



# 電感等校電路模型之建立與驗證

許源佳

## 前言

在射頻電路中，電感是最常被使用的被動元件之一，因為它可以用來當作諧振、濾波、相移以及延遲等電路，也可用作隔絕高頻信號通過的射頻阻隔器(RF choke)。因此，如何模擬驗證電感的模型，得到準確的電感特性，是射頻電路技術發展關鍵之一。

然而，電路設計者針對不同運用需求，含蓋不同電路的種類與不同操作的頻段，且製程廠商提供的元件庫也有限，不能滿足設計者的需求，使得在電路設計上受到限制。所以，電路設計者應建立自己所需要的元件以及其等效模型。

對於建立電感等效模型的過程中，不同製程及不同頻段之應用，皆有相當不同的考量，在大於 5GHz 應用層面，如何建構在準確之模型元件庫，其量測及參數粹取方式甚為關鍵，本文將提供給讀者一個建立模型的參考準則。

## 電感的佈局與量測

在建立電感模型的過程中，並不會只針對單一個測試元件進行模型的建立，而會是一系列，隨內徑大小而改變、金屬寬度差異或是不同圈數變化的電感測試元件。因為在找尋電感等效電路的過程中，(以一個傳統的 $\pi$ 模型為例)，可以有很多組參數，能逼近實際量測的曲線，若只針對單獨一個測試元件建立電感模型，則所建立的等效模型的參數值的物理意義與準確度就有待商榷。若有一系列的電感測試元件，在有物理意義的條件限制下，交叉驗證就可以得到較準確的等效電路模型的參數值。

在電感量測的過程中，由於一系列的電感測試元件彼此差異不是很大，且有一定的相關性，量測上人為所造成的誤差可能造成少部分量測結果的錯誤，所以重複性的量測是有必要的，如此才能獲得低誤差且有效的量測結果，也才能算是完整的原始資料(raw data)。CIC 目前在量測方面，已提供 8510C 網路分析儀 S 參數的量測服務，量測頻段可達到 40GHz，搭配低阻值探針(Infinity Probe)，減少接觸電阻值，可以相當準確地量測出實際電感參數值。

然而要如何確認電感量測的資料是可靠的，必須確認 On-wafer Probe 與網路分析儀校正是否穩定與準確，尤其是在量測小電感更需要注意。Calibration、下針點測、De-embed 三項技術對量測的結果都會有影響。在此簡述說明：

### I、校驗【Calibration】

網路分析儀的校正方式有很多種(包括 SOLT、TRL、LRRM 等)，不論何種校驗方式首先都必確認校正的結果要穩定，此外要注意的是每次量測的可重複性，不同的 probe 都有不同的 issue，可利用 probe 的水平校驗、calibration 以及 calibration verification 來了解 probe 的特性。

### II、量測【Measurement】

電感的量測，所要觀察量測的 Data 的特性是要利用方程式來計算，所以量測完成後利用下列方程式來得到電感值、Q 值以及阻值等參數，如下所示：

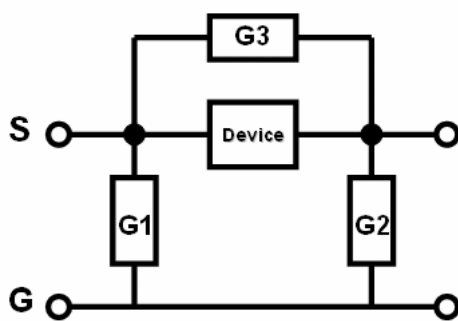
$$L_s = \text{imag}(Z_{11}^{1-port}) / 2\pi f \quad R_s = \text{real}(Z_{11}^{1-port})_{F_{\min}} \quad Q = \frac{\text{imag}(Z_{11}^{1-port})}{\text{real}(Z_{11}^{1-port})}$$

