石英晶體振盪線路之迴路分析介紹

引文：

一般常用的振盪元件，大多採用壓電材料，其中屬石英材料最為穩定，且能夠提供寬廣且穩定的頻率！在各類電子產品中，石英晶體振盪器相當於心臟，振盪頻率相當於脈搏，所以準確的振盪頻率，以及振盪的穩定性是非常重要的！而如何得知頻率是否準確，且穩定的振盪，就相當的重要！本文將介紹石英晶體振盪線路之迴路分析與最佳匹配調整。

本文：

舉凡消費性產品：如數位電視。遊樂器，數位相機，手錶等；資訊產品：如個人電腦，及其週邊設備，掌上型電腦，及硬碟等；通訊產品：如行動電話，無線電電話，及呼叫器等；網路產品：如數據機，IA 產品，甚至藍芽套件等皆會使用石英晶體振盪器！

是故，石英晶體振盪器在電子產品中佔有著舉足輕重的位置，不可或缺！在這些應用中，很多都需要要求準確且穩定的振盪頻率，因此有越來越多的廠商開始注重石英晶體振盪線路之迴路分析。以求在設計階段，就能先行做線路的確認以及調整，以達到最佳電路匹配！

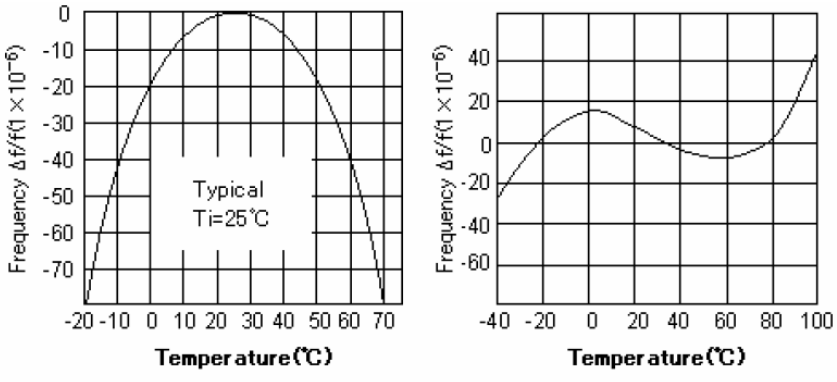
振盪線路迴路分析的目的

一個石英振盪線路必然會存在一定範圍的誤差，這些誤差的來源主要有三種：

1. 石英晶體振盪器的溫度特性（意味著隨著溫度變化，會出現頻率偏差的現象）：

   石英晶體振盪器因溫度變化而導致頻率改變，是因為石英材料在各個座標軸向的熱膨脹係數不同。當溫度改變時，各軸向的晶格間距會產生些許變化，造成頻率的偏移。

   當使用不同的切割角度時就會有不同的頻率對溫度特性，但在定義上依然會使用 25℃當做相對零點！以 AT 型晶體來說，其特性是三次方程式的頻率對溫度特性曲線；kHz 等級的音叉型晶體的特性則為拋物線方程式。因此在進行最佳化匹配時，必須針對不同的溫度特性來做調整。



