

如何利用阻抗分析儀量測被動元件

王信雄

前言：

一個電感在高頻下呈現出來的不再是定值，甚至變成電容性；同樣地，一個電容在高頻下也會變成電感性。這是眾周知的事實，但是如果要明確的定義出在某頻率下的特性，一般低頻的 RLC 表是無法滿足量測需要的。特別是在 LC 濾波電路與 EMI 濾波電路中，我們感興趣的濾波效果通常在相對高頻，幾百 kHz 甚至幾十 MHz，必須用網路分析儀才能量得出來。而現在的阻抗分析儀不僅可以量到 100MHz 的元件特性，更可以利用其產出的量測資料來計算，估計其組合濾波效果。

阻抗分析儀 (Impedance Analyzer)：

阻抗分析儀，顧名思義就是用來分析元件在不同頻率下的阻抗特性，特別在高頻下的特性。知道元件在特定頻率範圍下的特性，有助於於電路設計者瞭解電路元件的不理想性，如此才能量化的去做電路的優化。舉一個電解電容(82 μ F/400V)的例子。圖 1 為用阻抗分析儀量到的阻抗/電阻與頻率的關係圖。令人驚訝的是在 10kHz 以前，大概維持一個純電容的特性；10kHz 到 5MHz，基本上是呈現一個電阻性；5MHz 以上阻抗上升，變成電感性。從曲線看，其等效電路也不是單純的 C – ESR – ESL 串聯的模型。而從黃色的串聯電阻(ESR)可以看出與頻率的關係，這就是為甚麼說在高頻情況下電解電容可以承受較大的漣波電流。



圖 1：電解電容阻抗(82 μ F/400V)

圖 2 為一個 1.5 μ F/400V 塑膠膜電容的阻抗與串聯電阻

隨頻率變化的曲線。從阻抗線型看，幾乎呈現標準 C – ESR – ESL 串聯的模型。在 2MHz 以前是一個純電容性，2MHz 以後是電感性，諧振點的阻抗幾乎等於 ESR。



圖 2：塑膠膜電容阻抗(1.5 μ F/400V)

如果將兩個不同材質的電容併聯使用，可以期待什麼樣的效果呢？圖 3 就是其併聯阻抗。可以看出在 200kHz 到 2MHz 大抵就是塑膠膜電容的特性，以外的就是原電解電容的特性。換句話說，在 200kHz 到 2MHz 這段頻率範圍，塑膠膜電容提供較低的阻抗，可以濾掉更多的雜訊。



圖 3：82 μ F/400V 電解電容並聯 1.5 μ F/400V 塑膠膜電容 阻抗

這就是為甚麼電路設計人員常會在電解電容旁邊併聯一個小小的塑膠膜或陶瓷電容的原因。

電容(Capacitor)：

一般書本上對於一個電容的頻率特性都是用 C – ESR – ESL 串聯的集總電路模型來說明，圖 4。

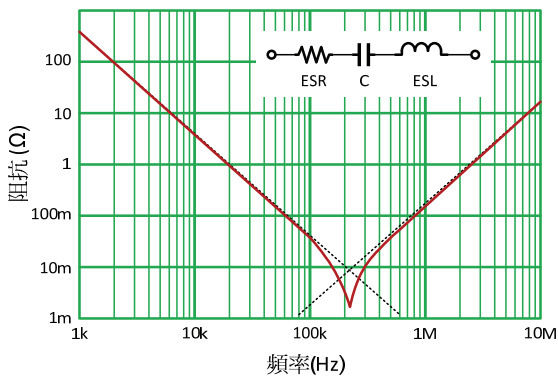


圖 4：電容器阻抗圖

阻抗用數學方式表示如下：

$$Z(j\omega) = R_{ESR} + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_{ESL}$$

上式代表了一個向量，有大小及相位。如果用大小和相位表示，上式變成

$$|Z(j\omega)| = \sqrt{R_{ESR}^2 + \left(\omega L_{ESL} - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$\angle Z(j\omega) = \tan^{-1} \frac{\omega L_{ESL} - \frac{1}{\omega C}}{R_{ESR}}$$

在低頻時，阻抗大小與相角主要由電容值決定，我們稱之為電容性，大抵是斜率-20dB/dec，角度接近-90°。反之在高頻時，ESL 將主宰阻抗的大小及相位，斜率為 20 dB/dec 及近 90°的相角。阻抗分析儀就是能夠掃描出在不同頻率下的阻抗大小以及其相位角。

利用阻抗分析儀可以量測到類似圖 4 的阻抗圖，除了可以將電路模型的參數估算出來外，也可以觀察到在哪个頻率範圍內，電容提供多高的阻抗，以方便電路現象的解讀與調試。

電感 (Inductor)：

電感器一般的集總電路模型如圖 5，其中 R_w 是繞線電阻， C_s 為繞線的雜散電容， R_c 為代表鐵損的電阻。與電容器相反，在低頻時成電感性，頻率越高阻抗也越高；在高頻時，雜散電容的效應明顯，整個電感器呈現電容性，阻抗隨頻率上升而降低。

