

训练 1

线性集中参数测量

1 实际操作培训的目标

- 理解电动换能器的物理机制
- 运用集中参数进行建模
- 使用传统和新技术进行集中参数测量
- 在完成实际测量中训练技能和进行试验
- 解读测量结果
- 发现和避免测量错误

2 要求

2.1 知识背景

第一次操作培训主要针对有电子和机械工程知识背景的学生和在电声领域有相关经验的工程师。

2.2 最低要求

实验人员将会用到由 KLIPPEL 数据库中 Linear Lumped Parameter Measurement.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：

- 线性集中参数测量模块 (LPM)
- 失真分析仪 DA2
- 激光传感器和控制器
- 放大器
- 固定支架

3 训练过程

1. 阅读下面训练相关的理论。
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. 依照指导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，在换能器上进行相关实验。

4 介绍

本节概述了集中参数建模的基本原理，这对完成实验非常有用。以下剖面图展示了常规扬声器系统中用作低音单元的电动换能器

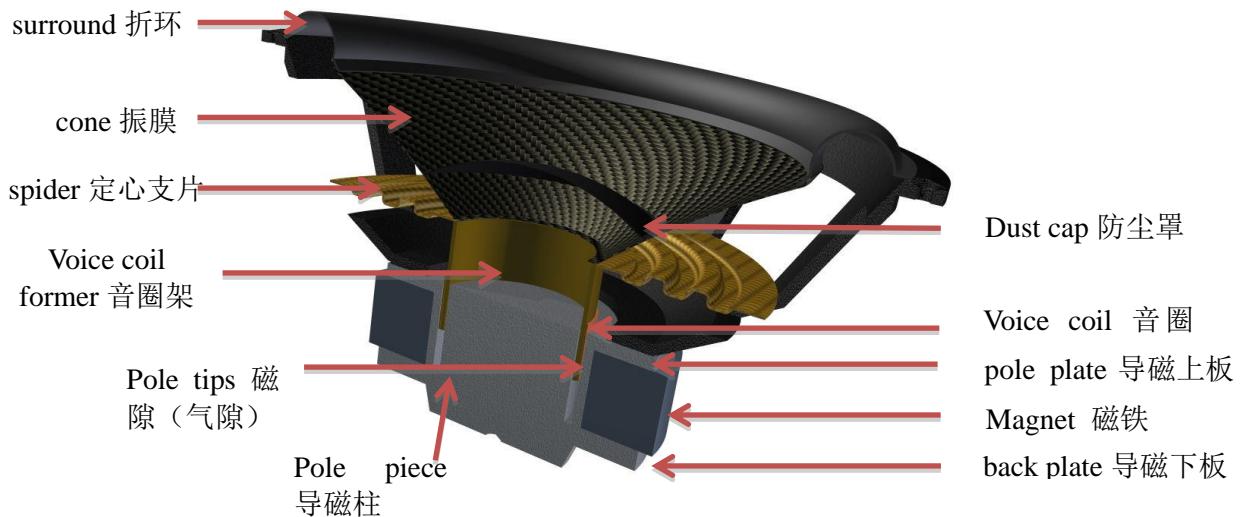


图 1：电动换能器剖面图（图片提供：Isophon）

4.1 低频段的机械模型

在低频段，波长远大于换能器的几何尺寸。机械系统可以用集中参数进行建模，得到一个阻尼质量弹簧谐振器。见图 2：

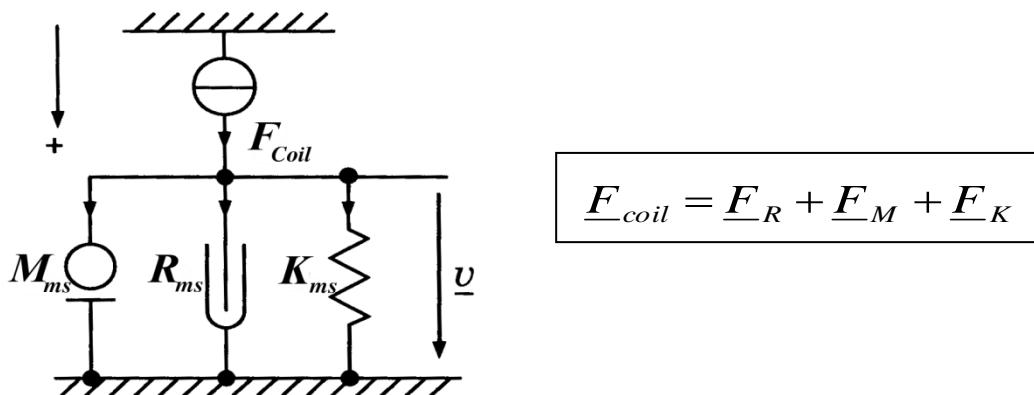


图 2：扬声器的机械结构

振膜、防尘罩、音圈、音圈骨架和机械悬挂的可移动部分（折环和定心支片）的质量被集中为一个点质量 M_{ms} 。该质量产生了惯性力 \underline{F}_M ，正比于加速度 a ，也就是位移 x 的二阶导数。音圈的位移 x 还导致了悬挂系统的形变，并且产生了一个恢复力 \underline{F}_K 。该力使得音圈回到的静止位置 $x=0$ 。在小信号区域，力和形变的关系曲线可以用一条以刚性 K_{ms} 为斜率的直线来近似。机械阻抗 R_{ms} 导致一个与速度 v 成正比且相对于其他力 F_M 和 F_K 正交的阻尼力 F_R 。

表 1: 机械力一览表

| 力 | 换能器物理部分 | 基本关系 |
|-----------------------------|-------------------------------|---|
| 总推动力 \underline{F}_{coil} | 音圈和磁铁系统 | $\underline{F}_{coil} = \underline{F}_R + \underline{F}_M + \underline{F}_K$ |
| 摩擦力 \underline{F}_R | 机械和声学元件的摩擦损耗 | $\underline{F}_R = R_{ms} \cdot \underline{v}$ 机械阻抗 R_{ms} , 速度 \underline{v} |
| 惯性力 \underline{F}_M | 振动质量: 振膜、折环、音圈、定心支片、音圈架、运动的空气 | $\underline{F}_M = M_{ms} \cdot \underline{a} = M_{ms} \cdot j2\pi f \underline{v}$ 振动质量 M_{ms} , 加速度 \underline{a} , 频率 f 和虚数单位 $j = \sqrt{-1}$ |
| 恢复力 \underline{F}_K | 定心支片和折环的形变 | $\underline{F}_K = K_{ms} \cdot \underline{x} = K_{ms} \cdot \frac{\underline{v}}{j2\pi f}$ 刚性 K_{ms} , 位移 \underline{x} |

机械导纳 $\underline{H}_{mech}(f) = \underline{v}/\underline{F}_{coil}$ 描述了速度和总体推动力的复比, 它是一个频率的函数, 并且在谐振频率点达到最大值。

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{ms}}{M_{ms}}}$$

谐振时恢复力和惯性力的和为 0, $\underline{F}_K + \underline{F}_M = 0$ 。

如果频率 f 被标准化为共振频率 f_s , 阻尼质量弹簧谐振系统的主导力和机械导纳将很容易算出 (见表 2)。

$$\underline{H}_{mech}(f) = \frac{\underline{v}}{\underline{F}} = \frac{2\pi f_s}{K_{ms}} \frac{j \frac{f}{f_s}}{1 - \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 + j \left(\frac{f}{f_s}\right) \frac{2\pi f_s R_{ms}}{K_{ms}}}$$

