

## 實用的訓練- 1

# 線性集中參數量測

## 1 本次實用訓練的目標

- 了解電動換能器的物理機制
- 應用集中參數進行模擬
- 使用傳統與新技術的方式進行集中參數之量測
- 在完成實務量測中發展技巧與進行試驗
- 解釋量測結果
- 偵測與避免量測誤差
- 

## 2 需求

### 2.1 與會者過去的知識背景

這個先期實用的訓練，主要針對具有機械、電機工程背景的學生或具有電聲工廠經驗的工程師。

### 2.2 最小的需求

與會者將會需要由 Klippel 資料庫中 *Linear Lumped Parameter Measurement.kdbx* 所提供的量測結果，而這些結果並不需要設定完整的 KLIPPEL 量測硬體。可從 [www.klippel.de/training](http://www.klippel.de/training) 下載 *dB-Lab* 並在 Windows 電腦中安裝相關軟體進行觀看。

### 2.3 功能需求

倘若與會者有 KLIPPEL R&D 量測系統，建議藉由指導員或其它與會者所提供的換能器進行量測。而為了完成量測，你也需要以下的軟硬體配合：

- 線性參數量測模組 (Linear Parameter Measurement Module ; LPM)
- 失真分析器 (Distortion Analyzer ; DA2)
- 雷射感測器 + 控制器
- 放大器
- 固定架 (Driver Stand)
- 

## 3 訓練過程

1. 閱讀相關理論並重新獲得本次訓練所須的知識
2. 觀看示範影片來學習實務量測的部分
3. 回答預備的問題藉以確認對於內容之了解有多少
4. 依循著教材來解釋說明資料庫內的結果以及回答複選的問題 (off-line)
5. 利用傳送你的回答到 [www.klippel.de/training](http://www.klippel.de/training) 網站上的匿名評分系統藉以確認你的答案
6. 將會收到內含有「**Certificate of Mastery, Knowledge or Participation**」的電子郵件 (依照參與者的表現)
7. 在有硬體的條件下針對換能器完成相關功能的量測

## 4 簡介

這個部分將概述基本的集中參數模擬。這些資訊對於完成本次訓練課程的實驗工作來說是相當必要的。以下剖面圖為常見使用在揚聲器系統中低音部分的電動換能器。

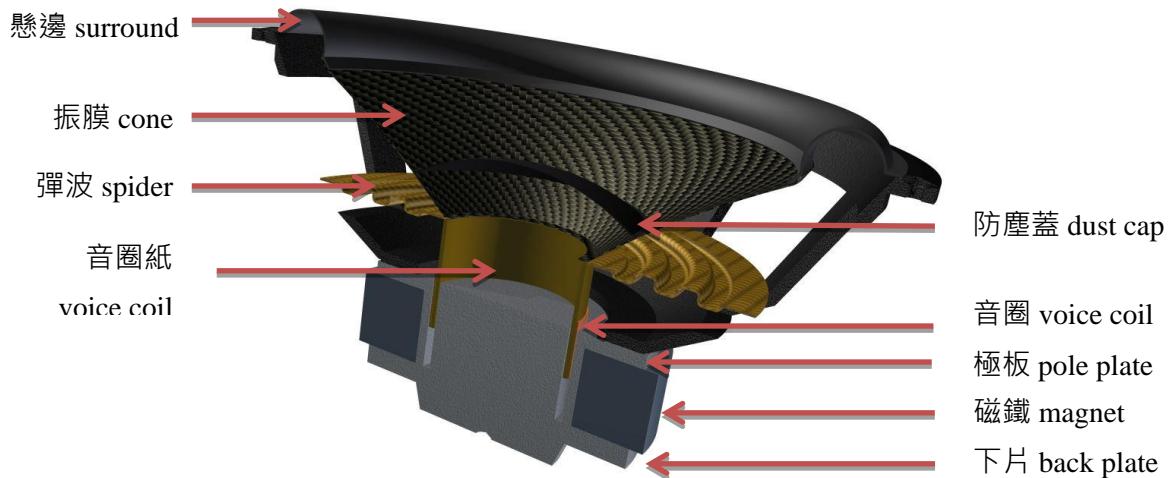


圖 1: 電動換能器剖面圖 (Isophon GmbH 所提供)

### 4.1 低頻段的機械模擬

由於低頻段相對的波長將遠大於換能器的幾何尺寸。因此，機械系統將可利用具有阻尼的質量-彈簧組合而成的集中參數系統加以模擬；此系統表示於以下圖 2.

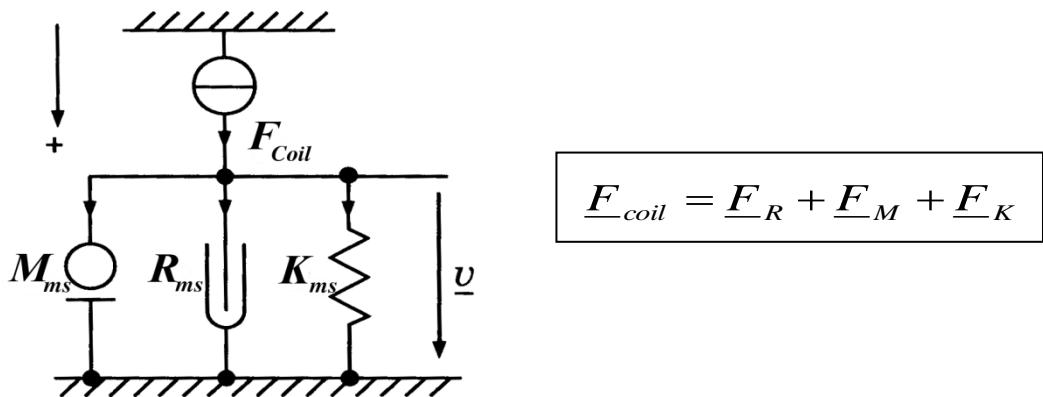


圖 2: 揚聲器的機械系統

此種系統中，振膜、防塵蓋、音圈紙以及機械懸吊振動部分的質量都將集中成為一個單點質量( $M_{ms}$ )的型式表示。這個質量所產生的慣性( $F_M$ )將正比於加速度( $a$ )以及位移( $x$ )的二次微分。音圈的位移( $x$ )也會導致懸吊系統的變形，進而產生一個回復力( $F_k$ )。這力會驅使音圈回到原始平衡位置( $x=0$ )。在小訊號範圍內，力與變形的曲線可利用一條相對於懸吊系統勁度( $K_{ms}$ )的斜率來近似表示。機械阻抗( $R_{ms}$ )會導致一個與速度( $v$ )成正比的阻尼力( $F_R$ )以及對於其它力( $F_M$ 與  $F_k$ )的一個垂直分量。

表 1: 機械力的概數

力	換能器的物理部分	基本的關係
所有的驅動力 $F_{coil}$	音圈 + 磁鐵系統	$F_{coil} = F_R + F_M + F_K$
摩擦力 $F_R$	機械與聲學元件的摩擦損失	$F_R = R_{ms} \cdot \underline{v}$ 機械阻 $R_{ms}$ , 速度 $\underline{v}$
慣性 $F_M$	移動的質量：振膜、懸邊、音圈、彈波、音圈紙、移動的空氣	$F_M = M_{ms} \cdot \underline{a} = M_{ms} \cdot j2\pi f \underline{v}$ 移動質量 $M_{ms}$ , 加速度 $\underline{a}$ , 頻率 $f$ 以及複數運算子 $j = \sqrt{-1}$
回復力 $F_K$	彈波與懸邊的變形	$F_K = K_{ms} \cdot \underline{x} = K_{ms} \cdot \frac{\underline{v}}{j2\pi f}$ 勁度 $K_{ms}$ , 位移 $\underline{x}$

機械導納( $H_{mech}(f) = \underline{v} / F_{coil}$ )描述複雜的速度( $\underline{v}$ )與所有驅動力( $F_{coil}$ )比值。這個比例是一個頻率的函數，而且將會在共振頻率點達到最大值。

