

## 培訓 4

# 揚聲器失真測量

## 1 培訓目标

- 對重要時針分析技術有一個總體認識。
- 理解產生主要非線性失真的條件。
- 研究激勵信號和狀態變量的影響。
- 解讀實驗結果（頻譜特性和時域特性）。
- 操作精確測量試驗，鍛煉實際操作能力。
- 優化量測設置。

## 2 實驗要求

### 2.1 預備知識

建議首先完成前面三個 *Klippel Trainings* 在開始本次培訓。

### 2.2 最小要求

學員需要 Klippel 數據庫 Training 4\_Loudspeaker Distortion Measurements.kdbx 提供的量測結果。本次培訓不需要使用 Klippel R&D 量測系統。數據庫可以用從 [www.klippel.de/training](http://www.klippel.de/training) 下載的 dB-Lab 打開觀看。

### 2.3 可選要求

如果學員有條件使用 Klippel R&D 量測系統，我們建議在換能器上做額外的實驗。為了能完成這些實驗，你需要以下硬件和軟件。

- 傳遞函數量測模塊（TRF）
- 3D 失真量測模塊（DIS）
- 失真量測儀（DA2）失真量測儀（DA2）
- 激光傳感器+控制器
- 放大器
- 支架

## 3 培訓过程

1. 閱讀教程
2. 看演示視頻
3. 回答預備問題
4. 依照教程，解讀數據庫中的結果並且離線回答多選問題
5. 上傳你的答案到匿名評價系統 [www.klippel.de/training](http://www.klippel.de/training)。
6. 收到一封郵件，包含了 **Certificate of Mastery, a Certificate of Knowledge** 或者 **a Certificate of Participation**（根據你的水平評價）。
7. 如果有硬件條件，在換能器上完成可選量測。

## 4 介紹

電動換能器有內在非線性特性，它限制了大輸入信號下的聲壓輸出。並且在重放聲音中產生了失真。信號失真的產生可以用圖 1 中的流程圖表示。

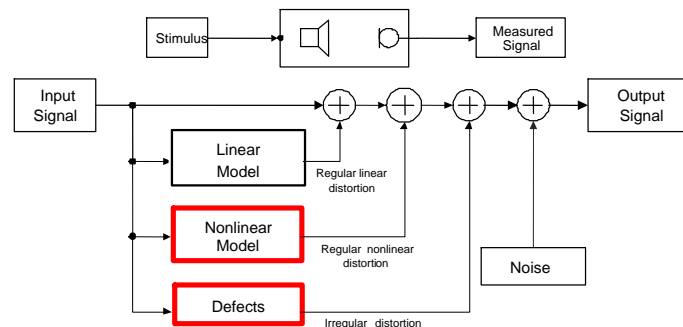


圖 1:音響系統中產生信號失真的流程圖

導致非線性失真的主要的非線性特性在電動換能器的電動機和懸掛部分。比如，非線性特性主要存在於當音圈位移相對音圈-磁隙結構尺寸較大時，和音圈位移相對於定心支片與折環的尺寸較大時。

不規則失真主要是因為生產過程中的缺陷。產品老化和其他外部因素，比如過載或者氣候，都在產品未來長期使用時產生影響。

本次培訓會講述，如何通過一系列量測來解讀失真並評估揚聲器性能。3D失真(DIS)和傳遞函數(TRF)模塊提供了換能器量測和尋找關鍵失真的特殊方法。

這些量測的目的是確定與揚聲器非線性特性相關的典型特徵或症狀。

### 4.1 量測激勵訊號

一個由激勵訊號激發的非線性系統產生的輸出訊號也會有非線性特徵。由於電動機和懸掛的非線性特性僅僅在大激勵訊號情況下出現，揚聲器在足夠小的輸入激勵訊號時基本上是線性的。在小訊號域，音圈位移極小，幾乎所有非線性特徵都不明顯。非線性特性取決於輸入訊號的幅度和相應的音圈位移大小，這是一個非線性特性的可靠的指標。

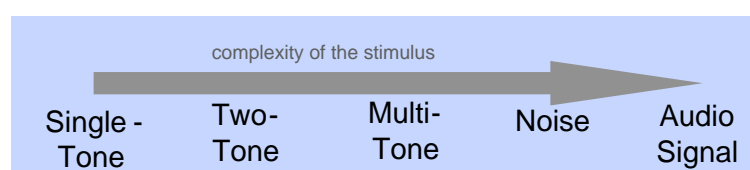


圖 2:非線性失真量測的激勵訊號

非線性失真的產生是一個複雜多維過程。一個單音激勵訊號未必能激活所有非線性特性，結果就是，只有一部分失真特徵被發現。

另一方面，一個更加複雜的激勵訊號會需要複雜的量測結果分析。因此，對特定量測使用不同的激勵訊號是明智的辦法。

如圖 3 所示，最簡單的量測激勵訊號是一個正弦音頻訊號，頻率為  $f_1$ 。它可以在音頻帶上離散或者連續。受測設備的輸出聲訊號則由傳感器（比如麥克風）接收，得到一個頻譜分析。

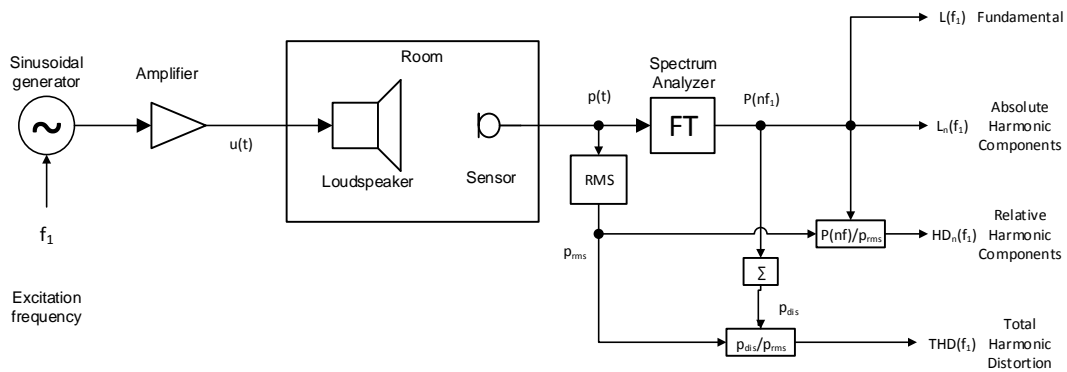


圖 3: 用激勵頻率為  $f_1$  的正弦輸入訊號量測諧波失真

圖 4 顯示輸入訊號  $u(t)$  產生的輸出聲訊號  $p(t)$  的頻譜  $P(f)$ 。基波分量  $P(f_1)$  在正弦輸入訊號的激勵頻率  $f_1$  處。其他諧波是額外的不需要的頻率分量  $P(nf_1)$ ， $n > 1$ ，他們是  $f_1$  的整數倍。每個諧波失真分量的幅度都可以用絕對或者相對值表示出來。絕對值一般是以 dB 為單位（用聲壓級  $L_n(f_1)$  比參考聲壓 20 uPa）。相對值則是 dB 相對於總輸出聲訊號  $p(t)$  的均方根  $p_{rms}$ 。總諧波失真 THD 定義為所有諧波失真分量（ $n \geq 2$ ）的均方根  $P(nf)$  與輸出信號均方根  $p_{rms}$  的比值。

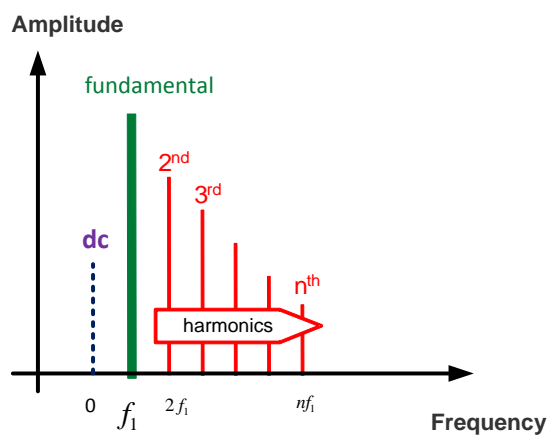


圖 4: 輸出聲訊號的頻譜顯示了由頻率為  $f_1$  的單音激勵訊號激發的非線性特性產生的諧波

在輸出頻譜中的諧波失真分量表明非線性特性是受測設備中固有的。但是使用一個單音輸入激勵訊號量測得到的輸出諧波對非線性系統的描述並不全面。

## 4.2 基波壓制

在大訊號域，溫度和非線性影響限制了換能器的聲音輸出。因此，在激光訊號中基波振幅分量的幅度不是與揚聲器終端的正弦輸入電壓幅度成比例地改變的。見圖 5。

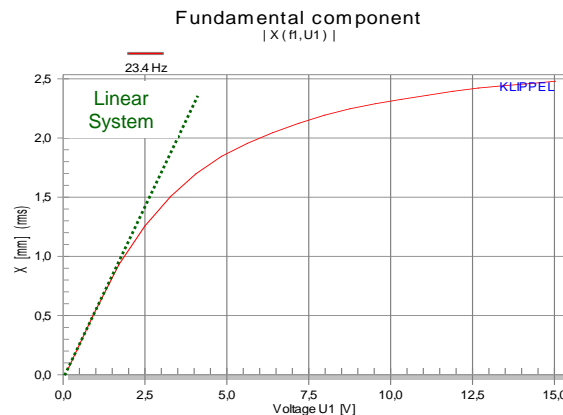


圖 5:基波壓制

在低輸入電壓情況下，輸入電壓和音圈位移之間的關係基本上是線性的，符合線性參數模型的要求。在高輸入電壓情況下，電動機和懸掛的非線性特性限制了音圈位移幅度，這就限制了最大聲輸出。