下表 2 说明了频率和机械导纳的关系。

表 2: 机械导纳的频率相关性

| 频率范围 | 机械阻抗 | 主要作用力 |
|---------------------|---|--|
| $f \ll f_s$ | $\underline{H}_{mech}(f) \approx \frac{j2\pi f}{K_{ms}}$ (刚性主导) | $\underline{F}_{coil} \approx \underline{F}_K$ (推动力等于恢复力) |
| $f = f_s$ (谐振频率) | $\underline{H}_{mech}(f) = \frac{1}{R_{ms}}$ (阻抗主导) | $\underline{F}_{coil} = \underline{F}_R$, (推动力补偿摩擦损耗) |
| $f \gg f_s$ | $\underline{H}_{mech}(f) \approx \frac{1}{j2\pi f M_{ms}}$ (振动的质量主导) | $\underline{F}_{coil} \approx \underline{F}_M$ (推动力等于惯性力) |

4.2 电动原理

一个使用电动原理的换能器会产生洛伦兹力 $F_{coil} = Bl_i$, 它垂直于由磁通密度 (磁感应强度 B) 和长度为 l 的导线中的电流 i 所形成的平面。同时, 音圈的速度产生一个反向电动势 Blv 。因此, 电动换能器就能被表示成一个耦合常数为 Bl 的变压器, 如图 3

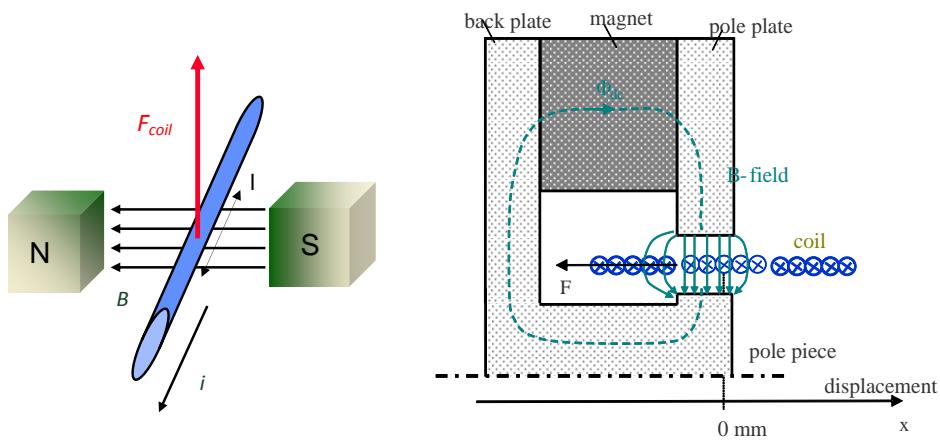


图 3: 电动换能器原理

图 4 中等效电路的右边部分与图 2 中的机械结构相同。该部分可由 FI 类比（也称为导纳型类比）来表示。力 F_{coil} 是流量变量（类似于电学中的电流）以及速度 v 为强度变量（类似于电学中的电压）。图 4 中的机械网络元件是机械可移动性的，定义为 v/F 。以下关系适用于电路元件的力、速度、电压和电流。

$$\begin{aligned} \underline{F}_M &= j\omega M_{ms} \underline{v}, \underline{F}_K = \frac{1}{j\omega C_{ms}} \underline{v}, \underline{F}_R = R_{ms} \underline{v} \\ \underline{I} &= j\omega C \underline{U}, \quad \underline{I} = \frac{1}{j\omega L} \underline{U}, \quad \underline{I} = \frac{1}{R} \underline{U} \end{aligned}$$

电路左边部分则表示音圈的电气属性。该部分将在接下来的电输入阻抗 $Z_e(f)$ 部分讨论。

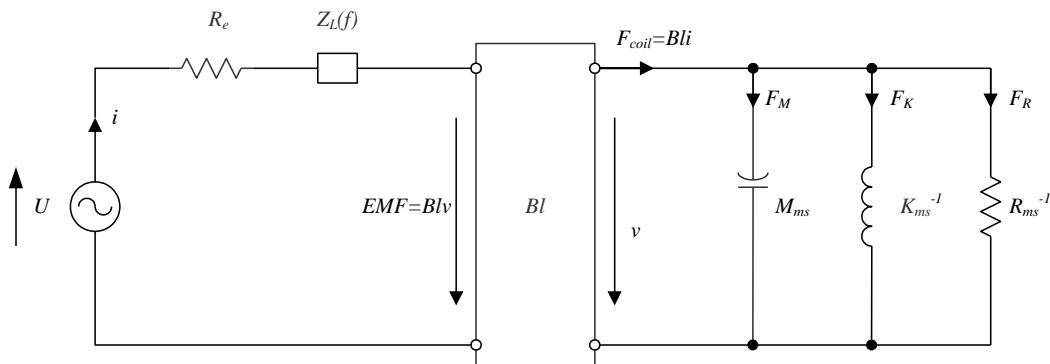


图 4: 电动换能器的机电等效电路

4.3 电输入阻抗

电输入阻抗是输入端的电压和输入电流的复比。幅度响应 $|Z_e(f)|$ （见图 5）展示了一个典型的位于谐振频率 f_s 的峰值。从电气的角度来看，这个峰值点与机械导纳的增加有直接关系。

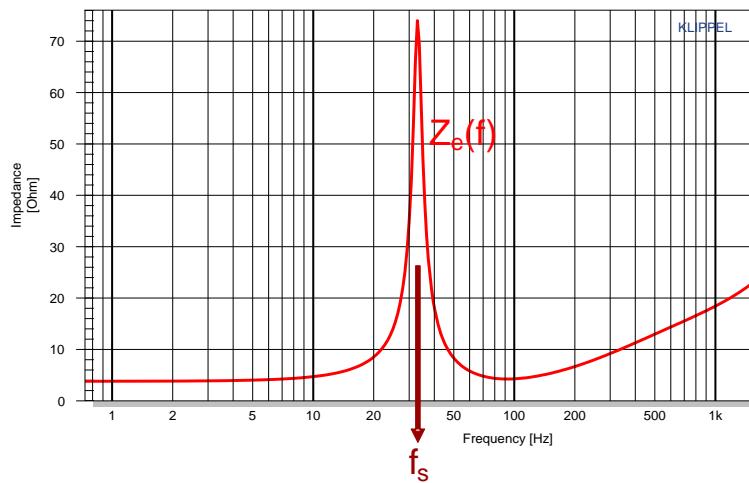


图 5：电阻抗与频率关系图

在低频情况下速度 v 可以被忽略，幅度响应 $|Z_e(f)|$ 与音圈的直流阻抗 R_e 相等。但是，当频率变高 $f > f_s$ 时，音圈的电感和磁隙上涡流造成的额外损耗会导致 $|Z_e(f)|$ 的额外增加。

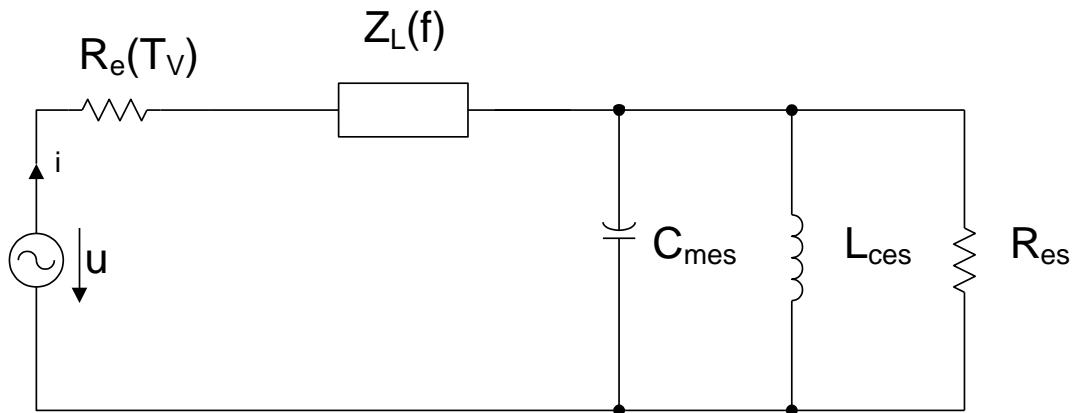


图 6：等效电路

图 6 展示了电输入阻抗是如何用该等效电路来模拟的。以下关系适用于机械阻抗到电域的变换。

$$Z_e = \frac{U}{I} = \frac{v}{F} (Bl)^2 = (Bl)^2 \frac{1}{Z_m}$$

参数 C_{mes} 、 L_{ces} 以及 R_{es} 可以基于上面的等式确定。

$$\text{振动质量: } \frac{1}{Z_m} = \frac{1}{j\omega M_{ms}} \Rightarrow Z_e = (Bl)^2 \frac{1}{j\omega M_{ms}} = \frac{1}{j\omega C_{mes}} \Rightarrow C_{mes} = \frac{M_{ms}}{(Bl)^2}$$

