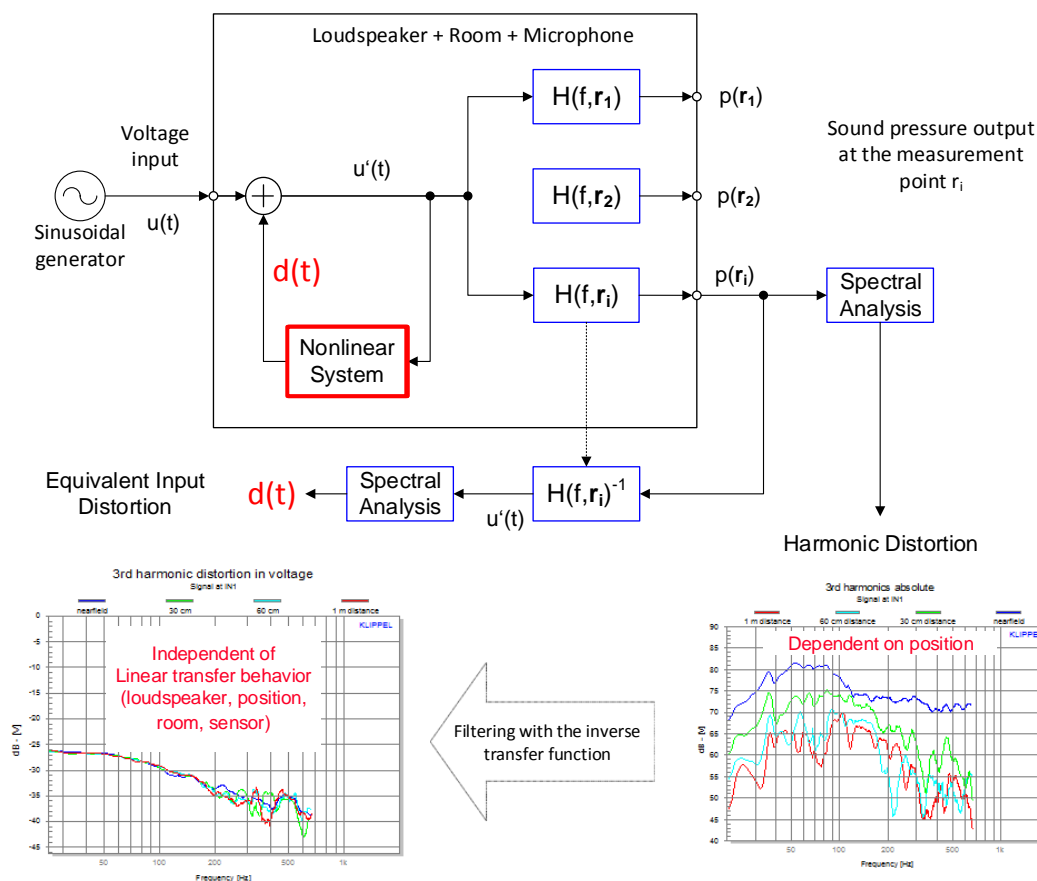


Figure 9: 测量等效谐波输入失真

4.4.1 等效谐波输入失真

在图7中的情况使得扬声器的纯粹谐波失真特性与房间线性后期整形的失真特性很难区分开来。等效输入失真（EHID）测量通过从测量中移除线性后期整形简化了谐波失真的解读。

主要的非线性特性比如磁力因数 $Bl(x)$ 、电感 $L(x)$ 和机械悬挂刚性 $K_{ms}(x)$ 都集中在换能器的电气域和机械域。如图9所示，这些非线性特性可以通过在非线系统输入信号 $u(t)$ 增加一个失真信号 $d(t)$ 并产生失真输入信号 $u'(t)$ 来进行模拟。这个失真信号 $u'(t)$ 通过传递函数为 $H(f, r_i)$ 的线性系统传输到了测量点 r_i 处的声压输出 $p(r_i)$ 。这个线性系统代表了模态振膜振动、声音辐射和传播、声学环境（比如房间）和传感器的属性（比如麦克风和激光）。虽然非线性失真由单个源产生的，但是测量得到的谐波失真取决于测量的位置 r_i ，如图9中右下图所示。失真曲线的高复杂性使得确定失真本质原因变得困难。

失真信号 $u'(t)$ 可以通过在测量声压信号 $p(r_i)$ 上加一个逆传递函数为 $H(f, r_i)^{-1}$ 的线性滤波器来计算得到。等效谐波输入失真（EHID）可以在失真信号 $u'(t)$ 上进行频谱分析来确定。EHID 描述了在非线系统输出端的失真信号 $d(t)$ ，这会明显简化解读的难易度。

4.5 互调失真测量

扬声器和其他电声换能器会在声音频带中产生显著的互调失真，这极大地影响了感知声音的质量。用一个正弦声音信号进行的失真测量不能产生这些互调分量。如图10所示，一个简单双音信号，包括一个变化频率为 f_1 的声音信号和第二个固定频率为 f_2 的声音信号，会在各差频处 $(f_2 - (n - 1)f_1)$ 和叠加频率处 $(f_2 + (n - 1)f_1)$ 产生 n 阶互调分量，其中 $n=2, 3, \dots$

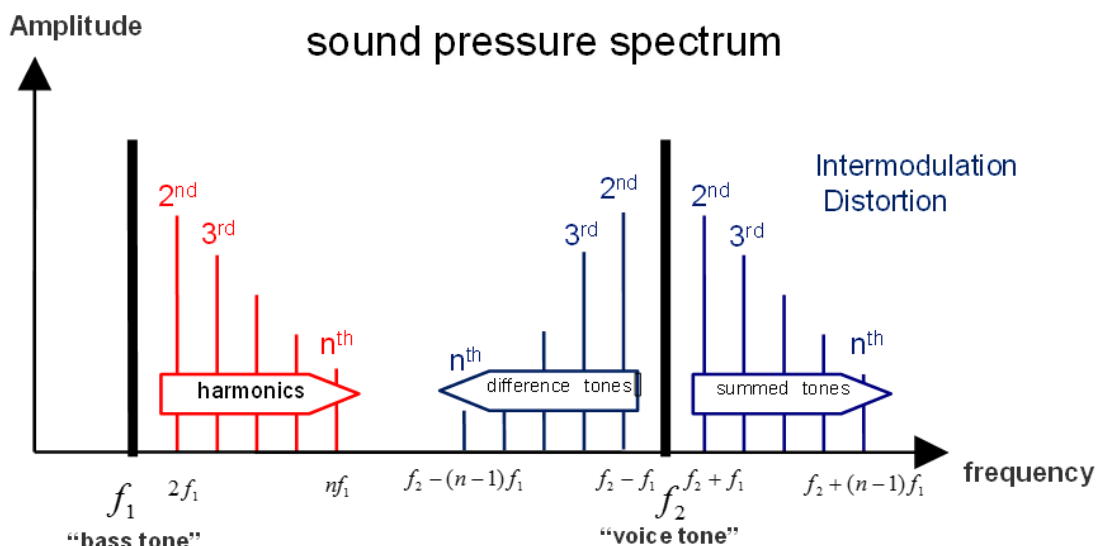
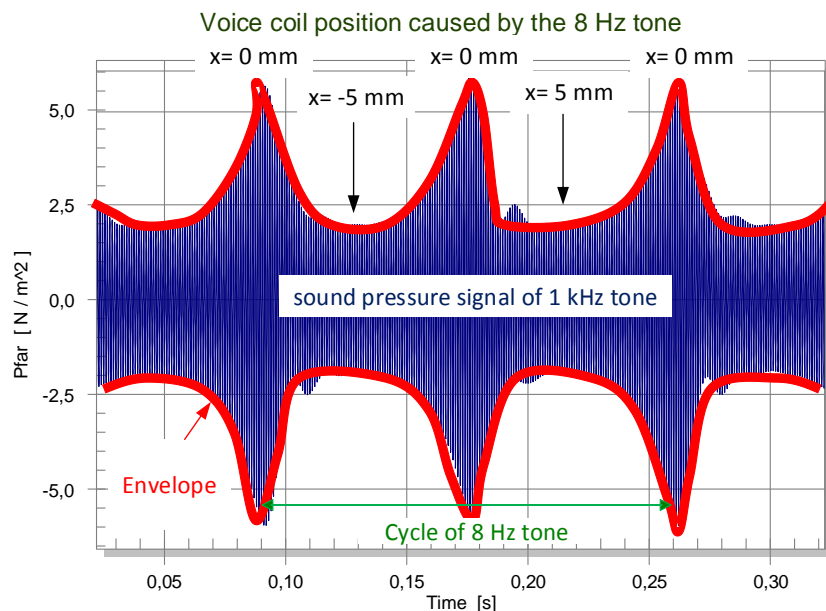