比較重要的是，在量測前必須對於待測電感的感值與寄生電阻值有所了解。很小的電感值(< 1nH)，其寄生電阻值就很小(~1 ohm)，在量測上就很 sensitivity，我們可以利用網路分析儀量測到的 S 參數值，直接觀察低頻的電阻值，這個電阻值包含電感的寄生電阻以及下針的接觸電阻，由於探針的阻值很低(<0.1 ohm)，所以可以由量測到的低頻電阻值來判斷下針的接觸點是否良好，與電感寄生電阻的關係是否合理，如此一來可以降低人為的量測誤差。

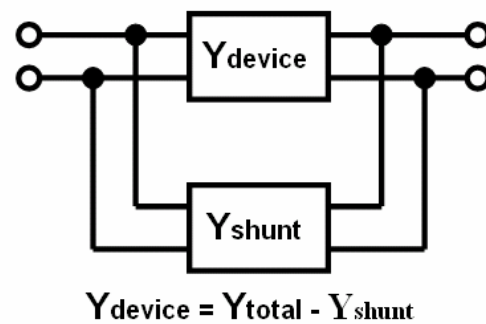
### III、【De-embed】

量測到 raw data 之後，必須扣除量測上所需要的 PAD，一般在 test-key 中都會額外擺放一組空的 OPEN PAD，測量 OPEN PAD 所造成的寄生效應，並利用一些公式的轉換來扣除，以得到我們真正要的電感模型。此種扣除寄生效應的過程稱為 De-embed。

一般 RF 探針的形式為 GSG (ground-signal-ground)，中間為信號線，兩旁為地，此種形式(GSG)的探針，可降低外面的雜訊經由信號的左右兩側干擾。其 PAD 寄生元件的等效電路如圖一所示，G1、G2、G3 各表示並聯到地的 PAD 與連線(interconnect)的寄生，並聯的寄生元件需利用 Y 矩陣去除，如圖二，因此正確 De-embed 的程序，是將量測到的 raw data 轉換成 Y 參數，扣除以轉換成 Y 參數的 OPEN PAD，最後的 Y 參數轉換成 S 參數，即可得到扣除 PAD 後真正的電感特性。



圖一

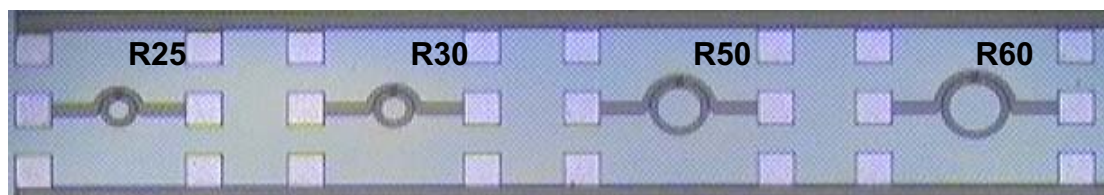


圖二

得到電感的 raw data 是萃取等效電路元件的第一步，再利用一些萃取公式[1]可以估算出等效電路元件的參數值。這些等效電路的寄生值，當作最佳化的初始值(Initial value)，最後利用最佳化(Optimization)的方式來找尋符合量測值的等效元件參數。如何判別數據是否可信呢？其依據是要觀察上述所說的 L 值、Q 值與 R 值的結果，每一組參數值都要有相同的趨勢，且在所要的頻率範圍，要求誤差範圍要小於 1% 以下，才是較準確的等效元件值。