$$\text{柔度: } \frac{1}{Z_m} = j\omega C_{ms} \Rightarrow Z_e = (Bl)^2 j\omega C_{ms} = j\omega L_{ces} \Rightarrow L_{ces} = (Bl)^2 C_{ms}$$

$$\text{阻抗: } \frac{1}{Z_m} = \frac{1}{R_{ms}} \Rightarrow Z_e = (Bl)^2 \frac{1}{R_{ms}} = R_{es} \Rightarrow R_{es} = (Bl)^2 \frac{1}{R_{ms}}$$

表 3: 电等效电路的基本参数

| | | |
|-----------|---|---------------------------------------|
| R_e | 直流音圈阻抗 | $R_e = Z_e(f=0) $ |
| $Z_L(f)$ | 用不同的电感模型(Leach, LR2, Wright, ...)来描述有损电感音圈的电阻抗。 | 近似 $ Z_L(f) \approx L_e j 2\pi f$ |
| C_{mes} | 电容代表振动的质量 M_{ms} | $C_{mes} = \frac{M_{ms}}{(Bl)^2}$ |
| L_{ces} | 电感代表机械柔度 C_{ms} | $L_{ces} = C_{ms} (Bl)^2$ |
| R_{es} | 电阻抗代表机械摩擦损耗 R_{ms} | $R_{es} = \frac{(Bl)^2}{R_{ms}}$ |

由这些变量得出了一些如表 4 中的重要参数。品质因数一般定义为无功功率与有效功率的商或者也可以是存储在谐振电路最大能量与功率损耗的商。无论电气或是机械阻抗都会引起功率损耗。

$$Q(\omega) = \omega \frac{|reactivepower|}{effectivepower} = \omega \frac{R}{U^2} CU^2 = \omega RC$$

表 4 列出了谐振时的电气和机械品质因数，总品质因数则由二者并联得到。

表 4: 从基本变量得出的重要相关参数

| | | |
|----------|--------------------------------------|---|
| f_s | 机械质量弹簧系统的谐振频率(弹力 F_k 等于惯性力 F_m) | $f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{mes} L_{ces}}}$ |
| Q_{es} | 电气品质因数代表了谐振电路的电阻尼 | $Q_{es} = 2\pi f_s C_{mes} R_e$ |
| Q_{ms} | 机械品质因数仅表示机械摩擦损耗 | $Q_{ms} = 2\pi f_s C_{mes} R_{es}$ |
| Q_{ts} | 总品质因数表示了机械和电损耗 | $Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$ |

5 参数识别

在应用常规换能器模型到一个特定的换能器中时，自由集中参数必须要通过将成本函数（cost function/loss function）最小化来估计，该成本函数描述了估计值和测量值的偏差。

5.1 测量电阻抗

要计算表 3 和表 4 中列举的电参数，首先要得到换能器终端测量的电阻抗 $Z_e(f)$ 。任何信号，只要大到可以提供足够的激励，就都能用于测量扬声器的终端电压（输入信号）和电流（输出信号），该扬声器与一个低输出阻抗（电压驱动）的功率放大器相连。电阻抗是一个线性传递函数，并且需要扬声器产生的非线性失真大小可以忽略不计。这就要求信号强度不高但同时又能够满足足够的信噪比。

常用的激励信号是一个稀疏的多音（多频）复信号，其可以用来测量呈对数分布的离散频率的电阻抗。将激励信号的频谱能量集中在每个音程的 16-30 条谱线上可以提高信噪比，同时提供足够的阻抗曲线的分辨率来可靠地确定参数。

图 7 中蓝色的线代表了在终端电压测量中得到的多音频的基频电压分量。在激振频率谱线之间的灰色谱线表示了噪声和失真。黑色的线是在没有信号情况下测量的噪音级，图中黑色谱线基本和灰色谱线相同，这表示功率放大器产生的电压信号有非常低的非线性失真。可靠的阻抗测量需要电压信号信噪比大于 40dB。信噪比可以通过将测量信号进行 N 次平均来提高，公式如下：

$$\Delta SNR = 3 \log_2(N) dB$$

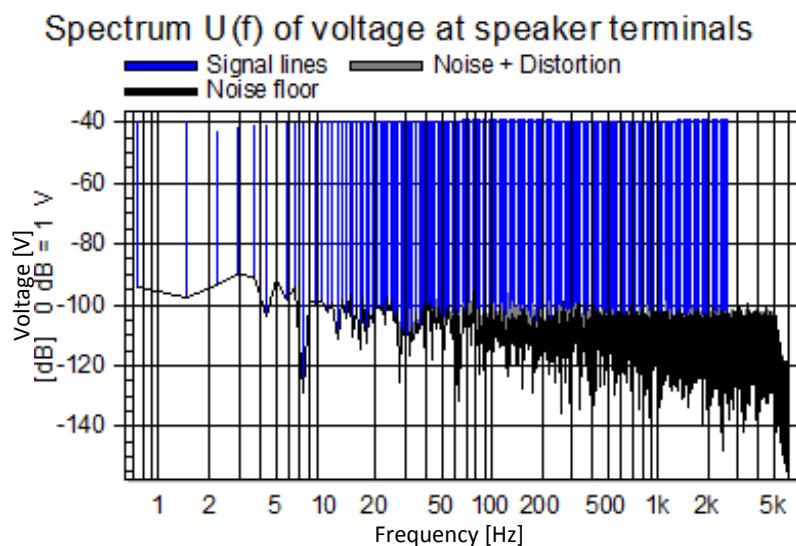


图 7：多音频信号测量的电压频谱

图 8 显示了测量的电流频谱，其中基频部分（红色谱线）在谐振频率处有一个特别的凹陷，这在图 5 中正好是阻抗最大值的位置。灰色谱线代表了噪声和失真，在谐振频率（这里是 120Hz 左右）处其大小超过了代表背景噪声的黑色谱线，这意味着扬声器有非线性失真。但是由于信噪比大于 30dB，实验结果还是可靠的。