## 4.3 產生 DC 分量

如圖 6 所示，電動機和懸掛的非線性的非對稱性在音圈位移中產生了 DC 偏移分量，這可以用激光傳感器探知。舉例來說，一個非對稱剛性  $K_{ms}(x)$  產生一個 DC 分量，其會將音圈朝著懸掛系統柔軟的一邊移動。當激勵頻率高於諧振頻率。一個非對稱磁力因數  $Bl(x)$  產生顯著 DC 分量，這會將音圈從  $Bl(x)$  最大值處移開。有兩側陡降的非線性磁力因數  $Bl(x)$  和低懸掛剛性的揚聲器設計會產生不穩定驅動行為，這會增大產生大量 DC 的風險。

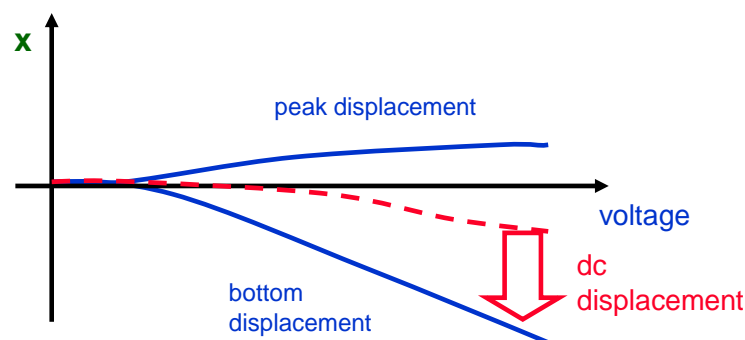


圖 6:非對稱磁力因數導致的 DC 位移

DC 分量非常重要因為它改變所有位移相關的非線性特性的工作點。因此，由一個非線性特性產生的一個 DC 位移能夠導致更多其他非線性特性產生的非線性症狀。

## 4.4 諧波失真解讀

諧波失真一般都是相對激勵頻率  $f_1$  來畫的。而且它一般會以絕對或相對的值顯示。舉例來說，由頻率為  $f_1$  的正弦激勵訊號在  $3f_1$  處產生的三階諧波的幅度，會畫在三階諧波圖中  $f_1$  處。但是，諧波響應的解讀一般不這麼簡單。圖 7 顯示的是典型揚聲器的絕對失真，在兩種聲學環境下 2 階和 3 階諧波與激勵頻率的關係。

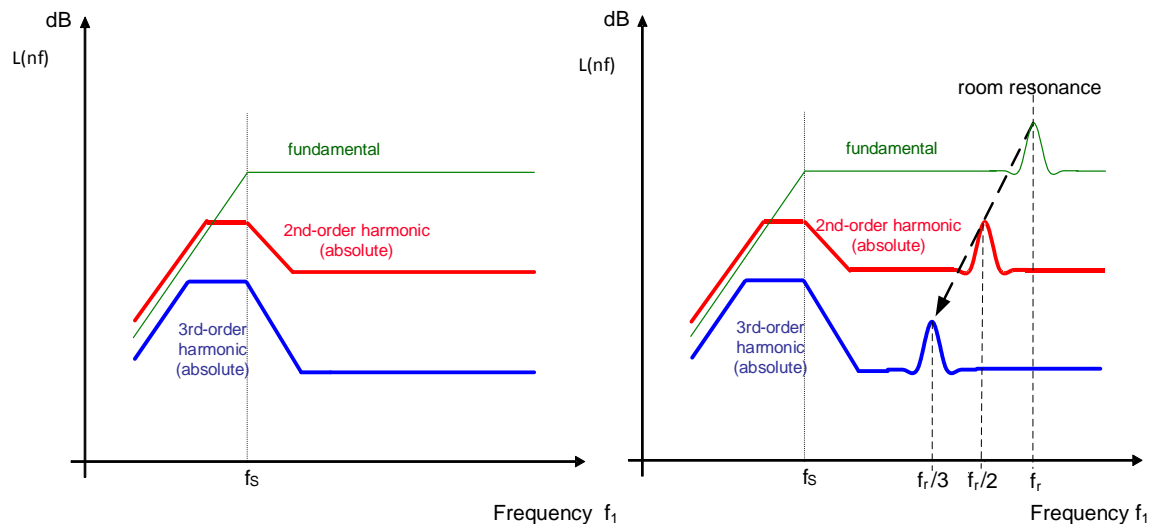


圖 7:在自由空間（左）和聽音室（右）中量測的同一個揚聲器的絕對諧波失真與激勵頻率  $f_1$  的關係。

左側的圖顯示了在自由場（消聲室）中工作的揚聲器的基波響應和諧波失真響應。而右圖則顯示了在混響環境且房間諧振頻率在  $f_r$  的同一個揚聲器的響應。

房間就像一個線性後置濾波器，它在房間諧振頻率  $f_r$  處增強所有訊號分量。這在基波分量的聲壓響應中造成一個峰值，位於激勵頻率  $f_1 = f_r$ 。  $n$  階諧波失真分量的響應也有峰值，但是他們出現在較低激勵頻率  $f_1 = f_r/n$ 。這是因為在自由場輸出頻譜中， $n$  階諧波失真分量是在激勵頻率的倍數上通過房間的線性後置濾波器的。這個例子說明聲學環境的線性傳遞特性增加了諧波響應的解讀的複雜性。建議在揚聲器近場處設置麥克風，因為房間的影響在這種情況下基本可以忽略，量測可以在很高信噪比情況下進行。

圖 8 有與圖 7 相同的揚聲器和聲學條件。但是， $n$  階諧波失真分量  $P(nf_1)$  是相對於激勵頻率為  $f_1$  的輸出訊號（包括基波分量）的均方根值  $p_{\text{rms}}(f_1)$  畫出的。

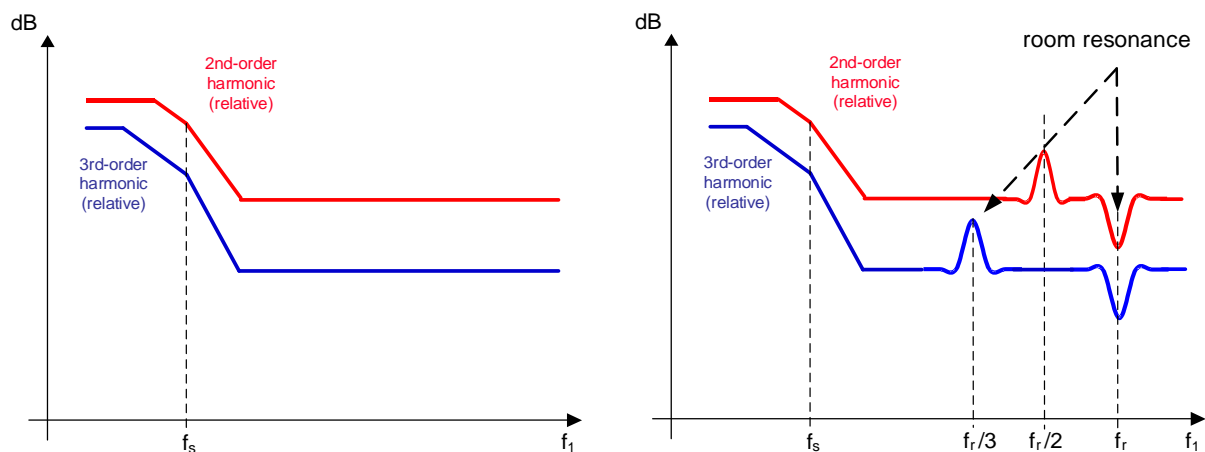


圖 8:相對諧波失真與激勵頻率的關係

房間諧振頻率導致  $n$  階諧波失真分量在  $f_r$  處增加一個的谷值，因為基波分量大小在此頻率處增大了。且絕對諧波失真是恆定的。這個例子說明了相對失真的計算增加了諧波響應的複雜性和解讀的難度。

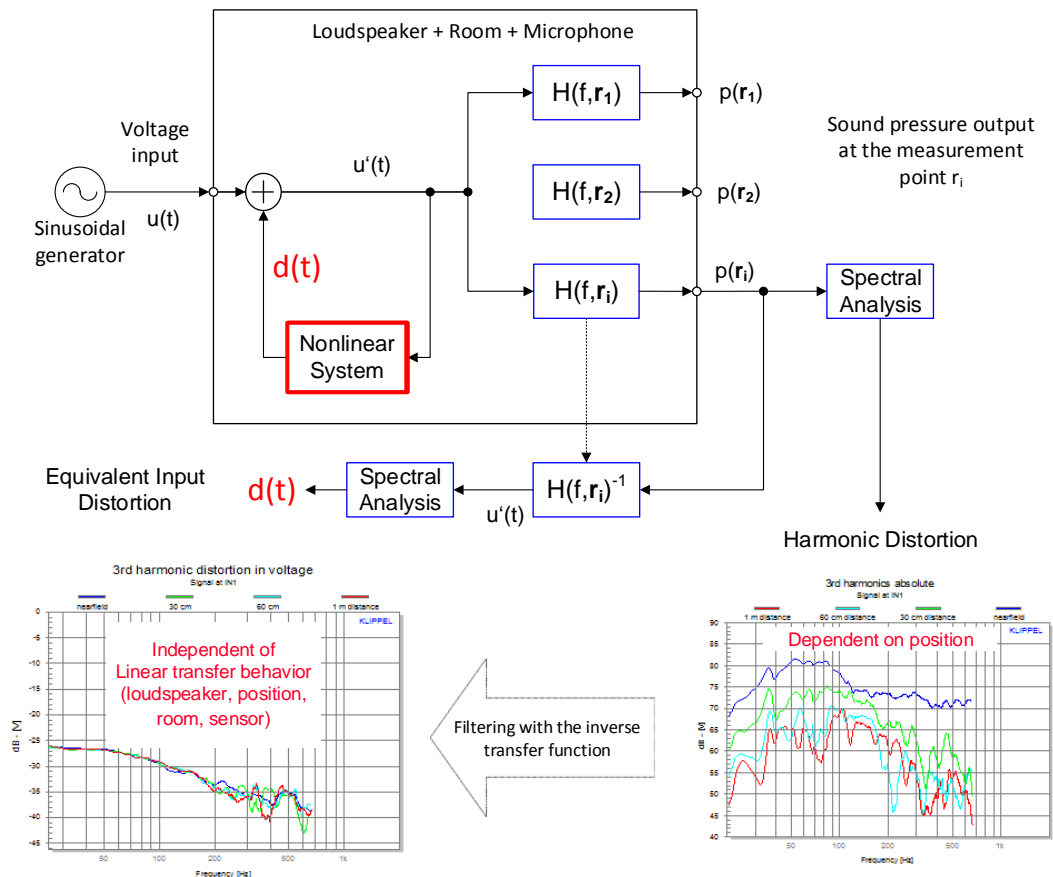


圖 9:量測等效諧波輸入失真

#### 4.4.1 等效諧波輸入失真

在圖 7 中的情況使得揚聲器的純粹諧波失真特性與房間線性後期整形的失真特性很難區分開來。等效輸入失真（EHID）量測通過從量測中移除線性後期整形簡化了諧波失真的解讀。

