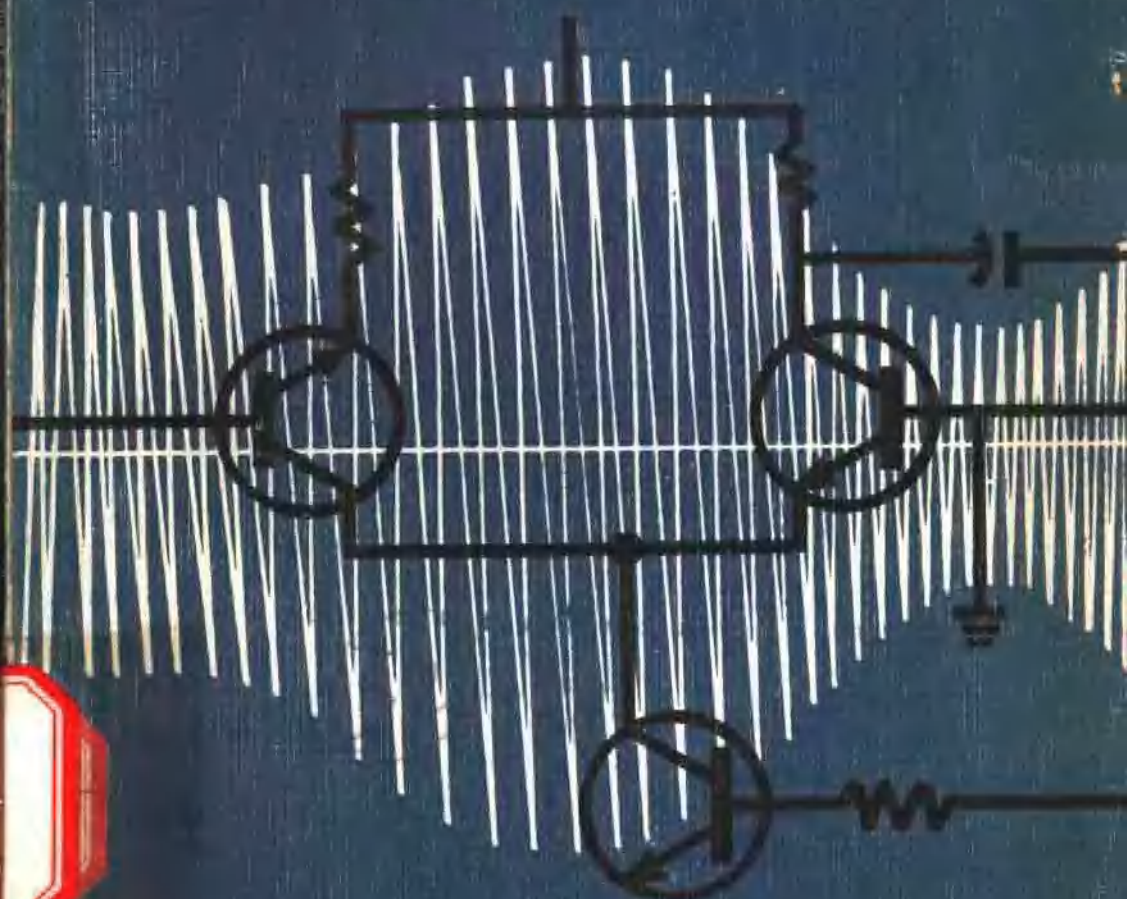


通信電子電路

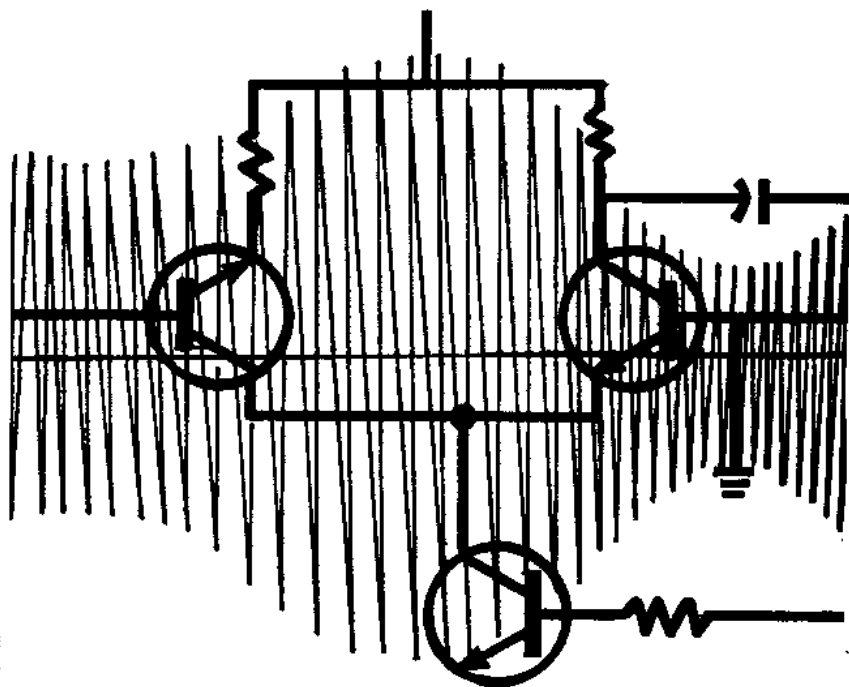
上冊 徐天佑編著



全華科技圖書公司印行

通信電子電路

徐天佑編著



全華科技圖書公司印行

編輯大意

徐天佑 於台北 65年8月

通信電子在電子工程中，一直佔著很重要的地位。但坊間討論其電路的書很少。有的置於電子學中作一概論，有的則過於作系統的闡述，而忽略了實際的電路。本書為避免上述缺點，乃依據DeFrance所著的 Communications Electronics Circuits 改寫而成。分上、下兩冊，適合高工、專科及一般人士自習之用。

本冊前半部綜述了一些用於通信系統的一般電路。雖然大多在普通電子學中學過，在此則是著重於如何適當的應用它們。後半部則在探討一般發射機之原理及如何將先前所述之電路組合成為發射機系統。

本書之完成有賴於全華科技圖書公司工作同仁的協助與支持，在此一併致謝。編寫校對之後，定仍有漏失之處，還望先進不吝指正，以供更正。

目 錄

第一章 諧振電路.....	1
1-1 串聯諧振電路	2
1-2 並聯諧振電路	16
習題	27
第二章 耦合電路.....	29
2-1 耦合方式	29
2-2 感應耦合	34
2-3 射頻濾波電路	49
2-4 阻抗匹配與耦合電路	53
習題	59
第三章 射頻電壓放大器.....	61
3-1 阻抗耦合射頻放大器	62
3-2 單諧變壓器耦合射頻放大器	73
3-3 雙諧變壓器耦合射頻放大器	75
3-4 高頻電路	80
習題	84
第四章 射頻功率放大器.....	87
4-1 真空管型C類放大器	87
4-2 C類放大器之中和	99

4-3	B類線性放大器	104
4-4	電晶體射頻功率放大器	107
	習題	115
第五章 射頻振盪器		117
5-1	基本振盪電路	118
5-2	晶體振盪器	126
	習題	132
第六章 調幅及發射機		135
6-1	調幅波之分析	136
6-2	屏極調變	147
6-3	其他調變	153
6-4	電晶體調變器	156
6-5	操作檢視	159
6-6	基本發射機	161
	習題	168
第七章 調頻與發射機		171
7-1	調頻原理	171
7-2	FM發射機	184
	習題	198