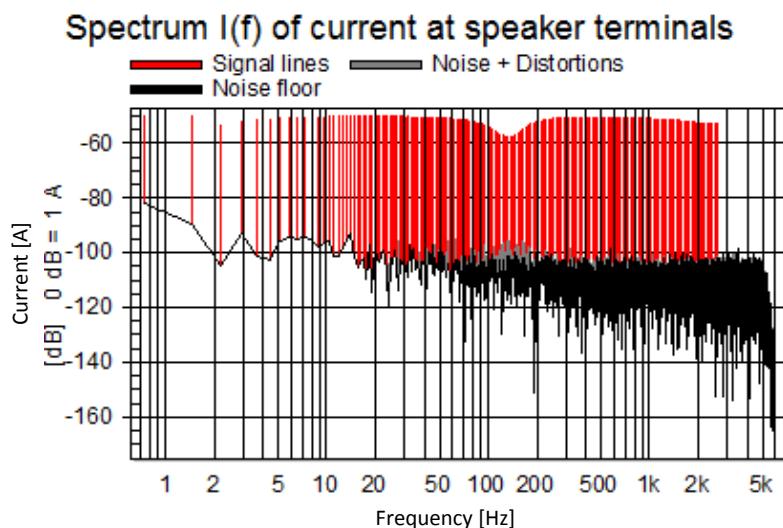
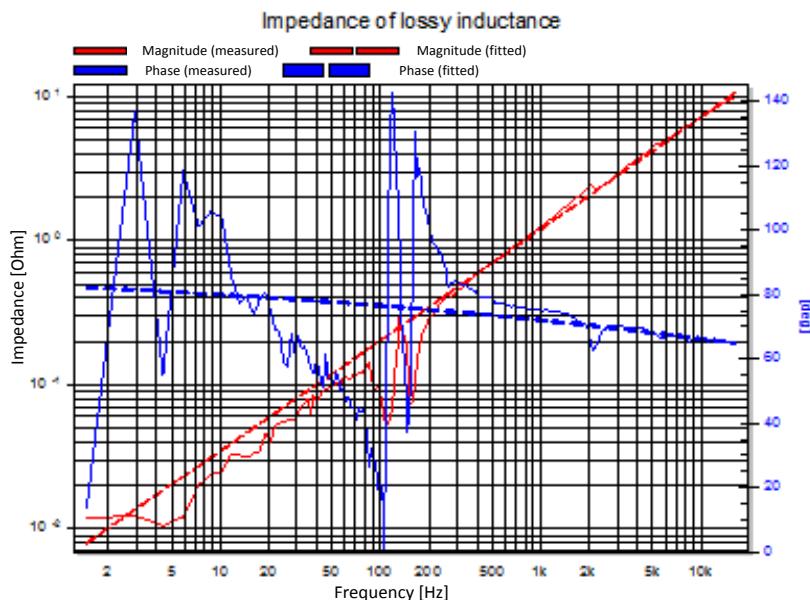


图 8：多音频信号测量的电流频谱

5.2 有损电感的阻抗

音圈所产生的磁场引起了磁隙处的涡流，这导致了高频率时候的显著发热。这种损耗不仅存在于直流阻抗 R_e ，也会在频率增加时产生于电阻抗的实部。

图 9 展示了“有损电感”的电阻抗 $Z_L(f)$ 的幅度和相位。有损电感是去除直流阻抗 R_e 和反向电动势以后剩下的电阻抗。 $Z_L(f)$ 的幅度上升斜率低于 6dB 每倍频程，这和理想的电感相同。频率高于 200Hz 时相位响应为 70 度左右，这是由于涡流带来的电损耗，频率低于 200Hz 时，由于幅值太小，相位响应非常的杂乱。

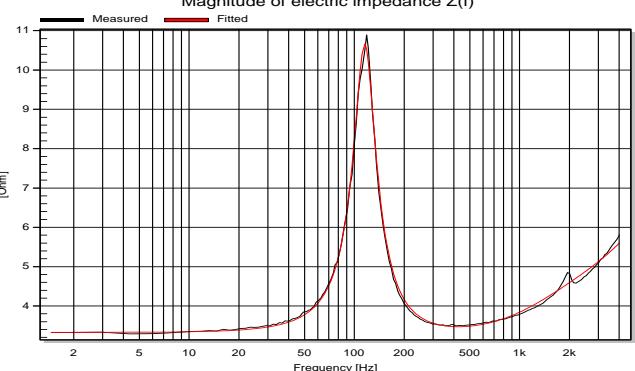
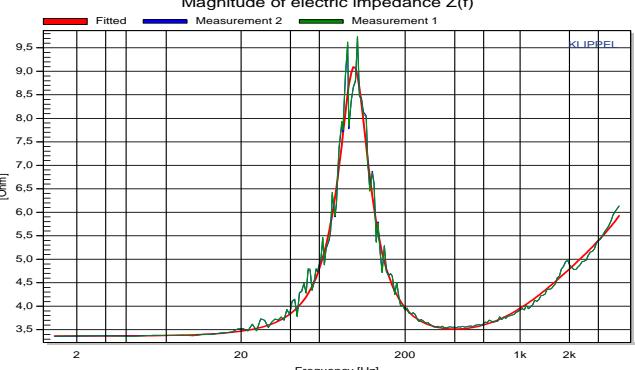
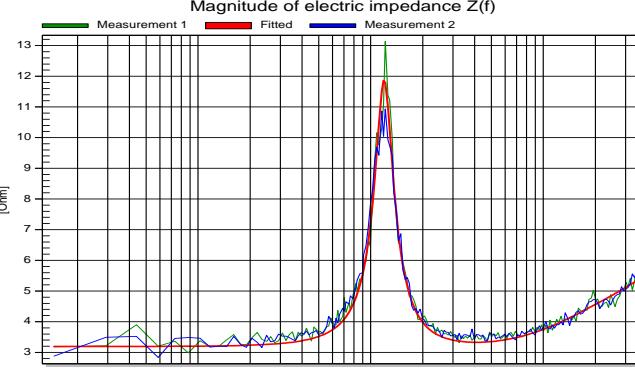
图 9：音圈在高频段的 $Z_L(f)$ 的幅度和相位响应

用理想的电感 L_e 仅仅能粗略地模拟阻抗 $Z_L(f)$ 。电阻抗的 LR2 模型在高频段串联了第二个理想电感 L_2 和与之相并联的电阻 R_2 。还有一些其他的模型(Leach, Wright)用了数学建模，不能用 LR 电路来展示。

5.2.1 电阻抗的拟合

最终，通过把测量和建模得到的阻抗曲线之间的均方误差最小化可以确定集中参数模型的自由参数。残余误差是由测量噪声，非线性失真和建模的缺陷造成的。信号的强度应该仔细设置以保证足够的信噪比，同时又能避免非线性失真的产生。见表 5：

表 5: 估计电阻抗测量结果

| | |
|--|---|
| <p>阻抗曲线的测量值和估计值非常吻合</p>  <p>Magnitude of electric impedance $Z(f)$</p> <p>Measured Fitted</p> <p>[Ohm]</p> <p>Frequency [Hz]</p> | <p>标准:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 高信号失真比 ($> 30 \text{ dB}$) - 高信噪比($> 30 \text{ dB}$) - 低拟合误差 RMS($< 3 \%$) |
| <p>测量曲线被非线性失真破坏</p>  <p>Magnitude of electric impedance $Z(f)$</p> <p>Fitted Measurement 2 Measurement 1</p> <p>[Ohm]</p> <p>Frequency [Hz]</p> | <p>标准:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 低信号失真比($< 30 \text{ dB}$) - 高信噪比($> 30 \text{ dB}$) - 阻抗曲线的估计值和测量值的吻合度很差 - 高拟合误差 RMS - 失真是可以重复出现的（相同设定下，多次测量得到同样的结果） <p>解决方法:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 降低信号强度 |
| <p>测量结果被噪声破坏</p>  <p>Magnitude of electric impedance $Z(f)$</p> <p>Measurement 1 Fitted Measurement 2</p> <p>[Ohm]</p> <p>Frequency [Hz]</p> | <p>标准:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 低信噪比($< 30 \text{ dB}$) - 阻抗的估计值和测量值的吻合度很差 - 拟合误差高 RMS - 失真是可以重复出现的（相同设定下，多次测量得到同样的结果） <p>解决方法:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 增加信号强度 - 增加平均次数 - 使用更高灵敏度的电流传感器 |