主要的非線性特性比如磁力因數  $Bl(x)$ ，電感  $L(x)$  和機械懸掛剛性  $K_{ms}(x)$  都在換能器的電氣域和機械域。如圖 9 所示，這些非線性特性可以通過在非線性系統輸入訊號  $u(t)$  增加一個失真訊號  $d(t)$  並產生失真輸入訊號  $u'(t)$  來進行模擬。這個失真訊號  $u'(t)$  通過傳遞函數為  $H(f, r_i)$  的線性系統傳輸到了量測點  $r_i$  處的聲壓輸出  $p(r_i)$ 。這個線性系統代表了模態振膜振動，聲音輻射和傳播，聲學環境（比如房間）和傳感器的屬性（比如麥克風及激光）。雖然非線性失真是由單個源產生的，但是量測得到的諧波失真取決於量測的位置  $r_i$ ，如圖 9 中右下角處所示。失真曲線的高複雜性使得確定失真本質原因變得困難。

失真訊號  $u'(t)$  可以通過在量測聲壓訊號  $p(r_i)$  上加一個逆傳遞函數為  $H(f, r_i)^{-1}$  的線性濾波器來計算得到。等效諧波輸入失真 (EHID) 可以在失真訊號  $u'(t)$  上進行頻譜分析來確定。EHID 描述了在非線性系統輸出端的失真訊號  $d(t)$ ，這會明顯簡化解讀的難易度。

#### 4.5 互調失真量測

揚聲器和其他電聲換能器會在聲音頻帶中產生顯著的互調失真，這很大地影響了感知的聲音的質量。用一個正弦聲音訊號進行的失真量測不能產生這些互調分量。如圖 10 所示，一個簡單雙音訊號，包括一個變化頻率為  $f_1$  的聲音訊號和第二個固定頻率為  $f_2$  的聲音訊號，會在各差頻處  $(f_2 - (n - 1)f_1)$  和疊加頻率處  $(f_2 + (n - 1)f_1)$  產生  $n$  階互調分量，其中  $n=2, 3$ 。

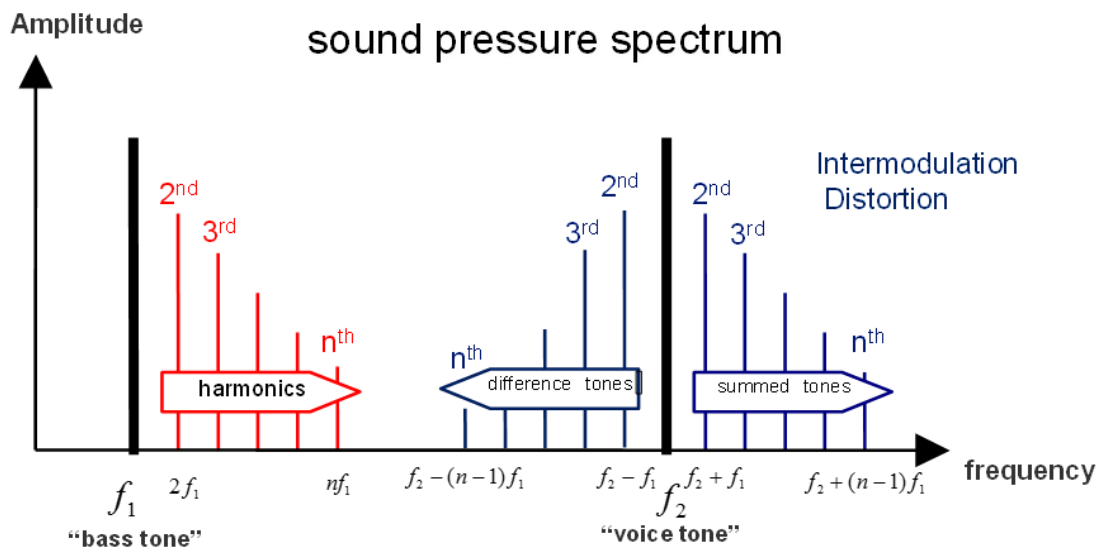


圖 10: 互調分量

互調失真 (IMD) 是電動機非線性特性  $Bl(x)$  和  $L_e(x)$  的一個關鍵的症狀，也是一個多普勒效應的關鍵症狀，它是一種聲音傳播的非線性特性。用雙音訊號激發揚聲器會產生幅度與相位（頻率）的調製失真。

##### 4.5.1 幅度和相位調製

幅度調製 (AM) 僅僅改變語音訊號的瞬時幅度（包絡線）但不會改變其相位。高頻訊號的包絡線隨時間的變化會在感知的聲音中產生波動和粗糙度。



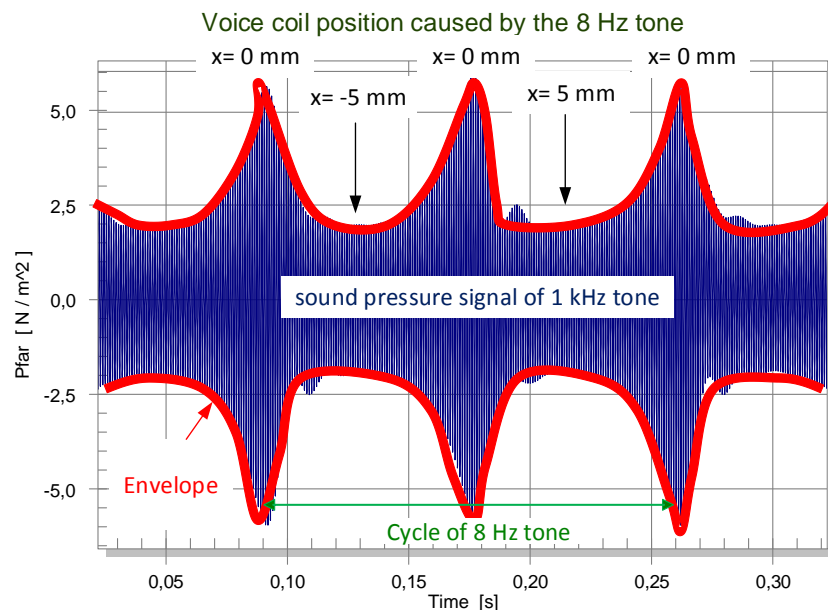


圖 11: 在雙音訊號 ( $f_1=8\text{ Hz}$  和  $f_2=1\text{ kHz}$ ) 情況下由非線性磁力因數  $BI(x)$  產生的幅度調製 (AM)

如圖 11 所示，磁力因數  $BI(x)$  相對於位移  $x$  的變化對高頻聲音訊號  $f_1$  產生了顯著的幅度調製。當音圈在靜止位置  $x = 0$ ， $BI(x=0)$  的瞬時值達到最大，並且在高頻聲音訊號的包絡線中產生一個峰值。對偏移量的正向最大值和負向最大值，即音圈在磁隙外， $BI$  值的減少導致了包絡線的谷值。

不像幅度調製，頻率調製或者相位調製不會改變語音訊號的包絡線，但是會改變瞬間相位。

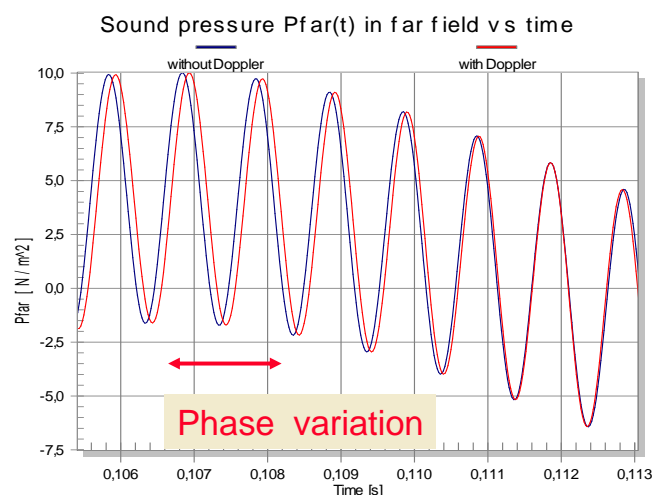


圖 12: 頻率調製 (FM)

多普勒效應導致了主要的相位調製，這是由振膜和監聽點之間變化的距離相關的時間延遲造成的。

#### 4.5.2 有效的互調量測的技術

改變激勵聲音訊號有兩個重要的設置：“低音掃描 (bass tone sweep)” 或者 “語音掃描 (voice tone sweep)”。在這兩種情況下，一個聲音訊號的頻率是恆定，與此同時另一個聲音訊號的頻率會改變。

圖 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

- $f_1$  是频率变化的低音声音訊號，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的频率的语音訊號  $f_2 \approx 7.5f_s$



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，这会激活占主导地位的扬声器非线性特性。频率  $f_2$  代表了在通频带中的一个典型声音讯号，在这里声音讯号的叠加和差值被清晰地从低音讯号  $f_1$  的谐波中分开。

