

★ 郵 電 叢 書 ★

濾 波 器

人 民 郵 電 出 版 社

濾波 器

康拉辛斯基 著

人民郵電出版社

Д. А. КОНАШИНСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1953

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ

ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

本書敘述一般低通、高通、帶通和帶阻濾波器的工作原理及其基本計算。在本書的後部也介紹了帶諧振回路的帶通濾波器的工作原理及其計算，供有一定無線電基礎的業餘無線電愛好者之用。

濾 波 器

著 者: 蘇 聯 康 拉 辛 斯 基

譯 者: 蘇 敬 之 孫 肇 燾

出版者: 人 民 郵 電 出 版 社
北京西長安街三號

印刷者: 北 京 市 印 刷 二 廠

發行者: 新 華 書 店

書號: 9 25開 86面 62千字

一九五四年六月初版(1—3000) 定價 4,500 元

北京市書刊出版業營業許可證出字第 048 號

目 錄

第一節	概論	(1)
第二節	低通濾波器	(17)
第三節	低通濾波器的計算	(22)
第四節	整流器電路中的低通濾波器	(26)
第五節	高通濾波器	(34)
第六節	高通濾波器的計算	(38)
第七節	帶通濾波器	(41)
第八節	帶通濾波器的計算	(44)
第九節	帶阻濾波器	(46)
第十節	帶阻濾波器的計算	(47)
第十一節	κ 型、 m 型和組合濾波器的概述	(49)
第十二節	無感濾波器	(51)
第十三節	同調帶通濾波器	(58)
第十四節	同調帶通濾波器的計算	(70)
第十五節	關於其他類型濾波器的概念	(77)

第一節 概 論

廣義說來，過濾器是用來分離具有不同特性物品的工具，我們日常生活中到處所碰到的機械性過濾器是非常普遍的，甚至使我們不想去分辨某一種工具是否為過濾器，例如篩麵粉的篩子，過濾咖啡沉澱的網子和淨水的工具等等。電信濾波器與機械過濾器相似，它是一種應用在電路裏的裝置，當各種頻率不同的電流流過的時候，可以隨心所欲地把某一頻率的電流與另一頻率的電流分離開來，或者阻止某一頻帶通過，而給另一頻帶提供自由通行的路徑。反之亦然。現代無線電的發射裝置和收信裝置，電視裝置和雷達設備等等，其工作之日趨完善，就是在它們的電力、高頻與低頻部分廣泛應用濾波器的效果。

濾波器在近代技術上有着廣泛的用途。在研究通信設備的性能時，在發送像語言、音樂等複雜形狀脈動電流時，都要使用濾波器。爲了研究各種頻率或因其他需要而必須分離頻率時，濾波器能分解複雜的聲波電流成爲由其所組成的各種頻率。在電話設備中，爲了克服某些缺點——減弱或分離某一些頻率，而明顯地加強其他頻率都普遍採用濾波器。藉助帶通濾波器可以把完整的頻帶分離開來。這就使我們有可能在同一電話線路上或無線電路中同時進行若干組談話和傳輸，而又在接收地點把若干組談話或傳輸各自分開。例如在人們所熟知的多路載波電話電路中，一對線路上同時就有各不相同而略高於音頻的十個電報電路和兩個一般直流（頻率爲零）的電報電路，以及普通的電話電路。所有這些同時發送的頻率，靠

濾波器的功用，在接收地點都能分開，每一個濾波器都祇能分出它所允許通過的頻帶，並把此頻帶送至一定的電路內，而同時不讓其他頻帶通過。

雖然要準確計算複雜濾波器是頗為費勁的事，但如果利用普通電路，設想各種不同頻率的電流通過它時，是不難了解濾波器的工作原理的。為此我們在敘述濾波器的工作時，正是從這裏着手。

各類型電信濾波器的功用是以下述的交流電路的四個法則作根據的。

1. 對頻率低的電流或直流來說，電感的阻抗較在頻率高時為小，我們也可以把直流看成頻率為零的交流。

實際上，從電工原理學中顯而易見，純電感，即不含任何具有能量損耗的電阻和沒有分佈電容的線圈，對於交流通過的感抗，其計算式為

$$X_L = \omega L = 2\pi fL,$$

式中 $\pi = 3.14$;

f —通過電感的電流頻率 以赫芝計；(註：赫芝=週/每秒)

L —電感值，以亨利計。

當流經電感的電流頻率 f 等於零時，即直流電流通過電感時，則 $X_L = 6.28 \times 0 \times L = 0$ ——線圈對直流電的感抗等於零，隨着頻率增加，線圈的電抗也成比例地增加，在圖1中，很清楚地可以看出感抗的上升是與通過該線圈的電流頻率的增加成比例的。