32.768kHz　　AT

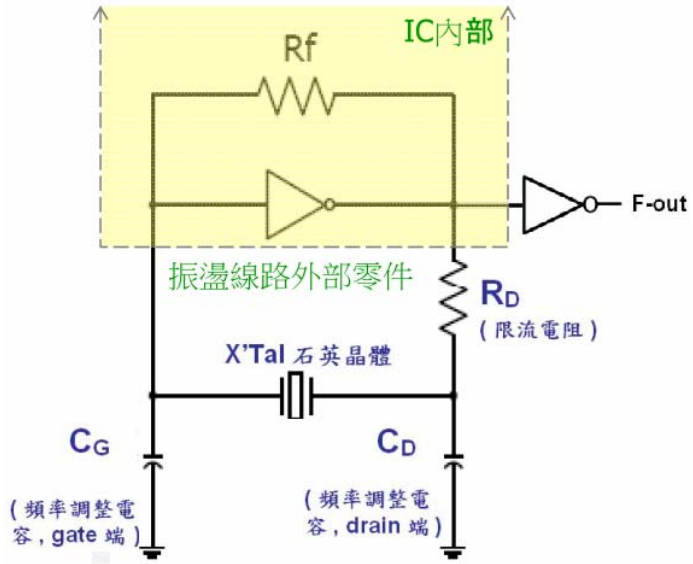
圖一　石英晶體的頻率對溫度特性曲線（圖片提供：Epson Toyocom）

2. 石英晶體振盪器本身的精度誤差（也就是石英晶體振盪器規格中的 Tolerance）：

源自於生產製程所造成！製程的好壞可以決定精度誤差的範圍，而 EPSON TOYOCOM 有一個新的製程『QMEMS』，以石英為基材，採用半導體的微機電技術來生產。相較於舊製程，『QMEMS』有著微型化、省能源、高穩定性與高準確性的顯著特色。

3. 石英晶體振盪線路上的週邊元件配置影響：

這些元件包括石英晶體、半導體 IC、週邊電阻/電容，以及 PCB 走線。不同的配置方式對於振盪線路的整體誤差會有很大的影響，例如電容器的擺放位置，或電容值的選取等，都需妥善的規劃，才能得到最佳化的表現。



圖二　標準的振盪線路配置圖（圖片提供：Epson Toyocom）

（一般週邊線路以半導體廠商在規格書中的建議為主，當然也會有例外。）

那為什麼要做振盪線路迴路分析呢？就是為了得知石英振盪器在整個振盪線路上的匹配性。若匹配性不好，就會發生振盪頻率不準、不起振、振盪不穩定等現象。所以我們一般都會要求客戶盡量在設計階段，就先行提供半成品給 EPSON TOYOCOM 做迴路分析，以避免量產後才發生問題，因為此時要再做電路變更是非常困難的！

EPSON TOYOCOM 主要振盪線路迴路分析項目

在 EPSON TOYOCOM 的迴路分析報告中，主要會測試三個項目：

1. 頻率容許誤差（Frequency Tolerance）的量測：

在 EPSON TOYOCOM 的報告中，顯示的數據為上文中所提到的『石英晶體振盪線路上的週邊元件配置』所造成的誤差，不包含石英晶體振盪器本身以及溫度特性所產生的誤差，方便客戶能更加了解此次設計的好壞！

不同的電子產品對於誤差的要求也會不一樣，像是一般資料時脈應用的要求就落於±30ppm~±50ppm 不等；若是實時時鐘（RTC）的要求就落於 0ppm~10ppm 之間。以實時時鐘的應用來說，使用的是 32.768KHz 石英振盪器，若有 10ppm 的誤差，則每天會誤差 0.864 秒。舉例公式如下：

- 頻偏誤差× 60(秒) × 60(分) × 24(小時)＝每天誤差秒數
- 10ppm × 60 × 60 × 24＝0.864 秒

所以量測出振盪線路中的頻率誤差是非常重要的，頻偏誤差會直接導致計時的不準，或資料時脈的不準，導致傳輸資料時不能同步，以致於傳輸的資料判讀錯誤，或是影像失真等不同的現象！

2. 驅動功率（D.L.，Driver Level）的量測：

驅動功率指的是做用在石英晶體振盪器上的功率，基本單位為μW(微瓦)，透過量測流經石英晶體振盪器上的電流，再乘上本身的等效內阻，換算而得！驅動功率公式如下：

■ $P(\mu W)=I^2\times Re$, and $Re=R1(1+C0/CL)^2$

石英振盪器需要一個驅動功率去使它起振並維持振盪，一般我們會要求這功率越小越好，以求省電，另外這也和振盪的穩定性以及石英晶體振盪器的壽命息息相關。若給予石英振盪器過高的功率，將會使它的特性跑掉，以及造成石英／電極／接面材料的介面惡化，進而造成頻率振盪的不穩定和壽命衰減！

以 32KHz 石英振盪器為例，若給予過高的功率，將導致內部晶體的音叉結構斷裂！以 MHz 的 AT 型晶體為例，則可能產生跳頻現象，並影響石英晶體的壽命及可靠度。