图10: 互调分量

互调失真（IMD）是电动机非线性特性 $Bl(x)$ 和 $L_e(x)$ 的一个关键症状，也是多普勒效应的一个关键症状，它是一种声音传播的非线性特性。用双音信号激发表声器会产生幅度与相位（频率）的调制失真。

4.5.1 幅度和相位调制

幅度调制（AM）仅仅改变语音信号的瞬时幅度（包络线）但不会改变其相位。高频信号的包络线随时间的变化会在感知的声音中产生波动和粗糙度。

图11: 在双音信号 ($f_1=8\text{ Hz}$ 和 $f_2=1\text{ kHz}$) 情况下由非线性磁力因数 $Bl(x)$ 产生的幅度调制 (AM)

如图11所示，磁力因数 $Bl(x)$ 相对于位移 x 的变化对高频声音信号 f_1 产生了显著的幅度调制。当音圈在静止位置 $x=0$ 处， $Bl(x=0)$ 的瞬时值达到最大，并且在高频声音信号的包络线中产生一个峰值。对偏移量的正向最大值和负向最大值，即音圈在磁隙外， Bl 值的减少导致了包络线的谷值。

不像幅度调制，频率调制或者相位调制不会改变语音信号的包络线，但是会改变瞬间相位。

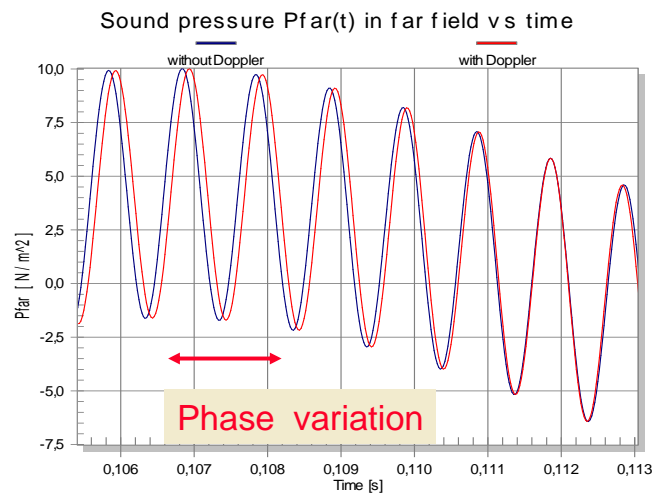


图12: 频率调制 (FM)

多普勒效应主要导致了相位调制，这是由于移动的振膜和固定监听点之间变化距离导致时间延迟造成的。

4.5.2 有效的互调测量技术

改变激励声音信号有两个重要的设置：“低音扫描 (bass tone sweep)”或者“语音扫描 (voice tone sweep)”。在这两种情况下，一个声音信号的频率是恒定，与此同时另一个声音信号的频率会改变。

图13展示了低音扫描技术的推荐设置。这些频率被选用于低音扬声器，如下：

- f_1 是频率变化的低音信号，在谐振频率附近 $0.5f_s < f_1 < 2f_s$
- f_2 是比谐振频率高的恒定频率的语音信号 $f_2 \approx 7.5f_s$

变化的低音频率 f_1 导致了音圈位移和输入电流的显著变化，这会激活扬声器占主导地位的非线性特性。频率 f_2 代表了在通频带中的一个典型声音信号，在这里声音信号的叠加和差值被清晰地从低音信号 f_1 的谐波中分开。

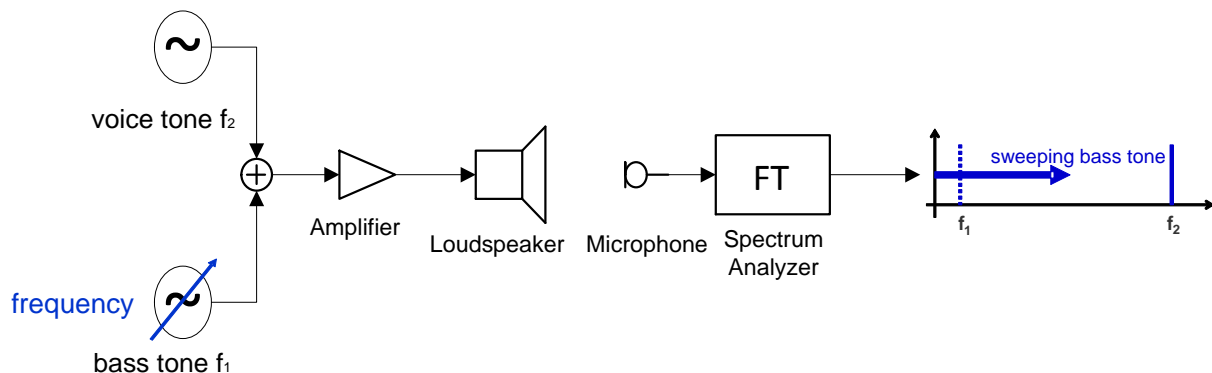


Figure 13: 用低音信号扫描方法进行 IMD 测量的设置

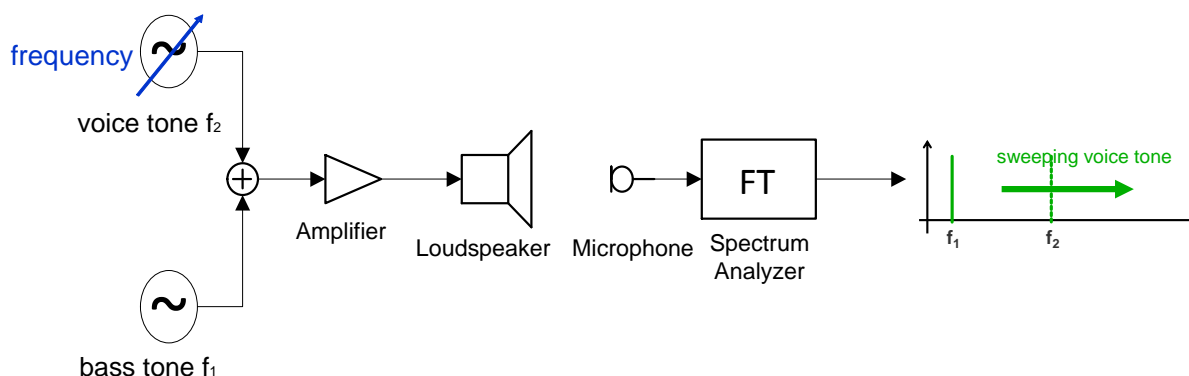


图14: 用语音信号扫描方法进行 IMD 测量的设置

图14展示了语音扫描技术的推荐设置。这些频率被选用于低音扬声器，如下：

- f_1 是频率恒定的低音信号，低于谐振频率: $f_1 \approx 0.5f_s$
- f_2 是在音频带上频率变化的高频语音信号， $8f_s < f_2 < 20f_s$