諧振電路

遠在 1900 年，無線電通訊可能是電子學所唯一有意義的應用項目。在無線電廣播的過程中，須先將低頻率的訊息信號，諸如談話，音樂等附加到某個射頻（RF）之上。這時選擇的射頻波稱之為載波（Carrier），而這種提升頻率的程序稱為調變（Modulation）。由調變所造成的結果則稱為調變波（Modulated wave），調變波將所傳送的訊息儲藏在位於載波頻率兩側的分量窄頻帶上。這些分量窄頻帶稱為旁頻帶（Side-band）。載波與旁頻帶所分佈的總頻帶稱為頻道（Channel）。利用射頻譜中各種不同的頻道，就可以同時傳送許多節目了。換言之，調變的目的乃基於將每一訊息安排在射頻譜的不同部份，並在互不干擾的情況下傳送許多不同的訊息以達到多工制通訊的目的。就接收端而言，由射頻波所帶來的電壓非常小，大約在幾微伏（ μV ）左右，因之，首先需利用射頻電壓放大器將這些信號加以放大。然後再從放大的射頻波中把原來的訊息取出。這種將低頻率的訊息從射頻取出的程序稱之為解調（Demodulation）或檢波（Detection）。再就發送端來看，在調變過程之前

2 通信電子電路

要先產生出載波頻率，這就需用到振盪電路了。再者，若要使距離發送處很遠的地方也能夠接收到信號，就需要相當的傳送功率，爲了這緣故，就不得不用到射頻功率放大器了。此外，爲了要將這些信號輻射到空中，就要先經傳輸線（Transmission Line）將射頻能量饋送到天線，再經天線將這些能量輻射到空中。以上所述種種不過是一個介紹而已，它們將陸續在本書各章中一一作詳細的說明與討論。

電子學自早期開始以至於現在，已發展到與日常生活息息相關—不僅是在娛樂方面，還在醫學上，商業上，工業上均有關係。但不論它在任何一方面的發展是多麼進步，有關射頻波的產生，發射與接受，仍佔着極爲重要的地位，同時也仍爲電子學最大的應用項目。用射頻波傳遞訊息的方式，除了廣播之外，還包括了飛機或商輪間的聯絡，深度、距離與高度的測量，飛彈的導航，對運動物體的追蹤與探尋，以及電報系統等。而先前我們所提到有關無線電廣播的各種程序同樣的可以利用到這些新的用途上。除此之外，高功率的射頻波尚在工業加熱上（包括烹飪）亦佔着一席地位，因此這許多廣泛的應用更增加了電子學中對射頻波電路的研討了。

設計用於射頻的電路通常都限於某一特定頻率，或射頻譜中的一個窄頻帶中。這特定的頻率即爲這電路的諧振頻率（Resonance），這窄頻帶就是這電路的饋寬（Bandwidth）。在本章中均會一一論及這些因素以及它們的特性，以作爲下面各章應用時的準備。

1-1 串聯諧振電路

爲要產生諧振，電路中必須含有電感量與電容量，同時也會有些電阻存在。這電阻可能是線圈本身的有效電阻，也可能是爲達到某種預期的效果而加入電阻器所產生的。雖然電阻值會嚴重的影響到電路諧振時的電流，電壓值，但它並不能決定諧振於何種頻率產生。在我們討論諧振的問題之

前，先來複習一下任何一個含有 R, L, C 串聯電路中的數學關係式：

1. $X_L = 2\pi fL$
2. $X_C = 1/(2\pi fC)$
3. $X_o = X_L - X_C$

X_o 為淨電抗 (Reactance)，若 X_L 大於 X_C 則為正值 (電感性)，若 X_C 大於 X_L 則為負值 (電容性)。

4. $Z = \sqrt{R^2 + X_o^2}$
5. $I = E/Z$

當電感性電抗等於電容性電抗，即 $X_L = X_C$ 時，這串聯電路就產生諧振了。不論所用的電感量與電容量是什麼值，總有一個頻率會使這兩種電抗相等的。而諧振頻率 f_o 也可由下式中求得：

$$X_L = X_C \text{ 或 } 2\pi f_o L = 1/(2\pi f_o C)$$

解出頻率 f_o ，即得 $(2\pi f_o)^2 = 1/(LC)$ ，

$$f_o = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

在諧振頻率時，由於 $X_L = X_C$ ，所以電路的總阻抗 Z 應為最小值且等於電路中的電阻值 R 。由於這時阻抗為最小，所以線電流應為最大，又因為阻抗為純電阻性，所以這時線電流與線電壓應為同相。電路的相角 θ_c 為零。綜述以上有關串聯諧振電路的特性可知，在諧振時：

