

培训3

揚聲器的非線性特性

1 實驗目標

- 確定揚聲器非線性失真的物理原因。
- 用非線性集中參數來對換能器進行建模。
- 理解揚聲器非線性特性和其結構設計的關係。
- 對揚聲器的非線性特性進行動態測量。
- 通過解讀非線性參數來訓練實際操作能力。
- 在測量中避免常見錯誤。

2 要求

2.1 實驗人員所需背景知識

建議能先完成訓練1和訓練2再來做這次訓練。

2.2 最小需求

實驗人員將會用到由 KLIPPEL 數據庫中線性集中參數 Masurement.kdbx（線性集中參數測量）所提供的測量結果，但並不需要對 KLIPPEL 的測量硬件進行完整設置。从 www.klippel.de/training 下載分貝實驗室並且在的 Windows 電腦上安裝，在其中觀察實驗數據即可。

2.3 可選需求

如果實驗人員有 KLIPPEL 研發測量系統，建議能使用指導老師或者其他實驗者提供的換能器進行更多的測試。為了能完成這些測試，可能需要以下的軟件和硬件：

- 大訊號識別模塊（LSI）
- 失真分析儀 DA2
- 激光傳感器
- 功率放大器
- 固定支架

3 訓練過程

1. 閱讀下面訓練相關的理論知識。
2. 看教學視頻並學習實際測量操作。
3. 回答預備問題來檢驗理解程度。
4. 依照教材來解讀數據庫中的實驗結果並且離線回答多選問題。
5. 上傳你的答案到匿名評分系統 www.klippel.de/training。
6. 獲得一封包含有學習證明的郵件 **Certificate of Mastery, Knowledge or Participation**（根據表現進行評分）。
7. 如果有條件使用硬件，在換能器上進行可選實驗。

4 介紹

揚聲器在小訊號域和大訊號域聽起來很不相同。揚聲器固有的非線性特性在訊號強度較高時候產生了額外的訊號失真。這些非線性特性和換能器物理結構有關，比如磁鐵的大小和重量，音圈的高度與磁隙的深度的比，和其他一些懸挂系統的幾何特性。

因此，第一次實際操作訓練的電聲等效電路的線性集中參數（比如磁力因數 Bl ）並不是恆定的，而是和瞬態變量有關，如音圈位移量 x 。集中參數的變化與非線性曲線的形狀相呼應，產生非線性訊號失真，其中包括了新的頻譜分量。這些就是諧波和互調，他們不存在於在揚聲器輸入訊號。

一個線性模型可以解釋揚聲器在小訊號域的特性。但現在需要一個非線性模型來研究以下方面：

- 限制聲學輸出（尤其是低頻情況）的因素。
- 產生可聽到的失真（對聲音質量有很大的影響）。
- 過載（產生疲勞和損傷）。
- 不穩定行為，如產生分叉（太高電壓情況下，由於非線性，音圈達到兩個振動態）和動態線圈抵消。
- 理想設計（低重量和大小情況下的性價比）。
- 換能器的效率（對可攜帶的設備的電池很重要）。
- 保護揚聲器（音圈位移的軟限制）。

以下的理論部分簡單地展示了在大訊號域工作的揚聲器模型，這對於後面操作訓練很有用。

4.1 重要的換能器非線性特性

以下部分會討論電動揚聲器中主要的非線性特性。

4.1.1 剛性 $K_{ms}(x)$

剛性 $K_{ms}(x)$ 描述了揚聲器懸掛系統的回复力 $F = K_{ms}(x)x$ 和音圈位移 x 的非線性關係。在小訊號情況下，剛性基本上是恆定的。在大訊號情況下，剛性隨著位移增加顯著增大，產生了很大的回复力，這時候懸掛（折環和定心支片）被拉伸，他們的外形改變很大（見圖1）。非線性柔順度（或稱力順）是非線性剛性的倒數 $C_{ms}(x) = 1 / K_{ms}(x)$ 。

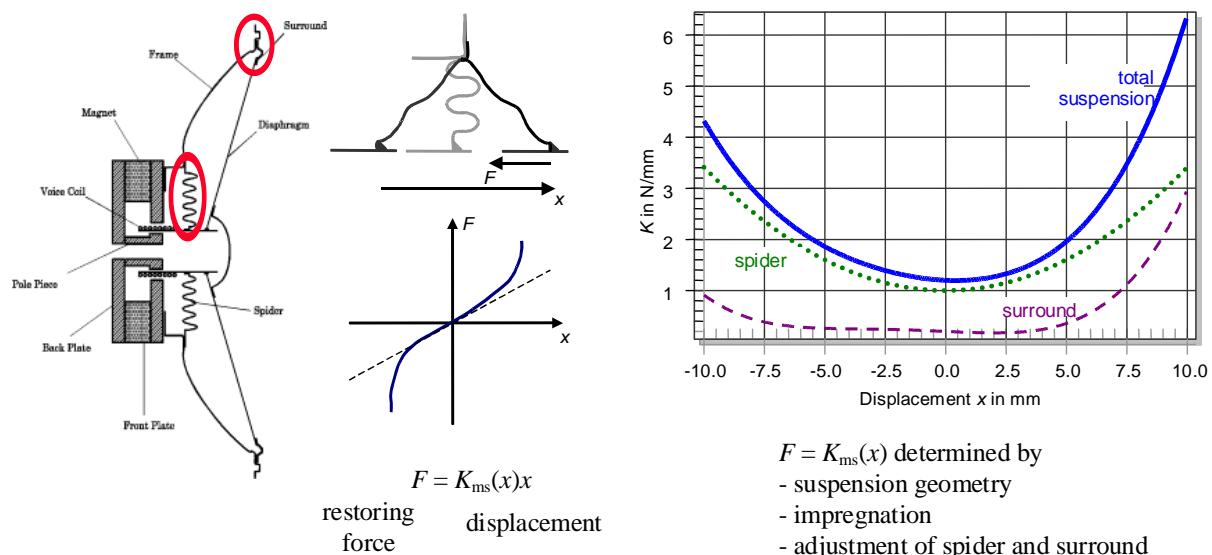


圖 1：折環和定心支片是造成非線性剛性 $K_{ms}(x)$ 的主因

4.1.2 磁力因數 $Bl(x)$

磁力因數 $Bl(x)$ 描述了電動換能器的電氣與機械域的耦合，它是磁通密度（或稱磁感應響度） B 在音圈長度 l 上的積分。和線性揚聲器模型情況下不一樣，磁力因數不是恆定的，而是一個真實換能器的音圈位移 x 的函數。由於較高的正負位移，磁力因數 $Bl(x)$ 減小，因為越來越多的線圈離開磁隙（磁隙中磁通密度 B 很高）。在很多應用情況下，需要一個對稱等長的磁力因數 $Bl(x)$ 曲線，它的最大值要在音圈靜止位置 $x = 0$ 處（見圖2）

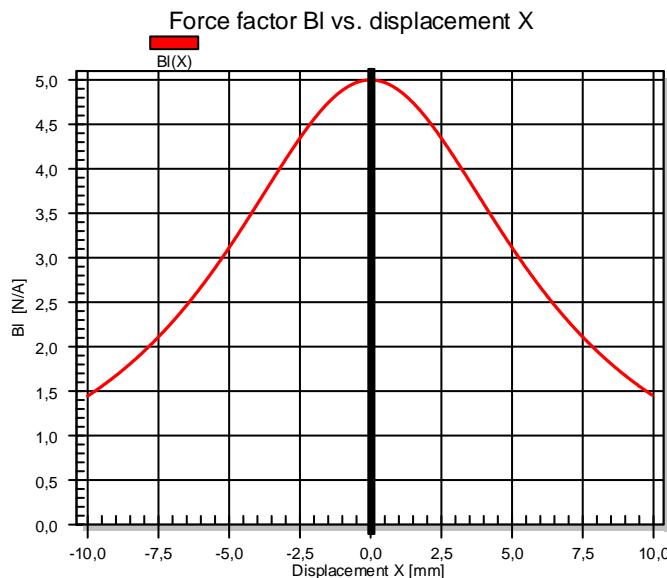


圖 2:磁力因數 $Bl(x)$ 與音圈位移 x

磁力因數 $Bl(x)$ 對電動換能器有兩個非線性影響：

磁力 force $F=Bl(x)i$ 激勵了機械系統，取決於與音圈的位置 x ，它產生了一個音圈電流和位移 x 的非線性相互作用

電壓（電動勢 EMF） $u_{EMF}=Bl(x)v$ 是由電動換能器電氣這一邊產生，它產生了一個位移 x 和速度 v 之間的非線性相互作用。

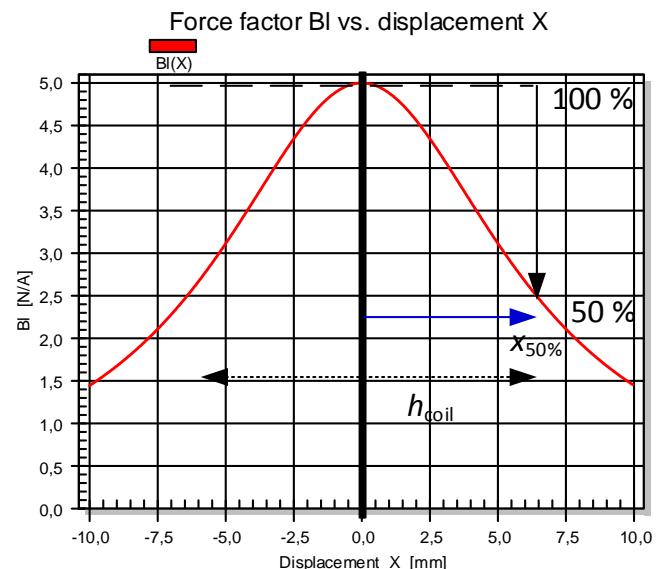
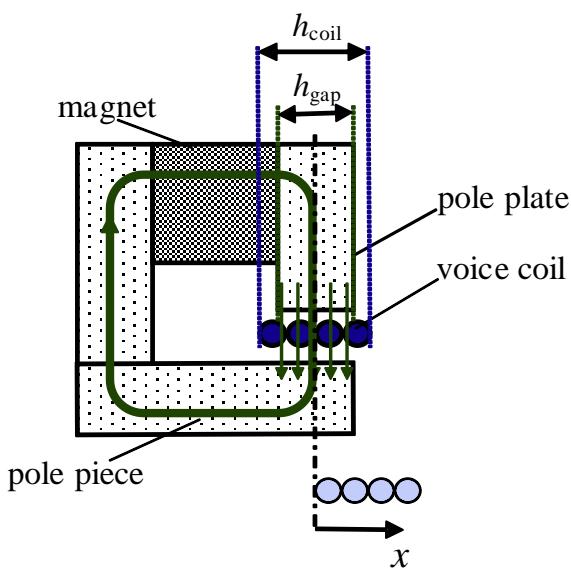