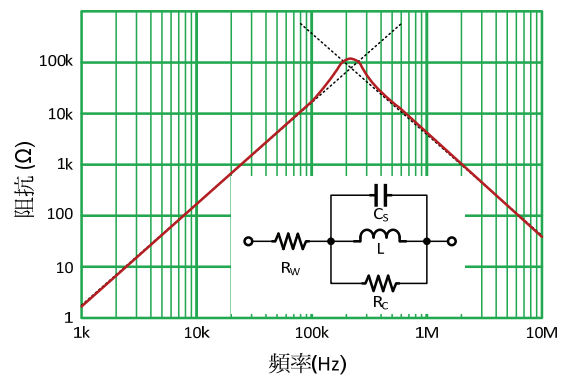


圖 5：電感器阻抗圖

LC 濾波器 (LC Filter)：

既然電感和電容都存在非理想性，如果用於 LC 濾波器會得到怎麼樣的結果呢？先用阻抗分析儀量一個 53uH 的環型電感，同時將量測到的資料以 Excel 格式存檔。先繪出其阻抗圖如圖 6。同樣地，量測一個 1uF X2 電容的阻抗圖，如圖 7。利用分壓理論，可以輕易的算出濾波器的效果。

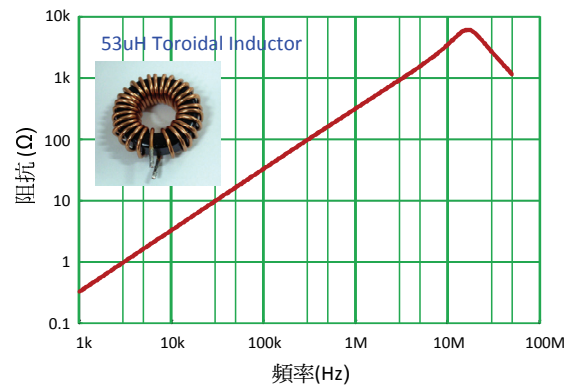


圖 6：53uH 環型電感阻抗圖

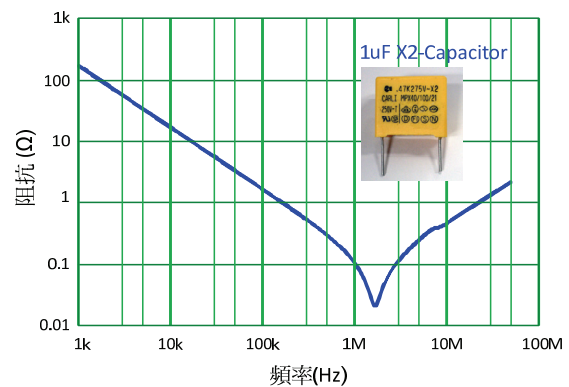


圖 7：1uF X2 電容阻抗圖

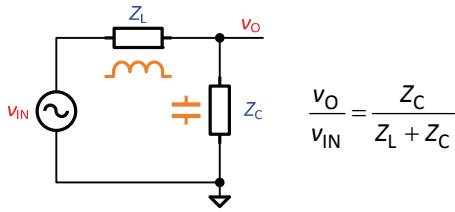


圖 8：低通濾波器

所以可以得到圖 9 的濾波效果。

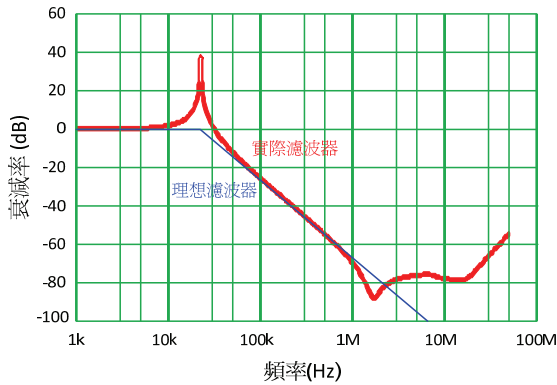


圖 9：實際低通濾波效果

一個理想 LC 濾波器在頻率過了角頻率後，以 40dB/dec 的斜率達到很好的濾波效果。但是在一個實際的 LC 濾波器中，因為電感上的雜散電容以及電容上的串聯電感，使得在高頻階段的濾波效果大打折扣。這些是電路設計者在選用元器件時必須注意到的。而阻抗分析儀就是提供向眼睛一樣，讓工程師可以清楚的看到這些雜散值的影響。