1. $X_L = X_C$
2. $f_o = 1/(2\pi\sqrt{LC})$
3. $Z = \text{最小值} \triangle R$
4. $I = \text{最大值} \triangle E/R$
5. $\theta_c = 0 \text{ 度}$

【例1-1】 一串聯電路， $L = 15.8 \text{ mH}$ ， $C = 0.1 \mu\text{f}$ ， $R = 10 \Omega$ ，線電壓 $E_T = 10 \text{ V}$ ，試求諧振頻率，在此頻率時之線電流，以及每一元件上所跨的電壓。

$$\text{解：(1) } f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{LC}) = 0.159 / \sqrt{15.8 \times 10^{-3} \times 0.1 \times 10^{-6}} \\ = 4000 \text{ Hz}$$

$$(2) \text{ 由於電路在諧振狀態，} (X_L = X_C) Z = R,$$

$$I = E/R = 10/10 = 1.0 \text{ A}$$

$$(3) \text{ 爲求跨於 } L \text{ 及 } C \text{ 兩端的電壓，要先求出 } X_L \text{ 及 } X_C$$

$$(a) X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 4000 \times 15.8 \times 10^{-3} = 398 \Omega$$

$$(b) X_C = 1 / (2\pi fC) = 0.159 \times 10^6 / (4000 \times 0.1) = 398 \Omega$$

$$(X_L = X_C, \text{ 這可證實計算無誤})$$

$$(c) E_L = IX_L = 1.0 \times 398 = 398 \text{ V}$$

$$E_C = IX_C = 1.0 \times 398 = 398 \text{ V}$$

$$E_R = IR = 1.0 \times 10 = 10 \text{ V}$$

電壓的提升 在上例中線電壓爲 10 V ，而跨 L 或 C 兩端的電壓却爲 398 V ，這種對電壓的提升，只要是在串聯諧振電路中都會產生。再者，電壓提升的倍數又是決定於電感抗與電阻的比值。我們知道，對一個線圈而言，線圈的電感抗與它的有效電阻的比值正是線圈品質的一種度量規格，稱之爲線圈的品質因素 (Quality factor) 或 Q 值。同樣，對一個諧振電路，我們也可定出這個電路的 Q 值。諧振電路的 Q 值可定義爲

$$Q = 2\pi \left[\frac{\text{諧振頻率時電路所儲存的平均能量}}{\text{諧振頻率時電路在一週期內所消耗之能量}} \right]$$

在串聯諧振電路時，電路的 Q 值依上式計算後正等於電路諧振時的電感抗與電路中電阻值之比。此時所指的電阻係電路中的總電阻 R_T ，它包括了

線圈內的有效電阻及其他的電阻性元件。

在例 1-1 中，電感抗 X_L 為 398Ω ，而電路總電阻為 10Ω ，所以電路的 Q 值

$$Q_c = X_L / R = 398 / 10 = 39.8$$

若比較一下諧振時跨 L 兩端的電壓與線電壓，結果正好是 39.8 倍。換言之正好是線電壓的 Q 倍，由此我們可引伸出一個結論，即在串聯諧振電路中，跨電感器或電容器兩端的電壓，在諧振時提升了 Q 倍。這結論可用數學式證之如下：