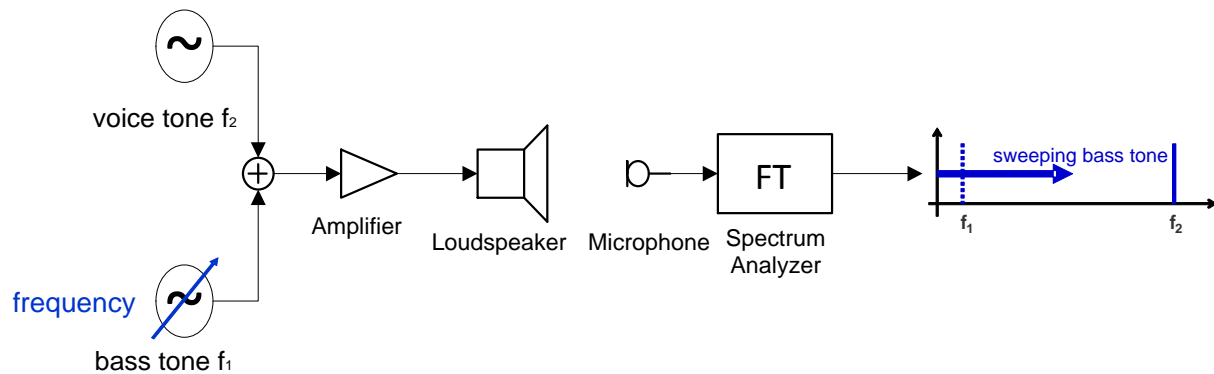


Figure 13:用低音訊號掃描方法進行 IMD 量測的設置

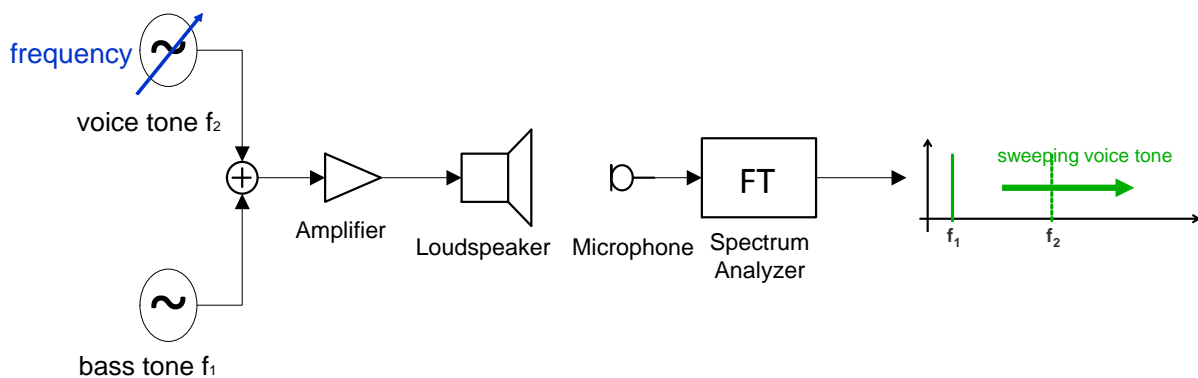


圖 14:用語音訊號掃描方法進行 IMD 量測的設置

圖 14 展示了語音掃描技術的推薦的設置。這些頻率被選用於低音揚聲器，如下：

- $f_1$  是頻率恆定的低音訊號，低於諧振頻率  $f_1 \approx 0.5f_s$
- $f_2$  是在音頻帶上的頻率變化的高頻語音訊號， $8f_s < f_2 < 20f_s$

語音訊號掃描方法保證了一個基本恆定的音圈位移峰值，同時能夠區分的低音訊號  $f_1$  諧波與語音訊號  $f_2$  的和與差的聲音訊號。當語音訊號掃描了，總 IMD 量測會變化。因此語音掃描方法顯示，互調失真與音頻帶中訊號分量的頻率有相關性。

#### 4.6 多音失真量測

多音複雜訊號包括了在已知頻率的多個訊號。在量測期間，每個訊號產生諧波。而且聲音相互作用產生了不同的聲音的疊加和差值，類似於一個真正的音樂訊號。由於這個原因，多音複合訊號被用來模擬揚聲器的常規工作環境。

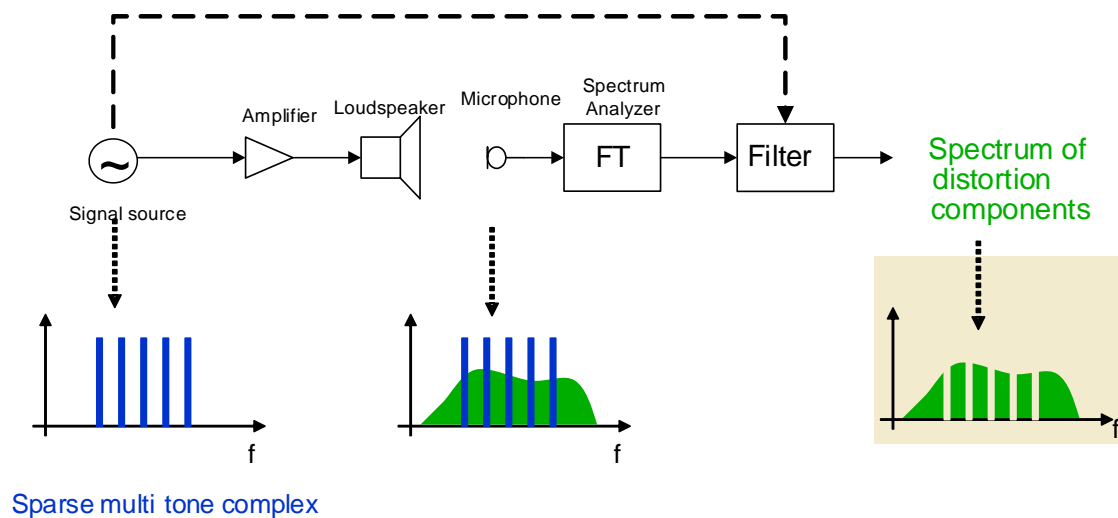


圖 15:多音失真量測

用多音复訊號時，在不同頻率聲音間發現有非線性失真。因此，多音訊號有一個稀疏的頻譜。環境噪聲可以通過一個額外的無任何激勵訊號的量測得到。多音复訊號的帶寬，形狀和密度可以輕易地調整來滿足特定換能器或者完整的揚聲器系統的目標應用。注意，由這個量測得到的失真頻譜不會給出任何關於非線性特性的對稱和不對稱形狀的診斷信息。

#### 4.7 異音量測

為了簡單的從產生的衝擊失真中分離激勵音頻訊號，可以用一個單音訊號或正弦掃頻訊號來激勵失真，這些失真與音圈的摩擦碰撞，鬆動，漏氣和懸掛與音圈骨架的硬限制等等不規則缺陷有關。

不規則缺陷產生的失真相比於電動機，懸掛與振膜的規則非線性特性產生的非線性失真更有衝激性。在常規的總諧波失真（THD）量測裡，規則非線性特性產生的諧波失真占主導地位。結果就是非常規失真無法被檢測到。而且非常規缺陷的失真可以被聽到，即使他們的高階分量（ $n > 20$ ）均方根值在傳統THD量測的噪音級之下。

##### 4.7.1 激勵和高階失真

在上面 4.7 中列舉的非常規缺陷產生的失真在時域有特殊的脈衝精細結構，如圖 16 所示的失真訊號 $d(t)$ 。在高次諧波和其他由非線性缺陷導致和同步得到的訊號分量中衝激行為很明顯。因此失真訊號的幅度和相位信息給出了確定缺陷源的重要信息。由於一個複雜頻譜的解讀比較麻煩，更有效的辦法是分析高通濾波後的時域訊號，見圖 16。因為非常規失真一般出現在較高頻率範圍，可以用一個高通跟踪濾波器將較低階的失真分量從原始麥克風訊號中分離。

在跟踪濾波器的輸出端，可以從激勵失真訊號 $d(t)$ 導出一些重要的量測結果：

- Peak value of higher-order distortion (PHD) 高階失真峰值(PHD)
- RMS value of higher-order distortion (MHD) 高階失真均方根值 (MHD)
- Crest factor of higher-order distortion (CHD) 高階失真波峰係數 (CHD)
- Instantaneous crest factor of higher-order distortion (ICHD) 瞬時高階失真波峰係數 (ICHD)

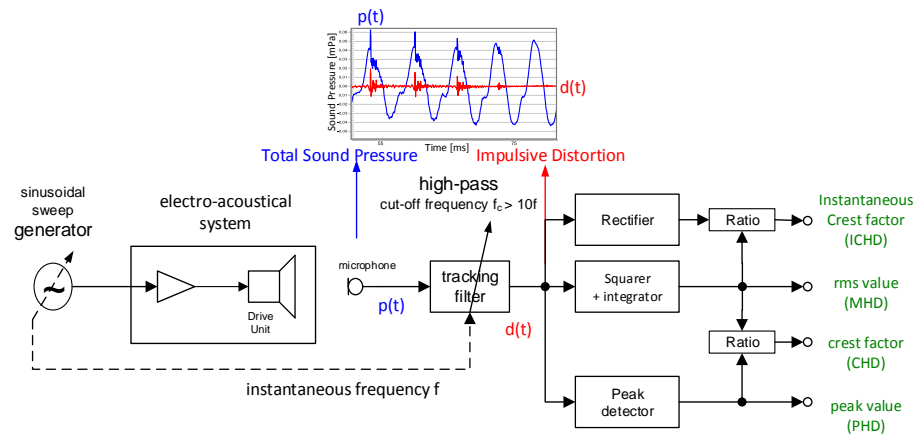


圖 16:用時域分析進行缺陷量測

#### 4.7.2 激勵衝激峰值

衝激失真最重要的特徵是峰值（PHD）。均方根值（MHD）與非常規失真的功率相關。而峰值的量測則更加靈敏地量測了波形的精細結構中的衝激症狀。

相對於揚聲器通頻帶聲壓級可以最佳地評估PHD的臨界值。

圖 17 展示了絕對PHD值，超過了PHD門限（低於通頻帶基頻平均聲壓級 40dB）。在 40Hz到 70Hz之間的頻帶有明顯的失真。

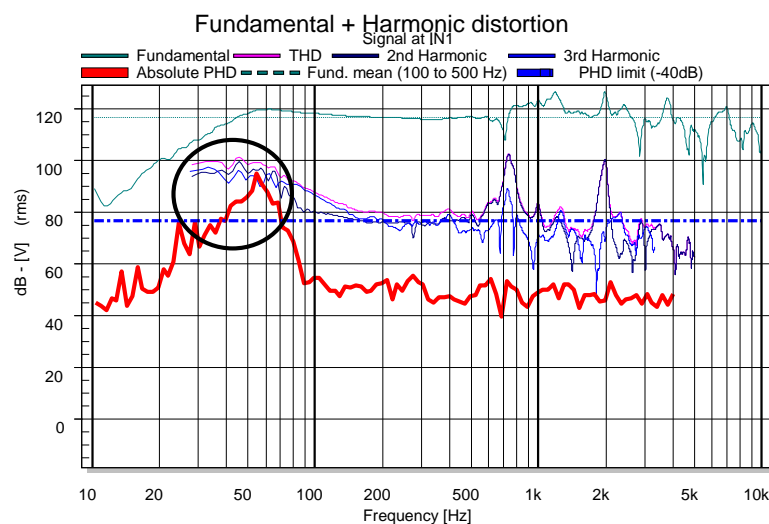


圖 17:絕對 PHD(紅色粗線)和 PHD 門限 (藍色虛線)