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

其中回復力與慣性力的總合為  $(F_K + F_M = 0)$ 。表 2 說明了頻率與機械導納間的關係。

表 2: 機械導納的頻率關係

頻率案為	機械阻抗	控制力
$f \ll f_s$	$H_{mech}(f) \approx \frac{j2\pi f}{K_{ms}}$ (勁度所主導)	$F_{coil} \approx F_K$ (驅動力與回復力相同)
$f = f_s$ (共振頻率)	$H_{mech}(f) = \frac{1}{R_{ms}}$ (阻所主導)	$F_{coil} = F_R$ , (驅動力補償磨擦損失)
$f \gg f_s$	$H_{mech}(f) \approx \frac{1}{j2\pi f M_{ms}}$ (移動質量所主導)	$F_{coil} \approx F_M$ (驅動力與慣性力相同)

## 4.2 電動原理

使用電動原理的換能器將產生一個勞侖茲力(Lorentz force ;  $F_{coil} = Bli$ )。這個力將會垂直於由磁場密度(電感  $B$ )所形成的平面以及具有音圈長度為( $l$ )的的電流( $i$ )。同時，音圈的速度將產生一個反感應電動式(Electro Motive Force ; EMF ;  $Blv$ )。因此，電動換能即可表示成一個耦合常數的轉換( $Bl$ )；如圖 3

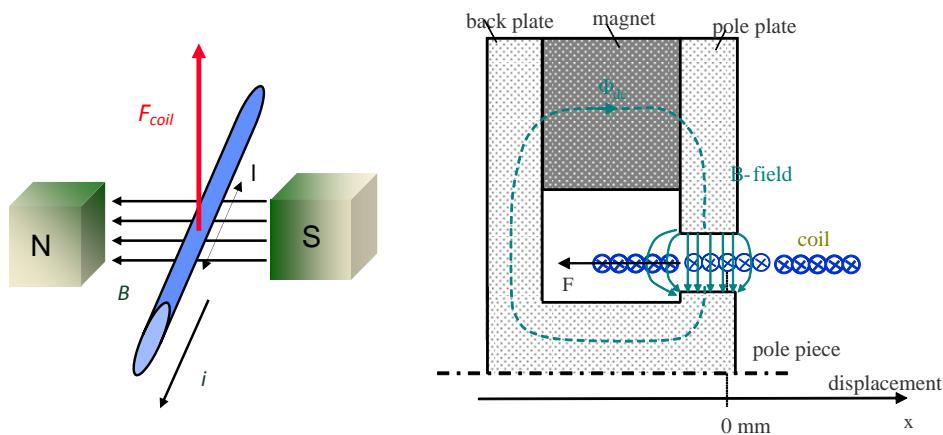


圖 3: 電動換能原理

圖 4 中等效電路的右邊是圖 2 中的機械部分；而左手邊的部分則為音圈電的性質，此部分將在以下電的輸入阻抗中( $Z_e(f)$ )進行討論。

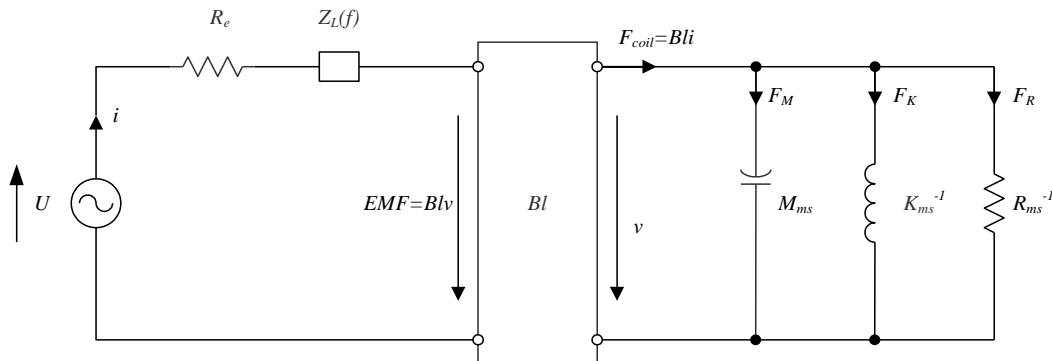


圖 4: 電動換能器的機電等效電路

### 4.3 電的輸入阻抗

電的輸入阻抗中( $Z_e(f)$ )是一個複雜的電壓( $u$ )與端子輸入電流( $i$ )比值。圖 5 中顯示的大小 $|Z_e(f)|$ 展現了傳統在共振頻率( $f_s$ )的峰值表現，從電的角度來說，這個頻率點與機械導納成正比的關係。

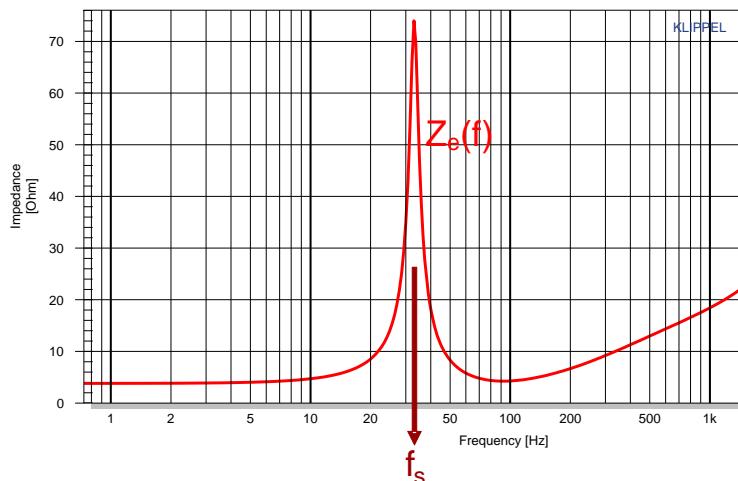


圖 5: 量測到的電阻抗與頻率間的關係

在低頻段而言，可以忽略速度( $v$ )的部分， $|Z_e(f)|$ 的大小將與音圈的電氣直流阻抗相同。然而，在高頻段( $f > f_s$ )，音圈電感與極片上渦電流所造成的額外損失對於 $|Z_e(f)|$ 而言將會產生一個額外的增量。

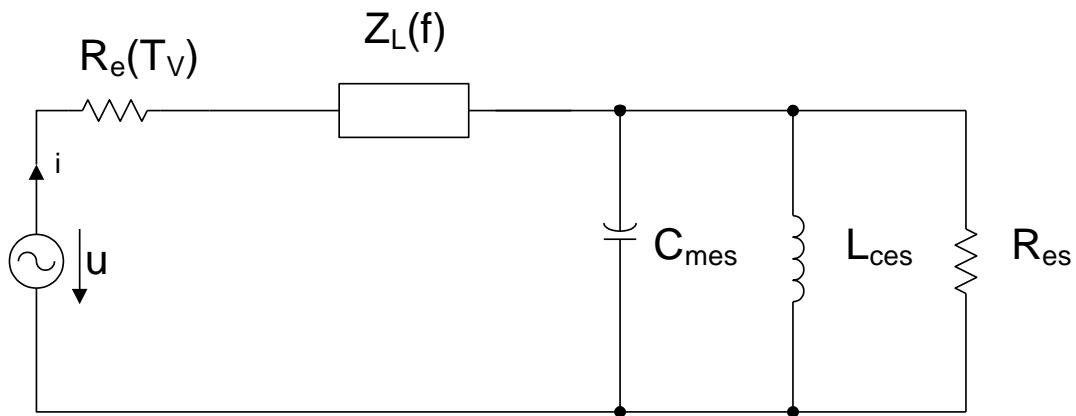


圖 6：電的等效電路

圖 6 顯示利用表 3 相關的電參數所組成的等效電路，可用來模擬電的輸入阻抗( $Z_e(f)$ )。

表 3：電等效電路的基本參數

$R_e$	直流音圈阻抗	$R_e =  Z_e(f=0) $
$Z_L(f)$	利用不同電感模型(Leach, LR2, Wright, ...)描述音圈 lossy inductanc 的電阻	近似 $ Z_L(f)  \approx L_e j 2\pi f$
$C_{mes}$	代表移動質量( $M_{ms}$ )的電容	$C_{mes} = \frac{M_{ms}}{(Bl)^2}$
$L_{ces}$	代表機械柔順度( $C_{ms}$ )的電感	$L_{ces} = C_{ms} (Bl)^2$
$R_{es}$	代表機械摩擦損失( $R_{ms}$ )的電阻	$R_{es} = \frac{(Bl)^2}{R_{ms}}$