$$E_L = I X_L$$

諧振時

$$I = E_T / R_T$$

將電流代入，即得

$$E_L = (E_T X_L) / R_T = Q_c E_T$$

同理可求得

$$E_C = (E_T X_C) / R_T = Q_c E_T$$

現在，我們可在串聯諧振電路諧振時的五個特性之外再加上第六點了：

$$6. E_L = E_C = Q_c E_T$$

頻率的效應 以上所討論的都是電路在諧振頻率時的情形。如果所加的電源，頻率改變了，那麼問題就變的較為複雜。這時就必須針對各種不同的輸入頻率去反覆計算電抗，阻抗，電流值和電壓值。表 1-1 就列出了在例 1-1 電路中各量由頻率變化所引起的效應。為計算方便起見，這時我們以

6 通信電子電路

400 Ω 代替了 X_L 及 X_C 原先在諧振時的 398 Ω 。

表 1-1 頻率對電路值所產生之效應

($L = 15.8 \text{ mH}$ $C = 0.1 \text{ } \mu\text{F}$ $R = 10 \text{ } \Omega$)

頻率 (Hz)	X_L (Ω)	X_C (Ω)	X_0 (Ω)	θ_i	Z		I (mA)	E_C (V)	E_L (V)
					(Ω)	特性			
1000	100	1600	-1500	90°	1500	電容性	6.70	10.7	0.67
2000	200	800	-600	89°	600	電容性	16.70	13.3	3.34
3000	300	533	-233	88°	233	電容性	43.00	25.1	12.9
4000	400	400	0	0°	10	電阻性	1 A	400	400
5000	500	320	+180	87°	180	電感性	55.00	18.1	27.5
8000	800	200	+600	89°	600	電感性	16.70	3.34	13.3
16000	1600	100	+1500	90°	1500	電感性	6.70	0.67	10.7

從 $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ 一式中可看出僅在諧振頻率時 ($X_L - X_C$)² = 0，而電壓頻率無論高於或低於諧振頻率，($X_L - X_C$)² 均為一大於零的正實數。因此可知阻抗 Z 當諧振頻率時為最小值且為電阻性，因這時 $Z = R$ 。而電壓頻率高於諧振頻率時，因為 $X_L > X_C$ 故電路呈電感性，反之，低於諧振頻率時，因 $X_L < X_C$ 故電路呈電容性。再者， $I = E/Z$ ，因此，電流在諧振時為最大，當電源頻率高於或低於諧振頻率，電流值就因阻抗 Z 的增加而減少。綜合以上的討論並分析表 1-1 的結果，我們可知電路特性隨電壓頻率不同而改變如下：

1. 在諧振頻率

- (a) 阻抗最小且呈電阻性（等於 R ）
- (b) 電流為最大且與線電壓同相
- (c) $E_C = E_L = Q_C E_T$

2. 低於諧振頻率

- (a) 阻抗迅速增加，且成為電容性
- (b) 電流驟減，並趨於零。
- (c) E_L 與 E_C 急速降低且趨於零。

3. 高於諧振頻率時

- (a) 阻抗迅速增加，但成為電感性。
- (b) 電流驟降且趨於零。
- (c) E_L 及 E_C 急速減少並趨於零。

阻抗隨頻率之變化示之於圖 1-1 中：

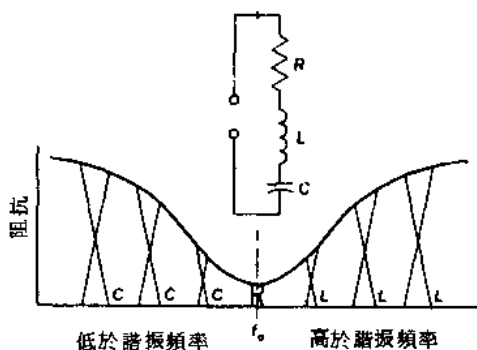


圖 1-1 串聯電路阻抗的頻率效應

電阻的效應。 先前我們已提過，諧振電路中的電阻值是不會影響諧振頻率的，但是會影響到諧振時電流與電壓。如將表 1-1 中的電阻改成 $20\ \Omega$ 與 $60\ \Omega$ ， L 與 C 不變，則電路中各量的數值均可重新求出，且列之於表 1-2 中。