5.3 机械参数测量

机械参数，如磁力因子 Bl 不能通过测量扬声器的电输入阻抗来确定。但是他们可以通过计算电参数的变化得到。这些变化来自已知的机械参数的扰动（见图 10），比如增加一个配重。

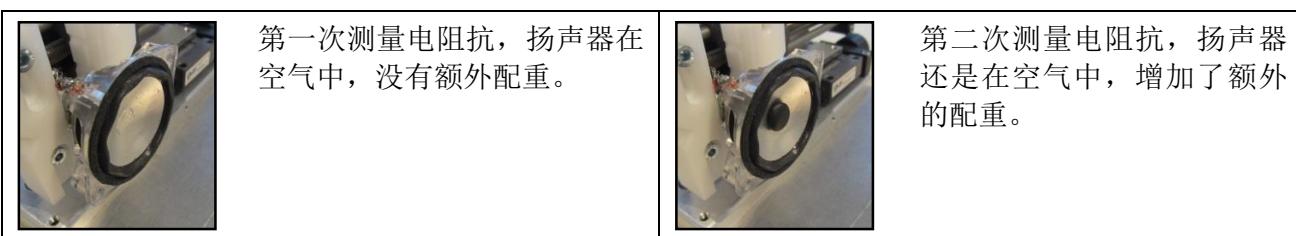


图 10: 用增加质量法来测量机械参数

5.3.1 增加质量法

分两次测量换能器的电参数，一次就换能器本身，一次在振膜上贴上配重，如图 10。结果见图 11，谐振频率向左偏移了（变小了）。

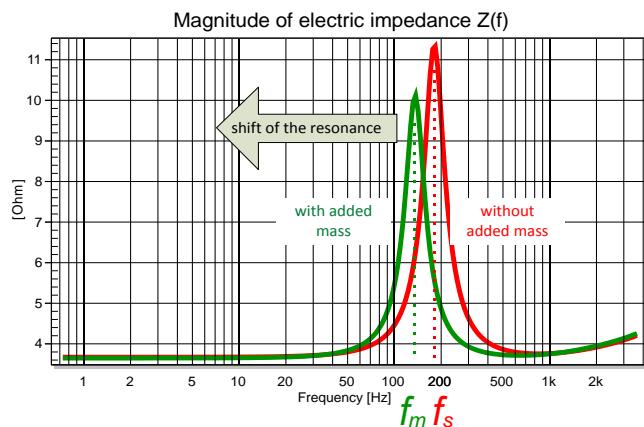


图 11: 增加配重法得到的输入阻抗测量结果

增加的配重 M_{add} 重量应该在测量得到的振动质量 M_{ms} 的 50% 到 100% 之间，这样能够使得谐振频率的偏移比较明显，又能在计算机械参数时候保证足够的精确。假定改变不影响机械损耗 R_{es} 情况下机械参数可以如表 6 中计算：

表 6: 用添加配重法计算机械参数

| | |
|--|--|
| 步骤 1: 用添加配重的扬声器的电气品质因数 Q_{em} 和 f_m 以及相应的没添加配重的扬声器的 Q_{es} 与 f_s ，以及添加的配重 M_{add} 来计算振动的质量 | $M_{ms} = \frac{M_{add}}{\frac{Q_{em}f_s}{Q_{es}f_m} - 1}$ |
| 步骤 2: 悬挂部分的柔度 | $C_{ms} = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 M_{ms}}$ |
| 步骤 3: 刚性是柔度的倒数 | $K_{ms} = \frac{1}{C_{ms}}$ |
| 步骤 4: 磁力因数描述了换能器的机械与电气耦合 | $Bl = \sqrt{\frac{2\pi f_s R_e M_{ms}}{Q_{es}}}$ |
| 步骤 5: 整个扬声器总损耗的机械阻抗 | $R_{ms} = \frac{2\pi f_s M_{ms}}{Q_{ms}}$ |

5.3.2 激光测量方法

增加配重法在小的扬声器上面不能使用，而且两次测量很耗时。我们可以只做一次测量就能得到这些机械参数，这需要一个额外的传感器，比如三角激光器，见图 12。

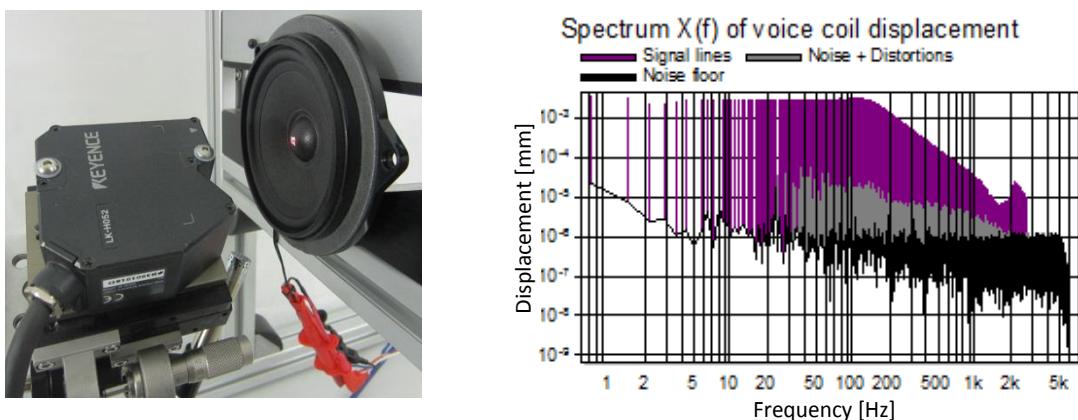


图 12: 三角激光器（左）和位移信号的频谱（右）

激光测量可以用于任何换能器，唯一条件就是激光能照射到换能器振膜。多音频信号的位移频谱可以分开非线性失真（图 12 中灰色谱线）和背景噪声。

通过集中参数计算得到电压和位移的传递函数：

$$H_x(f) = \frac{X(f)}{U(f)} = \frac{Bl}{(R_e + Z_L(f))(K_{ms} + j2\pi f R_{ms} - (2\pi f)^2 M_{ms}) + j2\pi f (Bl)^2}$$

该传递函数与通过输出电压和位移传感器得到的传递函数相吻合。

本次训练课程中的集中参数模型假设悬挂可以通过一个恒定刚性系数 K_{ms} 来描述，这样在低频时幅值 $|H(f)|$ 也是一个常数。但是，实际中悬挂的黏弹特性会产生一种“蠕变效应”，这会导致在频率变低时刚性 $K_{ms}(f)$ 的减少和 $R_{ms}(f)$ 的增加（这个效应在图 13 中也可以看到，但是会在微型扬声器的训练课程中详细讲述）。

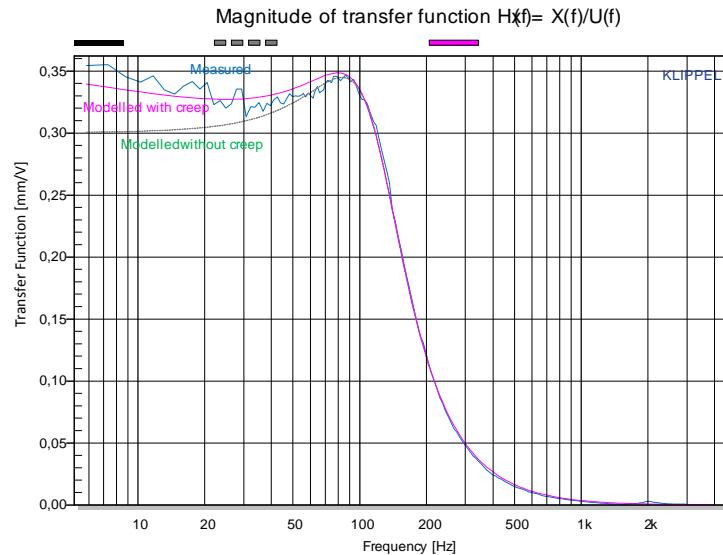


图 13: 通过集中参数建模和激光传感器测量的传递函数 $H_x(f)$ 的幅度（分为考虑和不考虑黏弹蠕变效应）

6 准备问题

在正式开始训练前，先确保你已经理解理论部分。请选择正确的答案，有时候答案不止一个。

QUESTION 1: 锥形扬声器的哪些部分能影响集中参数 R_e ?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 终端、绞线
- MC c:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC d:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC e:** 折环、定心支片

QUESTION 2: 锥形扬声器的哪些部分能影响集中参数 Bl ?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 终端、绞线
- MC c:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC d:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC e:** 折环、定心支片

QUESTION 3: 锥形扬声器的哪些部分能影响集中参数 M_{ms} ?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC c:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC d:** 折环、定心支片

QUESTION 4: 锥形扬声器的哪些部分能影响集中参数 C_{ms} ?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC c:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC d:** 折环、定心支片

QUESTION 5: 哪些机械参数与 C_{mes} 有关, C_{mes} 表示了电学领域的振动质量?