#### 4.7.3 高階失真的波峰係數

高階失真的波峰係數是描述一個基波週期內的失真的峰值和rms值的比值的相對度量。這個值描述了失真訊號的衝激性。一個恆定的DC訊號的峰值係數是 0dB。一個正弦訊號的峰值係數是 3dB。由規則非線性特性或者量測噪聲造成的失真的峰值係數一般會達到 12dB。由揚聲器缺陷產生的典型的不規則失真的峰值係數可以高於 12dB。

瞬時峰值高階失真（ICHD）描述了瞬時失真絕對值和rms值MHD之間的比值。這個度量對於探究衝激失真的精細結構很有用。當映射到狀態變量時，如音圈位移或者聲壓輸出，可以確定這些物理原因的有價值的信息，比如撞擊底部，音圈摩擦，壓縮等等。

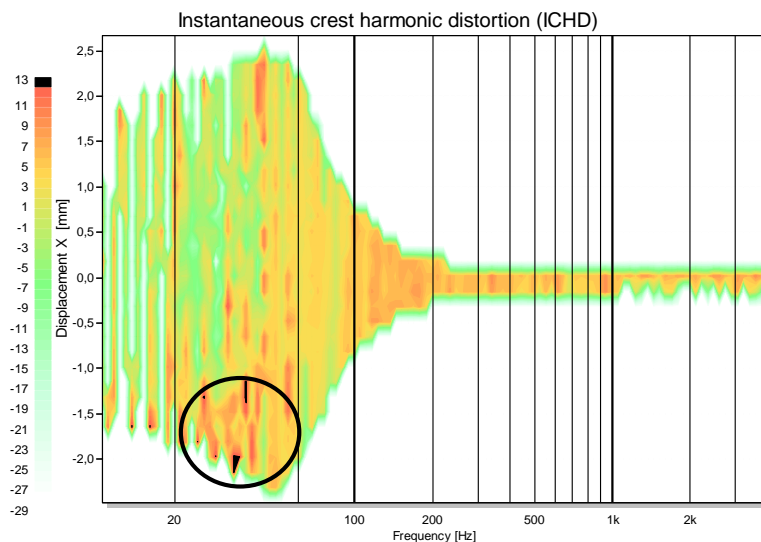


圖 18: 高階失真的瞬態峰值係數與頻率和音圈位移的關係。

圖 18 展示了 ICHD 值作為一個音圈位移（縱軸）和瞬時頻率的函數，這是與對數啁啾激勵訊號的掃描時間相關的。如圖 18 所示，在頻率為 20Hz 到 50Hz 之間的負向偏移處的黑點表明音圈骨架撞擊了導磁下板。

## 5 預備問題

在正式開始第六部分前檢查你的理論知識理解程度。回答問題，選擇所有正確答案（答案不止一個）

**QUESTION 1:** 非線性失真分量的產生取決於激勵訊號中激勵音的頻率麼？

- ☐ **MC a:** 是，非線性失真（諧波，互調和 DC 分量……）的產生取決於激勵訊號的頻率，因為揚聲器是一個動態非線性系統。
- ☐ **MC b:** 不，非線性失真（諧波，互調和 DC 分量……）的產生與激勵訊號的頻率無關，因為揚聲器是一個靜態非線性系統，沒有記憶（像一個二極管，在輸入輸出端間有非線性傳輸特性）。

**QUESTION 2:** 非線性失真分量的產生取決於激勵訊號中的激勵音的幅度麼？

- ☐ **MC a:** 不，在輸出訊號產生的非線性時針分類與激勵訊號的頻譜分量的幅度無關。
- ☐ **MC b:** 當激勵訊號頻譜分量的幅度增加時候，非線性失真分量的幅度總是增加。
- ☐ **MC c:** 當激勵訊號頻譜分量的幅度增加時，非線性失真分量的幅度可能會增加也可能會減小。

**QUESTION 3:** 揚聲器非線性特性影響基波分量麼。

- ☐ **MC a:** 不影響，揚聲器非線性僅僅產生基波分量的頻率倍數的諧波失真。輸出訊號中的基波分量的幅度和相位可以通過把線性傳遞函數  $H(j\omega)$  和激勵訊號的基波相乘計算得出。
- ☐ **MC b:** 可以，基波分量也被揚聲器的非線性特性影響。在大多數情況下，量測的非線性揚聲器輸出的基波幅度比使用線性傳遞函數預計的輸出要少。但是，在諧振頻率處，由於電阻尼造成的損失，非線性揚聲器可能產生更多基波分量的輸出。

**QUESTION 4:** 量測的音圈位移的 DC 分量說明了什麼？

- ☐ **MC a:** DC 分量是由非線性參數（電動機和懸掛非線性特性）中的非對稱性造成的，造成交流位移的部分整流。DC 分量的符號（表示音圈運動朝向）說明了非對稱性的形狀的方向。

- **MC b:** 即使當揚聲器非線性特性是對稱的時候，揚聲器不穩定性也可能會造成 DC 分量。
- **MC c:** 音圈位移中 DC 分量是一個揚聲器非線性特性的症狀。但是沒有什麼診斷價值，因為 DC 分量是聽不見的。

**QUESTION 5:** 諧波失真量測能完整地描述揚聲器非線性傳遞特性麼？

- **MC a:** 能，如果是用覆蓋整個音頻帶的正弦掃頻訊號（啁啾）量測諧波失真的話就能。
- **MC b:** 能，如果所有階的諧波失真和基波的非線性壓縮都被作為一個正弦激勵訊號的頻率和幅度的函數量測的話就能。
- **MC c:** 不行，因為一個單音訊號不能產生互調失真。 IMD 需要一個包含不止一個頻譜分量（雙音）的激勵訊號。

**QUESTION 6:** 絕對諧波失真的頻率響應有與相對諧波失真（IEC 或者其他標準定義的）相同的曲線形狀嗎？

- **MC a:** 是的，當相對諧波失真用 dB 表示時候曲線形狀相同（比如：-40dB 表示 1% 失真）。
- **MC b:** 不，相對諧波失真是絕對失真的幅度相對於總訊號的幅度，因此，相對諧波失真的頻率響應會有不同的曲線形狀。

**QUESTION 7:** 如何可靠地檢測到異音和其他不規則揚聲器缺陷？

- **MC a:** 使用雙音激勵訊號量測 2 階或者 3 階互調分量是量測異音的很可靠方法。
- **MC b:** （THD）的量測考慮到了所有諧波分量的幅度。由異音和其他不規則揚聲器缺陷產生的 THD 比電動機和懸掛固有的規則非線性特性產生的 THD 小很多。結果就是，為了檢測不規則缺陷的獨特的症狀，需要一個額外的高通濾波器來壓制由規則揚聲器非線性特性產生的低階諧波失真分量。
- **MC c:** 非規則揚聲器缺陷產生的衝擊失真分量有很高的峰值係數（高峯值對 rms 值比）。因此，需要一個時域分析來考慮高頻處的失真分量的幅度和相位。
- **MC d:** 假如激勵訊號是由足夠多的在音頻帶上對數分佈的聲音訊號組成，用多音訊號失真量測來檢測異音的技術就是可靠的。

## 6 解讀失真量測（不需要硬件）


Step 1: 在 [www.klippel.de/training](http://www.klippel.de/training) 看演示視頻 *Loudspeaker Distortion Measurements*，這裡介紹了如何進行失真量測。

Step 2: 打開軟件 *dB-Lab* 然後打開文件 *Loudspeaker Distortion Measurements.kdbx*。

建議:在上交答案之前，建議離線完成下面的練習

### 6.1 諧波失真量測

#### 6.1.1 2階和3階失真

Step 3: 打開實驗  *1a TRF SPL Fund + Harm 1.5V*，它用一個正弦掃頻波對換能器諧波失真進行瞬時量測，其瞬時頻率在時間上以對數增加。在結果窗口 *Fundamental + Harmonics* 中比較 *2<sup>nd</sup> Harmonic* 的曲線和 *Total Harmonic Distortion (THD)*。


**QUESTION 8:** 在哪個頻率範圍內，絕對 2 階失真分量決定了 THD？

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




**QUESTION 9:** 在哪個頻率範圍內，絕對 3 階失真分量決定了 THD？

- ☐ MC a: 低於 40Hz
- ☐ MC b:  $40 < f < 250$  Hz
- ☐ MC c: 低於 250Hz

Step 4: 在同一個實驗  **1a TRF SPL Fund + Harm 1.5V** 中，查看結果窗口 **Y1 (f) Spectrum** 並且比較重現激勵訊號 *Signal lines*（藍色）和在有靜音激勵訊號（muted stimulus）的麥克風訊號中的基底噪聲 *Noise floor*。