表 1-2 電阻對電路值所產生之效應

($L = 15.8\text{ mH}$ $C = 0.1\ \mu\text{F}$)

頻率 (Hz)	X_n (Ω)	$R = 20\ \Omega$			$R = 60\ \Omega$		
		Z (Ω)	I (mA)	E_L (V)	Z (Ω)	I (mA)	E_L (V)
1000	-1500	1500	6.70	10.7	1500	6.70	10.7
2000	-600	600	16.70	13.3	600	16.70	13.3
4000	0	20	500	200	60	167.00	66
8000	+600	600	16.70	3.34	600	16.70	3.34
16000	+1500	1500	6.70	0.67	1500	6.70	0.67

8 通信電子電路

自表 1-2 的數據看來，可得以下的結論：

1. 當頻率遠離諧振頻率時，由於電阻值與淨電抗值 X_0 相比小的太多，故可忽略不計，因之電阻數值雖變，電流 I 及電壓 E_L, E_C 却不受影響仍然相同。
2. 當在諧振頻率及其附近時，淨電抗值 X_0 比電阻值小的很多，因此電流 I ，及電壓 E_L, E_C 取決於電阻值，電阻值大時，電流小，同時 E_L, E_C 也因 $Q (=X_L / R)$ 小而提升的少。

圖 1-2 表示了電阻對電流，電壓的影響，這曲線稱為諧振曲線或反應曲線，從圖中可看出，電阻值越小，曲線的兩側越陡峭，反之越平潤。

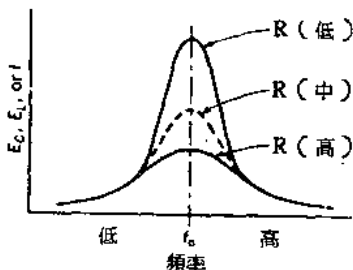


圖 1-2 串聯諧振電路頻率反應曲線之電阻效應

L / C 的效應 在例 1-1 中，15.8 mH 的線圈與 0.1 μ f 的電容器形成了一個諧振頻率為 4000 Hz 的串聯諧振電路。如果將線圈的電感量增加 10 倍（158 mH），電容器的電容量減少 10 倍（0.01 μ f），則所形成的電路仍諧振於 4000 Hz，但這時 L / C 的比值却增加了 100 倍，這對電路會產生什麼影響呢？在值定電阻值不變的情形下，可大致分析如下：

1. 在諧振頻率時，由於淨電抗 X_0 仍為零，所以電流 I 不會因 L / C 比值的增加而變化，但 L 的增加造成 $Q (Q = \omega_0 L / R)$ 的增加，所以 E_L, E_C 因 Q 倍的提升而增加了。
2. 遠離諧振頻率時，由於 L / C 的增加， $(X_L - X_C)^2$ 增加了，因此 Z

隨着增加，自然這時電流 $I (= E_T / Z)$ 就要減少了。而 E_L 與 E_C 則等於電流與電抗的乘積，而電流減少的效應恰被電抗增加的效應所抵消，因此這時 E_L 及 E_C 均不致受 L/C 比值的增加而改變。