- MC a:** 磁力因数 Bl
- MC b:** 柔度 C_{ms} 或者刚性 K_{ms}
- MC c:** 振动质量 M_{ms}
- MC d:** 机械阻抗 R_{ms}

QUESTION 6: 扬声器哪些部分影响电容 C_{mes} ?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 终端
- MC c:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC d:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC e:** 折环、定心支片

QUESTION 7: 哪些机械参数与 L_{ces} 有关, L_{ces} 表示电学领域的柔度?

- MC a:** 磁力因数 Bl
- MC b:** 柔度 C_{ms} 和刚性 K_{ms}

- MC c:** 振动质量 M_{ms}
- MC d:** 机械阻抗 R_{ms}

QUESTION 8: 扬声器哪些部分能影响电感 L_{ces} , L_{ces} 表示了电学领域的机械柔度?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 终端、绞线
- MC c:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC d:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC e:** 折环、定心支片

QUESTION 9: 扬声器哪些部分能影响阻抗 $Z_L(f)$, $Z_L(f)$ 表示了高频下的音圈电感?

- MC a:** 音圈、音圈骨架
- MC b:** 终端、绞线
- MC c:** 振膜、防尘罩
- MC d:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC e:** 折环、定心支片

QUESTION 10: 锥形扬声器的哪些部分影响到了谐振频率 f_s ?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 终端、绞线
- MC c:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC d:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC e:** 折环、定心支片

QUESTION 11: 锥形扬声器的哪些部分能影响品质因数 Q_{ms} , Q_{ms} 仅仅表示机械阻尼?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 终端、绞线
- MC c:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC d:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC e:** 折环、定心支片

QUESTION 12: 锥形扬声器的哪些部分能影响总品质因数 Q_{ts} ?

- MC a:** 音圈
- MC b:** 终端、绞线
- MC c:** 振膜、防尘罩、音圈骨架
- MC d:** 磁铁、导磁上板、导磁下板、导磁柱
- MC e:** 折环、定心支片

7 解读线性参数实验结果 (不需要硬件)

- Step 1: 观看 www.klippel.de/training 中的演示视频 *Linear Lumped Parameter Measurement* 来看如何操作一个实际的线性集中参数的测量实验。
- Step 2: 在电脑上安装 KLIPPELR&D 的软件 *dB-Lab* 并且下载相应的数据库。
- Step 3: 用 *dB-Lab* 打开文件 **Training 1 Linear Lumped Parameter Measurement.kdbx**。
- Step 4: 在 *dB-Lab* 中打开测试对象  **'1 Woofer 4inch in free air**。其中包含有一系列一个小低音扬

声器在空气中用激光测量法得到的线性参数测量（LPM）实验结果。

Step 5: 点击第一个实验 **1a LPM 0.005V** 并且在菜单栏下面点击 “Properties”（属性）来观察实验设置（电压、频率、平均数）。

建议：最好能离线完成接下来的练习，将多选题的答案写在一张纸上。

7.1 找到信号最佳的电压大小

QUESTION 13: 为什么线性集中参数的测量要求信号强度很低？

- MC a:** 为了保护换能器，防止过载造成永久性伤害。
- MC b:** 换能器的线性模型仅仅在音圈位移很小的情况下成立，这时扬声器的非线性影响可以被忽略。
- MC c:** 为了保护耳朵。

QUESTION 14: 什么能保证换能器工作在线性区域（换能器被连接于一个普通低输出阻抗的功率放大器）？

- MC a:** 信号的电压应该小于厂商标注的换能器允许的最大电压。
- MC b:** 谐振频率处的输入电流信号的非线性失真应该比基频分量低 30dB。
- MC c:** 谐振频率处的终端电压信号的非线性失真应该比基频分量低 30dB。
- MC d:** 由信号产生的音圈最大位移量应该小于由厂商标注的最大的（线性）位移 X_{max} 。
- MC e:** 试验用的任何换能器的终端电压都必须要小于 1Voltrms。
- MC f:** 试验用的任何换能器中信号产生的最大位移都应该小于 1 mm。

QUESTION 15: 如何用多音频信号来区分非线性失真和测量中的噪声？

- MC a:** 信号分量间的差异（噪声和失真），基频分量和在无信号情况下测量得到的背景噪声显示了非线性失真。
- MC b:** 测量信号的波形显示了非线性失真。
- MC c:** 电阻抗($rmsZ_e(f)$)的拟合错误显示了非线性失真。

Step 6: 查看实验 **1a, 1b** 和 **1c**（分别采用不同电压设置 0.005 V, 0.8 V, 和 0.1 V）的结果。在结果窗口“**Current (f) Spectrum**”中，通过比较基频信号的谱线与“噪声+失真”（*Noise + Distortion*）谱线以及“背景噪声”（*Noise Floor*）谱线来评估非线性失真和噪声的级别。

QUESTION 16: 哪个电压值对于测量数据库中低音单元的小信号线性参数最好？

- MC a:** 高电压值 $U=0.8\text{ V}$, 保证了最佳的信噪比（SNR）。
- MC b:** 中等电压值 0.1 V , 产生很小的非线性失真同时能保证可接受的信噪比。
- MC c:** 低电压值 0.005 V , 确保非线性失真尽可能小。

Step 7: 打开结果窗口“**Table Linear Parameters**”和“**Table Signal Characteristics**”并且比较三次实验的谐振频率 f_s 和位移的峰-峰值 X_{pp} 。

QUESTION 17: 测量得到的谐振频率 f_s 取决于位移的峰到峰值 X_{pp} 么？

- MC a:** 是，谐振频率会随着位移峰-峰值的增加而减少，因为悬挂在小信号情况下会因为粘弹效应（与蠕变效应类似）出现暂时的软化。
- MC b:** 不，谐振频率一直稳定并且和位移峰-峰值无关。

7.2 找到多频信号的最佳的频谱特性

Step 8: 检查实验 **2a, 2b, 2c** 和 **2d** 的结果，这里信号的频谱特性在变化。在结果窗口“**Table Linear Parameter**”中研究其对拟合错误 $rmse Z$ 和 $rmse Hx$ 的影响。

QUESTION 18: 多音频情况下如何调整上限频率 F_{max} ?

- MC a:** 如果描述损耗电感的参数(如 $Z_L(f)$)要在全音频频带上被识别, 那么 F_{max} 应该设置成 18kHz。
- MC b:** F_{max} 应该设置成 500Hz, 这样能满足任意换能器。
- MC c:** 如果机械参数的精确性比确定全音频频带的电感更加重要, F_{max} 应该设置为 $20f_s$ 。
- MC d:** F_{max} 的设置并不重要, 只要满足 $f_s < F_{max}$ 那么它就不会影响集中参数的测量。

QUESTION 19: 在多音情况下, 如何调整相对分辨率 (每倍频程中激发的谱线数) ?