语音信号扫描方法保证了一个基本恒定的音圈位移峰值，同时能够区分低音信号 f_1 的谐波和语音信号 f_2 的和与差的声音信号。当进行语音信号扫描时，总 IMD 测量会变化。因此语音扫描方法显示了互调失真与音频带中信号分量的频率有相关性。

4.6 多音失真测量

多音复杂信号包括了多个在已知频率处的信号。在测量期间，每个信号都产生谐波。而且声音相互作用产生了不同声音的叠加和差值，类似于一个真正的音乐信号。由于这个原因，多音复合信号被用来模拟扬声器的常规工作环境。

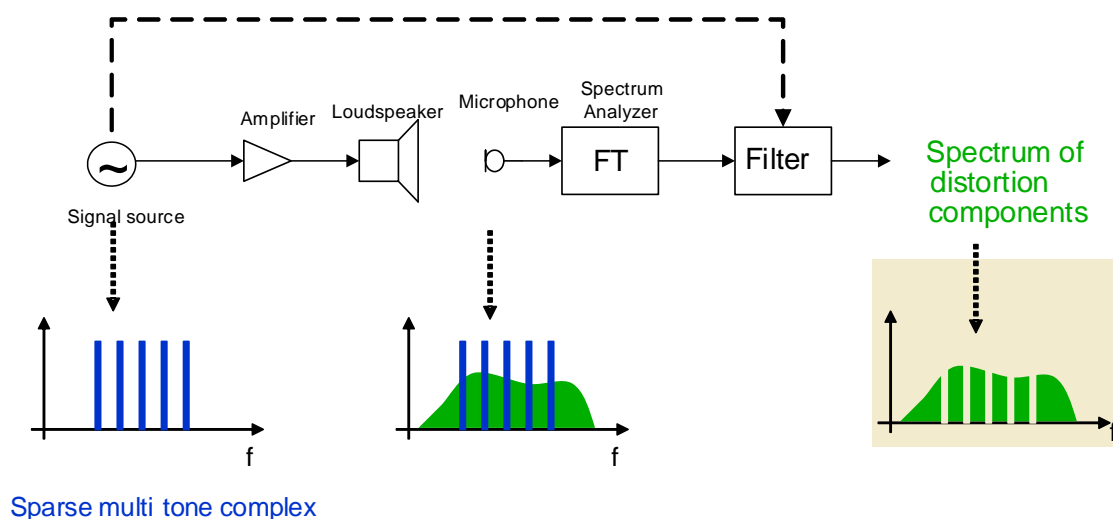


图15: 多音失真测量

用多音复信号时，在不同频率声音间检测非线性失真。因此，多音信号有一个稀疏的频谱。环境噪声可以通过一个额外的无任何激励信号的测量得到。多音复信号的带宽、形状和密度可以轻易地通过调整来满足特定换能器或者完整扬声器系统的目标应用。注意，由这个测量得到的失真频谱不会给出任何关于非线性特性的对称和不对称形状的诊断信息。

4.7 异音 (Rub&Buzz) 测量

为了简单的从产生的冲击失真中分离激励音频信号，可以用一个单音信号或正弦扫频信号来激励产生失真，这些失真与音圈的摩擦碰撞、松动、漏气和悬挂与音圈骨架的硬限制等等不规则缺陷有关。

不规则缺陷产生的失真相比于电动机、悬挂与振膜的规则非线性特性产生的非线性失真更有冲击性。在常规的总谐波失真（THD）测量里，规则非线性特性产生的谐波失真占主导地位。结果就是非常规失真无法被检测到。另外，非常规缺陷的失真可以被听到，即使他们的高阶分量（ $n > 20$ ）的均方根值在传统THD测量的噪音级之下。

4.7.1 冲击和高阶失真

在上面4.7中列举的非常规缺陷产生的失真在时域有特殊的脉冲精分结构，如图16所示的失真信号 $d(t)$ 。在高次谐波和其他由非线性缺陷导致和同步得到的信号分量中冲击行为很明显。因此失真信号的幅度和相位信息给出了确定缺陷源的重要信息。由于一个复杂频谱的解读比较麻烦，更有效的办法是分析高通滤波后的时域信号，见图16。因为非常规失真一般出现在较高频率范围，可以用一个高通跟踪滤波器将较低阶的失真分量从原始麦克风信号中分离。

在跟踪滤波器的输出端，可以从激励失真信号 $d(t)$ 导出一些重要的测量结果：

- 高阶失真峰值Peak value of higher-order distortion (PHD)
- 高阶失真均方根值RMS value of higher-order distortion (MHD)
- 高阶失真波峰系数Crest factor of higher-order distortion (CHD)
- 瞬时高阶失真波峰系数Instantaneous crest factor of higher-order distortion (ICHD)

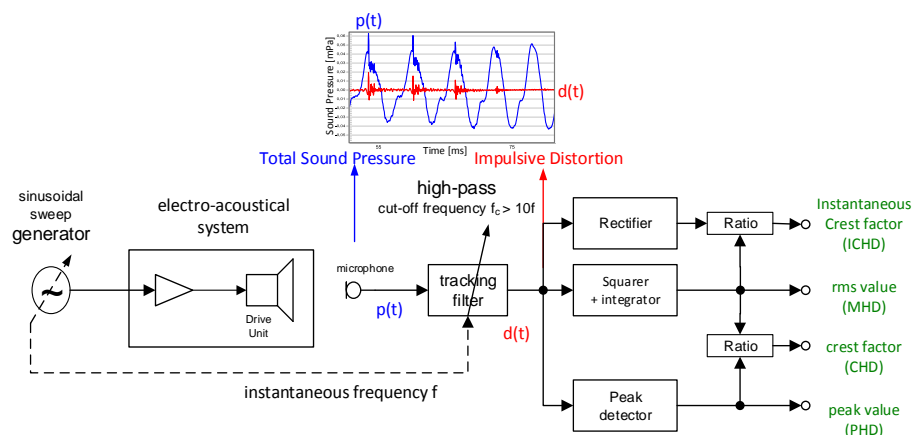


图16: 用时域分析进行缺陷测量

4.7.2 冲击失真峰值

冲击失真最重要的特征是峰值（PHD）。均方根值（MHD）与非常规失真的功率相关，而峰值则更加灵敏地测量了波形精细结构中的冲击症状。

通过扬声器通频带声压级可以最佳地评估PHD的临界值。图17展示了绝对PHD值，其超过了PHD门限（门限低于通频带基频平均声压级40dB）。在40Hz到70Hz之间的频带处有明显的失真。