圖 3: 等長結構的非線性磁力因數 $Bl(x)$

電機拓撲結構（音圈高度和磁隙深度）直接關聯於磁力因數 $Bl(x)$ 對位移的曲線形狀。對稱結構（圖3中）在靜止位置提供了很高的 Bl 值，但是也有曲線的早期衰減。長音圈，如圖4，會在

$Bl(x)$ 曲線產生一個平直區域，因為在比較小的音圈位移情況下，在磁隙中總是有著恆定數量的線圈。不考慮磁隙之外的邊緣場（實際情況下磁場並不是出了磁隙就瞬間為0的），音圈位移 $x_{50\%}$ （即磁力因數減小到了50%的位移）與兩種拓撲結構中的音圈高度 h_{coil} 是相對應的。

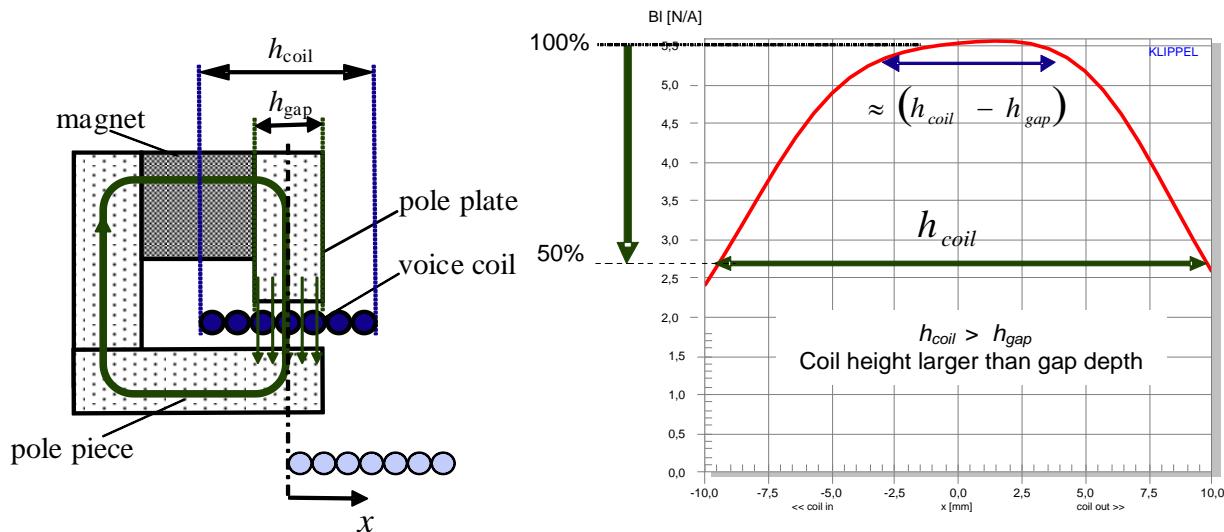


圖 4：長音圈的非線性磁力因數 $Bl(x)$

4.1.3 音圈電感 $L_e(x, i=0)$

音圈電感 L_e 也是低音揚聲器和低音炮很重要的非線性特性，因為電流會產生磁交流電場，這取決於線圈的位置。

如果音圈向正向移動，也即是向空氣部分，線圈就會在空氣中產生一個磁通 Φ ，這個磁通比音圈負向移動到磁隙的金屬內壁所產生的磁通要小很多（一個中間是空氣一個中間是金屬導磁柱）。這個非線性特性可以通過添加導電材料來減少，比如短路環或者靠近音圈的鋁質或銅質的的罩子，見圖5。這會產生一個反向的磁通 $\Phi_{counter}$ ，它能在負向位移處減少總的磁通量。（以短路環為例，其附著在導磁柱或者磁鐵上，只要極性調整到和線圈電流相反就能造成磁通量抵消效果。它的磁通量是由高速移動的帶有電流的線圈產生的磁場在整個導磁柱-極板-磁鐵結構中產生的渦流產生的，畢竟相對於移動中的線圈，導磁柱-極板-磁鐵結構才是在高速振動的，它們在磁場中運動，會在本身產生電流，這個電流就是渦流。現在增加一個電阻小很多的短路環，那麼渦流電流都會集中在短路環中，產生的磁通量可以被利用來抵消線圈造成的磁通量。）

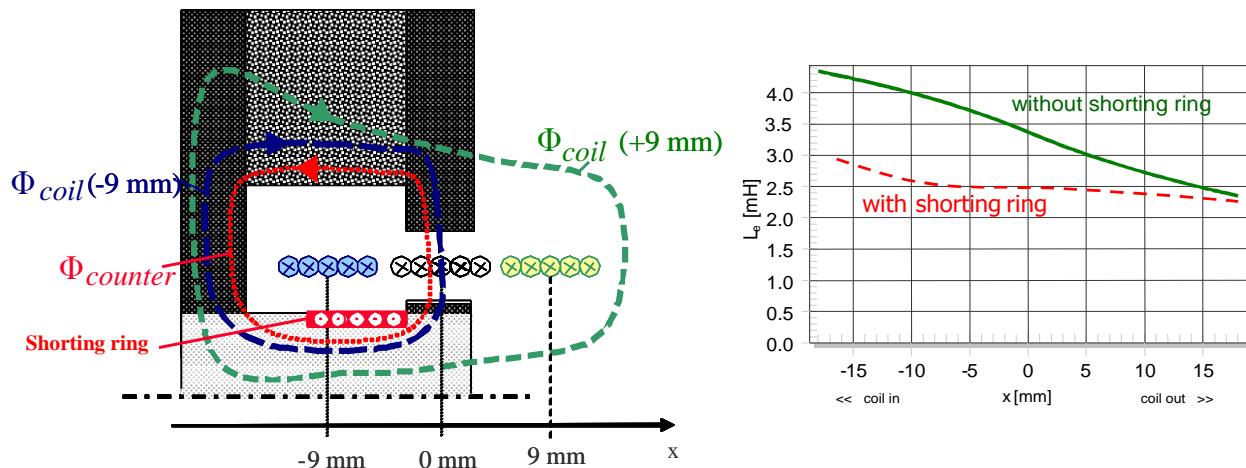


圖 5：在導磁柱上，導磁上板下方的區域，鋪上短路環可以減少音圈負向位移時的電感，得到一個幾乎恆定的電感。

音圈電感 $L_e(i, x = 0)$

音圈的電感 $L_e(i)$ 還取決於電流 i ，因為在鐵質材料中磁場強度 H 和磁通密度 B 之間的關係是非線性的。圖6展示了在位移 $x = 0$ 時候三個不同音圈電流值的總磁通密度的變化。在 $i = 0 \text{ A}$ 時，磁鐵產生的磁場強度 H_2 決定了 $B(H)$ 圖中工作點。當電流升高 ($i = 10 \text{ A}$) 整個磁場強度 H_3 升高了，鐵質材料（金屬導磁柱和周圍環繞的鐵質材料）工作在更高的飽和態下，磁導率 μ 下降。磁導率 $\mu(i)$ 的變化導致電感 $L_e(x, i)$ 也與電流 i 有關。