這些變數將衍伸部分重要的參數，整理如表 4。

表 4：從基本變數所衍伸的重要相關參數

$f_s$	機械質量-彈簧系統的共振頻率 (彈簧力 $F_K$ 與慣性力 $F_M$ 相等)	$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{mes} L_{ces}}}$
$Q_{es}$	代表共振電路電阻的電品質因子	$Q_{es} = 2\pi f_s C_{mes} R_{es}$
$Q_{ms}$	代表單純機械磨擦損失的機械品質因子	$Q_{ms} = 2\pi f_s C_{mes} R_{es}$
$Q_{ts}$	考慮機械與電損失的總品質因子	$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$

## 5 參數識別

對於將常見的換能器模型應用到較特別的換能器中並進行模擬與量測行為的差異評估時，所使用的集中參數應越少越好。

### 5.1 電阻抗的量測

在換能器端子上量測到的電阻抗( $Z_e(f)$ )是評估表 3&4 中相關電參的基礎。換能器端子的電壓(輸入訊號)以及從揚聲器連結到具有低輸出阻抗(電壓驅動)的功率放大器的電流(輸出訊號)皆可利用任何訊號激發訊號獲得。電阻抗是一個線性的轉換函數，並且忽略揚聲器所產生的失真。因此在足夠的訊噪比(signal to noise ratio ; SNR)前提下量測時，激發訊號的振幅不能太大。為了符合上述的需求，常見的訊號方式乃採用稀疏的多頻複雜訊號(multi-tone complex)針對在一個對數分佈的離散頻率下進行電阻抗的量測。並將激發的頻譜功率集中在每個音程(octave)中的 16-30 條線上，藉以改善訊噪比；如此利用提高阻抗曲線的解析度的方式進而確保參數的可靠度。

圖 7 中的藍色線代表在端子量測到的基頻電壓頻譜(多頻電壓)；灰色線則代表在每個激發頻率線中量測到的噪音與失真；黑色線則是在訊號沒有被激發的前提下所獲得的噪音大小。而圖中顯示灰色與黑色線幾乎相同，此現象及代表中率放大器所產生的電壓訊號具有相當低的非線性失真。而量測到的阻抗大小必須在訊噪比大於 40 dB(SNR > 40 dB)的條件下，此結果才具有可靠度；此訊號比的大小可藉由增加平均的次數( $N$ )來提高，其公式如下：

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

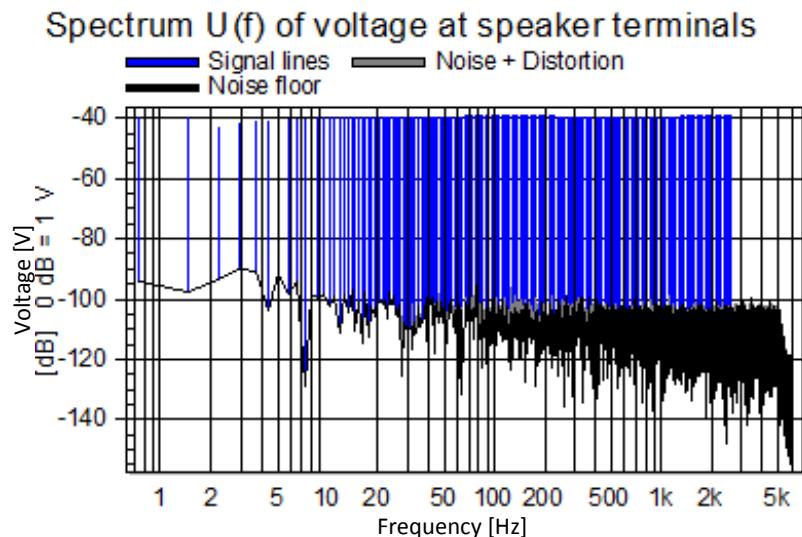


圖 7：利用激發多頻訊號量測到的電壓頻譜

圖 8 紅色線顯示量測到電流訊號頻譜的基頻部分；圖中可發現，在共振頻率( $120$  Hz ;  $f_r$ )所顯示的凹陷或稱谷(dip)，其在圖 5 阻抗曲線中為峰值(peak)的特性表現。灰色線為噪音與失真的部分，此線在共振頻率點處高於黑色線的部分；這的特性代表了揚聲器的失真行為。然而，由於此時的訊噪比大於 30dB，因此這個訊號比的大小是確保量測結果是否具有可靠性的依據。

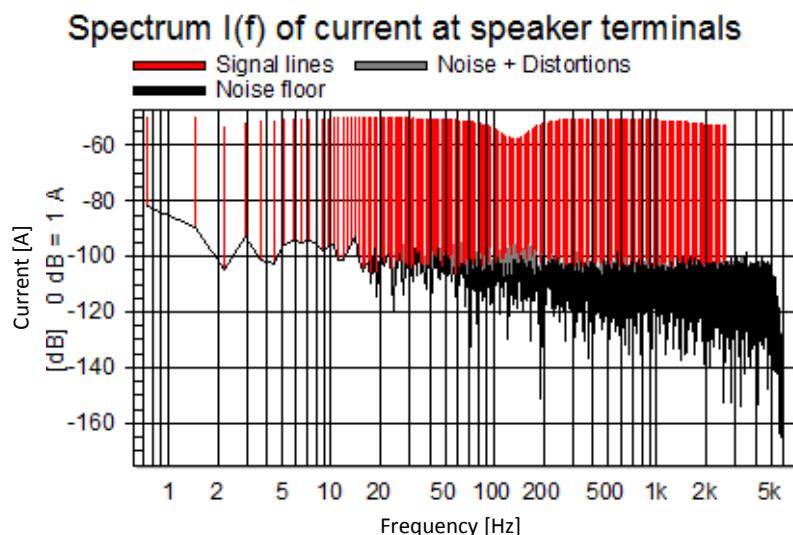
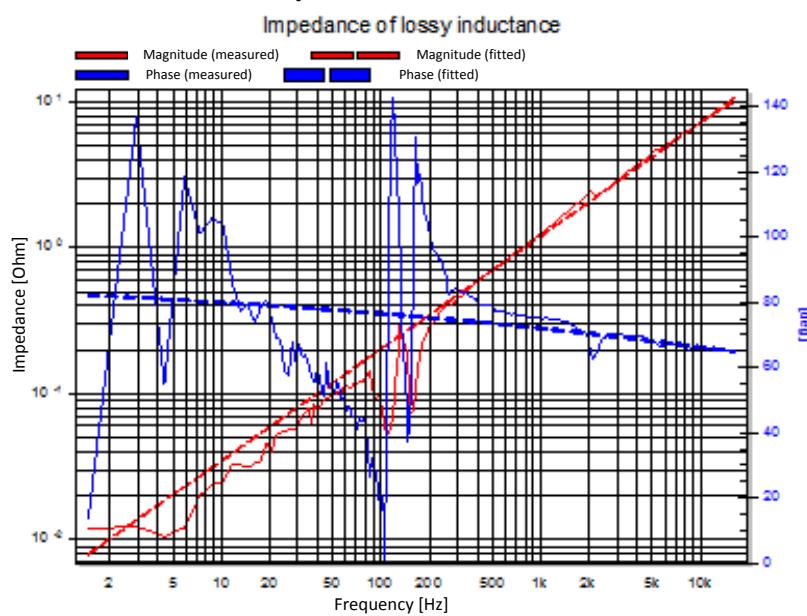