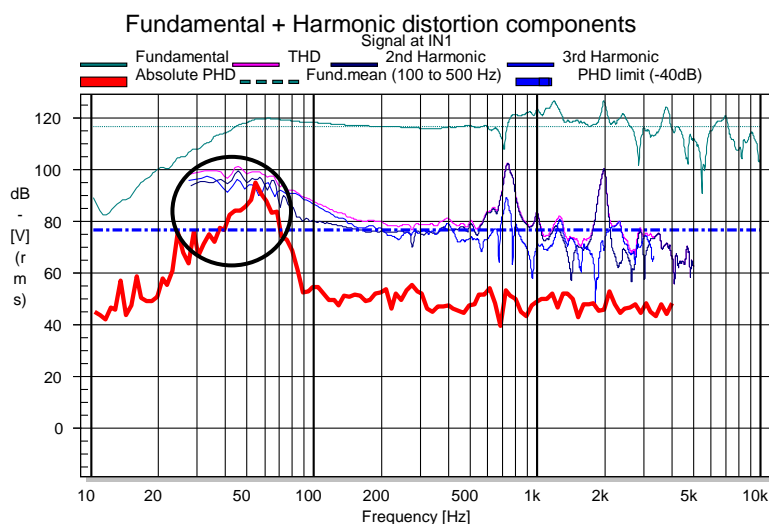


图17: 绝对 PHD (红色粗线) 和 PHD 门限 (蓝色虚线)

4.7.3 高阶失真的波峰系数

高阶失真的波峰系数是描述一个基波周期内失真的峰值与其均方根值比值的相对度量。这个值描述了失真信号的冲激性。一个恒定的DC信号的峰值系数是0dB，一个正弦信号的峰值系数是3dB，由规则非线性特性或者测量噪声造成的失真的峰值系数一般会达到12dB，由扬声器缺陷产生的典型不规则失真的峰值系数可以高于12dB。

瞬时峰值高阶失真 (ICHHD) 描述了瞬时失真绝对值和均方根值MHD之间的比值。这个度量对于探究冲击失真的精细结构很有用。当映射到状态变量时，如音圈位移或者声压输出，可以确定这些失真的物理原因的有用信息，比如底部撞击、音圈摩擦、压缩等等。

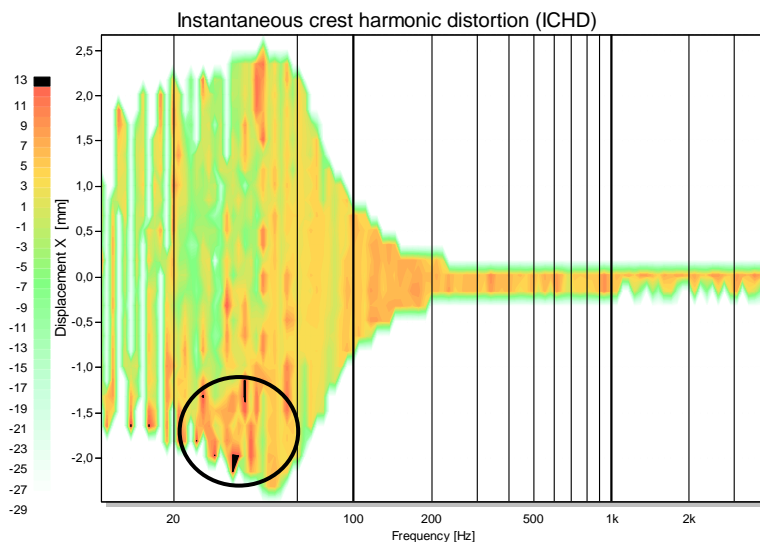


图18: 高阶失真的瞬态峰值系数与频率和音圈位移的关系。

图18展示了 ICHHD 值是一个关于音圈位移 (纵轴) 和瞬时频率的函数，并与对数型激励信号的扫描时间相关。如图18所示，在频率为20Hz 到50Hz 之间的负向偏移处的黑点表明音圈骨架撞击了导磁下板。

5 准备问题

在正式开始第六部分前检查你的理论知识理解程度。回答下面问题，选择所有正确答案，有时答案不止一个。

QUESTION 1: 非线性失真分量的产生取决于激励信号中激励音的频率么？

- **MC a:** 是，非线性失真（谐波、互调和 DC 分量……）的产生取决于激励信号的频率，因为扬声器是一个动态非线性系统。
- **MC b:** 不，非线性失真（谐波、互调和 DC 分量……）的产生与激励信号的频率无关，因为扬声器是一个静态非线性系统，没有记忆（像一个二极管，在输入输出端间有非线性传输特性）。

QUESTION 2: 非线性失真分量的产生取决于激励信号中的激励音的幅度么？

- **MC a:** 不，输出信号产生的非线性失真幅度与激励信号的频谱分量的幅度无关。
- **MC b:** 是的，当激励信号频谱分量的幅度增加时，非线性失真分量的幅度总是增加。
- **MC c:** 是的，当激励信号频谱分量的幅度增加时，非线性失真分量的幅度可能会增加也可能减小。

QUESTION 3: 扬声器非线性特性影响基波分量么？

- **MC a:** 不影响，扬声器非线性仅仅产生基波分量倍频的谐波失真。输出信号中的基波分量的幅度和相位可以通过把线性传递函数 $H(j\omega)$ 和激励信号的基波相乘计算得出。
- **MC b:** 影响，基波分量也被扬声器的非线性特性影响。在大多数情况下，测量的非线性扬声器输出的基波幅度比使用线性传递函数预计的输出要少。但是，在谐振频率处，由于电阻尼造成的损失，非线性扬声器可能产生更多基波分量的输出。

QUESTION 4: 测量的音圈位移的 DC 分量说明了什么？

- **MC a:** DC 分量是由非线性参数（电动机和悬挂非线性特性）中的非对称性造成的，造成交流位移的部分整流。DC 分量的符号（表示音圈运动朝向）说明了非对称性的形状的方向。
- **MC b:** 即使当扬声器非线性特性是对称的时候，扬声器不稳定性也可能造成 DC 分量。
- **MC c:** 音圈位移中 DC 分量是一个扬声器非线性特性的症状。但是没有什么诊断价值，因为 DC 分量是听不见的。

QUESTION 5: 谐波失真测量能完整地描述扬声器非线性传递特性么？

- **MC a:** 能，如果是用覆盖整个音频带的正弦扫频信号（啁啾声）测量谐波失真的话就能。
- **MC b:** 能，如果所有阶的谐波失真和基波的非线性抑制都被测量并是一个关于正弦激励信号频率和幅度的函数的话就能。
- **MC c:** 不行，因为一个单音信号不能产生互调失真。IMD 需要一个包含不止一个频谱分量（双音）的激励信号。

QUESTION 6: 绝对谐波失真频率响应的曲线形状与相对谐波失真（IEC 或者其他标准定义的）相同吗？

- **MC a:** 是的，当相对谐波失真用 dB 表示的时候，曲线形状相同（比如：-40dB 表示 1% 失真）。
- **MC b:** 不同，相对谐波失真是绝对失真的幅度相对于总信号的幅度，因此，相对谐波失真的频率响应有不同的曲线形状。

QUESTION 7: 如何可靠地检测到异音和其他不规则扬声器缺陷？

- **MC a:** 使用双音激励信号测量 2 阶或者 3 阶互调分量是测量异音很可靠的方法。
- **MC b:** 总谐波失真（THD）的测量考虑到了所有谐波分量的幅度。由异音和其他不规则扬声器缺陷产生的 THD 比电动机和悬挂固有的规则非线性特性产生的 THD 小很多。结果就是，为了检测不规则缺陷的独特症状，需要一个额外的高通滤波器来压制由规则扬声器非线性特性产生的低阶谐波失真分量。

- **MC c:** 非规则扬声器缺陷产生的冲击失真分量有很高的峰值系数（高的峰值-均方根比）。因此，需要一个时域分析来考虑高频处失真分量的幅度和相位。
- **MC d:** 假如激励信号是由足够多在音频带上对数分布的声音信号组成，用多音信号失真测量来检测异音的技术就是可靠的。

6 解读失真测量（不需要硬件）


Step 1: 在 www.klippel.de/training 看演示视频 *Loudspeaker Distortion Measurements*，这里介绍了如何进行失真测量。