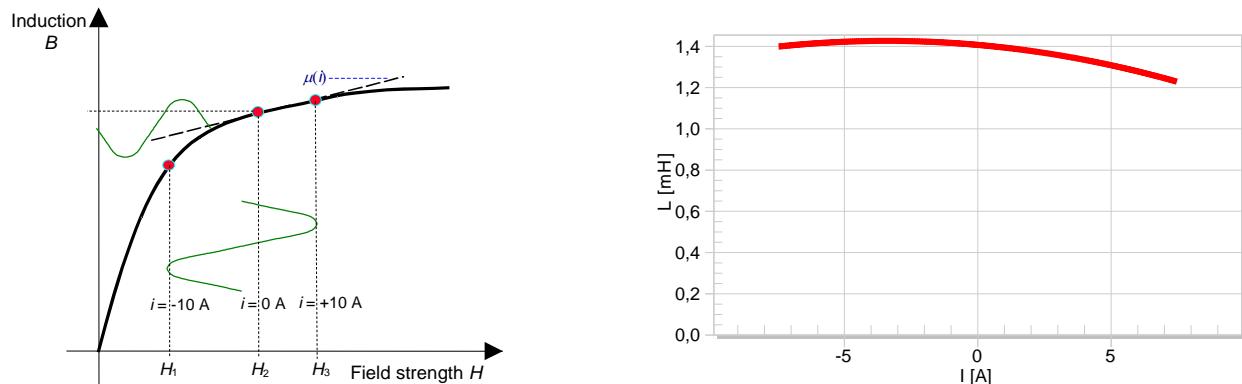


圖 6：音圈電感 $L_e(i, x = 0)$ 和音圈電流 I 關係

非線性電感也許可以用短路環來減少，短路環就是一個鐵質線路或者在音圈附近放置短路材料（低阻）。

4.2 非線性集中參數模型

揚聲器的主導的非線性特性之間的相互作用可以通過建立一個集中參數模型來研究，見圖7

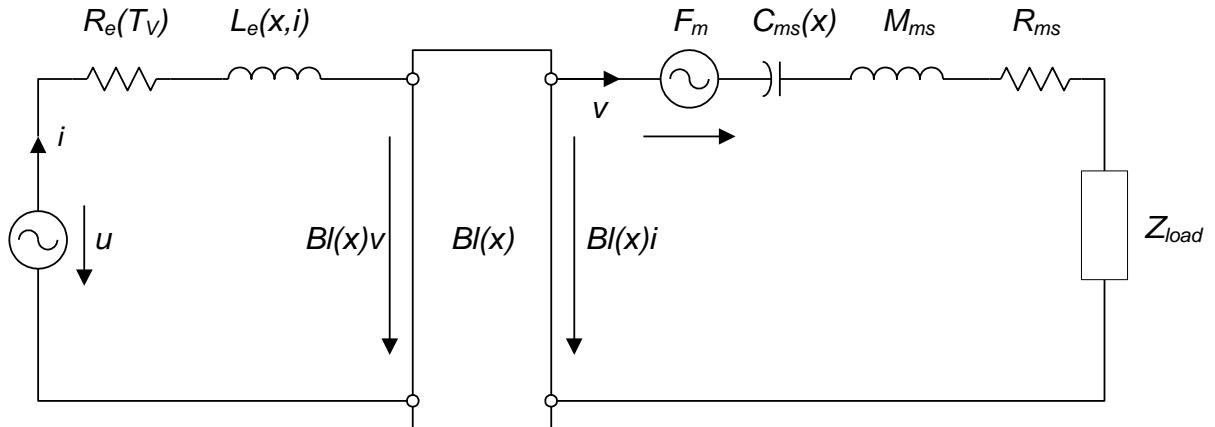


圖 7:包含非線性集中參數的電動換能器的等效電路

該等效電路的電氣這一邊（左邊）展示了電阻 R_e 、非線性電感 $L_e(x, i)$ 和由速度與磁力因數產生的恢復電動勢的影響。電動驅動力 $Bl(x)v$ 和磁阻力 F_m （非線性電感 $L_e(x, i)$ 的第二非線性效應）激發了右邊的機械系統（包括了非線性柔度 $C_{ms}(x) = 1 / K_{ms}(x)$ ，移動質量 M_{ms} ，機械阻抗 R_{ms} 和負載 Z_{load} ）。

5 揚聲器非線性實驗

揚聲器非線性可以通過不同方法測量，可參見 IEC standard 62458.

5.1 靜態測量

靜態測量，如圖8，使用了一個直流訊號作為激勵訊號（比如一個恆力）來測量揚聲器在穩態下的狀態變量（比如音圈的位移）。這個測試可以用不同大小的直流訊號重複。最終得到力-偏差曲線force-deflection curve，這是計算非線性剛性的基礎。因為需要對非線性曲線採樣很多點，這個測量很耗時。而且它還有兩個缺點。懸掛材料的粘彈效應會導致位移過程中的蠕變和滯後效應。這在高頻情況下見不到。靜態測量技術不太適合確定電感的非線性，因為直流電不產生磁通量的時間導數，在端口沒有後向感應電壓。

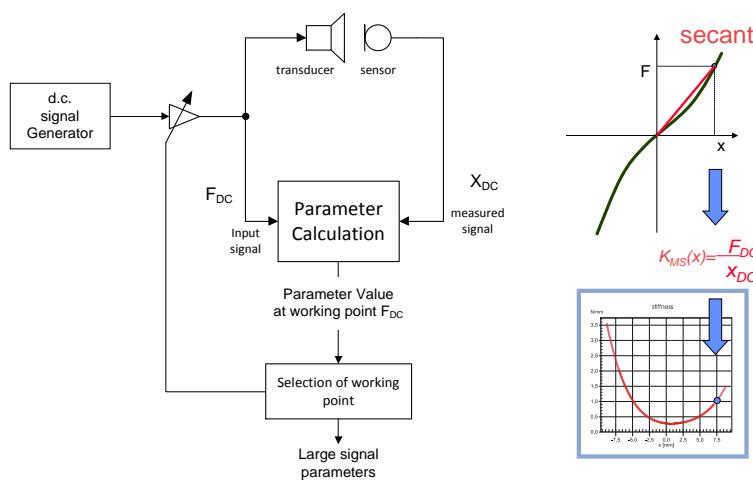


圖 8:揚聲器非線性的靜態測量

5.2 動態方法

動態方法採用了足夠大小和帶寬的交流激勵訊號，比如音樂或者一個類音頻訊號（噪音）。一般情況下不會有直流分量。

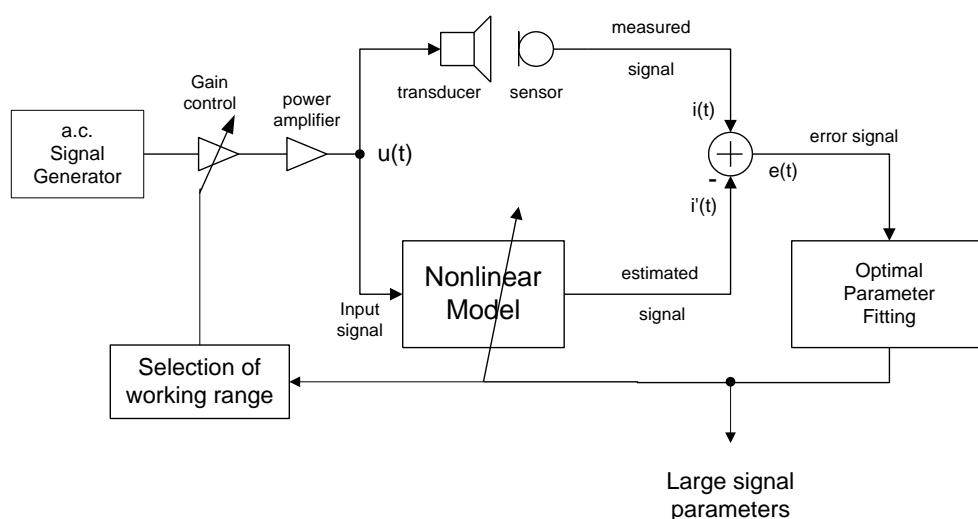


圖 9:全動態方法測量非線性集中參數模型，在揚聲器端口測量電壓 $u(t)$ 和電流 $i(t)$

5.2.1 確定參數

在揚聲器終端測量電壓和電流可以確定電氣域的揚聲器測集中參數模型。這些參數估計值可以通過不斷縮小錯誤訊號 $e(t) = i(t) - i^*(t)$ ，也就是縮小測量值和估計值之差，來逼近真實值。在一個更新間隔（1s）中最大誤差和最大電流值的比率 E_i 代表了系統識別的精確度。功率放大器的增益可以通過自適應技術得到，相對誤差 E_u 代表了終端電壓測量值和估計值的差異。

電阻 R_e 和電感 $L_e(x_{rel})$ 的非線性特性可以直接得到以Ohm和Henry為單位的值。由 $Bl(x)v$ 定義的反向電動勢可以被用來監測機械系統，還能被用來確定靜止點 $x = 0$ 處的諧振頻率 $f_s(x = 0)$ 和品質因數 $Q_{ms}(x = 0)$, $Q_{es}(x = 0)$ 以及 $Q_{ts}(x = 0)$ 。電學測量還給出了相對的磁力因數非線性 $Bl(x_{rel}) / Bl(x = 0)$ 和剛性非線性 $K_{ms}(x_{rel}) / K_{ms}(x = 0)$ ，它給出了非線性曲線與相對位移 x_{rel} ($-1 < x_{rel} < 1$) 的關係。

5.2.2 狀態識別

系統識別（基於電壓和電流監測）給出了瞬間音圈位移 $x_{rel}(t)$ 和其他的派生出的機械訊號（速度，加速度），甚至還有測量時任意時間的預測的輸出聲壓 $p(t)$ 。機械和聲學訊號是相關訊號。

一個可選激光傳感器可以用來測量音圈的位移和確定磁力因數 $Bl(x = 0)$ （作為物理量，以N/A校準）。精確度可以用測量音圈位移和建模音圈位移的相對誤差 E_x 來評價。誤差 E_x 說明模型不夠精確（比如一個二階模型被用於音箱系統），而且在激光測量中有光學故障。建議用激光信息來檢查揚聲器的極性，和換能器終端與揚聲器導線的正確接法，這與位移方向相關（負向位移應該是音圈朝著導磁下板方向運動）。

還有，激光頭提供了所有機械參數和狀態變量的粗略的估計值。導入一個用小訊號測試（線性參數測量，LPM）得到的已知的小訊號參數（ $Bl(x = 0)$ 或者 M_{ms} ）可以對上面估計值進行精確的校準。