圖 8：利用激發多頻訊號量測到的電流頻譜

## 5.2 電感損耗(lossy inductance)所造成的阻抗

在極片上，音圈產生的磁場將會感應渦電流(eddy currents)的產生，而這個渦電流會在高頻處產生一個明顯的熱傳機制。這個損失除了反應在直流阻抗外(DC resistance  $R_e$ )，也會隨著頻率的增加反應在電阻抗的實部。圖 9 顯示了 lossy inductance 的電阻( $Z_L(f)$ )大小與相位，這個電感損耗(lossy inductance)是在沒有直流電阻與反感應電動勢(back EMF)影響的條件下所產生的殘留電阻。 $Z_L(f)$ 的大小將會隨著每個音程小於 6 dB 的斜率增加，這個現象與理想電感雷同；而在 200 Hz 頻率以上相位逐漸趨於穩定保持在 70 度左右，這就由於高頻渦電流所造成的電損失；而在頻率小於 200 Hz 時，由於大小非常的小，因此造成相位相當混亂複雜(noisy)。

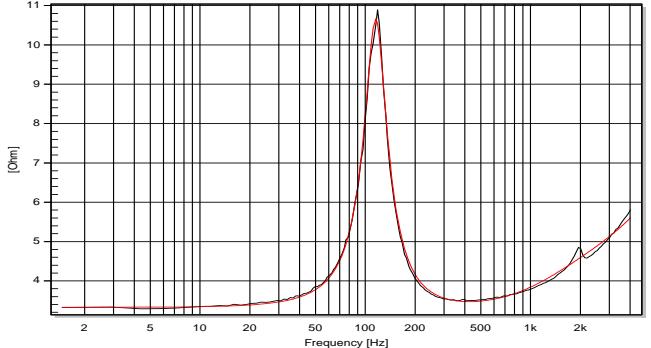
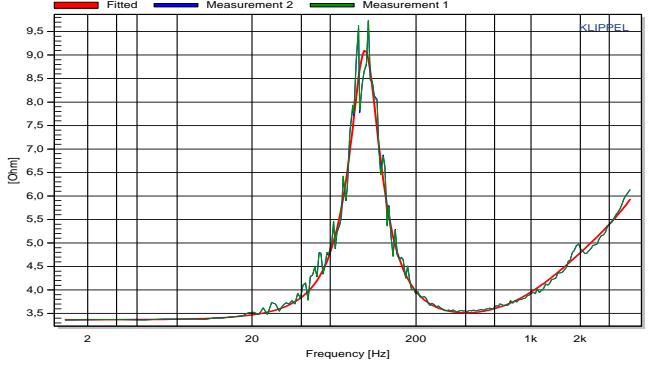
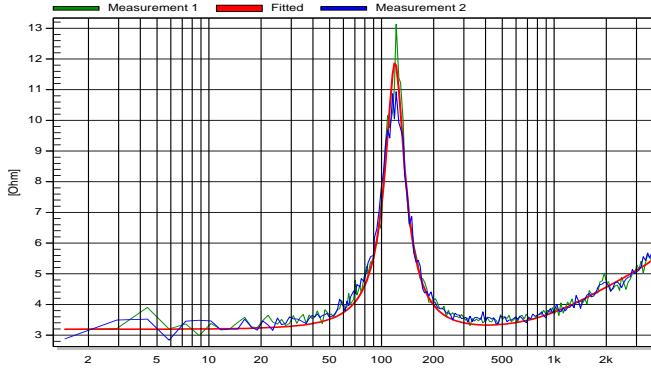
圖 9：音圈在高頻段所產生的電阻( $Z_L(f)$ )大小與相位

電阻( $Z_L(f)$ )只能利用理想電感概略地近似。而在高頻段，電阻可利用 LR2 模型加以模擬，此模型主要利用串聯第二個理想電感( $L_2$ )與電阻( $R_2$ )並且並聯( $L_2$ )的方式加以模擬。其它的數學模型如 Leach 與 Wright 則無法以電的 LR 電路代表之。

### 5.2.1 電阻抗的擬合

最後，集中參數模型中的相關參數可利用利用最小平方法處理量測與模擬結果獲得。而此方法所形成的殘餘誤差的來源可歸類為量測的噪音、非線性失真以及不夠貼近真實表現的模型所造成。為了確保訊噪比並且避免非線性失真的產生(表 5)，激發訊號的大小的調整要相當小心。

表 5：評估電阻抗的量測結果

<p>Good agreement between estimated and measured impedance curve</p> <p>Magnitude of electric impedance <math>Z(f)</math></p> 	<p>準則:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 好的訊號與失真比(&gt; 30 dB)] [Good signal to distortion ratio ]</li> <li>✓ 好的訊噪比(&gt; 30 dB)] [Good signal to noise ratio]</li> <li>✓ 擬合誤差均方根值低(&lt; 3 %) [Low fitting error RMS]</li> </ul>
<p>Measured curve corrupted by nonlinear distortion</p> <p>Magnitude of electric impedance <math>Z(f)</math></p> 	<p>準則:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 差的訊號與失真比 (&lt; 30 dB)]</li> <li>✓ 好的訊噪比(&gt; 30 dB)</li> <li>✓ 量測與模型預估的兩條阻抗曲線匹配性差</li> <li>✓ 擬合誤差均方根值高</li> <li>✓ 失真再生或重複出現 (在相同的設定下，經過在不同的量測方式會產生相似的結果)</li> </ul> <p>解決方式:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 降低激發訊號的大小</li> </ul>
<p>Measured curve corrupted by measurement noise</p> <p>Magnitude of electric impedance <math>Z(f)</math></p> 	<p>準則:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 差的訊號與失真比 (&lt; 30 dB)]</li> <li>✓ 量測與模型預估的兩條阻抗曲線匹配性差</li> <li>✓ 擬合誤差均方根值高</li> <li>✓ 失真再生或重複出現 (在相同的設定下，經過在不同的量測方式不會產生相似的結果)</li> </ul> <p>解決方式:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 增加激發訊號的大小</li> <li>✓ 增加平均次數</li> <li>✓ 使用高靈敏度的電流感測器</li> </ul>

### 5.3 機械參數的量測

透過量測揚聲器電的輸入阻抗無法確認如力轉換因子( $Bl$ )等機械參數。然而，這些機械參數可利用如圖 10 中所示，透過針對機械參數進行一已知的擾動所造成的相關電參數的變化進而計算獲得。



圖 10: 利用增加質量法量測機械參數

#### 5.3.1 增加質量法

利用在振膜上有無增加額外質量的方式，如圖 10，量測所獲得的電阻抗圖如圖 11，可明顯的獲得共振頻率的偏移情況。

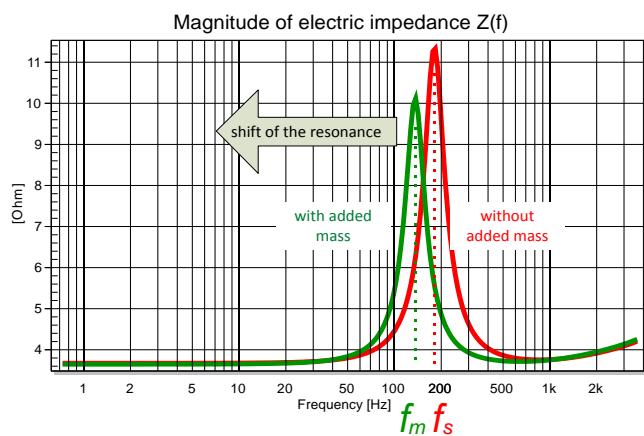


圖 11: 增加額外質量所量測到的輸入阻抗

所增加的質量( $M_{add}$ )必須在原本振動質量( $M_{ms}$ )的 50% ~ 100%；如此才能有完整的共振偏移以及完成正確的計算；相關參數如表。

表 6: 利用增加質量法計算機械參數

步驟-1: 利用有無增加額外質量所獲得的電品質因子( $Q_{em}$ & $Q_{es}$ )以及共振頻率( $f_m$ & $f_s$ )，搭配已知增加的質量( $M_{add}$ )，可獲得振動的質量( $M_{ms}$ )：	$M_{ms} = \frac{M_{add}}{\frac{Q_{em} f_s}{Q_{es} f_m} - 1}$
步驟-2: 懸邊的柔順度( $C_{ms}$ )：	$C_{ms} = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 M_{ms}}$
步驟-3: 勁度為柔順度的倒數：	$K_{ms} = \frac{1}{C_{ms}}$
步驟-4: 力耦合因子是描述換能器機械與電的耦合：	$Bl = \sqrt{\frac{2\pi f_s R_e M_{ms}}{Q_{es}}}$
步驟-5: 總驅動損失(total driver losses)的機械阻：	$R_{ms} = \frac{2\pi f_s M_{ms}}{Q_{ms}}$