Step 2: 打开软件 *dB-Lab* 然后打开文件 *LoudspeakerDistortion Measurements.kdbx*。

建议:在提交答案之前，建议离线完成下面的练习。

6.1 谐波失真测量

6.1.1 2阶和3阶失真


Step 3: 打开实验  *1a TRF SPL Fund + Harm 1.5V*，它用一个正弦扫频波对换能器谐波失真进行瞬时测量，其瞬时频率在时间上以对数增加。在结果窗口 *Fundamental + Harmonics* 中比较 *2nd Harmonic* 的曲线和 *Total Harmonic Distortion (THD)*。

QUESTION 8: 在哪个频率范围内，绝对 2 阶失真分量决定了 THD？

- **MC a:** 低于 40Hz
- **MC b:** $40 < f < 250 \text{ Hz}$
- **MC c:** 低于 250Hz


QUESTION 9: 在哪个频率范围内，绝对 3 阶失真分量决定了 THD？

- **MC a:** 低于 40Hz
- **MC b:** $40 < f < 250 \text{ Hz}$
- **MC c:** 低于 250Hz

Step 4: 在同一个实验  *1a TRF SPL Fund + Harm 1.5V* 中，查看结果窗口 *Y1 (f) Spectrum* 并且比较重现激励信号 *Signal lines*（蓝色）和静音激励信号（muted stimulus）下麦克风信号中的基底噪声 *Noise floor*。

QUESTION 10: 稳态噪声（比如由空气条件产生）损坏了在 40Hz 到 250Hz 激励频率上 2 阶和 3 阶谐波失真的测量么？


- **MC a:** 不，测量没有被稳态噪声损坏，因为信噪比在频率 $80 \text{ Hz} < f < 750 \text{ Hz}$ 内范围大于 40dB，2 阶和 3 阶谐波失真在此阶段测量。
- **MC b:** 是，信噪比在 40Hz 处大约为 40dB，这对于测量 40Hz 处的谐波不够。

Step 5: 打开实验  *1b TRF SPL Fund + Harm 6V*，这里是同一个换能器的谐波失真，使用了同样的测量设置，但正弦激励电压要高很多（6V，而非 1.5V）。在结果窗口 *Fundamental + Harmonics* 中观察 *3rd Harmonic* 并回答以下问题：

QUESTION 11: 总谐波失真的绝对大小在高于谐振频率处（ $f_s < f < 4f_s$ ）降低的物理原因是什么？



- **MC a:** 声压输出在这个频率范围内基本上恒定。
- **MC b:** 输入电流在谐振频率(120 Hz)以上一直增加到电阻抗曲线最小值（450Hz）。
- **MC c:** 位移在高于谐振频率处每音程减小 12dB。

6.1.2 位移

Step 6: 打开实验  **2a TRF X Fund + Harm 6V** 然后在结果窗口 **“Fundamental + Harmonics”**、**“Harmonic Distortion (relative)”**和 **“Y2 (f) Spectrum”**中观察频率 150Hz 到 1.5KHz 范围。


QUESTION 12: 在结果窗口 **Harmonic distortion (relative)**中这个频率范围内，什么导致了相对总谐波失真，也就是曲线 **THD in X** 的增加？

- ☐ **MC a:** 谐波失真测量被测量噪声损坏了。如结果窗口 **“Y2 (f) Spectrum”**中所示，测量音圈位移在 1kHz 背景噪声处消失了。由此得到的低信噪比导致了这个频段上一个基本上恒定的绝对失真值（-50dB）。由于总位移减少了 40dB，这个相对失真（绝对失真和总位移的比值）增加了。
- ☐ **MC b:** 扬声器在高频处会产生更多失真。
- ☐ **MC c:** 激光传感器有限制并产生这个失真。

Step 7: 在同一个实验  **2a TRF X Fund + Harm 6V** 中，打开结果窗口 **Harmonic Distortion (relative)**，比较曲线 **THD in X**（代表位移信号的相对 THD）和曲线 **THD in SPL**（代表了声压信号中的相对 THD，这个曲线是从实验  **1b TRF SPL Fund + Harm 6V** 的结果窗口 **“Harmonic Distortion (relative)”**中复制而来）。


QUESTION 13: 为何在声压测量中的相对 THD 比在低频处（ $f < 150$ Hz）位移测量得到的相对 THD 更高？

- ☐ **MC a:** 声音的辐射和传播是高度非线性的并且在低频处会增加失真。
- ☐ **MC b:** 两个相对测量的幅度都取决于基波分量的频率响应。在谐振频率以下，SPL 测量的基波减小，但是位移测量的基波基本上恒定。
- ☐ **MC c:** 麦克风产生的噪声使声音测量的 THD 增加。

Step 8: 打开实验  **2b DIS X Fund., DC, Short**，然后观察结果窗口 **“DC Component”**，这里有位移对频率的关系。

QUESTION 14: DC 分量与正弦激励信号的频率无关么？


- ☐ **MC a:** 不，DC 分量不仅仅取决于频率，还取决于非线性特性的形状。在这个情况下 DC 分量在谐振频率上最大。
- ☐ **MC b:** 不，DC 分量的方向不仅仅取决于频率，还取决于非线性特性的形状。在这个情况下，DC 分量在频率 50Hz 以下和 300Hz 以上取得最大值。
- ☐ **MC c:** 是，DC 分量总在低频处达到最大，这里位移更大。

Step 9: 打开实验  **2c DIS X Motor stability** 并且观察结果窗口 **“DC Component”**，这里展示了位移对电压的关系。

QUESTION 15: DC 位移随电压如何变化？



- ☐ **MC a:** DC 位移在更高电压处变低，因为悬挂系统在正向和负向位移产生的刚性对称性增加，这会增加扬声器的稳定性。
- ☐ **MC b:** DC 位移在低电压情况下相对较小，但是在高电压情况下增长迅速。这个行为说明电动换能器的不稳定性。
- ☐ **MC c:** DC 位移随着增长的电压缓慢增加。这种情况对一个稳定的但是其非线性参数有显著不对称性的扬声器是很典型的。

6.1.3 等效输入失真

Step 10: 选择实验  **3a TRF SPL EHID 6 V**。打开属性页面下的 **Processing**。确保 *Reference Curve* 和 *Level* 被禁止了。打开结果窗口 **Fundamental + Harmonics**。复制曲线 *Fundamental* 到剪贴板。打开属性页面下 **Processing** 的 *Reference*，点击 **Edit**，点击 **From Clipboard**。这时，导入曲线被用来对麦克风信号反向滤波。基波分量的响应现在基本是平直的。这样做能够把传感器（也就是麦克风）的非线性失真转变到扬声器的输入端（也就是电终端）。

QUESTION 16: 为什么计算等效输入失真很有用？

- ☐ **MC a:** 由电动机和悬挂系统非线性特性产生的主要非线性失真都产生于靠近电输入的一维信号域。这些非线性特性会产生与麦克风测量（与麦克风位置无关）相同的等效谐波输入失真（EHID）。如果 EHID 测量与麦克风位置有关，这些非线性特性就在多维信号路径中（比如振膜振动或者声音传播）。
- ☐ **MC b:** 麦克风幅度响应对等效谐波输入失真（EHID）测量没有任何影响，这是因为反向滤波移除了基波的线性特性和麦克风的线性特性。
- ☐ **MC c:** 房间反射和房间模式的影响都被从等效输入失真测量中移除了，这是因为线性声传播会通过基波分量的反向滤波所补偿。