確定直流電阻 $R_e(t)$ 與測量時間的關係也是計算測量期間音圈溫度上升 ΔT_v 的基礎。

5.2.3 保護換能器

換能器的測量始於小訊號域，這時激勵訊號不會讓音圈顯著發熱，非線性也可以忽略。訊號的大小是緩慢提升到增強模式“Enlargement Mode”，這時，輸入功率，音圈溫度，非線性磁力因數 $Bl(x)$ 和非線性剛性 $K_{ms}(x)$ 都可以得到確認。激勵訊號的最大值就是輸入功率，音圈溫度，或者非線性參數的變化剛好不超過用戶定義的門限值，否則造成過熱或者機械過載。在確定了特定換能器的工作範圍後，非線性模式“Nonlinear Mode”用一個慢學習速度來確保自適應參數識別的最精確度。

5.2.4 失真分析

集中參數模型的非線性參數的識別是計算失真峰值比 D_B , D_C , D_L 和 $D_{L(i)}$ 的基礎，他們分別來自於預測聲壓輸出訊號 p_{total} 的 $Bl(x)$, $C_{ms}(x)$, $L_e(x)$ 和 $L_e(i)$ 。

5.3 解讀非線性參數

非線性參數的曲線包含了關於非線性特性的物理原因和性質的重要信息。它和揚聲器組件的屬性直接相關。

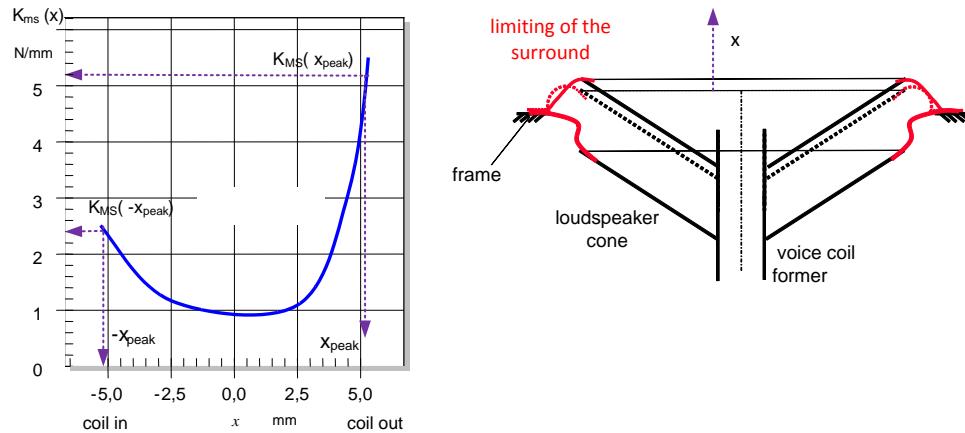


圖 10:由懸掛系統的限制導致的剛性的非對稱特性

5.3.1 剛性的非對稱性

定心支片和折環的中波紋圈的非線性和不同的懸掛組件的組合會導致剛性曲線 $K_{ms}(x)$ 的非對稱性。舉例來說，折環在正向偏移，見圖 10 右邊，產生了一個非對稱剛性曲線，見圖 10 左邊。這樣的非對稱性不是懸掛系統想要的，因為它提升了非線性失真，並且當交流訊號上加載了直流位移分量以後音圈會朝著懸掛系統柔軟的一邊移動。

剛性曲線的非線性可用一個量來描述

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

上面公式使用了 K_{ms} 曲線中負向和正向最大位移 $\pm x_{peak}$ 處的剛性。 A_K 的正負號與非線性整流過程動態產生的直流位移的正負號相關（由於剛性非線性，導致真正的剛性最小的點偏移了靜態位置，那麼音圈就會以新的基準點按照 AC 訊號振動，這個偏移的距離就叫做 DC 直流位移分量）

剛性值 $K_{ms}(x = 0, x_{peak})$ 在靜止位置 $x = 0$ 處不是恆定值而是取決於之前激勵訊號產生的位移極值。這個特性可以解釋為懸掛材料(橡膠，纖維，泡沫……)的粘彈效應。粘彈效應會造成材料屬性的瞬間變化。

5.3.2 磁力因數的非對稱性

磁力因數 $Bl(x)$ 的非對稱性還啟動了交流訊號的整流，產生一個直流分量，把音圈從 Bl 最大值處移開，並且動態提升非對稱性。這個過程是揚聲器不穩定和過度的二階諧波失真與互調失真的原因。

用對稱點 x_{sym} 可以簡單評估磁力因數的非對稱性。這個值由下定義：

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

其中 x_{sym} 是音圈的虛擬偏移 x_{off} ，在正負最大位移 $\pm x_{ac}$ 處產生相同的 Bl 值，見圖 11。如果 Bl 曲線形狀本身就不對稱，是扭曲的，曲線的偏移不是一個固定值，那麼對稱點 x_{sym} 會隨著峰值位移 x_{ac} 變化。

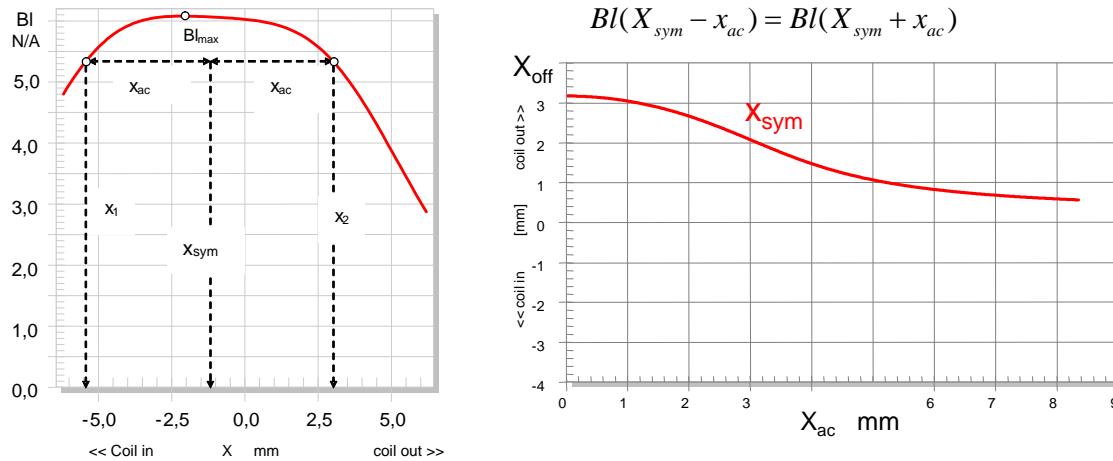


圖 11：對稱點 $x_{sym}(x_{ac})$ 與激勵訊號產生的峰值位移 x_{ac}

對於產生很小的峰值位移的訊號，對稱點所在處就是 $Bl(x)$ 的最大值。對於很大的峰值位移 x_{ac} ，對稱點 x_{sym} 細出了讓 $Bl(x)$ 的衰減曲線對稱的虛擬位移 x_{off} 。 Bl 對稱點是確定音圈最佳靜止點的有效判斷標準。關於 Bl 的非對稱性 A_{Bl} ，定義如下：

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

A_{Bl} 描述了相對於 x_{off} (就是音圈偏移的靜態位置) 距離為峰值位移 x_{ac} 的兩個對稱點的 Bl 值的相對差值。

如果 A_{Bl} 小於 5 %，非對稱性可以忽略，不需要改正靜止位置。這個情況取決於峰值位移 x_{ac} 和中心工作點 x_{off} ，也就是音圈偏移的靜止位置，見圖 12 中灰色區域。對於小的峰值位移 $x_{ac} < x_{Bl-asym}$ ，對稱區域就相對較寬，並且因為圖 12 左上方的 $Bl(x)$ 圖中平台區域，對稱區域還包括了當前音圈靜止位置 $x_{off} = 0$ 。藍色虛線表示了音圈當前靜止位置 $x_{off} = 0$ ，此處臨界峰值位移為 $x_{Bl-asym}$ ，超過了就會離開灰色區域。更高的幅度 $x_{ac} > x_{Bl-asym}$ 下，當前靜止位置（的振動位移）超出了對稱區域，音圈應該移到新的靜止位置 $x_{off} = -2.5$ mm。這樣就確保了在大訊號時，線圈離開磁隙的正負位移是對稱的。因為 $Bl(x)$ 曲線下降處很陡，對稱區域在峰值位移 x_{ac} 很大的時候非常的窄。