**QUESTION 10:** 穩態噪聲（比如由空氣環境產生）損壞了在 40Hz 到 250Hz 激勵頻率上 2 階和 3 階諧波失真的量測麼？


- ☐ MC a: 不，量測沒有被穩態噪聲損壞，因為信噪比在頻率  $80 \text{ Hz} < f < 750 \text{ Hz}$  內範圍大於 40dB，2 階和 3 階諧波失真在此階段量測。
- ☐ MC b: 是，信噪比在 40Hz 處大約為 40dB，這對於量測 40Hz 處的諧波不夠。

Step 5: 打開實驗  **1b TRF SPL Fund + Harm 6V**，這裡是同一個換能器的諧波失真，使用了同樣的量測設置，但正弦激勵電壓要高很多（6V，而非 1.5V）。在結果窗口 **Fundamental + Harmonics** 中觀察 *3<sup>rd</sup> Harmonic* 並回答以下問題：

**QUESTION 11:** 總諧波失真的絕對大小在諧振頻率（ $f_s < f < 4f_s$ ）以上降低的物理原因是什麼？



- ☐ MC a: 聲壓輸出在這個頻率範圍內基本上恆定。
- ☐ MC b: 輸入電流在諧振頻率(120 Hz)以上一直增加到電阻抗曲線最小值（450Hz）。
- ☐ MC c: 在諧振頻率以上，位移每音程減小 12dB。

### 6.1.2 位移

Step 6: 打開實驗  **2a TRF X Fund + Harm 6V** 然後在結果口“Fundamental + Harmonics”“Harmonic Distortion (relative)”和“Y2 (f) Spectrum”中觀察頻率 150Hz 到 1.5KHz 範圍。

**QUESTION 12:** 在結果窗口 **Harmonic distortion (relative)** 中這個頻率範圍內，什麼導致了相對總諧波失真，也就是曲線 *THD in X* 的增加？


- ☐ MC a: 諧波失真量測被量測噪聲損壞了。如位移的結果窗口“Y2 (f) Spectrum”中所示，量測音圈位移在 1kHz 背景噪聲處消失了。由此得到的低信噪比導致了這個頻段上一個基本上恆定的絕對失真值（-50dB）。由於總位移減少了 40dB，這個相對失真（絕對失真和總位移的比值）增加了。
- ☐ MC b: 揚聲器在高頻處會產生更多失真。
- ☐ MC c: 激光傳感器有限制並產生這個失真。

Step 7: 在同一個實驗  **2a TRF X Fund + Harm 6V** 中，打開結果窗口 **Harmonic Distortion (relative)**，比較曲線 *THD in X*（代表位移訊號的相對 THD）和曲線 *THD in SPL*（代表了聲壓訊號中的相對 THD，這個曲線是從實驗  **1b TRF SPL Fund + Harm 6V** 的結果窗口“Harmonic Distortion (relative)”中複製而來）。

**QUESTION 13:** 為何在聲壓量測的相對 THD 比在低頻處（ $f < 150 \text{ Hz}$ ）位移量測得到的相對 THD 更高？


- ☐ MC a: 聲音的輻射和傳播是高度非線性的並且在低頻處增加失真。
- ☐ MC b: 兩個相對量測的幅度都取決於基波分量的頻率響應。在諧振頻率以下，SPL 量測的基波減小，但是位移量測的基波基本上恆定。

- **MC c:** 麥克風產生的噪聲使聲音量測的 THD 增加。

Step 8: 打開實驗  **2b DIS X Fund., DC, Short**, 然後觀察結果窗口“**DC Component**”, 這裡有位移對頻率的關係。

**QUESTION 14:** DC 分量與正弦激勵訊號的頻率無關麼？


- **MC a:** 不, DC 分量不僅僅取決於頻率, 還取決於非線性特性的形狀。在這個情況下 DC 分量在諧振頻率上最大。
- **MC b:** 不, DC 分量的方向不僅僅取決於頻率, 還取決於非線性特性的形狀。在這個情況下, DC 分量在頻率 50Hz 以下和 300Hz 以上取得最大值。
- **MC c:** 是, DC 分量總在低頻處達到最大, 這裡位移更大。

Step 9: 打開實驗  **2c DIS X Motor stability** 並且觀察結果窗口“**DC Component**”, 這裡展示了位移對電壓的關係。

**QUESTION 15:** DC 位移隨電壓如何變化？



- **MC a:** DC 位移在更高電壓處變低, 因為懸掛系統在正向和負向位移產生剛性的對稱增加, 這會增加揚聲器的穩定性。
- **MC b:** DC 位移在低電壓情況下相對較小, 但是在更高電壓情況下增長迅速。這個行為說明電動換能器的不穩定性。
- **MC c:** DC 位移隨著增長的電壓緩慢增加。這種情況對一個有顯著不對稱的非線性參數的穩定的揚聲器是很典型的。

### 6.1.3 等效輸入失真

Step 10: 選擇實驗  **3a TRF SPL EHID 6 V**。打開屬頁面下 **Processing**。確保 **Reference** 中 **Curve** 和 **Level** 被禁止了。打開結果窗口 **Fundamental + Harmonics**。複製曲線 **Fundamental** 到剪貼板。打開屬性頁面下 **Processing** 的 **Reference**, 點擊 **Edit**, 點擊 **From Clipboard**。這時, 導入曲線被用來對麥克風訊號反向濾波。基波分量的響應現在基本是平直的。這樣做能夠把在傳感器 (也就是麥克風) 的非線性失真轉變到揚聲器的輸入端 (也就是電終端)。

**QUESTION 16:** 為什麼計算等效輸入失真很有用？

- **MC a:** 由電動機和懸掛系統非線性特性產生的主要的非線性失真都產生於靠近電輸入的一維訊號域。這些非線性特性會產生與由麥克風量測 (與麥克風位置無關) 得到的相同的等效諧波輸入失真 (EHID)。如果 EHID 量測與麥克風位置有關。這些非線性特性就在多維訊號路徑中 (比如振膜振動或者聲音傳播)。
- **MC b:** 麥克風幅度響應對等效諧波輸入失真 (EHID) 量測沒有任何影響, 這是因為反向濾波移除了基波的線性特性和麥克風的線性特性。
- **MC c:** 房間反射和房間模式的影響都被從等效輸入失真量測移除了, 這是因為線性聲傳播會通過基波分量的反向濾波所補償。

Step 11: 在  **3b X EHID 6 V** 中打開結果窗口 **Harmonic Distortion (relative)**, 這裡有激光量測的  $2^{nd}$  EHID X 和  $3^{rd}$  EHID X 曲線。比較這些曲線與  $2^{nd}$  EHID SPL 及  $3^{rd}$  EHID SPL (這倆是從麥克風量測  **3a TRF SPL EHID 6 V** 中複製過來的)


**QUESTION 17:** 在所有頻率中, 從麥克風量測與激光量測得到的相對等效諧波輸入失真 (EHID) 都相似嗎？

- **MC a:** 不, 在低頻情況下 ( $f < 100$  Hz), 激光和麥克風量測給出幾乎相同的 EHID。
- **MC b:** 但是, 在高頻處 ( $f > 150$  Hz), 由激光量測得到的 EHID 就損壞了, 原因是由不足的信噪比導致的量測噪聲。
- **MC c:** 是的, 激光量測和麥克風量測給出了任意頻率上的幾乎相同的 EHID。






## 6.2 互調失真量測

### 6.2.1 互調失真

Step 12: 打開實驗  **4a DIS SPL IMD (bass sweep)** 並且觀察結果窗口“**2<sup>nd</sup> Intermod, %**”和“**3<sup>rd</sup> Intermod, %**”中互調失真的頻率響應。

**QUESTION 18:** 在低音的哪個頻率相對互調失真（百分比）達到最大？


- ☐ MC a: 35 Hz
- ☐ MC b: 95 Hz(靠近諧振頻率)
- ☐ MC c: 235 Hz

Step 13: 在同一個實驗  **4a DIS SPL IMD (bass sweep)** 中觀察結果窗口“**Fundamental Component**”，然後比較 **6.00V** 曲線和 **Fundamental X 6V** 以及 **Fundamental I 6V** 曲線。他們分別是從實驗  **4b DIS X (bass sweep)**和  **4c DIS current (bass sweep)**，中導入來的。

**QUESTION 19:** 在互調失真在頻率  $20\text{ Hz} < f < 120\text{ Hz}$  時增加時，哪個狀態變量有最大幅度？


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

### 6.2.2 调幅/调频失真

Step 14: 打開實驗  **4d DIS SPL IMD (voice sweep)** 觀察結果窗口“**Waveform YI**”，這裡展示雙音訊號的聲壓訊號，包含了第一個語音訊號  $f_1 = 1.9\text{ kHz}$  和第二個低音訊號  $f_2 = 23\text{ Hz}$ 。

**QUESTION 20:** 聲壓時間訊號表現了什麼？


- ☐ MC a: 1.9KHz 的語音訊號的包絡線隨著時間變化。最大值間的距離大約是 43ms。這和 23Hz 的低音訊號的周期相吻合。
- ☐ MC b: 語音訊號的相位隨著時間變化。

Step 15: 打開同一個實驗  **4d DIS SPL IMD (voice sweep)** 的結果窗口“**Modulation**”然後比較曲線 **AM distortion(Lamd)**（表示純調幅 AM 失真）和總互調失真 **Ldm (cumul)**（考慮幅度和頻率調製 AM + FM）。

**QUESTION 21:** 什麼導致了 1.9KHz 語音訊號的包絡線的變化？



- ☐ MC a: 調幅，因為 **AM distortion(Lamd)** 值與總互調失真 **Ldm (cumul)**最接近。
- ☐ MC b: 調頻，因為 **AM distortion(Lamd)** 值比總互調失真 **Ldm (cumul)**小很多。

### 6.2.3 輸入電流的失真

Step 16: 打開實驗  **5a TRF CURRENT Harm 6 V**，然後在結果窗口“**Fundamental + Harmonics**”觀察輸入電流對頻率的絕對 2<sup>nd</sup> Harmonic 和 3<sup>rd</sup> Harmonic 失真。