Step 11: 在  **3b X EHID 6 V** 中打开结果窗口 **Harmonic Distortion (relative)**”，这里有激光测量的 2^{nd} EHID X 和 3^{rd} EHID X 曲线。比较这些曲线与 2^{nd} EHID SPL 及 3^{rd} EHID SPL（这俩是从麦克风测量  **3a TRF SPL EHID 6 V** 中复制过来的）

QUESTION 17: 在所有频率中，从麦克风测量与激光测量得到的相对等效谐波输入失真（EHID）都相似吗？

- ☐ **MC a:** 不，在低频情况下（ $f < 100$ Hz），激光和麦克风测量给出几乎相同的 EHID。但是，在高频处（ $f > 150$ Hz），由激光测量得到的 EHID 就损坏了，原因是测量噪声导致不足的信噪比。
- ☐ **MC b:** 是的，激光测量和麦克风测量给出了任意频率上的几乎相同的 EHID。




6.2 互调失真测量

6.2.1 互调失真

Step 12: 打开实验  **4a DIS SPL IMD (bass sweep)** 并且观察结果窗口“ 2^{nd} Intermod, %”和“ 3^{rd} Intermod, %”中互调失真的频率响应。

QUESTION 18: 在低音的哪个频率相对互调失真（百分比）达到最大？


- ☐ **MC a:** 35 Hz
- ☐ **MC b:** 95 Hz(靠近谐振频率)
- ☐ **MC c:** 235 Hz

Step 13: 在同一个实验  **4a DIS SPL IMD (bass sweep)** 中观察结果窗口“**Fundamental Component**”，然后比较 6.00V 曲线和 **Fundamental X 6V** 以及 **Fundamental I 6V** 曲线。他们分别是从实验  **4b DIS X (bass sweep)** 和  **4c DIS current (bass sweep)** 中导入来的。

QUESTION 19: 互调失真在频率 $20 \text{ Hz} < f < 120 \text{ Hz}$ 之间增加时，哪个状态变量有最大幅度？


- ☐ **MC a:** 位移
- ☐ **MC b:** 电流
- ☐ **MC c:** 声压

6.2.2 调幅/调频失真

Step 14: 打开实验  **4d DIS SPL IMD (voice sweep)** 观察结果窗口“**Waveform Y1**”，这里展示双音信号的声压信号，包含了第一个语音信号 $f_1 = 1.9 \text{ kHz}$ 和第二个低音信号 $f_2 = 23 \text{ Hz}$ 。

QUESTION 20: 声压时间信号表现了什么？


- ☐ **MC a:** 1.9KHz 的语音信号的包络线随着时间变化。最大值间的距离大约是 43ms。这和 23Hz 的低音信号的周期相吻合。
- ☐ **MC b:** 语音信号的相位随着时间变化。

Step 15: 打开同一个实验  **4d DIS SPL IMD (voice sweep)** 的结果窗口“**Modulation**”然后比较曲线 **AM distortion(Lamd)** (表示纯调幅 AM 失真) 和总互调失真 **Ldm (cumul)** (考虑幅度和频率调制 AM + FM)。

QUESTION 21: 什么导致了 1.9KHz 语音信号的包络线的变化？




- ☐ **MC a:** 调幅，因为 **AM distortion(Lamd)** 值与总互调失真 **Ldm (cumul)** 最接近。
- ☐ **MC b:** 调频，因为 **AM distortion(Lamd)** 值比总互调失真 **Ldm (cumul)** 小很多。

6.2.3 输入电流的失真

Step 16: 打开实验  **5a TRF CURRENT Harm 6 V**，然后在结果窗口“**Fundamental + Harmonics**”观察输入电流对频率的绝对 **2nd Harmonic** 和 **3rd Harmonic** 失真。



QUESTION 22: 输入电流的 2 阶谐波失真在频带 200Hz 到 1.75kHz 上如何变化？

- ☐ **MC a:** 输入电流的谐波失真的绝对值是恒定的。
- ☐ **MC b:** 输入电流的谐波失真的绝对值每音程减小约 5dB。
- ☐ **MC c:** 输入电流的谐波失真的绝对值每音程减小约 12dB。

Step 17: 在 同 一 个 实 验  **5a TRF CURRENT Harm 6 V** 和 同 一 个 结 果 窗 口 “**Fundamental + Harmonics**” 中，观察 200Hz 到 1.75kHz 频段中电流的基波分量的频率响应。复制  **1b TRF SPL Fund-Harm 6 V** 中相应的声压曲线和  **2a TRF X Fund + Harm 6 V** 中位移，然后粘贴到这个窗口，比较这些曲线。



QUESTION 23: 扬声器的哪个状态变量在这个频段降低？提示：这可能会激活一个扬声器的非线性特性，该非线性特性在 200Hz 和 1.75kHz 之间在输入电流里产生失真。

- ☐ **MC a:** 音圈位移每音程减小 12dB
- ☐ **MC b:** 由于音圈电感的影响，电流略有下降。

Step 18: 打开实验  **5b DIS CURRENT IMD (bass sweep)** 的结果窗口“**3rd Intermod, %**”，比较 6V 曲线 (表示输入电流中 3 阶互调失真) 和 **IMD SPL 6V** 曲线，它是从  **4a DIS SPL IMD (bass sweep)** 中拷贝而来的声压中相应的 3 阶互调失真。

QUESTION 24: 电流和声压中 3 阶互调失真有共同的原因么 (相同的扬声器非线性特性)？


- ☐ **MC a:** 没有，因为声压中 3 阶 IMD 比电流信号中 3 阶 IMD 的幅度要大很多。因此，失真的源头在机械或者声学域。
- ☐ **MC b:** 是，因为这些值很相近。因此失真的源头在电气域。

Step 19: 打开实验  **5c DIS CURRENT IMD (voice sweep)** 然后观察结果窗口“**2nd Intermod %**”和“**3rd Intermod %**”。比较 3V 互调失真曲线 (输入电流) 和 **IMD SPL 3V** 曲线 (从实验  **4d DIS SPL IMD (voice sweep)** 相应结果窗口中拷贝的声压输出)。注意，2 阶和 3 阶互调失真在 1.9kHz 都有一个最大值 (超过 30%)。

QUESTION 25: 导致在 1.9kHz 处的高互调失真的非线性特性在哪里？


- **MC a:** 该非线性处在电气域，因为在输入电流中的互调失真与声压输出中的 IMD 相似。
- **MC b:** 该非线性特性处于机械域或者声学域。因为输入电流的 IMD 比声压中的 IMD 明显要小。

6.3 多音失真测量

Step 20: 打开实验  **6a LPM MTD 1/10th oct** 并查看结果窗口“**P(f) Spectrum**”。比较曲线 *Noise Floor* 和 *Noise+Distortion*。



QUESTION 26: 失真噪声比是否足够大来将非线性失真分量从稳态环境噪声中区分开来？

- **MC a:** 不，noise floor 曲线与 *Noise+Distortion* 曲线相似。
- **MC b:** 是，noise floor 曲线在 *Noise+Distortion* 曲线 30dB 以下。

Step 21: 在同一个实验  **6a LPM MTD 1/10th oct** 同样的结果窗口 **P(f) Spectrum** 中里比较 *Noise+Distortion* 频谱和结果窗口 **Current (f) Spectrum** 中相应的频谱。

QUESTION 27: 用光标来读取 2kHz 处的基波分量和失真峰值的差距。失真的主要原因是什么？


- **MC a:** 失真主要是在电气域，因为输入电流有主要的失真（在输入电流和输出声压中，失真和基波之间有相同的差值）。
- **MC b:** 失真主要在机械或者声学域，因为输入电流仅仅有很小的失真（输入电流中失真和基波之间的级差为 30dB，这比声压输出中相应的 15dB 级差大多了）