### 5.3.2 雷測量測技術

增加質量法無用應用到較小的換能器，並且由於須經過兩次的量測，因此在處理上相當耗時。然而，利用額外的機械感測器，如利用三角雷射，並且只需要進行一次的量測，傳統的機械參數卻可以快速的獲得，如圖 12。

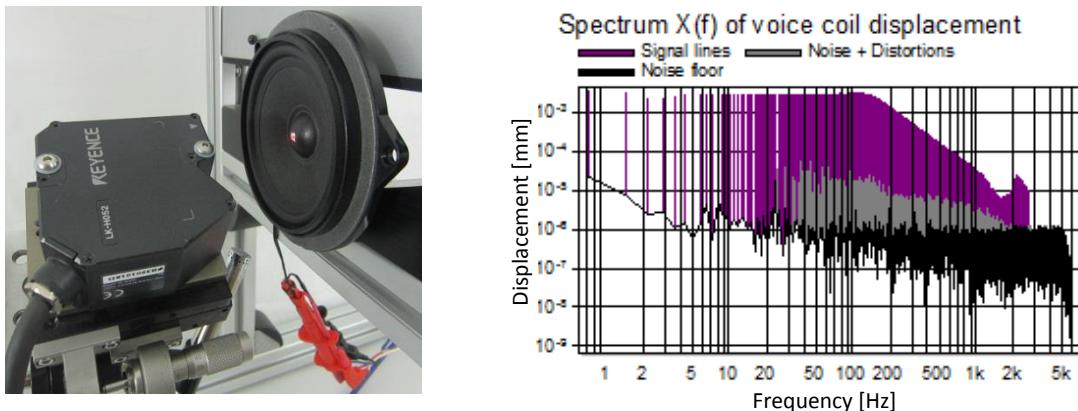


圖 12: 三角雷射感測器(左)；量測到的位移頻譜(右)

在任何光學感測器可感測到換能器振膜的條件下，雷射的量測皆可應用。利用多頻訊號的形式所感測到的位移頻譜可分離非線性失真(圖 12 灰色線)與底噪(noise floor)。

電壓與位移間的轉換函數如下：

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

利用集中參數模型的計算結果與利用輸出的電壓與位移感測器所得到的轉換函數兩者相擬合。

此次的訓練課程中所採用的集中參數模型將懸吊系統的勁度( $K_{ms}$ )假設為一個常數，如此可知在低頻段中相對應的轉換函數( $H(f)$ )大小也將為一個常數。然而，在真實懸吊系統中，其存在的粘彈性行為具有所謂的淺變效應(creep effect)，而此效應對於低頻段而言，將會導致勁度的下降以及阻的增加。(圖 13 也可以看到這個淺變效應，但詳細的說明將於本訓練課程中的微型揚聲器中(micro-speakers)加以說明。)

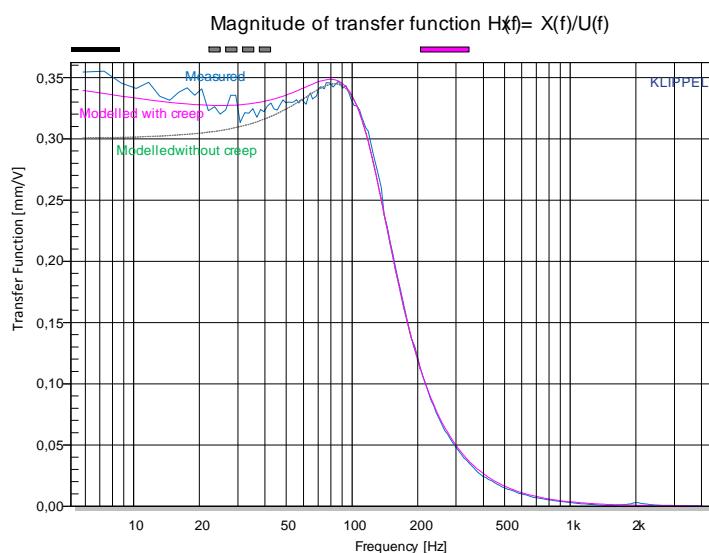


圖 13: 利用雷射感測器所量測到的轉換函數大小( $H_x(f)$ )以及利用集中參數模型欲測知結果(有無考慮淺變效應)

## 6 預備的問題

在開始此次訓練前請確認你的理論知識。針對以下的問題選擇正確的答案(有可能複選)。

**QUESTION 1:**對於錐形的揚聲器，哪一部份將會影響集中參數的直流阻抗( $R_e$ )？

- MC a:** 音圈[Voice coil]
- MC b:** 端子、litz 線[Terminals, litz wire]
- MC c:** 振膜、防塵蓋與音圈紙[Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC d:** 磁鐵、極板、背板與極片[Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC e:** 懸邊、彈波[Surround, spider]

**QUESTION 2:**對於錐形的揚聲器，哪一部份將會影響集中參數的力耦合因子  $Bl$ ？

- MC a:** 音圈[Voice coil]
- MC b:** 端子、litz 線[Terminals, litz wire]
- MC c:** 振膜、防塵蓋與音圈紙[Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC d:** 磁鐵、極板、背板與極片[Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC e:** 懸邊、彈波[Surround, spider]

**QUESTION 3:**對於錐形的揚聲器，哪一部份將會影響集中參數的  $M_{ms}$ ？

- MC a:** 音圈[Voice coil]
- MC b:** 振膜、防塵蓋與音圈紙[Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC c:** 磁鐵、極板、背板與極片[Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC d:** 懸邊、彈波[Surround, spider]

**QUESTION 4:**對於錐形的揚聲器，哪一部份將會影響集中參數的  $C_{ms}$ ？

- MC a:** 音圈[Voice coil]
- MC b:** 振膜、防塵蓋與音圈紙[Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC c:** 磁鐵、極板、背板與極片[Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC d:** 懸邊、彈波[Surround, spider]

**QUESTION 5:**哪一個機械參數與電領域中代表振動質量的  $C_{mes}$  有關？

- MC a:** 力耦合因子[Force factor  $Bl$ ]
- MC b:** 柔順度( $C_{ms}$ )或勁度( $K_{ms}$ )[Compliance  $C_{ms}$  or stiffness  $K_{ms}$  ]
- MC c:** 振動質量( $M_{ms}$ )[Moving mass  $M_{ms}$ ]
- MC d:** 機械阻( $R_{ms}$ )[Mechanical resistance  $R_{ms}$ ]

**QUESTION 6:**揚聲器的哪一部份會影響  $C_{mes}$ ？

- MC a:** 音圈[Voice coil]

- MC b:** 端子 [Terminals]
- MC c:** 振膜、防塵蓋與音圈紙 [Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC d:** 磁鐵、極板、背板與極片 [Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC e:** 懸邊、彈波 [Surround, spider]

**QUESTION 7:** 哪一個機械參數與電領域中代表柔順度的  $L_{ces}$  有關?

- MC a:** 力耦合因子 [Force factor  $Bl$ ]
- MC b:** 柔順度 ( $C_{ms}$ ) 或勁度 ( $K_{ms}$ ) [Compliance  $C_{ms}$  or stiffness  $K_{ms}$ ]
- MC c:** 振動質量 ( $M_{ms}$ ) [Moving mass  $M_{ms}$ ]
- MC d:** 機械阻 ( $R_{ms}$ ) [Mechanical resistance  $R_{ms}$ ]

**QUESTION 8:** 揚聲器中哪一個部份會影響電領域中代表柔順度的  $L_{ces}$ ?

- MC a:** 音圈 [Voice coil]
- MC b:** 端子、litz 線 [Terminals, litz wire]
- MC c:** 振膜、防塵蓋與音圈紙 [Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC d:** 磁鐵、極板、背板與極片 [Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC e:** 懸邊、彈波 [Surround, spider]