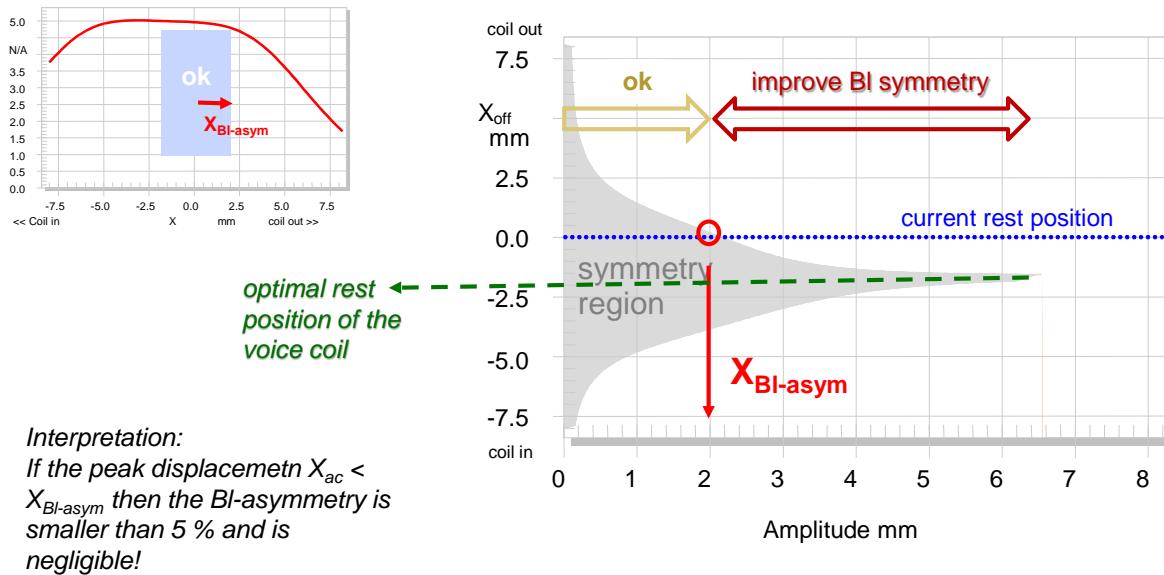
圖 12: 評估 $BI(x)$ 的對稱性，找到最佳的音圈靜止位置。

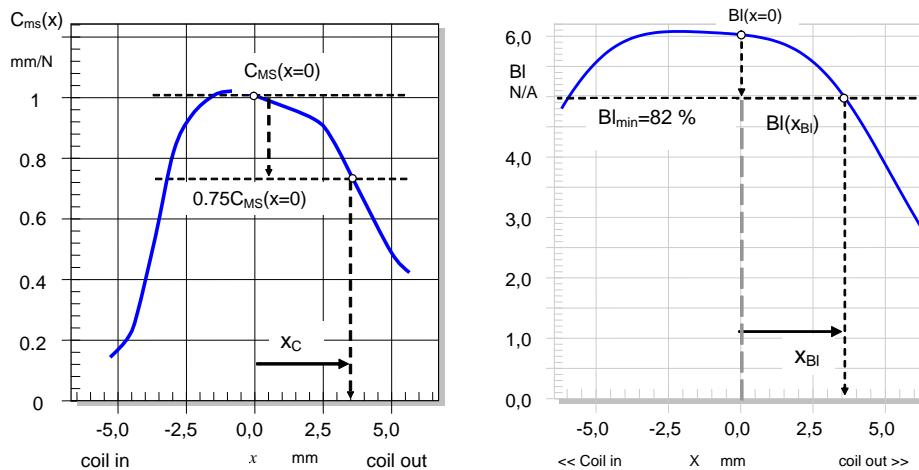
圖3中那種等長對稱結構電動換能器只有很窄的 BI 對稱區域，並且需要很仔細地調整音圈靜止位置。這是因為 $BI(x)$ 沒有平台區域，在正負位移時候， BI 值隨著增大的峰值位移迅速衰減。

5.4 峰值位移 $X_{max10\%}$

音圈的最大峰值位移 $X_{max10\%}$ 是一個評估換能器的機械性能的很重要的參數，這些機械性能限制低頻段時候的聲音重放。該值是根據IEC standard 62458定義為音圈的峰值位移。在該值時，總的諧波失真或者調製失真最大值達到定義的門限值 $d = 10\%$ 。另外，這個值可以從由音圈位移 x 決定的揚聲器非線性的形狀得到。對每個主導的非線性都引入了一個單獨的位移極限：

- X_C 由非線性柔順度決定的位移 x
- X_{BI} 由非線性磁力因數決定的位移 x
- X_L 由非線性電感決定的位移 x

最小的位移限制大約對應於產生10%失真的最大峰值位移 $X_{max,10\%}$ 。

圖 13: 由非線性柔度 $C_{ms}(x)$ 和磁力因數 $BI(x)$ 計算位移限制 X_C 和 X_{BI}

5.4.1 位移限制 X_{Bl} 和 X_C

圖13左側是由非線性柔順度 $C_{ms}(x)$ 的限制來計算出的峰值位移 X_C 。這個限制時是柔順度降到靜止位置時柔順度的75%時 $C_{ms}(X_C) = 0.75 C_{ms}(x=0)$ 的最小的位移。對於一個單音激勵訊號，如果音圈位移極值達到 X_C ，換能器會在聲壓輸出產生10%諧波失真。

右邊的圖是峰值位移 X_{Bl} ，是由磁力因數的限制來計算出的，此時磁力因數降低到了靜止位置時的82% $Bl(X_{Bl}) = 0.82 Bl(x=0)$ 。峰值位移為 $x_{peak} = X_{Bl}$ 的換能器在雙音激勵訊號的聲壓輸出產生10%的互調失真。

6 準備問題

在正式訓練前檢查理論知識。選擇所有正確的答案（有時候答案不止一個哦）。

QUESTION 1: 揚聲器的非線性特性有沒有正面影響啊？

- MC a:** 在電機和懸掛系統中的非線性特性會限制音圈的峰值位移，防止音圈撞底板。
- MC b:** 磁力因數的非線性與換能器在通頻帶($f > f_s$)的效率直接相關。舉例來說，一個等長結構相比於長音圈可以在靜止位置產生一個較高的 Bl 值對於正常的聲音訊號則能有更多的聲能輸出。這減少了可攜帶音響設備的耗能，延長電池壽命。
- MC c:** 有非線性磁力因數和剛性的揚聲器可能比更線性的揚聲器更小，更輕和更便宜。
- MC d:** 有些揚聲器的非線性特性（比如，低音炮的非線性剛性）會產生可以接受甚至在特定情況下有益的非線性特性。

QUESTION 2: 為什麼需要在揚聲器診斷和設計時直接測量非線性特性？

- MC a:** 非線性參數顯示了失真的物理原因，而失真的測量顯示了非線性系統的症狀。非線性參數不需要對揚聲器物理建模，但是失真測量需要精確的模型。
- MC b:** 非線性參數與零部件的幾何尺寸和材料直接相關。
- MC c:** 非線性參數描述了換能器，並且很大程度上與激勵訊號的屬性無關（與失真測量相反）。

QUESTION 3: 動態和靜態測量非線性參數的不同在哪裡？

- MC a:** 動態測量方法可以用一個普通聲音訊號（比如音樂）作為激勵訊號加載到揚聲器上。靜態測量方法一般用一個直流訊號（比如恆定的力）作為測試訊號，由於材料的粘彈效應，這會導致不同的變化（比如懸掛系統的蠕變）。
- MC b:** 靜態測量比動態測量更耗時。
- MC c:** 測量揚聲器非線性參數的動態和靜態測量方法沒有什麼區別。

QUESTION 4: 什麼特性（參數和狀態信息）可以通過僅僅測量揚聲器電壓和電流得到。

- MC a:** 監測直流阻抗 R_e 的變化得到音圈溫度的增量。
- MC b:** 諧振頻率，品質因數 Q_{ms} , Q_{es} 和 Q_{ts} 。
- MC c:** 代表了振動質量，柔順度和機械以及聲學損耗的電氣參數。
- MC d:** 相對機械特性，比如非線性的磁力因數 $Bl(x_{rel}) / Bl(x=0)$ 相對於音圈位移 $x_{rel} = x / x_{peak}$ 的曲線形狀。
- MC e:** 單位為 mm 的音圈位移（不用來自激光傳感器的信息或者導入機械參數）

QUESTION 5: 用於電動換能器(比如 LSI 低音揚聲器)的動態參數測量方法的也可以用於確定靜電換能器的非線性參數麼？

- MC a:** 可以，所有電聲換能器都有顯著的非線性特性。

- MC b: 不行，換能器原理不同，考慮到物理模型的特點需要不同測量方法。

7 用數據庫測量（不需要硬件）

Step 1: 觀看演示視頻 Loudspeaker Nonlinearities 來看如何實際操作線性集中參數測量實驗。

Step 2: 從網站 www.klippel.de/training 下載軟件 **dB-Lab** 並且安裝到你的 PC 上

建議：推薦離線做以下練習，將答案記錄在一張紙上。

7.1 選擇揚聲器模型

Step 3: 打開數據庫“Training 3_Loudspeaker Nonlinearities.kdbx”。對象  “woofer 4inch in free air small woofer”包含了在空氣中夾在激光測量支架上且沒有任何外殼的小低音揚聲器的 LPM 和 LSI 測量。觀察實驗  “1 LPM TS-Parameters”的小訊號測量結果。並且讀出諧振頻率 f_s ，選出有正確換能器模型的大訊號識別模塊(LSI)。

QUESTION 6: 哪個模型能夠更好對測量的換能器建模？

- MC a: LSI 低音揚聲器，($f_s < 400$ Hz)，空氣
- MC b: LSI 低音揚聲器音箱，($f_s < 400$ Hz)，封閉外殼
- MC c: LSI 低音揚聲器音箱，($f_s < 400$ Hz)，外殼開孔
- MC d: LSI 高音揚聲器($f_s > 200$ Hz)

7.2 測量步驟

Step 4: 第一次測量的結果存在實驗  “2a LSI Clim 50% without laser”中。打開結果窗口 “Temperature, Power”，王座拖動粉紅色垂直光標線（在開始是黑色的）到實驗開始時間 ($t = 0$) 來看實驗過程。同時按住 SHIFT 和右方向鍵來沿時間軸向後移動光標，觀看整個測量過程。

Step 5: 在窗口 “Temperature, Power” 中移動時間光標到 “Linear Mode 3(7)” 結束，“Enlargement Mode 4(7)” 開始的時刻，看結果窗口 “State” 和磁力因數 “Bl (X)”。

QUESTION 7: 兩種模式有什麼區別？

- MC a: “Linear Mode 3(7)” 提供了精確的線性參數(T/S parameters).
- MC b: 在“Linear Mode 3(7)” 裡非線性曲線是平的，並且假定換能器是工作在足夠小幅度的訊號情況下，這時非線性特性可以忽略不計。對揚聲器防止機械過載的保護在“Enlargement Mode 4(7)” 時被激活，這時候非線性參數可以識別。
- MC c: 在“Linear Mode 3(7)” 時音圈溫度增量 Delta T_v 是 0，因為瞬間音圈電阻 R_e 被測量並被用作表示實驗起始時間的溫度的參考值。過熱保護在“Enlargement Mode 4(7)” 時變得活躍，這時候可以得到音圈溫度增量 Delta T_v 。
- MC d: 輸入功率在“Linear Mode 3(7)” 結束時候基本恆定。但是在“Enlargement Mode 4(7)” 時緩慢增長直到達到允許工作範圍的門限（由保護參數確定）。