圖 1-3 表示了 L/C 比值對於反應曲線的效應。並以下例來證實上述的論點。

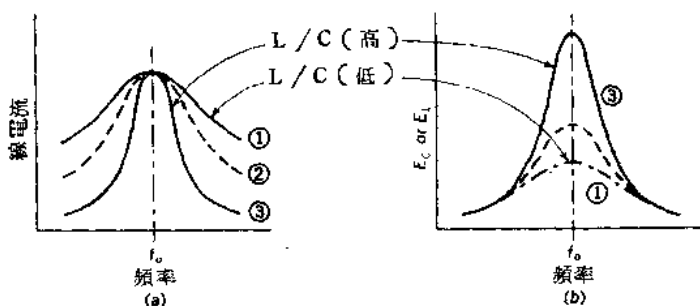


圖 1-3 L/C 比對反應曲線之效應

【例 1-2】 試將例 1-1 ($L = 15.8 \text{ mH}$, $C = 0.1 \mu\text{f}$, $E_T = 10 \text{ V}$) 的 I , E_C 在頻率為 1000, 4000, 16000 Hz 時，與 (1) $L = 158 \text{ mH}$, $C = 0.01 \mu\text{f}$ (2) $L = 1.58 \text{ mH}$, $C = 1 \mu\text{f}$ 的情形作一比較。

解：在以上的任一情形下， $L C$ 的乘積均相等，所以諧振頻率都是 4000 Hz。而電抗，阻抗，電流及電壓 E_C 則依表 1-2 之形式求出列之於表 1-3 中。

從表 1-3 中可看出先前所作的分析是正確的。即在諧振頻率 (4000 Hz) 時，阻抗與電流都不受 L/C 比值的影響，但 E_C 則因 Q 值的增加而增大了。反之，在遠離諧振頻率時， E_C 不受 L/C 的影響，但電流與 L/C 比值成反比，阻抗則與它成正比。

表 1-3 不同 L/C 比值下，電路值之比較

頻率 (Hz)	電路條件		X_L (Ω)	X_C (Ω)	Z (Ω)	I (mA)	E_C (V)
	L	C					
1000	15.8 mH	0.1 μ F	100	1600	-1500	6.70	10.7
	158 mH	0.01 μ F	1000	16,000	-15,000	0.67	10.7
	1.58 mH	1.0 μ F	10	160	-150	67.00	10.7
4000	15.8 mH	0.1 μ F	400	400	10	1 A	400
	158 mH	0.01 μ F	4000	4000	10	1 A	4000
	1.58 mH	1.0 μ F	40	40	10	1 A	40
16,000	15.8 mH	0.1 μ F	1600	100	+1500	6.70	0.67
	158 mH	0.01 μ F	16,000	1000	+15,000	0.67	0.67
	1.58 mH	1.0 μ F	160	10	+150	67.00	0.67

諧振電路的增益 在射頻時，串聯諧振電路常像變壓器一樣的用來作為獲得電壓增益之用。但是變壓器是將任何輸入的信號都放大同樣的倍數，而串聯諧振電路則只對諧振頻率及其附近頻率的電壓加以放大。為獲得這項電壓增益，輸入信號電壓是加在整個串聯電路的兩端，而輸出電壓則從電容器或線圈兩端取出。這電路已繪於圖 1-4 中。由於輸出電壓即為電容器兩端的電壓 E_C ，所以電壓增益係由 Q 值決定。亦即當電路電阻值甚低，且 L/C 比高時能獲得較大的增益。

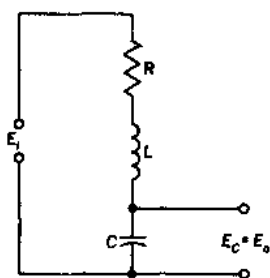


圖 1-4 作為電壓增益用之串聯諧振電路

諧振銳度—寬度 諧振電路主要應用在發射機與接收機中。它擔負着兩種任務：(1)產生或通過某特定頻率（載波）或頻帶（頻道）。及(2)拒斥或阻

止頻道以外的其他頻率通過。諧振電路所擔負的這些工作是否成功則取決於反應曲線的選擇性 (Selectivity)，亦即諧振銳度 (Sharpness of Resonance)。若反應曲線的兩側非常峻峭的急劇下降，則電路將具較好的選擇性。試比較圖 1-2 中的各曲線，顯然含較低電阻量的電路具有較好的選擇性。再檢視一下圖 1-3 (b)，曲線③的 L/C 比值最大，也是兩側最陡峻的曲線，當然也是選擇性較優的了。從這些討論中可得到一個結論，那就是若要電路的選擇性好，就要使串聯電阻值越小， L/C 比越大。