Step 22: 选择实验  **6b LPM MTD 1/10th oct hp**，其展示了低于 300Hz 的频率分量被高通滤波抑制的多音失真测量。在结果窗口“**P(f) Spectrum**”中，比较 *signal line(high-pass)* 曲线和 *signal line (full band)* 曲线（从实验  **6a LPM MTD 1/10th oct** 中相应结果窗口中复制而来）。打开结果窗口“**Multi-tone distortion**”并且比较 *MTD high pass* 曲线和 *MTD full band* 曲线。注意，用到高通滤波后的激励信号失真显著地减少了（20dB）。

QUESTION 28: 哪个状态信号对 300Hz 以上的 MTD 产生明显影响但被高通滤波器显著减小？



- **MC a:** 音圈位移
- **MC b:** 电流输入
- **MC c:** 终端电压
- **MC d:** 麦克风声压输出

6.4 异音测量

Step 23: 选择实验  **7c TRF peak harmonics 8V**，然后打开结果窗口“**Fundamental+Harmonics**”。激活光标来观察 70Hz 处的绝对总谐波失真和 70Hz 处的 21 阶谐波失真的 *THD* 曲线的幅度差。注意：如果 21 阶谐波没有显示，按“c”或者右键点击图区域然后选择 **customize**。选择属性页面 **Subset**，点击 Ctrl 然后选择曲线 **21th**。

QUESTION 29: 21 阶谐波分量测量是找到异音和其他非常规缺点的有效办法么？

- **MC a:** 是，因为电机和悬挂中内在的常规失真对高阶谐波无显著贡献。
- **MC b:** 不，高阶谐波分量 ($n > 10$) 只有低频谱能量并且处于背景噪声附近。通过读取更高阶单音谐波只能发现显著的缺陷。因此需要时域敏感测量技术和频域谐波分量间的频谱信息来确定多谐波的幅度和相位信息 ($10 < n < 300$)。

Step 24: 在同一个实验  **7c TRF peak harmonics 8V** 中打开结果窗口“**Instantaneous Distortion**”然后观察高通滤波 PHD ($n > 10$) 的峰值。该窗口展示了 *Distortion* 曲线和 *Distortion 1V* 曲线（从实验  **7a TRF peak harmonics 1V** 中复制而来，其使用较低终端输入电压）。

Step 25: 打开同一个实验 **7c TRF peak harmonics 8V** 的结果窗口“**Fundamental+Harmonics**”然后观察 *Absolute PHD* 曲线。找到 *AbsolutePHD* 中超过允许的 *PHD limit* 线(基波分量平均值 40dB 以下)的频率范围。

Step 26: 选择实验 **7d TRF Crest harmonics 8V** 并检查结果窗口“**Instantaneous Distortion**”。找到瞬时峰值因数 *ICHD* 超过允许门限 *Thresh* 曲线（设定在 12dB）的频率范围。

QUESTION 30: 峰值 PHD 和峰值因数 ICHD 是在同一个频率超过相应的门限的么？

- **MC a:** 是，在频率范围 40Hz 到 60Hz 有高 PHD 值和高 ICHD 值的扬声器非常规缺陷意味着冲击失真的产生。
- **MC b:** 不，瞬时峰值因数 ICHD 在频率范围 40Hz 到 60Hz 超过门限值，但是 PHD 在基波 40dB 以下。即使失真的冲击属性意味着非常规缺陷，很小的峰值表示这个缺陷可以忽略。
- **MC c:** 不，即使峰值 PHD 超过了允许门限，低瞬时峰值因数 ICHD 意味着失真不是冲击性的。峰值可能是由于测量噪声导致的，这并不重要。

Step 27: 同一个实验 **7d TRF Crest harmonics 8V** 观察结果窗口“**Instantaneous Distortion 3D**”并且寻找瞬时峰值因数 ICHD 超过 12dB 门限（对应于图中黑点）的条件（频率，位移）。

QUESTION 31: 确定冲击失真出现时和峰值因数超过 12dB 门限时的音圈位移。

- **MC a:** 在频率范围 $35 < f < 65$ Hz，冲击失真发生在位移的正峰值处（3mm 峰值）。
- **MC b:** 在频率范围 $35 < f < 65$ Hz，冲击失真发生于位移的负峰值处（3mm 峰值）。
- **MC c:** 在频率范围 $35 < f < 65$ Hz，冲击失真发生在位移的负峰值处（1mm 峰值）。

Step 28: 在 同一个 实验 **7d TRF Crest harmonics 8V** 中 观察 结果 窗口 “**Modelled and Measured Response**”，这里展示了 *Residual* 曲线关于瞬时频率的失真波形。在 60Hz 处放大 *Residual* 曲线来看在最大负声压信号（对应于正位移最大值，声压与加速度成比例）处产生的冲击失真。

7 实际测量（需要硬件）

7.1 硬件设置

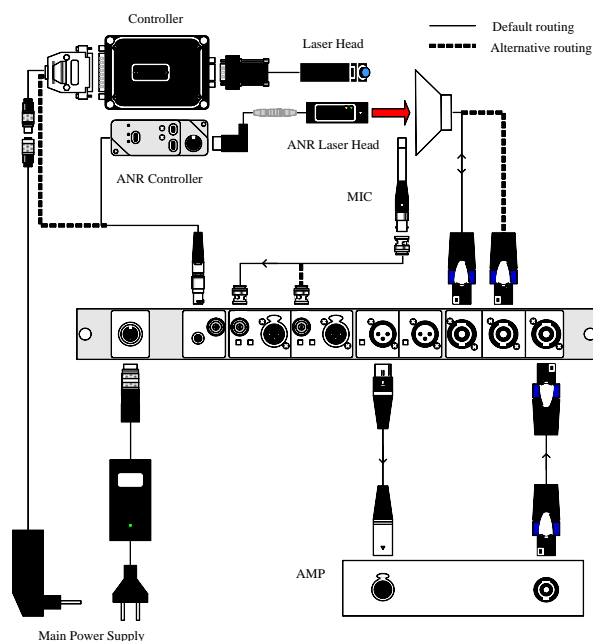


图13: DA2接口连接

- Step 29: 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。
- Step 30: 连接放大器的输出端到 DA 的 Speakon 输入端 “**AMPLIFIER**”。
- Step 31: 用特制扬声器测量导线连接 DA 的 Speakon 输出端 “**Speaker1**” 到扬声器的终端。
- Step 32: 如果你有一个激光器, 连接激光头到控制器, 并且把控制器的 LEMO 插头连接到失真分析仪 DA 背后标有 **LASER** 的输入端。
- Step 33: 将失真分析仪 DA 前方的 **USB** 输入连接到电脑。
- Step 34: 选择一个换能器来测试。推荐使用谐振频率低于 100Hz 的低音扬声器单元。把换能器紧紧地固定在支架上, 确保振膜垂直于激光束。
- Step 35: 在振膜中心点一个白点 (用涂改液或者白贴纸)。
- Step 36: 将激光束对准白点。
- Step 37: 将激光头调整到工作距离。
- Step 38: 把麦克风放到扬声器近场处, 并连接到失真分析仪 DA 的 **INPUT 1** 端口。

7.2 多音失真

- Step 39: 在工具栏上点击按钮 **NEW OBJECT**, 然后选择 KLIPPEL 模板 **Diagnostics WOOFER**, 给该受测设备命名。
- Step 40: 在实验 **4g LPM Multitone distortion** 中打开属性页面中的 **Stimulus**, 调整换能器输入电压 (从一个 1V 左右的较小值开始, 以免损坏扬声器), 然后开始测量。
- Step 41: 打开麦克风信号的结果窗口 **P(f) Spectrum**。检查多音失真 **multi-tone distortion** 和背景噪声 **noise floor**。
- Step 42: 打开结果窗口 **Multitone Distortion** 然后读出失真的最大值。如果失真的最大值小于 -20dB (低于 10%), 则在属性页面 **Stimulus** 中提高电压, 然后重复测量。
- Step 43: 对于后面的测量, 请记下步骤 42 中确定的最终电压。
- Step 44: 打开结果窗口 **X(t)** 然后读出位移峰值。
- Step 45: 打开结果窗口 **Current (f) spectrum**。通过找到电流信号中多音失真最大值和基波之间的差值 (dB), 确定电流中失真的相对级大小 (dB)。把这个结果和声压输出中的相对失真级进行比较。这个主要的非线性特性是在电气域么?