7.3 保護限制

- Step 6: 在結果窗口“**Temperature, Power**”中調整光標到測量的最後（光標變黑）。打開結果窗口“**Bl (X)**”，展示了相對磁力因數比 $Bl(x) / Bl(x = 0)$ 与相對位移 x / x_{prot} 的關係。讀取在工作區域中負位移 $-x_{prot}$ 和正峰值位移 x_{prot} 之間的最小磁力因數比 $Bl_{min} = \text{MIN} \{ Bl(x) / Bl(x = 0) \}$ 。
- Step 7: 打開結果窗口柔順度“**Cms (X)**”，有相對柔順度比 $C_{ms}(x) / C_{ms}(x = 0)$ 與相對位移 x / x_{prot} 的關係。讀取工作區域中負位移 $-x_{prot}$ 和正峰值位移 x_{prot} 之間的最小柔順度比 $C_{min} = \text{MIN} \{ C_{ms}(x) / C_{ms}(x = 0) \}$ 。
- Step 8: 在結果窗口“Temperature, Power”中讀取實際電氣輸入功率 P_{real} 和音圈溫度增量“Delta Tv”。
- Step 9: 分別比較結果窗口“**State**”裡的 Delta T_v , Bl_{min} , C_{min} , P_{real} 和在屬性 property 頁面下“**Protection**”裡定義的相應的門限值 T_{lim} , Bl_{lim} , C_{lim} 和 P_{lim} 。

QUESTION 8: 什麼參數限制工作區域？

- MC a:** 音圈溫度增量 Delta T_v
- MC b:** 最小磁力因數比 Bl_{min}
- MC c:** 最小柔順度比 C_{min}
- MC d:** 實際輸入功率 P_{real}

7.4 激光傳感器

- Step 10: 打開實驗“2b LSI Clim 50%”，這是用一個激光傳感器得到音圈位移來測量的。比較結果窗口“State”, “Bl (X)”, “Kms (X)”和 Temperature, Power”與“2a LSI Clim 50% without laser”里相應的結果窗口。

QUESTION 9: 實驗 2a 和 2b 有什麼區別？

- MC a:** 實驗2a 用相對量（各種比值）表示機械參數，這是因為沒有用到激光，沒有機械參數導入。實驗2b 從測量位移訊號中得到磁力因數，並且以絕對值形式給出機械參數（用機械單位，比如磁力因數 $Bl(x)$ 用 N/A）。
- MC b:** 非線性參數 $Bl(x)$ 和 $K_{ms}(x)$ 的相對曲線形狀有很大的不同。
- MC c:** 由結果窗口 State 中 Delta T_v , Bl_{min} , C_{min} , P_{real} 各自允許的工作範圍有顯著地不同。
- MC d:** 實驗2b 用到了激光傳感器，有標籤音圈進“coil in”和標籤音圈出“coil out”，顯示了關於音圈移動的非線性曲線的方向。這個信息在不用激光的實驗2a 中沒有。

- Step 11: 打開實驗“4c LSI Error”的結果窗口“**Cms (X)**”，檢查標籤“coil in”是否按照一般慣例指向下負向位移。

QUESTION 10: 為什麼標籤“coil in”指向正向的位移呢？

- MC a:** 激光沒有正確校準（校準過程中，距離不是減少而是提升了）。
- MC b:** 激光器指向了振膜的後部。
- MC c:** 揚聲器裝配了短路環。
- MC d:** 揚聲器終端連接失真分析儀時候極性反了。

7.5 測量可靠度

- Step 12: 打開結果窗口“**Error (t)**”然後看識別錯誤 $E_i(t)$, $E_x(t)$ 和 $E_u(t)$ 與時間的關係。

QUESTION 11: 錯誤 $E_i(t)$ 展示了什麼？

- MC a:** $E_i(t)$ 描述了輸入電流 i 與時間關係的測量值和預測值的不匹配。
- MC b:** 很高的錯誤值 $E_i(t)$ 也許是由於選取的模型和被測換能器的不匹配。
- MC c:** 很高的錯誤值 $E_i(t)$ 也許是由於電壓和電流傳感器在高幅值情況下的限制（還會產生一個額外的警告）。
- MC d:** $E_i(t)$ 顯示了功率放大器的線性和非線性失真。

QUESTION 12: 錯誤 $E_u(t)$ 說明了什麼？

- MC a:** $E_u(t)$ 描述了功率放大器的輸入和輸出訊號間的差異。
- MC b:** $E_u(t)$ 顯示了由於高通濾波器的削波，時延，截止頻率導致的功率放大器產生的線性和非線性失真以及噪音。
- MC c:** 高錯誤值 $E_u(t)$ 也許是由選取的模型和被測的換能器的不匹配導致。
- MC d:** 沒有連接激光。

QUESTION 13: 錯誤 $E_x(t)$ 說明了什麼？

- MC a:** 激光傳感器沒有正確校準（測量的位移要麼太小要麼太大）。
- MC b:** 使用激光傳感器測量位移失敗（錯誤距離，光學阻礙，目標表面不反射）。
- MC c:** 功率放大器的線性或者非線性失真（比如門限）不會影響位移錯誤 E_x 。這是因為音圈位移 x 是由揚聲器終端測量的電壓和電流計算得到的。
- MC d:** 没有连接激光。

QUESTION 14: 如何檢查參數識別的精度？

- MC a:** 很低的錯誤值 E_i ($E_i < 30\%$) 表示模型的輸入電流與測量得到的電流 i 一致。
- MC b:** 很低的錯誤值 E_x ($E_x < 20\%$) 顯示模型機械位移與測量位移 x 一致。但是，這個標準需要激光傳感器在保證足夠信噪比情況下精確地測量位移。
- MC c:** 一個高的錯誤值 E_u ($E_u > 50\%$) 顯示終端測量電壓與功率放大器輸入的訊號不一致。但是放大器產生的適度失真對參數測量精度沒有影響。這是因為揚聲器終端的電壓和電流被用作系統識別。

7.6 從 LPM 導入校準參數

Step 13: 選擇實驗  “1 LPM TS-Parameters” 打開屬性頁面“Im/Export”。點擊“Export to Clipboard”。

選擇實驗  “2a LSI Clim 50% without laser” 然後在屬性頁面“Im/Export” 裡點擊“Import from Clipboard”。相對機械參數和相對位移會被導入的參數的絕對數值代替。

QUESTION 15: 為什麼推薦導入磁力因數 $Bl(x = 0)$ 和振動質量 M_{ms} ？

- MC a:** 線性參數測量(LPM)以最高精度給出了在小訊號域的集中參數，它考慮到了低頻段的粘彈效應和高頻段的阻抗（損耗電感）的不規則情況。
- MC b:** 大訊號識別(LSI)使用了激光傳感器，得出了一個比傳統小訊號測量方法更精確的 $Bl(x = 0)$ 值和 M_{ms} 值。
- MC c:** 沒用到激光傳感器的大訊號識別(LSI)本質上是一個電學測量，可以用於揚聲器或任何工作在惡劣環境（氣候室）中的電動換能器。這種情況下可以通過導入揚聲器型號的說明書中至少一個機械參數($Bl(x = 0)$ 或 M_{ms}) 來對機械參數校準。

7.7 揚聲器非線性的後果

Step 14: 在實驗“**2b LSI Clim 50%**”中打開結果窗口“**Cms (X)**”，然後檢查非線性柔順度。右鍵單擊以啟動交叉光標然後尋找對應於柔順度 $C_{ms}(X_C) = 0.75 C_{ms}(x = 0)$ 時的最小位移 X_C ，其對正弦聲音訊號($f_1 = f_s$)產生10%諧波失真。

QUESTION 16: “**2b LSI Clim 50%**”中測量的揚聲器的位移 X_C 多大？

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

Step 15: 打開“**2b LSI Clim 50%**”中結果窗口“**Bl (X)**” 然後觀察非線性磁力因數。鼠標右鍵啟動交叉光標然後尋找對應於 $Bl(X_{Bl}) = 0.82 Bl(x = 0)$ 的最小位移 X_{Bl} ，其對正弦雙音訊號 ($f_1 = f_s$ and $f_2 = 1.5 f_s$) 產生10%互調失真。

QUESTION 17: “**2b LSI Clim 50%**”中測量的揚聲器位移 X_{Bl} 多大？

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

Step 16: 打開“**2b LSI Clim 50%**”中結果窗口“**Nonlinear Parameters**” 然後對比讀數和位移限制 X_C , X_{Bl} , X_L ，他們分別對應與能產生10%諧波失真或者互調失真的非線性柔順度 $C_{ms}(x)$ ，磁力因數 $Bl(x)$ 和電感 $L(x)$ 。

QUESTION 18: 確定位移門限最低的非線性參數，它給出了揚聲器的 $X_{max10\%}$ 值。

- MC a:** 折環柔順度 $C_{ms}(x)$
- MC b:** 磁力因數 $Bl(x)$
- MC c:** 多普勒效應
- MC d:** 電感 $L(x)$

7.8 激勵訊號的影響

打開“**2b LSI Clim 50%**”中結果窗口“**Distortion**” 然後看聲壓輸出中由各非線性特性導致的非線性失真。比較最大的極值 D_C , D_B , D_L 和 $D_{L(i)}$ 隨時間的變化。