- MC a:** 一个倍频程里面至少要有一条谱线才能提供给多音信号足够的激励。
- MC b:** 每个倍频程中有 16 条谱线就能提供足够的分辨率来描述电阻抗在谐振频率的最大值, 同时能保证音圈的最大位移尽可能小 (减少非线性失真)。
- MC c:** 为了用最高分辨率来测量阻抗曲线, 多音信号中激发分量的密度应该尽可能高 (最少每倍频程 40 条)。

QUESTION 20: 如何保证直流阻抗 R_e 在测量中有足够的精确性?

- MC a:** 把 F_{max} 尽可能设置高, 以此来在高频段精确测量阻抗。
- MC b:** 在测量流入换能器中的电流信号时使用灵敏的传感器。
- MC c:** 用足够多的平均次数来提高监控的电压和电流的信噪比。
- MC d:** 电压设置到最佳来保证足够的信噪比和低失真率。
- MC e:** 足够的分辨率 (最少每倍频 16 条谱线) 来确保电流信号的最低的谱线在 1Hz 以上 (接近直流)。

QUESTION 21: 哪个实验使用了正确的信号来测量 8kHz 以下的低音扬声器参数?

- MC a:** 实验 2a LPM 500 用的是低于 500Hz 的低通滤波器得到的信号。
- MC b:** 实验 2b LPM 2.6k 用的是低于 2.6 kHz 的低通滤波器得到的信号, 这是考虑到电感的影响。
- MC c:** 实验 2c LPM 16k 用的信号能在高频段理想地得到有损电感。
- MC d:** 实验 2d LPM 2.6k res 1/3 oct 用的是低于 2.6 kHz 的低通滤波器得到的信号, 它的频谱分辨率足够确定机械分谐振频率。

7.3 找到最佳电感模型

Step 9: 选择实验  2c LPM 16k 并且观察结果窗口 “**Impedance Magnitude**”, “**Lossy Inductance**” 和 “**Table Linear Parameters**”。打开属性界面  “**Im/Export**”并且研究不同电感模型(*LR2*, *Wright*, *Leach*)的影响。在 “**Table Linear Parameters**”中利用 *rmse Z* 来研究拟合度的好坏。

QUESTION 22: 哪个电感模型让实验  2c LPM 16k 有最好的拟合?

- MC a:** LR2
- MC b:** Leach
- MC c:** Wright

QUESTION 23: 为什么最佳电感模型的选择如此重要?

- MC a:** 为了精确测量直流电阻 R_e
- MC b:** 为了精确测量谐振频率 f_s
- MC c:** 为了精确测量品质因数 Q_{ms} 和 Q_{es} , 这对于用激光法或者干扰法精确测量机械参数 (Bl , K_{ms} , M_{ms} , R_{ms}) 非常重要。

7.4 找到最佳的平均次数

QUESTION 24: 当 N=16 次时，信噪比能有多少 dB 的提升？

- MC a:** 12 dB
- MC b:** 24 dB
- MC c:** 6 dB

Step 10: 比较实验  3a, 3b, 3c 和 3d 并且考虑平均次数的影响。

QUESTION 25: 300Hz 以上，采用 16 次平均，信噪比 SNR 的测量结果的改善与理论值吻合么？

- MC a:** 是的，300Hz 以上，电流信号的信噪比改善了大约 6dB。
- MC b:** 是的，300Hz 以上，电流信号的信噪比改善了大约 12dB。
- MC c:** 是的，300Hz 以上，电流信号的信噪比改善了大约 24B。
- MC d:** 不，有些其他的与信号相关的干扰无法通过平均来减少。

QUESTION 26: 平均次数能减少换能器产生的非线性失真的大小么？

- MC a:** 可以，在低于或高于谐振频率 f_s 处产生的非线性失真可以通过平均来减少
- MC b:** 不行，换能器产生的非线性失真是可以重复出现的，不能用增加平均次数方法减少

7.5 增加配重法

Step 11: 检查实验  4 LPM added mas 的结果，该实验不用连接激光，而是用增加额外配重来测量机械参数。

QUESTION 27: 这个实验采用了有效的参数设置么？

- MC a:** 没有，增加的配重 M_{add} 太小了
- MC b:** 有，增加的重量 M_{add} 大小合适
- MC c:** 有，输入电流的失真比基频分量低 30dB 以上。

QUESTION 28: 激光法和增加配重法测量得到的集中参数有些差异，有哪些可能原因？

- MC a:** 配重的质量测量不精确。
- MC b:** 激光校准不精确。
- MC c:** 两次实验时候环境温度和湿度有明显的改变（因为两次实验有间隔）。
- MC d:** 换能器在没有配重和增加配重的情况下对相同的信号产生了不同的位移。
- MC e:** 配重没有粘牢在振膜上
- MC f:** 两次实验的静态（大气压）声压不同

QUESTION 29: 两种方法的优缺点是什么？

- MC a:** 激光方法只需要一步完成，更快。
- MC b:** 激光法能在小型换能器上使用，唯一要求就是振膜表面可以进行光学测量。
- MC c:** 激光法根据位移测量确定集中参数，不需要在终端测量电压和电流。

7.6 可能的操作错误

Step 12: 实验  5a, 5b 和 5c 有典型操作失误，把它们和前面正确的结果比较。

Step 13: 观察实验  5a，它的机械质量 M_{ms} 比之前实验  4 LPM added mass 的要高很多（使用同样的换能器）。

QUESTION 30: 下面哪个表述是对的？

- MC a:** 额外的配重会降低谐振频率 f_s 。
- MC b:** 激光传感器的校准有问题，导致了传递函数 $H_x(f)$ 的大小显著改变。这会影响所有的机械参数，但是电参数很精确。
- MC c:** 扬声器的导线接触不良，导致直流阻抗 R_e 增加。
- MC d:** 采用的电感模型不好，在高频段拟合效果很差。

Step 14: 观察实验  5b，其机械质量 M_{ms} 比之前的实验  4 LPM added mass 小很多。

QUESTION 31: 什么原因呢？

- MC a:** 激光传感器没有位移信号（基频分量和背景噪声相同）。
- MC b:** 激光照射出了问题（被阻挡了），导致在激光传感器的输出信号出现显著的失真，见结果窗口 $x(t)$ 里面的波形。
- MC c:** 没有在目标表面（振膜上）点一个白点，反射激光信号不够强。
- MC d:** 激光传感器不是垂直照在目标表面上（导致激光输出信号衰减，磁力因数 Bl 出现一个微小误差，但是没有造成激光信号的失真）。
- MC e:** 换能器没有紧紧夹在支架上（导致电阻抗出现额外的谐振频率）。

Step 15: 观察实验  5c，它的直流电阻 R_e 比之前的实验  4 LPM added mass 要稍微大一些（同样的换能器）。

QUESTION 32: 有什么可能的原因呢？

- MC a:** 换能器没有紧紧得垂直夹在支架上，导致阻抗曲线多了一个额外的谐振频率。
- MC b:** 扬声器导线接触不良，导致了短暂的信号中断。这些中断就导致了电流信号的失真，并且和基频分量的频谱分布相同（最小值在谐振频率 f_s ）。相反，换能器产生的电流非线性失真的最大值在谐振频率 f_s 。
- MC c:** 所选的电感模型不够好，在高频段不能很好地拟合电阻抗曲线。
- MC d:** 信号的电压太高了，换能器产生了显著的非线性失真，见结果窗口“*Current (f) Spectrum*”（失真最大值在谐振频率 f_s ）。