**QUESTION 9:** 揚聲器中哪一個部份會影響高頻段音圈 lossy inductance 所造成的阻抗  $Z_L(f)$ ?

- MC a:** 音圈 [Voice coil]
- MC b:** 端子、litz 線 [Terminals, litz wire]
- MC c:** 振膜、防塵蓋與音圈紙 [Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC d:** 磁鐵、極板、背板與極片 [Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC e:** 懸邊、彈波 [Surround, spider]

**QUESTION 10:** 揚聲器中哪一個部份會影響共振頻率  $f_s$ ?

- MC a:** 音圈 [Voice coil]
- MC b:** 端子、litz 線 [Terminals, litz wire]
- MC c:** 振膜、防塵蓋與音圈紙 [Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC d:** 磁鐵、極板、背板與極片 [Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC e:** 懸邊、彈波 [Surround, spider]

**QUESTION 11:** 錐形的揚聲器的哪一個部份會影響單獨代表機械阻尼的品質因子  $Q_{ms}$ ?

- MC a:** 音圈 [Voice coil]
- MC b:** 端子、litz 線 [Terminals, litz wire]
- MC c:** 振膜、防塵蓋與音圈紙 [Cone, dust cap, voice-coil former]

- MC d:** 磁鐵、極板、背板與極片[Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC e:** 懸邊、彈波[Surround, spider]

**QUESTION 12:** 錐形的揚聲器的哪一個部份會影響總品質因子  $Q_s$ ?

- MC a:** 音圈[Voice coil]
- MC b:** 端子、litz 線[Terminals, litz wire]
- MC c:** 振膜、防塵蓋與音圈紙[Cone, dust cap, voice-coil former]
- MC d:** 磁鐵、極板、背板與極片[Magnet, pole plate, back plate, pole piece]
- MC e:** 懸邊、彈波[Surround, spider]

## 7 線線參數量測的解釋與說明(不需要硬體)

- Step 1: 觀看 [www.klippel.de/training](http://www.klippel.de/training) 網頁中所提供的示範影片中的 *Linear Lumped Parameter Measurement*，進而了解該如何完成一個實務的線性集中參數量測。
- Step 2: 在你的電腦中安裝 KLIPPEL R&D 軟體 *dB-Lab*，並下載與本次訓練相關的資料庫(database)。
- Step 3: 利用點擊檔案 *Training 1 Linear Lumped Parameter Measurement.kdbx* 開啟 *dB-Lab*。
- Step 4: 在 *dB-Lab* 中，打開測試主題 '1 Woofer 4inch in free air'，這個主題中包含了應用在空氣中小型低音揚聲器之 LPM 量測結果。
- Step 5: 點擊第一個功能或操作 **Ia LPM 0.005V** and 並且在選單調下點擊 “Properties”進入量測設定(電壓、頻率、平均)。

**建議:** 建議在無須硬體的條件(offline)下完成以下的練習並且將複選的答案註記在紙上!

### 7.1 找到最佳的激發電壓

**QUESTION 13:** 為何線性集中參數的量測現置在低振幅的情況?

- MC a:** 為了保護換能器避免過載與永久的損壞
- MC b:** 線性的換能器模擬只對於低音圈位移的情況有效(忽略非線性影響)
- MC c:** 為了保護操作者的耳朵

**QUESTION 14:** 要使得換能器工作在線性範圍內必須要確認哪些條件?

- MC a:** 換能器的激發電壓應該小於製造商所定義的最大容許電壓
- MC b:** 在共振頻率處點，輸入電流訊號所造成的非線性失真應該小於基頻成份的 30dB
- MC c:** 在共振頻率處點，端子電壓訊號所造成的非線性失真應該小於基頻成份的 30dB
- MC d:** 激發訊號所產生的音圈峰值位移應該小於製造商所定義的對大(線性)峰值位移  $X_{max}$
- MC e:** 換能器測試時，端子處的電壓應該小於 1 Volt rms
- MC f:** 換能器測試時，激發訊號所產生的峰值位移應該小於 1 mm

**QUESTION 15:** 利用多頻激發訊號時，要如何從量測噪音中區別分離出非線性失真？

- MC a:** 在訊號成份(Noise + Distortion)、基頻成份以及尚未激發所產生底噪(noise floor)代表了非線性失真
  - MC b:** 量測訊號的波形顯示了非線性失真
  - MC c:** 電阻(rms  $Z_e(f)$ )擬合的誤差代表了非線性失真
- Step 6: 確認不同電壓的結果， $\{ \text{Ia} : 0.005 \text{ V} \text{, Ic} : 0.8 \text{ V} \text{, Id} : 0.1 \text{ V} \}$ 。比較 **Current (f) Spectrum** 中基頻線與 *Noise + Distortion* 以及 *Noise Floor*，藉以評估非線性失真的大小。

**QUESTION 16:** 對於低音揚聲器線性小訊號參數的量測來說，使用哪一個電壓大小最好？

- MC a:**  $U = 0.8 \text{ V}$ (高電壓)提供了良好的訊噪比(SNR)
  - MC b:**  $U = 0.1 \text{ V}$ (中等電壓)且在可接受的訊噪比條件下，將產生微小的非線性失真
  - MC c:**  $U = 0.005 \text{ V}$ (低電壓)時，儘可能將非線性失真降到越小越好
- Step 7: 打開 **Table Linear Parameters** 結果視窗以及 **Table Signal Characteristics**，並與比較三種量測結果的共振頻率點( $f_s$ )與位移的峰值對峰值比(peak to peak displacement  $X_{pp}$ )。

**QUESTION 17:** 量測所得的共振頻率點( $f_s$ )是否與位移的峰值對峰值比相關？

- MC a:** 是的，在小訊號的條件下，由於懸吊系統受到類似於潛變現象的粘彈性效應所造成在時間上的軟化(temporal softening)，共振頻率會隨著位移的峰對峰值(peak to peak)增加而降低
- MC b:** 不，共振頻率將維持常數並且與峰值位移無關

## 7.2 找到 multi-tone 激發訊號的最佳頻譜性質

Step 8: 確認這些具有不同激發訊號頻譜特性的結果， $\{ \text{2a, 2b, 2c 與 2d} \}$ ；並且調查在結果視窗(**Table Linear Parameter**)所顯示之擬合誤差  $rmse Z$  與  $rmse Hx$  的影響

**QUESTION 18:** 在 multi-tone 的條件下，如何調整上限頻率( $F_{max}$ )？

- MC a:** 倘若為了確認描述 lossy inductance (e.g.  $Z_L(f)$ )的參數，則  $F_{max}$  應該設定到 18 kHz
- MC b:** 對任何的換能器而言， $F_{max}$  應該要設定到 500 Hz
- MC c:** 倘若確認正確機械參數的重要性遠高於電感的識別，則  $F_{max}$  應該設定到  $20f_s$
- MC d:** 在滿足  $f_s < F_{max}$  的條件下，設定  $F_{max}$  是不重要的，並且這樣的設定也不會影響到集中參數的量測

**QUESTION 19:** 在 multi-tone 的條件下，如何調整相對的解析度(每個音程中的激發數目)？

- MC a:** 為了提供足夠的激發條件，每個音程中最少要有 1 條激發線
- MC b:** 為了描述電阻的共振峰值時，每個音程中要有 16 條激發線(避免非線性失真的前提下，音圈的位移應該要越小越好)

- MC c:** 在量測阻抗曲線時，激發成份的密度應該越高越好(每個音程中至少要有 40 條激發線)

**QUESTION 20:** 該如何確保所獲得的直流阻( $R_e$ )具有一定的正確性?

- MC a:** 為了獲得正確高頻的電阻， $F_{max}$  應該越高越好
- MC b:** 應該要利用靈敏度較高的感測器量測流入換能器的電流訊號
- MC c:** 須要有足夠的平均數才能改善所監控的電壓與電流訊號之訊噪比(SNR)
- MC d:** 最佳化電壓的設定，藉以確保具有足夠的訊噪比以及低失真
- MC e:** 為了確保電流頻譜最低的訊號線位於 1 Hz 以下(接近直流)，須有足夠的解析度(每個音程至少 16 條激發線)

**QUESTION 21:** 哪一種量測方式可以獲得應用於 4 kHz 以下的低音揚聲器之機械參數?

- MC a:** 2a LPM 500 所使用的激發是利用低於 500 Hz 的低通濾波器
- MC b:** 2b LPM 2.6k 所使用的激發是利用低於 2.6 kHz 的低通濾波器，如此可考慮到電感的影響
- MC c:** 2c LPM 16k 所使用的激發條件是可獲得高頻 lossy inductance
- MC d:** 2d LPM 2.6k res 1/3 oct 所使用的激發利用低於 2.6 kHz 的低通濾波器，並且此種方式所提供的頻譜解析則以確認機械的共振
- MC e:** Operation 2d LPM 2.6k res 1/3 oct uses a stimulus which is low-pass filtered below 2.6 kHz and provides a spectral resolution which is sufficient to identify the mechanical resonance.