QUESTION 19: 為何失真的數值隨著時間一直增加？

- MC a:** 激勵訊號的電壓在增強模式“Enlargement Mode”下增加了，更高的狀態變量（位移，電流）導致了揚聲器非線性。
- MC b:** 自適應參數估計需要一些時間來收斂最佳參數值。系統識別在非線性模式“Nonlinear Mode”最後給出了最高精度的非線性參數。

QUESTION 20: 在測量的最後，哪個非線性特性導致了最大的聲壓輸出的非線性失真峰值？

- MC a:** D_C 代表了折環的柔順度 $C_{ms}(x)$ 。
- MC b:** D_B 代表了磁力因數 $Bl(x)$ 。
- MC c:** D_L 代表了電感 $L(x)$ 與位移的關係。

- MC d: $D_{L(i)}$ 代表了電感與電流關係

Step 17: 打開測量  “3 LSI Clim 50% white noise”的結果窗口“Distortion”，這裡用頻段從75Hz 到 1.5KHz 的帶通濾波器濾波後的白噪音作為激勵訊號（見屬性頁面“Generator”）。把 D_C , D_B , D_L 和 $D_{L(i)}$ 的最大峰值和  “2b LSI Clim 50%”（用粉紅噪音作為激勵訊號）里相應數值比較。

QUESTION 21: 激勵訊號的頻譜屬性會影響失真的產生麼？

- MC a: 不會，失真分量的產生與激勵訊號的屬性無關。
 MC b: 是，非線性電感 $L(x)$ 產生的失真很大程度上取決於頻譜特性。
“3 LSI Clim 50% white noise”用到的白噪音激勵訊號顯著增加了 $L(x)$ 產生的互調失真，導致 $L(x)$ 成為失真主要來源。

7.9 揚聲器非對稱性

Step 18: 打開“2b LSI Clim 50%”裡的結果窗口“Bl (X)”裡的結果窗口 $Bl(x)$ 和翻轉曲線 $Bl(-x)$

QUESTION 22: 把音圈靜止位置朝著導磁下板(coil in) 移動會減少 $Bl(x)$ 曲線的非對稱性麼？

- MC a: 不，改正音圈靜止位置對 $Bl(x)$ 不，改正音圈靜止位置對。
 MC b: 不，音圈應該朝外移動。
 MC c: 是，朝內移動音圈靜止位置可以減少非對稱性。

Step 19: 打開“2b LSI Clim 50%”的結果窗口“Bl Symmetry Range”，这里 Bl 曲線的非对称性作为激励訊號幅度 x_{ac} (x 軸) 和静止位置的偏移 x_{off} (y 軸) 的函数。在对称区域（灰色区域）中 Bl 的变化很小（小于5 %），非对称性可以忽略。

QUESTION 23: 對稱區域取決於激勵訊號的幅值 x_{ac} 麼。

- MC a: 是，對稱區域取決於幅度 x_{ac} ，它在小訊號時候（例如 $x_{ac} = 0.1$ mm）更大。這是因為靜止位置有一個偏移，會讓 Bl 值產生極小的不對稱變化（在磁隙中線圈數量不變）。
 MC b: 不，對稱區域與幅值無關 x_{ac} 。
 MC c: 是，對稱區域取決於幅度 x_{ac} 。它在高幅度(比如 $x_{ac} = 1.5$ mm) 下較小。這是因為一個小偏移會導致在正向和負向位移最大值時一個顯著的 Bl 變化，這時 Bl 曲線很陡（音圈就要離開磁隙了）。

Step 20: 在“2b LSI Clim 50%”中打開結果窗口“Bl Symmetry Range”。確定峰值位移 $x_{Bl-asym}$ ，它是音圈產生5% Bl 變化的最大的幅度（靜止位置仍在在對稱區域內時允許的最大幅度）。

QUESTION 24: 讓 Bl 的非對稱性可以忽略的音圈位移 $x_{Bl-asym}$ 的最大的幅度是多少？

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

Step 21: 結果窗口“Bl Symmetry Range” 中紅色線代表了真正的對稱點。這也是對於特定強度正弦激勵訊號，音圈靜止位置應該移動到的最佳位置。用這一點作為靜止位置會根據交流訊號幅值在正負向產生對稱的位移。在“2b LSI Clim 50%”中結果窗口“Bl Symmetry Range”裡比較小交流訊號（0.2 mm 幅度）的對稱點的位置和大交流訊號（1.8 mm 幅度）的對稱點的位置。

QUESTION 25: 哪個對稱點應該用來修改音圈的靜止位置？

- MC a:** 音圈靜止位置應該準確地移動到0.42 mm 因為只有這個值滿足小訊號域（小幅值 $x \approx 0$ ）的完美對稱 Bl 曲線。
- MC b:** -0.36到-0.2之間的一個值，其取決於特定目標應用所需的最大幅值 x_{ac} 。如果位移幅值 x_{ac} 比 $x_{Bl\text{-asym}}$ 更小，靜止位置的偏移就可以忽略。

QUESTION 26: $Bl(x)$ 曲線顯著的非對稱性能減少位移門限 X_{Bl} 的最大峰值麼？

- MC a:** 是，非對稱性讓 Bl 曲線的一邊較早衰減，另一邊較晚衰減並使最大峰值位移較小。這是因為這個值被定義為產生靜止位置的 Bl 大小的82%的最小位移。工作範圍因此也小了，同樣的位移，一邊的 Bl 值會大於另一邊。
- MC b:** 不， Bl 曲線非對稱性對產生約10%諧波失真的最大峰值位移沒有任何影響。

Step 22: 打開“2b LSI Clim 50%”的結果窗口“Kms (X)”，比較剛性曲線 $Kms(x)$ 和其翻轉曲線 $Kms(-x)$ 。用交叉光標在來讀取在 $x_{peak} = 2$ mm 和 $x_{-peak} = -2$ mm 的 Kms 值。用下式計算剛性非對稱係數：

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

QUESTION 27: 剛性非對稱性 A_K 多大？

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

QUESTION 28: 非對稱剛性 A_K 的符號給出了有用信息麼？

- MC a:** 沒有，它的符號總是正號。
- MC b:** 是，它與剛性非對稱性產生的直流位移的符號一致（正的 A_K 會產生正直流位移，背離導磁下板）。
- MC c:** 是，它展示了懸掛較柔軟的一邊。一個正 A_K 說明懸掛系統在正位移方向更柔軟。

Step 23: 打開“2f LSI Clim 20%”裡的結果窗口“Displacement”。把預測的位移峰值 x_{peak} 和位移谷值 x_{bottom} 與相應的激光測量得到的 x_{max} 和 x_{min} 分別進行比較。

QUESTION 29: 結果窗口“Displacement”展示了什麼？

- MC a:** 預測的位移峰值和谷值與激光測量值非常吻合，說明揚聲器模型與測試的換能器匹配。
- MC b:** 在較高訊號能度情況下，正向峰值位移(x_{peak}) 大於負向峰值位移(x_{bottom})。這意味著正 DC 位移是由揚聲器非線性特性的非對稱性動態產生的。
- MC c:** 在較高訊號能度情況下，正向峰值位移(x_{peak}) 大於負向峰值位移(x_{bottom})。這意味著負 DC 位移是由揚聲器非線性特性的非對稱性動態產生的。

Step 24: 打開“2f LSI Clim 20%”中結果窗口 PDF(X)”，這裡展示了“Nonlinear mode”中的位移 x 的概率密度函數 PDF(x)。這個曲線展示了取決於激勵訊號特性和揚聲器特性的位移的分佈。音圈大部分時候接近於靜止位置，大偏移很少見。這解釋了為什麼線性系統和小位移時的非線性的識別可以在幾秒鐘內完成，而在工作範圍兩端的非線性測量就需要幾分鐘。比較原曲線和翻轉曲線 PDF(-x)來檢查位移概率函數的非對稱性。在結果窗口“PDF Voltage”中檢查換能器終端的電壓訊號的對稱性。

QUESTION 30: 什麼導致了位移的 $PDF(x)$ 的不對稱？

- MC a:** 揚聲器非線性（特別是剛性 K_{ms} 的非對稱性）使 $PDF(x)$ 形狀非對稱，這和直流位移與位移最大值和最小值的差值一致。
- MC b:** 測量系統的激勵訊號的電壓的 $PDF(u)$ 是非對稱的，這也會影響音圈的位移。

7.10 參數隨時間的變化

Step 25: 在“2f LSI Clim 20%”中打開結果窗口“ $f_s(X)$ ”。這裡展示了瞬間諧振頻率 $f_s(x) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{ms}(x)}{M_{ms}}}$ ，其考慮到了隨着位移變化的懸挂的剛性。

Step 26: 在“2f LSI Clim 20%”中打開結果窗口“ $K_{ms}(t), f_s(t)$ ”來觀察剛性 $K_{ms}(x=0, t)$ 的變化和靜止位置 $x=0$ 處的諧振頻率 $f_s(x=0, t)$ 隨時間的變化。

Step 27: 比較“2f LSI Clim 20%”中大訊號測量最後的剛性 $K_{ms}(x=0)$ 和諧振頻率 $f_s(x=0)$ 與“1 LPM TS-Parameters”中在較低幅度測量的剛性 K_{ms} 和諧振頻率 f_s 。

QUESTION 31: 靜止位置的剛性 $K_{ms}(x=0)$ 是不變的麼。

不，靜止位置 $x=0$ 處的懸掛系統的剛性 $K_{ms}(x=0)$ 在“Enlargement Mode”($150 s < t < 300 s$) 顯著降低，在此階段音圈位移幅度增加了。在“Nonlinear Mode”($300 s < t < 550 s$) 剛性 $K_{ms}(x=0)$ 僅僅稍微降低，此時幅度是基本恆定的。懸掛材料的粘彈機制導致靜止位置的剛性 $K_{ms}(x=0)$ 受峰值位移影響。