共模電抗 (Common-mode Choke)：

除了一般差模的濾波外，最常碰到的是 EMI 的共模電感，主要的功能在於於 Y 電容形成一個 LC 低通濾波器以阻絕和過濾高頻的共模雜訊。同時它的漏電感與 X 電容也形成另一種過濾差模雜訊的濾波電路。然而在一般的實驗室，因為缺乏像阻抗分析儀這種儀器，只能用低頻 LCR 表去定義共模電抗。通常只有在 100 kHz 以下量測，而 EMI 的傳導量測卻從 150kHz 到 30 MHz。所以即便定義了共模電抗的電感值，也無法定義出高頻範圍的差異。這時候，阻抗分析儀便起了很重要的檢視作用，讓共模電抗在高頻範圍的效能一覽無遺。這樣的功

能一覽無遺。這樣的功

資料，也是日後量產進料品檢的利器。

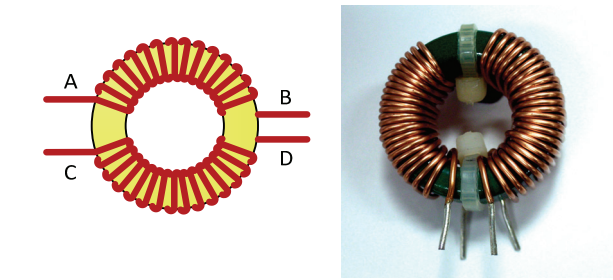


圖 10：常規的環型共模電抗器

瞭解共模雜訊的產生與路境，要確定共模電抗的效能首先得確定其“共模阻抗”。將圖 10 的 AC 點合併，BD 點合併，同時量其 A 與 B 兩端點的阻抗即為共模阻抗。圖 11 為一實際例子。

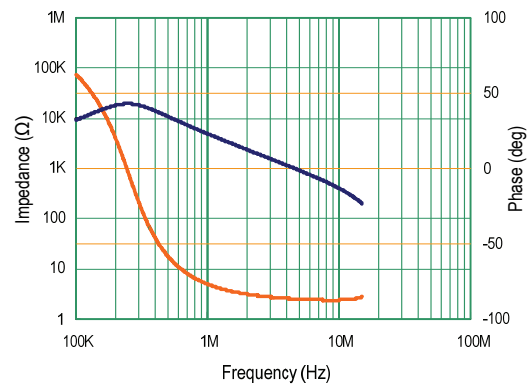


圖 11：共模電抗量測

如果將 BC 端點相接，量測 AD 點的阻抗，即成為“差模阻抗”，這個阻抗有效的擔任差模雜訊的抑制作用，卻經常因為以為不存在而被忽視。圖 12 為這個差模阻抗。

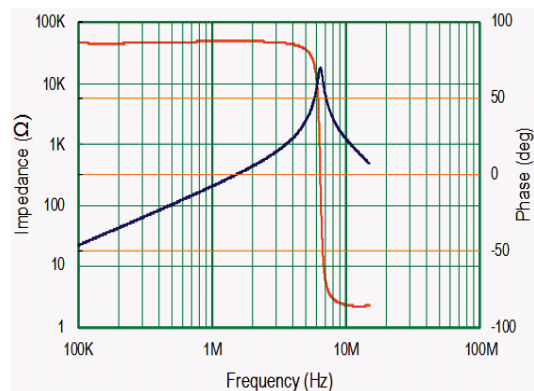


圖 12：差模阻抗

如果用集總的等效電路來表示，如圖 13，這個共模電抗器可表示為

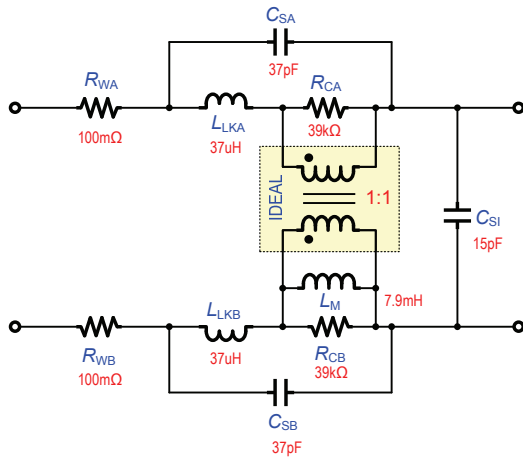


圖 13：共模電抗器的等效電路

圖 11 到圖 13 都是定義這個共模電抗的重要參數，藉由阻抗分析儀的量測，這些參數都可一一的呈現出來。對於解決傳導型 EMI 有著極重要角色。

結語：

以往不論在書本上讀的，課堂上老師教的，或是工程師彼此之間口耳相傳的，對於高頻被動元件的參數，一般僅止於約略值的猜測，很難定量的去分析。而阻抗分析儀提供了在高頻環境下準確量測阻抗的工具，讓許多試誤(Cut and Try)的過程得以變成系統化分析。所謂要優化必先量化，準確的定義元件參數便是重要的第一步。