**QUESTION 22:** 輸入電流的 2 階諧波失真在頻帶 200Hz 到 1.75kHz 上如何變化？



- ☐ MC a: 輸入電流的諧波失真的絕對值是恆定的。
- ☐ MC b: 輸入電流的諧波失真的絕對值每音程減小約 5dB。
- ☐ MC c: 輸入電流的諧波失真的絕對值每音程減小約 12dB。

Step 17: 在同一個實驗  **5a TRF CURRENT Harm 6 V** 和同一個結果窗口“**Fundamental + Harmonics**”中，觀察 200Hz 到 1.75kHz 頻段中電流的基波分量的頻率響應。複製  **1b TRF SPL Fund-Harm 6 V** 中相應的聲壓曲線和  **2a TRF X Fund + Harm 6 V** 中

位移，然後粘貼到這個窗口，比較這些曲線。



**QUESTION 23:** 揚聲器的哪個狀態變量在這個頻段降低？提示：這可能會激活一個揚聲器的非線性特性，該非線性特性在 200Hz 和 1.75kHz 之間在輸入電流裡產生失真。

- ☐ **MC a:** 音圈位移每音程減小 12dB。
- ☐ **MC b:** 由於音圈電感的影響，電流略有下降。

Step 18: 打開實驗  **5b DIS CURRENT IMD (bass sweep)** 的結果窗口“**3<sup>rd</sup> Intermod, %**”，比較 6V 曲線（它表示輸入電流中 3 階互調失真）和 **IMD SPL 6V**，它是從  **4a DIS SPL IMD (bass sweep)** 中拷貝而來的聲壓中相應的 3 階互調失真。

**QUESTION 24:** 電流和聲壓中 3 階互調失真有共同的原因麼（相同的揚聲器非線性特性）？

- ☐ **MC a:** 沒有，因為聲壓中 3 階 IMD 比電流訊號中 3 階 IMD 的幅度要大很多。因此，失真的源頭在機械或者聲學域。
- ☐ **MC b:** 是，因為這些值很相近。因此失真的源頭在電氣域。

Step 19: 打開實驗  **5c DIS CURRENT IMD (voice sweep)** 然後觀察結果窗口“**2<sup>nd</sup> Intermod %**”和“**3<sup>rd</sup> Intermod %**”。比較 3V 互調失真曲線（輸入電流）和 **IMD SPL 3V** 曲線（從實驗  **4d DIS SPL IMD (voice sweep)** 中相應結果窗口中拷貝的聲壓輸出）。注意，2 階和 3 階互調失真在 1.9kHz 都有一個最大值（超過 30%）。

**QUESTION 25:** 導致在 1.9kHz 處的高互調失真的非線性特性在哪裡？


- ☐ **MC a:** 該非線性處在電氣域，因為在輸入電流中的互調失真與聲壓輸出中的 IMD 相似。
- ☐ **MC b:** 該非線性特性處於機械域或者聲學域。因為在電流輸入中的 IMD 比聲壓中的 IMD 明顯要小。

### 6.3 多音失真量測

Step 20: 打開實驗  **6a LPM MTD 1/10th oct** 並檢查結果窗口“**P(f) Spectrum**”。比較曲線 **Noise Floor** 和 **Noise+Distortion**。



**QUESTION 26:** 失真噪聲比有沒有足夠大來將非線性失真分量從穩態環境噪聲中區分開來？

- ☐ **MC a:** 不，noise floor 曲線與 **Noise+Distortion** 曲線相似。
- ☐ **MC b:** 是，noise floor 曲線在 **Noise+Distortion** 曲線 30dB 以下。

Step 21: 在同一個實驗  **6a LPM MTD 1/10th oct** 同樣的結果窗口 **P(f) Spectrum** 中里比較 **Noise+Distortion** 頻譜和結果窗口 **Current (f) Spectrum** 中相應的頻譜。

**QUESTION 27:** 用光標來讀取 2kHz 處的基波分量和失真峰值的差距。失真的主要原因是什麼？

- ☐ **MC a:** 失真主要是在電氣域，因為輸入電流有主要的失真（在輸入電流和輸出聲壓中，失真和基波之間有相同的差值）。
- ☐ **MC b:** 失真主要在機械或者聲學域，因為輸入電流僅僅有很小的失真（輸入電流中失真和基波之間的級差為 30dB，這比聲壓輸出中相應的 15dB 級差大多了）。


Step 22: 選擇實驗  **6b LPM MTD 1/10th oct hp**，其展示了低於 300Hz 的頻率分量被高通濾波抑制的多音失真量測。在結果窗口“**P(f) Spectrum**”中，比較 **signal line (high-pass)** 曲線和 **signal line (full band)** 曲線（從實驗  **6a LPM MTD 1/10th oct** 中相應結果窗口中拷貝而來）。打開結果窗口“**Multi-tone distortion**”並且比較 **MTD high pass** 曲線和 **MTD full band** 曲線。注意，用到高通濾波後的激勵訊號時失真被顯著地減少了（20dB）。

**QUESTION 28:** 哪個對 300Hz 以上 MTD 產生有足夠的影響的狀態訊號會被高通濾波器顯著減小？

- ☐ **MC a:** 音圈位移



- MC b: 電流輸入
- MC c: 終端電壓
- MC d: 麥克風聲壓輸出


## 6.4 異音量測


Step 23: 選擇實驗  **7c TRF peak harmonics 8V** 然後打開結果窗口“**Fundamental+Harmonics**”。激活光標來觀察 70Hz 處的絕對總諧波失真和 70Hz 處的 21 階諧波失真的 THD 曲線的幅度的差。注意：如果 21 階諧波沒有顯示，按 c 或者右鍵點擊圖區域然後選擇 **customize**。選擇屬性頁面 **Subset**，點擊 Ctrl 然後選擇曲線 **21th**。

**QUESTION 29:** 21 階諧波分量量測是找到異音和其他非常規缺點的有效辦法麼？

- MC a: 是，因為電機和懸掛中內在的常規失真對高階諧波無顯著貢獻。
- MC b: 不，高階諧波分量 ( $n > 10$ ) 只有低頻譜能量並且處於背景噪聲附近。通過讀取更高階單音諧波只能發現顯著的缺陷。需要在時域的敏感量測技術和頻域裡的諧波分量之間的頻譜信息來確定多諧波的幅度和相位信息 ( $10 < n < 300$ )。


Step 24: 在同一個實驗  **7c TRF peak harmonics 8V** 中打開結果窗口“**Instantaneous Distortion**”然後觀察高通濾波 PHD ( $n > 10$ ) 的峰值。該窗口展示了 **Distortion** 曲線和 **Distortion 1V** 曲線（從實驗  **7a TRF peak harmonics 1V** 中複製而來，其使用低終端輸入電壓）。

Step 25: 打開同一個實驗  **7c TRF peak harmonics 8V** 的結果窗口“**Fundamental+Harmonics**”然後觀察 **Absolute PHD** 曲線。找到 **Absolute PHD** 中超過允許的 **PHD limit** 線(基波分量平均值 40dB 以下)的頻率範圍。

Step 26: 選擇實驗  **7d TRF Crest harmonics 8V** 並檢查結果窗口“**Instantaneous Distortion**”。找到瞬時峰值因數 **ICHD** 超過允許門限 **Thresh** 曲線（設定在 12dB）的頻率範圍。


**QUESTION 30:** 峰值 PHD 和峰值因數 ICHD 是在同一個頻率超過相應的門限的麼？

- MC a: 是，在頻率範圍 40Hz 到 60Hz 有高 PHD 值和高 ICHD 值的揚聲器非常規缺陷意味著衝擊失真的產生。
- MC b: 不，瞬時峰值因數 ICHD 在頻率範圍 40Hz 到 60Hz 超過門限值，但是 PHD 在基波 40dB 以下。即使失真的衝激屬性意味著非常規缺陷，很小的峰值表示這個缺陷可以忽略。
- MC c: 不，即使峰值 PHD 超過了允許門限，低瞬時峰值因數 ICHD 意味著失真不是衝激性的。峰值可能是由於量測噪聲導致的，這並不重要。

Step 27: 同一個實驗  **7d TRF Crest harmonics 8V** 觀察結果窗口“**Instantaneous Distortion 3D**”並且尋找瞬時峰值因數 **ICHD** 超過 12dB 門限（對應於圖中黑點）的條件（頻率，位移）。

**QUESTION 31:** 確定衝激失真出現時和超過 12dB 門限的峰值因數時的音圈位移。

- MC a: 在頻率範圍  $35 < f < 65$  Hz，衝激失真發生在位移的正峰值處（3mm 峰值）。
- MC b: 在頻率範圍  $35 < f < 65$  Hz，衝激失真發生於位移的負峰值處（3mm 峰值）。
- MC c: 在頻率範圍  $35 < f < 65$  Hz，衝激失真發生在位移的負峰值處（1mm 峰值）。

Step 28: 在同一個實驗  **7d TRF Crest harmonics 8V** 中觀察結果窗口“**Modelled and Measured Response**”，這裡展示了以 **Residual** 曲線與瞬時頻率的关系表示的失真波形。在 60Hz 放大 **Residual** 曲線來看在最大負聲壓訊號（對應於正位移最大值，聲壓與加速度成比例）處產生的衝激失真。