當希望通過某特定頻率的信號且要排除鄰近頻率時，就需要選擇性高的反應曲線。因此，選擇性可定義為諧振時的反應（需要的信號）與某一非諧振頻率的反應（拒斥的信號）間的比值。圖 1-5 可將這敘述很清楚的表出。曲線 (a) 中，頻率 f_1 的信號（不需要的信號）僅為諧振頻率 f_0 （需要的信號）振幅的百分之廿，所以它的選擇性好。反之，曲線 (b) 的選擇性就差了，這時頻率 f_1 的振幅幾乎與 f_0 的振幅相同，亦即，要拒斥的信號並未被大幅的阻止。

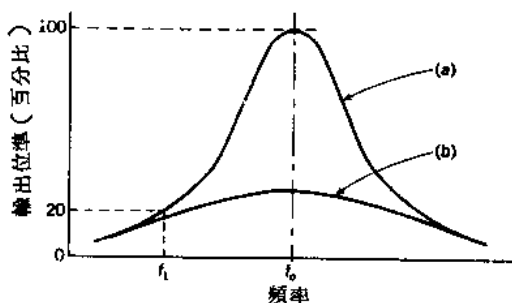


圖 1-5 諧振銳度對鄰近頻道選擇性之效應

可惜，選擇性並非是諧振電路唯一需要注意的特性，上面曾提及，諧振電路尚須能通過一個頻帶，因之理想的反應曲線，其頂端係成水平，且此平坦的頻寬 (Band width) 要等於欲通過的所有頻帶。曲線的兩側則

應是垂直的下落。這時那些在所欲頻率之外的任何頻率就會完全被拒斥了，因為它們的反應均為零。這種理想的反應曲線示之於圖 1-6 中的曲線 (a)。它的頻寬為 70 KHz (565 ~ 635 KHz)。

一個簡單的串聯諧振電路並不能產生這種理想的反應曲線。它只能產生一個像圖 1-6 曲線 (b) 那樣呈啞鈴型的形狀。雖然曲線 (b) 與曲線 (a) 的最大振幅與涵蓋的頻率均相同，可是兩側却非垂直下落而是呈斜坡形的。那麼這時該如何來計算它的頻寬呢？假若在靠近峯值處計算，頻寬就較窄，若在靠近底部計算又過寬了。爲了解決這模擬兩可的情形，於是將度量點規定在輸出最大值的 70.7 % 處。這時的度量點又稱為半功率點，因為在這頻率時的功率恰是諧振頻率時的一半。若以分貝 (dB) 來表示，那麼度量點的輸出大小恰比最大輸出低 3 dB。

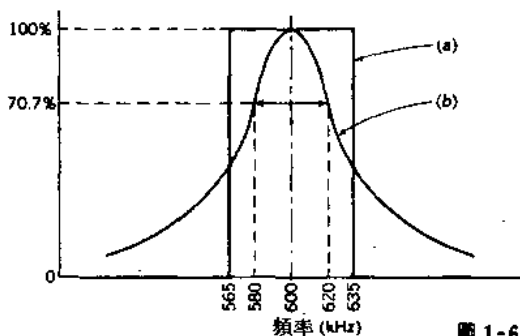


圖 1-6 頻寬之估算

在討論諧振的銳度時，曾提到電路電阻越低，電感越高，反應曲線就越窄銳。但這因素正決定了電路的 Q 值。因此 Q 值高的電路，可得到銳度大的反應曲線。又由於頻寬與銳度正呈相反的效應，所以 Q 值低的電路頻寬亦寬。換言之，任一電路頻寬的大小與 Q 值的高低呈反比。事實上，對一已定 Q 值而言，頻寬依下式決定

$$\text{頻寬 } BW = f_0 / Q$$