7.3 音圈位移

- Step 46: 打开实验 **3a DIS X Fundamental DC** 中属性页面的 **Stimulus**, 然后在 **U end** 中输入 **4g LPM Multitone distortion** 中用到的电压 (**U start** 输入 0.1V), 然后开始测量。
- Step 47: 在结果窗口 **PEAK + BOTTOM** 中确定位移的峰值和谷值。
- Step 48: 在结果窗口 **COMPRESSION** 中, 检查谐振频率以下的振幅压缩。
- Step 49: 检查低音单元产生的直流位移 **DC-displacement**。找到换能器产生最大直流位移的频率, 并将其和换能器谐振频率 (在实验 **4g LPM Multitone distortion** 结果窗口 **Table Linear Parameters** 中所示) 进行比较。
- Step 50: 打开实验 **3b DIS motor stability** 属性页面中的 **Stimulus** 然后输入临界频率 $f = 1.5 f_s$ 。确保属性页面 **Protection** 中音圈温度监测 **voice coil temperature monitoring** 已打开。然后设置最大允许升高温度到 60 K, 开始测量。(基于温度监控的保护措施可以使用一个 **U end** 的最大电压, 其超过实验 **4g LPM Multitone distortion** 中的电压。)

Step 51: 在结果窗口 *DC component* 中读取最大值，并且和结果窗口 *Fundamental Component* 中 AC 分量进行比较。这个电机稳定么？

7.4 谐波失真

Step 52: 打开实验 *4a TRF SPL + harmonics* 中属性页面的 *Stimulus*，然后调整激励信号电压到 *4g LPM Multitone distortion* 中用到的电压值。确保 *noise floor monitoring* 被勾选，开始测量。

Step 53: 打开结果窗口 *Y1(f) Spectrum* 然后检查信噪比。在目标频段内，SNR 超过了 30dB 么？

Step 54: 打开结果窗口 *Impulse response* 并且在直达声波附近设置左右窗口光标，这样较晚到达的房间反射会被抑制。

Step 55: 检查结果窗口 *Fundamental + Harmonics* 中的谐波，确定哪个谐波失真决定了总谐波失真 (THD)。

Step 56: 打开结果窗口 *Harmonic Distortion* 然后找高于谐振频率 f_s 的最大失真处的频率。比较此频率处的谐波失真和实验 *4g LPM Multitone distortion* 中的同频率的多音失真，解释这个差别。

7.5 等效输入失真

Step 57: 复制实验 *4a TRF SPL + harmonics* 并粘贴在同一个 dB-lab 对象 (object) 下。重命名为 *4a TRF Equivalent Harmonics*。打开结果窗口 *Fundamental + Harmonics* 然后复制 *Fundamental* 曲线到剪贴板。打开属性页面 *Processing* 然后粘贴这个曲线到 *IMPORT*。

Step 58: 观察结果窗口 *Fundamental + Harmonics*，然后检查 *Fundamental* 曲线已经变平坦并且在 0 附近。现在这个窗口中的谐波失真曲线表示等效输入失真。为什么低于谐振频率时 EID 几乎恒定？

Step 59: 打开结果窗口 *Harmonic Distortion*，并且将 EID 相对失真和实验 *4a TRF SPL + harmonics* 中相应窗口中声压输出的相对失真进行比较。

7.6 互调失真

Step 60: 打开实验 *4e DIS IM Dist. (voice sweep)* 中属性页面的 *Stimulus*，然后在 U end 中输入实验 *4g LPM Multitone distortion* 中用到的电压 (U start 用 0.1 V) 并开始测量。听重现高频声音中的波动和粗糙度。

Step 61: 查看结果窗口 *2nd Intermod, %* 和 *3rd Intermod, %*，然后找最大互调失真的频率 f_{\max} 。将其和实验 *4a TRF SPL + harmonics* 中同频率 f_{\max} 处的谐波失真相比较。

7.7 异音和其他不规则失真

Step 62: 打开实验 *5 TRF Rub and Buzz* 的属性页面的 *Stimulus*，然后输入电压值 1V。把这个测量重命名为 *5 TRF Rub and Buzz1V*，开始测量，听撞击底部的声音，音圈摩擦的声音和其他不规则缺陷的症状。

Step 63: 打开结果窗口 *Fundamental + Harmonics*，寻找 *Absolute PHD* 曲线的最大值。这个曲线超过 *PHD limit(-40 dB)* 线了么？重复测量来保证这个最大值是可重现的并且不是由环境噪音所导致。一个没有缺陷的扬声器应该仅仅产生噪音（一条与频率无关的平直线）。

Step 64: 在接近振膜处手持一个物体（笔，螺丝刀等等），然后再次开始测量。如果振膜撞到了该物体并且产生一个冲激，你可以在 *Absolute PHD* 看到一个明显的上升。打开属性页面的 *I-Dist*，在 *Measure* 下选择 *ICHD*。打开结果窗口 *Instantaneous Distortion 3D*，这里展示了瞬时峰值因数与位移和频率的关系，找到足够让振膜表面撞击到该物体的正向位移和频率。

Step 65: 复制实验 *5 TRF Rub and Buzz1V*，然后输入 *4g LPM Multitone distortion* 中用到的电压。重命名为 *5 TRF Rub and Buzz high voltage*，开始测量。听音圈撞击、摩擦的声音和其他非常规缺陷的症状。打开结果窗口 *Fundamental + Harmonics* 然后找到 *Absolute PHD* 曲线的最大值。

重复实验确保这个最大值是可重现的且不是由环境噪音所导致。这个曲线超过 *PHD limit* (-40 dB)曲线了么？如果没有，继续增加电压然后重新测量。

Step 66: 打开测量 5 *TRF Rub and Buzz high voltage* 的结果窗口 *Instantaneous Distortion 3D*，这里展示了瞬时峰值因数相对位移和频率的关系。找到 3D 窗口中的黑点，读取产生冲击失真的音圈位置。

Step 67: 讨论导致测量冲击失真的可能原因。

8 更多资料

KLIPPEL R&D SYSTEM操作手册 – *Transfer Function (TRF)* 传递函数

KLIPPEL R&D SYSTEM操作手册 – *3D Distortion Measurement (DIS)* 3D失真测量

KLIPPEL R&D SYSTEM操作手册 – *Linear Parameter Measurement (LPM)* 线性参数测量 (LPM)

论文 “*Measurement of Equivalent Input Distortion*” “等效输入失真测量”

http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Literature/Papers/Measurement_of_Equivalent_Input_Distortion_03.pdf

论文 “*Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances*” “冲激失真、异音和其他干扰的测量”：

http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Literature/Papers/Measurement_of_Rub_and_Buzz_03.pdf