3. 負性阻抗（-R，也稱為起振餘裕）的量測：

負性阻抗，又稱 OA(Oscillation Allowance)，代表著振盪線路的振盪餘裕程度！也象徵著這個振盪線路是否設計良好。在一般的驅動下，是否容易起振。負性阻抗不是真實的阻抗，而是在石英晶體振盪器旁串接一個電阻，去模擬各種未知條件影響下，當石英晶體振盪器 ESR 變大時，是否仍然能正常起振！

一般我們會要求負性阻抗值越大越好，代表此振盪線路越容易起振，若負性阻抗值太低，代表起振時間變長，甚至發生不會起振的現象！因此各家晶振廠商有定義了負性阻抗的規範，一般範圍落在石英晶體振盪器最大 ESR 的 3～5 倍以上即可！

迴路分析與最佳匹配化

在振盪線路中，有一個很重要的參數，就是整個線路上的負載電容（C_L，Load Capacitance），它是由 gate 端的頻率調整電容（C_G）、drain 端的頻率調整電容（C_D）及雜散電容（C_S）等三個參數共同組成。其中負載電容及兩個頻率調整電容是已知的，可以透過下列公式求得雜散電容值：

$C_L=(C_G\ //\ C_D)+C_S$

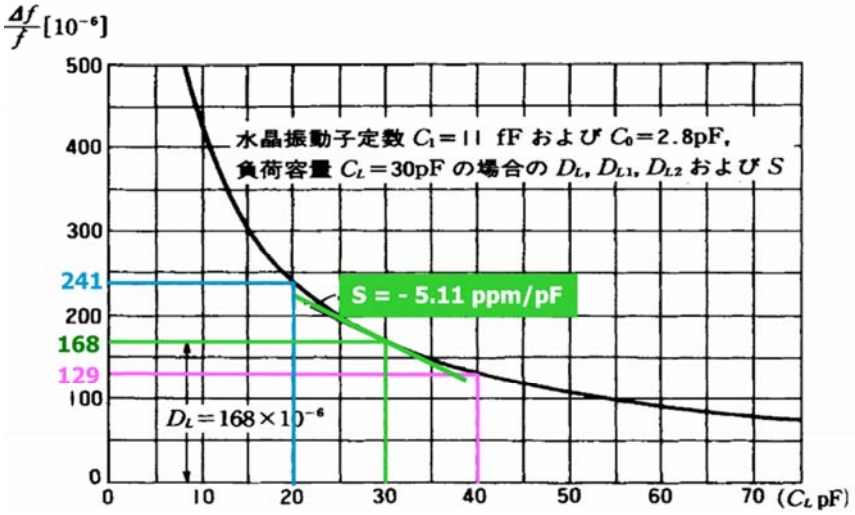
$C_S=C_L-[(C_G\times C_D)/(C_G+C_D)]$

負載電容和和頻率誤差、驅動功率、負性阻抗有緊密的關係存在，彼此互相影響，我們可由下圖了解。

圖三　負載電容與驅動功率和負性阻抗的關係圖（圖片提供：Epson Toyocom）

圖四　負載電容與頻率偏移的關係圖（圖片提供：Epson Toyocom）

所以為振盪線路做迴路分析的一個重要目的，就是透過兩個頻率調整電容的調整，找到最佳的匹配設計。此外，一般石英業者會建議廠商選用負載電容較大的石英晶體，這是為何呢？原來是因為負載電容選用的比較小時，雖然容易起振、省電，但也因此容易造成較大的頻率偏移，我們可由下圖得知，在較小的負載電容值時，其特性曲線的斜率是較大的。



圖五　負載電容與頻率敏感度（圖片提供：Epson Toyocom）

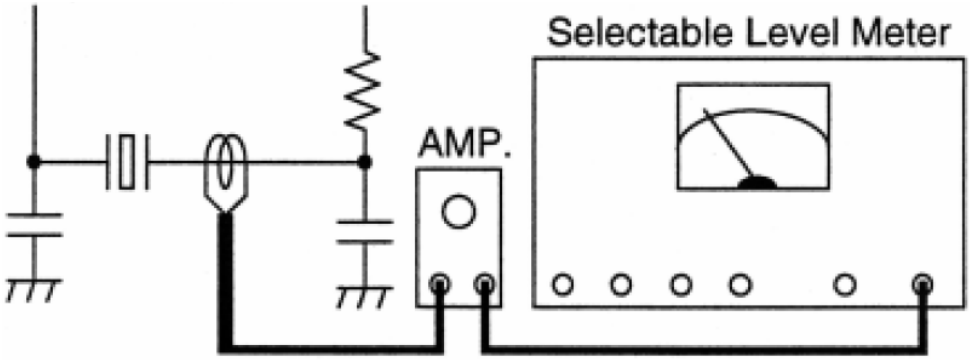
不過，透過專業的迴路分析，即使使用小負載電容，客戶依然可以得到最佳建議線路設計，進而應用在客戶的產品上！