## 7 實際量測（需要硬件）

### 7.1 設置硬件

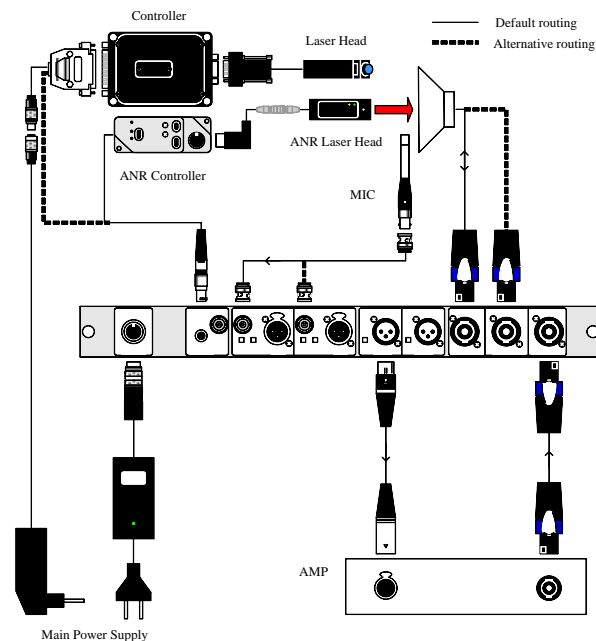


圖 13 DA2 接口連接

Step 29: 在失真分析儀 *Distortion Analyzer (DA)* 背後，連接 XLR 輸出 **OUT 1** 到放大器的 XLR 輸入。

Step 30: 連接放大器的輸出到 **AMPLIFIER SPEAKON** 輸入連接器，它在 *DA* 的後部。

Step 31: 連接 *DA* SPEAKON 輸出 **Speaker 1** 到揚聲器終端。使用特殊揚聲器量測導線。

Step 32: 如果你有一個激光器，連接激光頭到控制器，連接控制器 LEMO 插頭到 *DA* 後部的 **LASER** 輸入。

Step 33: 在 *DA* 正面，連接 **USB** 輸入到 PC 上。

Step 34: 選擇一個換能器來測試。推薦使用諧振頻率低於 100Hz 的低音音箱。把換能器緊緊地固定在支架上。確保振膜垂直於激光束。

Step 35: 在振膜中心點一個白點（用塗改液或者白貼紙）。

Step 36: 將激光束對準白點。

Step 37: 將激光頭調整到工作距離。

Step 38: 把麥克風放到揚聲器近場處，連接其到失真分析儀 *DA* 的 **INPUT 1**。

### 7.2 多音失真

Step 39: 在工具欄上點擊按鈕 **NEW OBJECT**，然後選擇 KLIPPEL 模板 *Diagnostics WOOFER*。給該受測設備命名。

Step 40: 在實驗 *4g LPM Multitone distortion* 中打開屬性頁面 *Stimulus*。調整換能器輸入電壓（從一個 1V 左右的較小值開始，以免損壞揚聲器）。開始量測。

Step 41: 打開麥克風訊號的結果窗口 *P(f) Spectrum*。檢查多音失真 *multi-tone distortion* 和背景噪聲 *noise floor*。

Step 42: 打開結果窗口 *Multitone Distortion* 然後讀出失真的最大值。如果失真的最大值小於 -20dB



（低於 10%），則在屬性頁面 *Stimulus* 中提高電壓，然後重複量測。

Step 43: 對於以後的量測，請記下步驟 42 中確定的最終電壓。

Step 44: 打開結果窗口 *X(t)* 然後讀出位移峰值。

Step 45: 打開結果窗口 *Current (f) spectrum*。通過找到電流訊號中多音失真最大值和基波之間的級差值（dB），確定電流中失真的相對級大小（dB）。把這個結果和聲壓輸出中的相對失真級進行比較。這個主要的非線性特性是在電氣域麼？

### 7.3 音圈位移

Step 46: 打開實驗 *3a DIS X Fundamental DC* 的屬性頁面 *Stimulus* 然後在 *U end* 中輸入 *4g LPM Multitone distortion* 中用到的電壓（*U start* 輸入 0.1V）。然後開始量測。

Step 47: 在結果窗口 *PEAK + BOTTOM* 中確定位移的峰值和谷值。

Step 48: 在結果窗口 *COMPRESSION* 中，檢查諧振頻率以下的振幅壓縮。

Step 49: 檢查低音音箱產生的直流位移 *DC-displacement*。找到換能器產生最大直流位移的頻率，並將其和換能器諧振頻率進行比較（如在實驗 *4g LPM Multitone distortion* 結果窗口 *Table Linear Parameters* 中所示）。

Step 50: 打開實驗 *3b DIS motor stability* 的屬性頁面 *Stimulus* 然後輸入臨界頻率  $f = 1.5 f_s$ 。確保屬性頁面 *Protection* 中音圈溫度監測 *voice coil temperature monitoring* 已打開。然後設置最大允許升高溫度到 60 K。開始量測。（基於溫度監控的保護措施讓使用超過實驗 *4g LPM Multitone distortion* 中的電壓的最大電壓 *U end* 成為可能。）

Step 51: 在結果窗口 *DC component* 中讀取最大值。並且和結果窗口 *Fundamental Component* 中 AC 分量進行比較。這個電機穩定麼？

### 7.4 諧波失真

Step 52: 打開實驗 *4a TRF SPL + harmonics* 的屬性頁面 *Stimulus* 然後調整激勵訊號電壓到 *4g LPM Multitone distortion* 中用到的電壓值。確保 *noise floor monitoring* 被勾選。開始量測。

Step 53: 打開結果窗口 *Y1(f) Spectrum* 然後檢查信噪比。在目標頻段內，SNR 超過了 30dB 麼？

Step 54: 打開結果窗口 *Impulse response* 並且到直達聲波附近設置左右窗口光標，這樣較晚到達的房間反射會被抑制。

Step 55: 檢查結果窗口 *Fundamental + Harmonics* 中的諧波。確定哪個諧波失真決定了總諧波失真 (THD)。

Step 56: 然後找高於諧振頻率  $f_s$  的最大失真處的頻率。比較此頻率處的諧波失真和實驗 *4g LPM Multitone distortion* 中的同頻率的多音失真。解釋這個差別。

### 7.5 等效輸入失真

Step 57: 複製實驗 *4a TRF SPL + harmonics* 然後粘貼在同一個 dB-lab 對象 (object) 下。重命名為 *4a TRF Equivalent Harmonics*。打開結果窗口 *Fundamental + Harmonics* 然後復制 *Fundamental* 曲線到剪貼板。打開屬性頁面 *Processing* 然後粘貼這個曲線到 *IMPORT*。

Step 58: 觀察結果窗口 *Fundamental + Harmonics*，然後檢查 *Fundamental* 曲線已經變平坦並且在 0 附近。這個窗口中的諧波失真曲線表示等效輸入失真。為什麼在低於諧振頻率的所有頻率時 EID 最恆定？

Step 59: 打開結果窗口 *Harmonic Distortion* 並且比較 EID 相對失真和實驗 *4a TRF SPL + harmonics* 中相應窗口的聲壓輸出中的相對失真。

## 7.6 互調失真

- Step 60: 打開實驗 *4e DIS IM Dist. (voice sweep)* 的屬性頁面 *Stimulus*。然後在 *U end* 輸入在實驗 *4g LPM Multitone distortion* 中用到的電壓 (*U start* 用 0.1 V)。開始測量。聽重現的高頻聲音中的波動和粗糙度。
- Step 61: 看結果窗口 *2<sup>nd</sup> Intermod, %* 和 *3<sup>rd</sup> Intermod, %* 然後找最大互調失真的頻率  $f_{\max}$ 。將其和實驗 *4a TRF SPL + harmonics* 中同頻率  $f_{\max}$  處的諧波失真相比較。

## 7.7 異音和其他不規則失真

- Step 62: 打開實驗 *5 TRF Rub and Buzz* 的屬性頁面 *page Stimulus* 然後輸入電壓值 1V。把這個量測重命名為 *5 TRF Rub and Buzz 1V*。開始量測。聽撞擊底部的聲音，音圈摩擦的聲音和其他不規則缺陷的症狀。
- Step 63: 打開結果窗口 *Fundamental + Harmonics* 然後尋找 *Absolute PHD* 曲線的最大值。這個曲線超過 *PHD limit (-40 dB)* 線了麼？重複量測來保證這個最大值是可重現的，並且不是由環境噪音所導致。一個沒有缺陷的揚聲器應該僅僅產生噪音（一條平直線，與頻率無關）。
- Step 64: 在很接近振膜處拿一個物體（筆，螺絲刀等等）。然後再次開始量測。如果振膜撞到了該物體並且產生一個衝激，你可以在 *Absolute PHD* 看到一個明顯的上升。打開屬性頁面 *I-Dist* 然後在 *Measure* 下選擇 *ICHD*。打開結果窗口 *Instantaneous Distortion 3D*，這裡展示了瞬時峰值因數與位移和頻率的關係。找到足夠讓振膜表面撞擊到該物體的正向位移和頻率。
- Step 65: 複製一個量測 *5 TRF Rub and Buzz 1V*。然後輸入 *4g LPM Multitone distortion* 中用到的電壓。重命名實驗 *5 TRF Rub and Buzz high voltage*。開始量測。聽音圈撞擊、摩擦的聲音和其他非常規缺陷的症狀。打開結果窗口 *Fundamental + Harmonics* 然後找到 *Absolute PHD* 曲線的最大值。重複實驗確保這個最大值是可重現的而不是由環境噪音所導致。這個曲線超過 *PHD limit (-40 dB)* 線了麼？如果沒有，繼續增加電壓然後重新量測。
- Step 66: 打開量測 *5 TRF Rub and Buzz high voltage* 的結果窗口 *Instantaneous Distortion 3D*，這裡展示了瞬時峰值因數相對位移和頻率的關係。找到 3D 窗口中的黑點，讀出產生了衝激失真的音圈的位置。
- Step 67: 討論導致量測衝擊失真的可能原因。

## 8 更多資料

KLIPPEL R&D SYSTEM 操作手冊 – *Transfer Function (TRF)* 轉移函數

KLIPPEL R&D SYSTEM 操作手冊 – *3D Distortion Measurement (DIS)* 3D失真量測

KLIPPEL R&D SYSTEM 操作手冊 – *Linear Parameter Measurement (LPM)* 線性參數量測 (LPM)

論文 “*Measurement of Equivalent Input Distortion*” “等效輸入失真量測”：

[http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know\\_How/Literature/Papers/Measurement\\_of\\_Equivalent\\_Input\\_Distortion\\_03.pdf](http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Literature/Papers/Measurement_of_Equivalent_Input_Distortion_03.pdf)

論文 “*Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances*” “衝激失真，異音和其他干擾的量測”

[http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know\\_How/Literature/Papers/Measurement\\_of\\_Rub\\_and\\_Buzz\\_03.pdf](http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Literature/Papers/Measurement_of_Rub_and_Buzz_03.pdf)