### 7.3 找到最佳的電感模型

Step 9: 選擇  2c LPM 16k 並且看一下的“**Impedance Magnitude**”, “**Lossy Inductance**”以及 “**Table Linear Parameters**”結果視窗。打開性質頁面  “**Im/Export**” 並且調查電感模型的影響 (Inductance Models ; LR2, Wright, Leach)。利用在“**Table Linear Parameters**”的 rmse Z 特性評估擬合的品質。

**QUESTION 22:** 在  2c LPM 16k 中，哪一種的電感模型具有最好的擬合結果?

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

**QUESTION 23:** 為何選擇最佳的電感模型是如此的重要?

- MC a:** 為了更精確的量測直流阻( $R_e$ )
- MC b:** 為了更精確的量測共振頻率( $f_s$ )
- MC c:** 為了更精確的量測品質因子( $Q_{ms}$  與  $Q_{es}$ )，這對於採用擾動或雷射的方式進而獲得正確的機械參數( $Bl, K_{ms}, M_{ms}, R_{ms}$ )來說都是很重要的

## 7.4 找到最佳的平均次數

**QUESTION 24:** 利用平均數達  $N=16$  的條件可改善多少 dB 的訊噪比?

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

Step 10: 比較  **3a, 3b, 3c and 3d** 並且了解平均數的影響

**QUESTION 25:** 對於 300 Hz 以上且採用  $N=16$  的平均數的條件下，量測到訊噪比的改善與理論值相同嗎?

- MC a:** 是的，在 300 Hz 以上，電流訊號的訊噪比有被改善約 6 dB
- MC b:** 是的，在 300 Hz 以上，電流訊號的訊噪比有被改善約 12 dB
- MC c:** 是的，在 300 Hz 以上，電流訊號的訊噪比有被改善約 24 dB
- MC d:** 不，有其它與激發有相關的變動無法利用平均數的方式有效進行抑制

**QUESTION 26:** 平均數會降低非線性失真的大小嗎?

- MC a:** 是的，在共振頻率( $f_s$ )左右兩邊的非線性失真可利用增加平均數的方式降低
- MC b:** 不，換能器所產生的失真是無法利用增加平均數的方式降低

## 7.5 增加質量法

Step 11: 確認  **4 LPM added mass** "的結果，這個操作是利用增加額外質量的方式下獲得機械參數(沒有連接雷射)

**QUESTION 27:** 是否採用了有效的設定方式來完成這個量測?

- MC a:** 不，所增加的質量太少( $M_{add}$ ).
- MC b:** 是的，所增加的質量( $M_{add}$ )是有效的.
- MC c:** 是的，在基頻成份以下，輸入電流的失真大於 30dB

**QUESTION 28:** 針對採用雷射以及增加質量法在集中參數結果上所造成差異性的可能原因為何?

- MC a:** 在將此增加質量放置於振膜前的量測方式有誤
- MC b:** 不正確的雷射校正
- MC c:** 在兩種量測時的室溫與濕度有明顯的差異(可能由於介於兩次量測停留的時間太長)
- MC d:** 在相同的激發條件下，有與沒有增加額外質量產生不同的峰值位移
- MC e:** 此增加質量並未確實固定到振膜上
- MC f:** 兩式量測時的大氣壓力產生變化

**QUESTION 29:** 兩種量測方式的優點與缺點為何?

- MC a:** 由於雷射的設定只需要一個步驟，因此採用雷射的量測速度較快

- MC b:** 只要振膜振動的面積足以產生有效的光學量測，雷射的方式皆可適用(微型換能器)
- MC c:** 雷射量測集中參數乃根據所量測到的位移，並不需要端子的電壓與電流

## 7.6 使用上可能發生的錯誤

Step 12: { **5a, 5b** 與 **5c**} 的操作是典型使用者所造成的誤差，故量測結果是不正確的。利用之前雷測所獲得的結果相比較。

Step 13: 檢查  **5a**，在相同的換能器條件下，此處的獲得的機械質量( $M_{ms}$ )遠高於  **4 LPM added mass** 的量測。

**QUESTION 30:** 以下乃一個敘述是正確的？

- MC a:** 換能器增加質量會降低其共振頻率( $f_s$ )
- MC b:** 採用不正確的雷射校正參數會導致轉換函數大小( $H_x(f)$ )產生明顯的偏移；這雖然可獲得精確的電參數，但卻將會影響所有機械參數
- MC c:** 端子的連接不良會導致直流阻( $R_e$ )的增加；而這將會影響所獲得的集中參數
- MC d:** 使用電感模型會降低高頻的擬合情況

Step 14: 檢查  **5b**，在相同的換能器條件下，此處的獲得的機械質量( $M_{ms}$ )遠低於  **4 LPM added mass** 的量測。

**QUESTION 31:** 上述的原因為何？

- MC a:** 雷射沒有訊號(基頻成份與底噪相同)
- MC b:** 光學的問題(微粒子)導致在雷射輸出訊號  $x(t)$  上產生明顯的失真(階梯式)
- MC c:** 沒有在目標表面採用白點的方式導致無法提供足夠的反射量
- MC d:** 雷射束並沒有與目標物垂直(導致雷射輸出訊號的衰點以及  $Bl$  因子的微量誤差，但對於雷射訊號並不會產生的失真)
- MC e:** 換能器並沒有確實固定在架上(導致電阻抗上產生額外的共振)

Step 15: 檢查  **5c**，在相同的換能器條件下，此處的獲得的直流電阻( $R_e$ )高於  **4 LPM added mass** 的量測。

**QUESTION 32:** 可能的原因為何？

- MC a:** 換能器並沒有確實固定在架上進而導致電阻抗上產生額外的共振
- MC b:** 線材與換能器端子的連接不良導致電訊號短時間的不連續，而這個不連續將會在電流訊號上產生失真並且具有如同基頻成份的頻譜分佈(共振頻率處達最小值)；相對地，換能器將會產生非線性失真，而在電流頻譜上的共振頻率處將會產生最大值
- MC c:** 所選擇的電感模型在電阻曲線高頻處無法具有良好的擬合情況
- MC d:** 激發電壓太高並且在結果視窗“*Current (f) Spectrum*”中顯示換能器非線性產生明顯的失真(在共振頻率點產生最大的失真)。

## 8 完成量測(需要硬體)

倘若有 KLIPPEL 量測系統，建議完成一個共振頻率為  $f_s < 200$  Hz 條件下的換能器實際量測。然而，當然這不一定是必要的，這樣的練習主要了解並學習實際量測上的技巧。