如何選擇迴路分析實驗室

因一般振盪線路的頻率誤差值非常的小，以 ppm 等級為單位，所以在迴路分析上需要特別的實驗室設備才能做到，以專精石英技術的 Epson Toyocom 為例，自 2008 年 6 月起在台灣才終於成立這樣的高規格實驗室，在過去也只有日本總公司才有這樣得實驗室和人員來為客戶服務。那究竟需要哪些特別的設備：

1. 非常精確的儀器：

高精度得計數器、示波器、電流計和 Selective Level Meter…etc.



圖六　量測極小電流的特殊設備（圖片提供：Epson Toyocom）

這邊發現了一個特別的儀器 Selective Level Meter，那為什要選擇它呢？原來在音叉型晶體振盪器（20kHz 至 165kHz），驅動功率的等級是非常小（最大 1μW）。如果水晶振盪器內阻值是 50K，電流通過晶體近似 4.5μA。此時電流量太低，一般的示波器無法讀取到！因此，必須使用此特殊儀器來測量電流。

另外還有最重要的時間源，大多的晶振廠商是使用 OCXO 等級的儀器來進行量測，雖然 OCXO 已經很精準，不過比起原子鐘來說，精準度約差了千倍以上！所以在進行精確的振盪線路迴路分析時，實驗室必須具備能提供極高精準度參考頻率的儀器如原子鐘！

2. 測試儀器的探棒：

另外一個重要的關鍵則是量測用的探棒，可分為被動式與主動式。

- 被動式探棒成本低，但以接觸式量測時會產生嚴重的電容效應（約 8-15pF），將造成很大的頻偏，因而無法量測到真正的頻偏值。
- 主動式探棒的成本高但本身的電容效應低，只有 1-2pF，因此較不會有上述問題！

除了使用主動式探棒之外，Epson Toyocom 進一步設計出**非接觸式**的量測方式，可以將量測時對線路負載的影響降到最低，可量測分析到實際的線路振盪特性。

結論

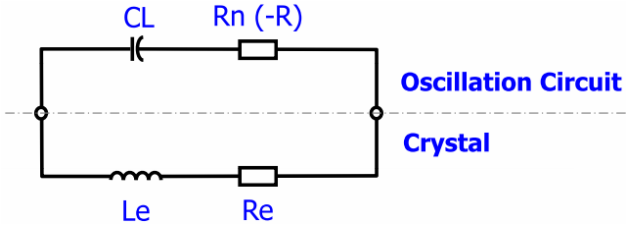
擁有這些特殊設備後，以及具有完善知識的專業人員，才能算是一個合格的石英晶體振盪迴路分析實驗室！這樣的實驗室能夠針對客戶所設計的振盪線路提供頻率誤差、驅動功率、負性阻抗的量測，並提供最佳匹配建議設計！除了這些基本的量測外，Epson Toyocom 實驗室，還會針對不同的應用提供更進階的服務，如溫度對頻率特性，振盪線路起振到系統開始運作的時間等！

名詞解釋

Crystal Impedance (CI)：等同於一般規格中得 ESR、R1。 i.e. CI ≅ ESR ≅ R1

Load Capacitance (CL)：等同於從石英晶體振盪器兩個端子看向振盪線路的所有電容值。

Negative Resistance (-R)：從石英晶體振盪器的角度來看等同於晶體振盪電路的電阻值。



Drive Level (D.L.)：當石英晶體振盪器工作時，作用在它身上的消耗功率。

i.e. Drive Level = I 2 * Re

QMEMS (Quartz + MEMS)：是結合微機電系統的概念，將石英基材使用 MEMS 技術來做為製程改善。是一個混合的新製程技術。