- MC a:** 是，靜止位置的剛性都是不變的。

Step 28: 在實驗“2f LSI Clim 20%”打開結果窗口“ $R_e(t)$, “ $Q_{es}(t)$ ”然後比較阻抗 $R_e(t)$ 和結果窗口“Temperature, Power”中的音圈溫度 $T_v(t)$ 。

QUESTION 32: 為什麼電阻 $R_e(t)$ 和音圈溫度的增加 $T_v(t)$ 有相似的曲線形狀？

- MC a:** 音圈溫度的增加是由直流電阻 R_e 的增加計算得到。
- MC b:** 音圈溫度的增加與電阻 R_e 無關。任何相似性都是偶然的。

Step 29: 選擇“2e LSI Clim 30%”，其展示的是非常“過激”的實驗的結果，保護參數非常弱。打開結果窗口“ $Bl(X)$ ”。複製曲線“ $X_p^- < X < X_p^+$ ”到粘貼板，並且粘貼這個曲線和“2b - 2d”裡的曲線到“2f LSI Clim 20%”的結果窗口“ $Bl(X)$ ”。比較 Bl 曲線的形狀。

Step 30: 在結果窗口“ $K_{ms}(X)$ ”重複以上操作。比較 K_{ms} 曲線的變化和 Bl 曲線的變化。

QUESTION 33: $K_{ms}(x)$ 曲線的非線性形狀取決于位移的峰值 x_{peak} 嗎？

- MC a:** 不，曲線比較穩定，而且不會隨著峰值位移 x_{peak} 改變。
- MC b:** 是的，懸挂系統的粘彈效應會導致暫時的剛性改變。尤其是靜止位置的剛性 $K_{ms}(x=0)$ 會在激勵訊號的強度增加時減少。

- **MC c:** 是，因為磨合(第一次把換能器暴露在激勵訊號中)導致的永久的剛性的變化，和負載型疲勞（懸掛系統的老化）。

8 測量試驗（需要硬件）

下面的教程提供了一些揚聲器實際測量的建議。推薦使用相對較小的低音炮(4-6 寸)。

8.1 硬件設置

第一次教程提供了硬件設置的詳細信息。下面是簡短的總結：

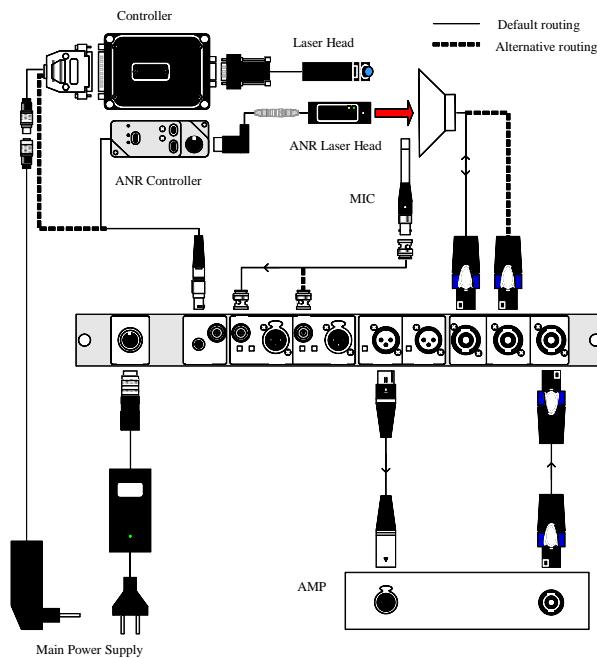


圖 13失真分析儀 DA2的引腳分配

Step 31: 連接失真分析儀 *Distortion Analyzer (DA)* 後部的 **XLR Output OUT1** 到放大器的 **XLR Input**。

Input。連接放大器的輸出和失真分析儀的 **SPEAKON Input AMPLIFIER**。連接失真分析儀 DA 的 **SPEAKON Output Speaker 1** (大電流通道) 和揚聲器終端。用特殊的揚聲器測量導線。

Step 32: 連接激光頭 (如果有) 和控制器，連接連接控制器的 LEMO 插頭到失真分析儀背後的標有 **LASER** 的輸入端口。

Step 33: 連接失真分析儀正面的 **USB Input** 到 PC 電腦上。

把揚聲器垂直於激光束方向緊緊夾在固定支架上。在振膜中間點一個白點 (塗改液或者白貼紙)。將激光束指向白點。把激光頭調整到工作範圍：黃色 LED 燈一直亮 (ANR-Laser) 或者綠色 LED 亮 (LD-Laser) (大約6cm)

1.1 實驗任務

Step 34: 打開 R&D 的測量軟件 *dB-Lab*。創建一個新的數據庫：點擊 “**Project**” → “**Select Database**” 然後 “**New**”。選擇存儲路徑和名字。創建測量實驗名稱 **my driver's name**。

Step 35: 選擇 **New Operation**。現在 *dB-Lab* 提供了不同的測量模板，讓第一次測量更加簡單。

選擇 **LSI Woofer Driver** 來測量一個諧振頻率 $f_s < 600 \text{ Hz}$ 來測量一個諧振頻率 **LSI Tweeter Driver** 來測量一個諧振頻率 $f_s > 100 \text{ Hz}$ 的高頻揚聲器。

Step 36: 右鍵點擊實驗選擇屬性“Properties”，在屬性頁面“Driver”中輸入驅動器直徑 diameter。

Step 37: 檢查屬性頁面“**Protection**”的門限。默認的門限一般都會保護揚聲器不被毀壞。如果你有一個激光傳感器，集中參數就會自動在線性模式“Linear Mode”得到（你可以在“**Protection**”頁面通過 G_{small} 調整電壓大小）但是我們建議從之前的 LPM 實驗中導入數據，這樣測量更精確。

Step 38: 如果沒有連接激光，你可以導入線性參數測量（訓練1）中測量過的 $Bl(x = 0)$ 或者 M_{ms} 。

Step 39: 點擊綠色箭頭開始測量。

Step 40: 如果你進入了“Enlargement Mode”，打開結果窗口“**State**”並且檢查建模電流訊號的相對誤差 $E_i(t)$ 。如果模型適配測試的揚聲器，這個值應該低於25%。

Step 41: 如果你在用激光位移傳感器，檢查位移訊號 $x(t)$ 裡的錯誤 $E_x(t)$ 。如果這個值大於20%，打開結果窗口 $L(x)$ 並且檢查“COIL IN”是顯示在位移負軸上。如果它出現自位移正軸上，點擊暫停按鈕，改變揚聲器終端導線的極性。然後再次點擊暫停按鈕繼續試驗。觀察非線性電感曲線的變化。“coil in”標籤應該出現在位移負軸下。

Step 42: $L(x)$ 曲線的最大值出現在負位移處嗎？你覺得測試的揚聲器使用了短路環來減少電感 $L(x)$ 並使之線性化麼？

Step 43: 如果測量結束了，打開結果窗口 **Temperature, Power**。在測量中音圈溫度的增加限制了激勵訊號的最大幅值了麼？

Step 44: 打開結果窗口“**Nonlinear Parameters**”。通過尋找最小位移門限 X_{Bl}, X_L, X_C 來找到最大峰值位移 $X_{max10\%}$ 。哪個非線性特性限制了揚聲器的位移峰值？

Step 45: 打開結果窗口“**Distortion**”然後搜索在聲壓輸出裡產生最高失真的非線性特性。該非線性也限制了最大位移麼？

Step 46: 觀察結果窗口 $Bl(x)$ 中 $Bl(x)$ 曲線的對稱性。 $Bl(x)$ 曲線對稱性能夠通過移動音圈靜止位置來提升麼？為了提升 $Bl(x)$ 曲線的對稱性，音圈靜止位置應該被遠離還是朝著導磁下板移動呢？

Step 47: 找到 $Bl(x)$ 達到峰值時的位移值 x_{maxBl} 。

打開結果窗口“**Bl-symmetry Range**”。讀取幅度最大值(x 軸)時的對稱點（紅色曲線）對應的 Offset 值。這個值與結果窗口“**Nonlinear Parameter**”裡面的 x_{sym} 吻合麼。 x_{sym} 值與 x_{maxBl} 值相同麼？這個 x_{maxBl} 值或者 x_{sym} 值對以音圈移動來改善 $Bl(x)$ 曲線的對稱性是一個很好的判斷指標麼？

Step 48: 在結果窗口 $K_{ms}(x)$ 中觀察 $K_{ms}(x)$ 曲線的對稱性，懸掛系統哪邊更軟？

Step 49: 打開結果窗口“**PDF (X)**”觀察位移的概率密度函數。這個曲線對稱麼？有哪些非線性因素會導致不對稱？

9 參考文獻

KLIPPEL R&D SYSTEM 操作手冊– *Large Parameter Identification* 大參數識別

規範 S1 *Large Signal Identification (LSI)* 大信號識別

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

海報 “*Loudspeaker Nonlinearities: Causes, Parameters, Symptoms*” “揚聲器非線性：原因，參數，症狀”

論文 *Loudspeaker Nonlinearities: Causes, Parameters, Symptoms* 揚聲器非線性：原因，參數，症狀：

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

論文 *Assessing Large Signal Performance of Transducers* 評估換能器大信號性能：

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

論文 *Measurement of Large Signal Parameters of Electrodynamic Transducer* 電動換能器的大信號參數測量

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

論文 *Large Signal Performance of Tweeters, Microspeakers and Horn Drivers* 高頻揚聲器，微型揚聲器和喇叭驅動器的大信號性能：

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