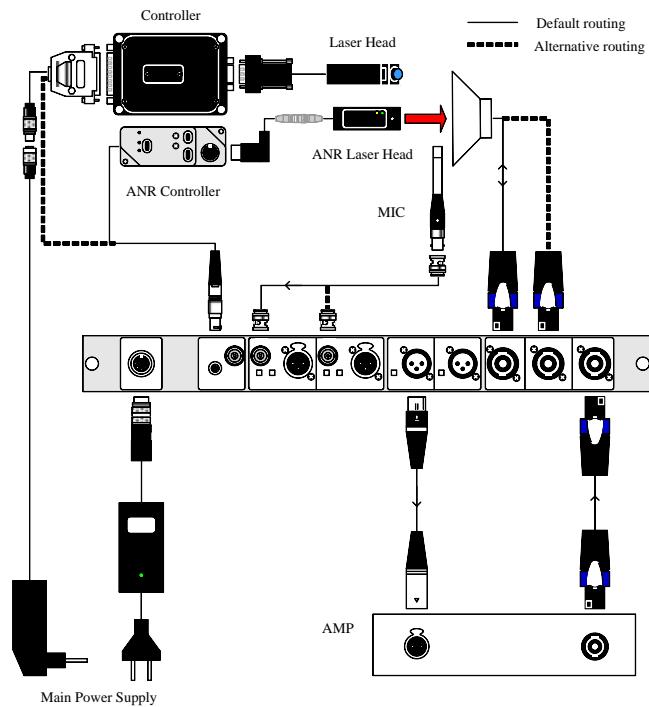


圖 14: LPM 量測所需的硬體

### 8.1 硬體設定

在觀看 *Linear Lumped Parameter Measurement* 的示範教學後，根據圖 14 以及以下的步驟進行相關硬體的連結：

- Step 16: 將在 *Distortion Analyzer (DA)*後面的 XLR **OUT1**，連結到放大器的輸入端。
- Step 17: 連結放大器的輸出端到 *DA Speakon* 的 **AMPLIFIER** 輸入。
- Step 18: 利用特製的揚聲器量測線材連結 *DA Speakon* 輸出 **Speaker 2** 到揚聲器的端子。
- Step 19: 連結雷射與雷測控制器，並且 Connect the laser head with the controller and link the LEMO plug of the controller into the **LASER** marked input on the rear side of the DA.
- Step 20: 連結在 *DA* 前端 **USB** 的到電腦。
- Step 21: 在打開 *DA* 的 **POWER** 後，按壓 **ENTER** 進入 *DA* 的獨立模式。利用按鍵移動滑鼠上下(↓ & ↑)到位移計(**Displacement Meter**)後按壓 **ENTER**。
- Step 22: 根據雷射形態選擇以下的方式進行雷射頭的校正：
  - a. 利用螺旋測微器校正 Keyence 雷射：

調整雷射頭與固定目標物的距離，進而使雷射在其工作範圍的中心位置(中點位置)：

LED 燈呈現綠色且無閃爍) , 並且位移顯示(X)接近於 0。利用游標鍵(→)選擇距離量測(D)後按 **ENTER**。選擇功能選單的 **ZERO** 並且按 **ENTER** , 藉以參考目前的位置進行不同的量測。此時 **D** 呈現的數值應該要接近 0。利用螺旋測微器(1 圈=0.5 mm)移動雷測感測器朝向目標物 0.5 mm 的距離 , 並且觀看所顯示的差異 **D**。注意 , 此差異應該為正的並且接近 0.5 mm 。

b. 利用參考階梯校正 ANR 雷射:

調整雷射頭與固定目標物的距離 , 進而使雷射在其工作範圍的中心位置(中點位置 : LED 燈呈現黃色且無閃爍) , 並且位移顯示(X)接近於 0。利用游標鍵(→)選擇距離量測(D)後按 **ENTER**。選擇功能選單的 **ZERO** 並且按 **ENTER** , 藉以參考目前的位置進行不同的量測。此時 **D** 呈現的數值應該要接近 0。在垂直的方向上移動雷測感測器 10 mm 到參考階梯的下一階 , 此動作代表縮短了雷射頭與目標物達 10 mm , 並且確認顯示的差異 **D** 。

倘若有明顯的誤差產生(> 5%) , 請重複量測置結果確認為止。假設雷射須要進行新的校正 , 請參閱手冊的說明 **Hardware Guide/Laser Displacement Meter/Laser Calibration** 。

Step 23: 將換能器牢牢的垂直固定在架上 , 並連結揚聲器線材到端子。

Step 24: 將雷射數垂直指向防塵蓋的中心 , 注意確保雷射束旁沒有其它微粒子的存在。

Step 25: 在目標物表面點上一個白色點(TippEx® 或者一個微小的白色標籤)

Step 26: 移動雷射頭到工作範圍的中心位置。確認 LED 燈的顏色(ANR-Laser : 黃色 ; Keyence-Laser : 綠色) , 並且確認此燈為穩定衡亮。

## 8.2 使用雷射進行量測

Step 27: 開啟 R&D 系統中的量測軟體 **dB-Lab** 。

Step 28: 新鍵一個新的資料庫: 點擊 “**Project**” → “**Select Database**” , 然後 “**New**” 。給資料庫一個新的名字 , 並且瀏覽檔案存放的位置後 , 點擊 “**OK**” 。

Step 29: 利用選擇  建立一個新的量測主題 , 並給定新的名字。

Step 30: 選擇  建立一個新的操作 , 並選擇由 **dB-Lab** 所提供的範本 **LPM Woofer T/S (Sp2)** 。

Step 31: 在此功能上點擊滑鼠右鍵並選擇 “**Properties**” 。

Step 32: 在性質頁面 **Driver** 中輸入揚聲器的 **Diameter** 。

Step 33: 在性質頁面 **Stimulus** 中輸入適合的電壓。

Step 34: 在性質頁面 **Method** 中確認所 **Using Laser** 。

Step 35: 點擊  開始量測。

Step 36: 觀看電流、位移與電壓的訊噪比 , 以及擬合曲線等量測結果。

倘若量測結果不好，在功能上點擊滑鼠右鍵並選擇 **Duplicate**；打開此操作的性質頁並改變設定。重複步驟 40 到 42，直到獲得滿意的結果為止。

### 8.3 使用增加質量法進行量測

- Step 37: 複製已完成最佳激發設定的 LPM 操作，並重新命名(如，**LPM Woofer T/S added mass**)
- Step 38: 點擊滑鼠右鍵的  功能選項並選擇 **Properties**。
- Step 39: 在性質頁面 *Method* 中選擇 **Using Additional Mass**，確定為空氣中量測。
- Step 40: 點擊  開始第一次量測。
- Step 41: 觀看電流、位移與電壓的訊噪比，以及擬合曲線等量測結果。
- Step 42: 倘若量測結果不好，在功能上點擊滑鼠右鍵並選擇 **Duplicate**；打開此操作的性質頁並改變設定。重複步驟 40 到 42，直到獲得滿意的結果為止。
- Step 43: 將欲增加的質量放置於振膜上，選擇 **with mass** 選項並在性質頁的 *Method* 中輸入質量。
- Step 44: 點擊  開始第一次量測。
- Step 45: 觀看電流、位移與電壓的訊噪比，以及擬合曲線等量測結果。
- Step 46: 倘若量測結果不好，在功能上點擊滑鼠右鍵並選擇 **Duplicate**；打開此操作的性質頁並改變設定。重複步驟 40 到 42，直到獲得滿意的結果為止。

### 8.4 量測結果驗證

- Step 47: 比較雷射與增加質量法的結果；利用集中參數找出兩者之差異。
- Step 48: 討論此差異的原因。
- Step 49: 確認硬體、激發訊號的性質以及其他設定的參數。
- Step 50: 重複量測，直到兩種方式皆可獲得令人滿意的結果為止。

## 9 更多的參考文獻

KLIPPEL R&D SYSTEM 使用手冊– *Linear Parameter Measurement*

Specification S2 *Linear Parameter Measurement (LPM)*:

[http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Bilder/Our\\_Products/R-D\\_System/PDF/S2-LPM.pdf](http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Bilder/Our_Products/R-D_System/PDF/S2-LPM.pdf)

Paper *Fast and accurate measurement of linear transducer parameters*:

[http://www.klippel.de/uploads/media/Fast\\_and\\_Accurate\\_Linear\\_Parameter\\_Measurement\\_02.pdf](http://www.klippel.de/uploads/media/Fast_and_Accurate_Linear_Parameter_Measurement_02.pdf)

Application Note Maximizing LPM Accuracy:

[http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know\\_How/Application\\_Notes/AN\\_25\\_Maximizing\\_LPM\\_Accuracy.pdf](http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Application_Notes/AN_25_Maximizing_LPM_Accuracy.pdf)