接下來以一組電感 test-key 為例，分別介紹量測結果與等效電路的模擬結果：

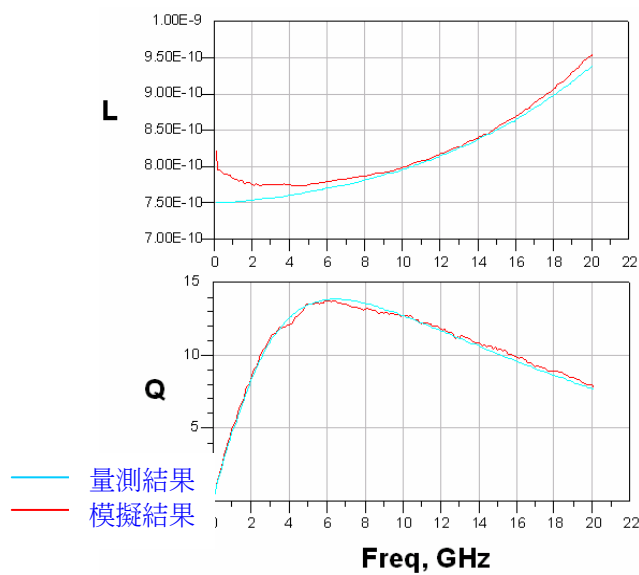
這組電感其圈數、繞線金屬寬度與繞線金屬間距都相同，只有內徑寬度不同，分別為 25um、30um、50um 與 60um，實體圖如圖三所示，：



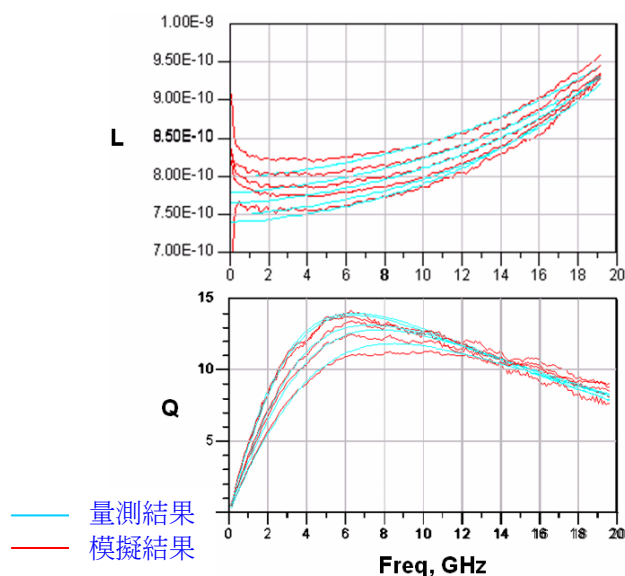
圖三

首先針對單一電感，將 De-embed 的資料與估算的等效參數值，轉換成等效感值(L)與品質因素(Q 值)會與實際量測直接轉換的結果有些差異，需再利用模擬軟體( Agilent ADS、IC-CAP、Ansoft Designer...等) 的最佳化(Optimization)[2]功能，在符合製程合理的物理意義下，設定等校元件參數的上下限範圍，找尋所要的頻率範圍下，最符合量測結果的等效電路參數值，如圖四所示，紅線是量測結果，藍線是模擬結果。

在同一系列電感用 fitting 的方式，必須不斷調整參數最佳化的上下限，再利用軟體中微調(Tune)的功能，可以找到整組較準確且合理的模擬結果，如圖五所示，紅線是量測結果，藍線是模擬結果。



圖四



圖五



在 Fit 量測結果找尋等效電路參數的過程中，因為等效電路已簡化，所以一組等效電路的參數與量測結果存在著一定的誤差值，無法在所有模擬頻率下都很接近。因此，在模型的建立過程中，應該依照使用上的需求，把最佳化設定在某個頻段內，使得這個頻段內的誤差值降到最低。

## 結語

一般在等效電路模型的建立的過程中，包括從量測、De-embed 的方式、最佳化的條件與目的、還有微調方式對於 Q 值、L 值與 R 值不同程度的影響，這是一個很繁瑣又重複高的工作，但每個細節都需要了解實際的物理意義與目的，模擬軟體只是一種工具，提供一個平台，唯有有效的設定軟體，

## 參考文獻

- [1] C. P. Yue, C. Ryu, J. Lau, T. H. Lee and S. S. wang, “A Physical model for planar spiral inductors on silicon” IEEE Electron Devices.
- [2] Agilent Technologies, Advance Design System 2003C Documentation