8 测量试验（需要硬件）

如果拥有 KLIPPEL 测量系统，那么最好能实际操作一次谐振频率小于 200Hz 的换能器（低音扬声器）的测量。当然这实验是可选的，其关注的是实际的扬声器操作能力和学习更多的测量技术。

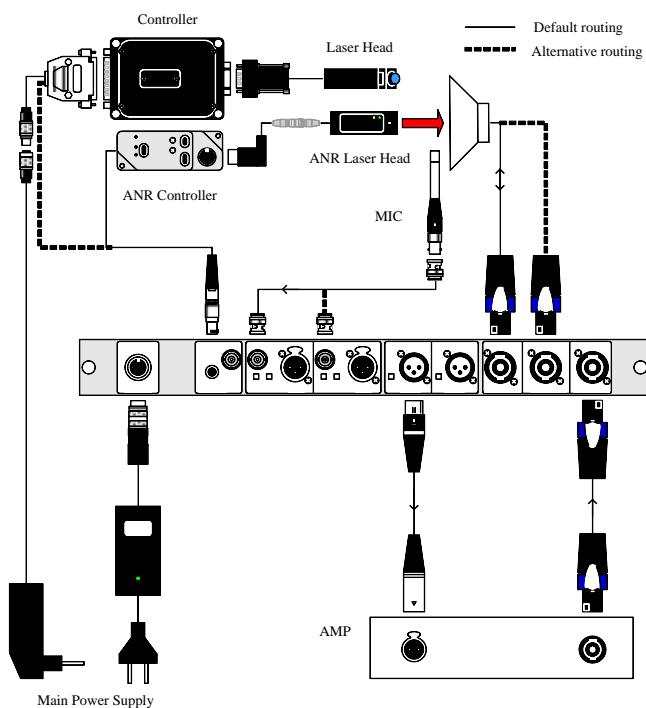


图 14: 线性参数测量试验 (LPM) 需要的硬件

8.1 设置硬件

在观看了演示视频 *Linear Lumped Parameter Measurement* 线性集中参数测量以后，按以下步骤，根据图 14 连接硬件：

- Step 16: 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 17: 连接放大器的输出端到 DA 的 Speakon 输入端 “**AMPLIFIER**”。
- Step 18: 用特制扬声器测量导线连接 DA 的 Speakon 输出端 “**Speaker 2**” 到扬声器的终端。
- Step 19: 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 20: 将失真分析仪 DA 前方的 **USB** 输入连接到电脑。
- Step 21: 打开失真分析仪的“**POWER**”后，点击“**ENTER**”来进入独立模式 stand alone mode。通过光标键↓ 和 ↑ 选到 **Displacement Meter** 然后再次点击“**ENTER**”。
- Step 22: 根据激光头类型进行校准：
 - a. 用螺纹千分尺来校准 Keyence 激光器：

调整激光头和一个固定目标的距离以确保激光头工作在其工作范围的中间段（绿灯在不再闪烁），此时显示屏显示一个距离 **X**，大小接近于 0。使用光标按钮→来选择距离测量“**D**”然后点击“**ENTER**”。选择菜单项“**ZERO**”并点击“**ENTER**”来启动相对与当前位置的测量。**D** 值应该接近于 0。然后通过转动螺纹千分尺把激光头朝目标移动 0.5mm (1 转 = 0.5 mm)，再看 **D** 值，这时候 **D** 值应该接近于正 0.5mm。

- b. 用参考阶梯来校准 ANR 激光器：

调整激光头和一个固定目标的距离以确保激光头工作在其工作范围的中间段（黄灯在不再闪烁），此时显示屏显示一个距离 **X**，大小接近于 0。使用光标按钮→来选择距离测量“**D**”然后点击“**ENTER**”。选择菜单项“**ZERO**”并点击“**ENTER**”来启动相对与当前位置的测量。**D** 值应该接近于 0。然后垂直移动激光头 10mm 到金属阶梯

的下一层梯，这层梯离激光头的距离近了 10mm。检查屏幕显示的测量差距 **D**。

如果有一个显著的差异（大于 5%）那么重复实验来确定结果。如果激光需要一个新的校准，请打开硬件操作指南，观看激光距离之激光校准部分 Guide/Laser Displacement Meter/Laser Calibration。

Step 23: 把换能器垂直紧紧夹在支架上，连接导线。

Step 24: 使激光束垂直照射到防尘罩中心。注意激光束附近不要有障碍物。

Step 25: 在目标振膜表面上涂抹一点白色（可以使用涂改液或者白色纸贴）。

Step 26: 把激光头调整到工作距离，这时候黄色灯（ANR 激光器）或者绿灯（Keyence 激光器）会亮着但不会闪烁。

8.2 用激光传感器测量

Step 27: 打开 R&D 系统的测量软件 dB-Lab。

Step 28: 创建一个新的数据库：点选“**Project**”→“**Select Database**”然后选择“**New**”。给该数据库起名字并选择存储位置，然后点选“**OK**”。

Step 29: 选择  来创建一个新的实验对象，起个适当名字。

Step 30: 选择  创建一个新的实验，并且选择 dB-Lab 提供的实验模板 **LPM Woofer T/S (Sp2)**。

Step 31: 右键单击这个实验选择属性“**Properties**”。

Step 32: 在驱动器 **Driver** 属性页面下填入驱动器的直径。

Step 33: 在信号 **Stimulus** 属性页面下确定一个合适的电压 **Voltage**。

Step 34: 检查 **Method** 属性页面下 **Using Laser** 被激活。

Step 35: 点  来启动实验。

Step 36: 查看电流、位移、和电压的信噪比和谱线的拟合度来检验实验结果。

如果实验设置不够完善，右键单击该实验并选择“**Duplicate**”进行复制。打开这个新实验的属性页面，然后改变设置，重复上面的实验过程直到有满意的结果。

8.3 用增加配重法测量

Step 37: 复制 LPM 实验，采用最佳信号设置并且重命名（比如 **LPMWoofer T/S added mass**）。

Step 38: 右键点击  选择属性“**Properties**”。

Step 39: 在 **Method** 属性页面下选择使用增加配重 **Using Additional Mass**。确保将 **Driver** 项设置在空气中 **in free air**。

Step 40: 点击  启动第一次实验。

Step 41: 检查测量结果，观察电流，位移和电压的信噪比和曲线的拟合度。

Step 42: 如果实验设置不完善，用右键点击实验，选择“**Duplicate**”进行复制，打开属性页面改变设置，然后重复步骤 Step40 到 42 以保证可信的结果。

Step 43: 将配重粘到振膜上，在 **Method** 属性页面中点选 **with mass** 并且设置添加的重量值。

Step 44: 点击开始第二次实验。

Step 45: 检查测量结果，观察电流，位移和电压的信噪比和曲线的拟合度。

Step 46: 如果实验设置不完善，用右键点击实验，选择复制“**Duplicate**”。打开属性页面改变设置，然后重复步骤 Step40 到 46。

8.4 测量结果验证

Step 47: 比较激光测量法和增加配重法的实验结果，找到有明显偏差的集中参数。

Step 48: 讨论偏差的原因。

Step 49: 检查硬件，信号属性和其他设定参数。

Step 50: 重复实验直到两次不相关的实验结果能互相吻合。

9 更多参考文献

KLIPPEL R&D SYSTEM用户手册– *Linear Parameter Measurement*

规范 S2 *Linear Parameter Measurement (LPM)*线性参数测量:

http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Bilder/Our_Products/R-D_System/PDF/S2_LPM.pdf

论文*Fast and accurate measurement of linear transducer parameters*快速且精确测量线性扬声器参数:

http://www.klippel.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Fast_and_Accurate_Linear_Parameter_Measurement_02.pdf

应用记录*Maximizing LPM Accuracy*最大化LPM精度:

http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Application_Notes/AN_25_Maximizing_LPM_Accuracy.pdf