實際上，任何線圈都具有一定的有效電阻，此電阻引起能量的損耗：銅導線中的損耗；絕緣架中的損耗；線圈周圍物體中的損耗等等。有效電阻 R_L 增加了線圈總的阻抗，因而線圈失掉了它電感的純粹性（電感的理想性）。但是一般正確設計製造的線圈，在其

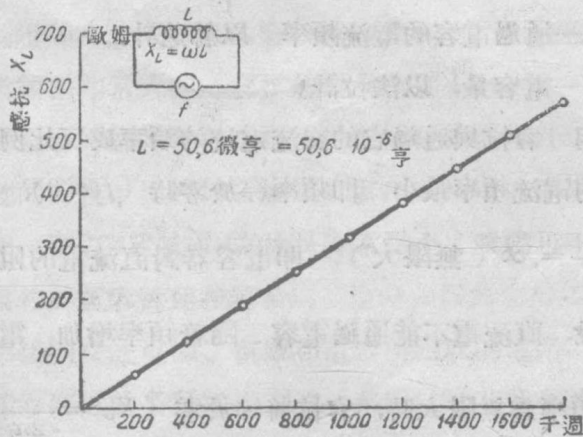


圖 1 感抗與頻率關係的變化曲線:

f (千週)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
X_L (歐姆)	0	64	128	191	256	318	381	445	508	572

工作頻帶以內的有效電阻 R_L 較之感抗 X_L 小得多，因此在某些情況下可以省略不計，把線圈當作純電感看待，圖 1 的曲線就根據這樣製成的。但是在某些情況下，特別是在濾波器中，即使是不大的電阻，實際上也會影響到濾波器的工作條件。在這裏我們暫不計較這種影響，否則便會使我們對問題的研究趨於複雜。等到下面我們應該敘述它的地方，我們再研究組成濾波器的各元件之電阻對於濾波器工作的影響。

2. 電容對高頻電流通過的阻抗比對低頻電流通過的阻抗小得多，對於直流電則完全阻止它通過。

根據電工學的原理，純電容（即沒有損耗和電感的電容器）對於交流電的通過是電容性的阻抗。容抗的計算式為

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{6.28 f C}$$

式中 $\pi = 3.14$;

f —通過電容的電流頻率，以赫芝計；

C —電容量，以法拉計。

算式說明 容抗與通過它的交流電流的頻率成反比例地變化。當通過電容的電流頻率最小，即頻率等於零時 ($f = 0$)，則 $X_C = \frac{1}{2\pi \times 0 \times C} = \infty$ (無限大)，即電容器對直流電的阻抗為無限大，換句話說，直流電不能通過電容。隨着頻率增加，電容器的容抗減小；當頻率為無限大時，容抗將等於零 ($X_C = \frac{1}{2\pi \times \infty \times C} = 0$)，即對頻率無限大的電流為短路。

像純電感的情況一樣，此一法則也可用圖解來表示(圖2)。

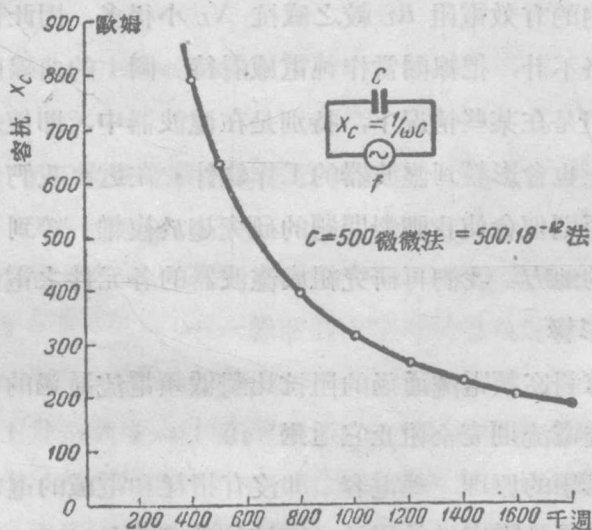


圖 2 電容阻抗與頻率關係的變化曲線：

f (千週)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
X_C (歐姆)	∞	1590	795	530	398	318	265	227	199	177

圖中曲線明顯地說明，電容器對直流電的阻抗是無限大，而隨着通過電流頻率的增加，該電容器的容抗開始急劇地、而接着是漸漸緩慢地減小；當頻率非常大時，容抗就變為特別小。

任何實用電容器都具有引起各種損耗的有效電阻 R_C 。此電阻增加了電容器總的阻抗，但因為一般電容器在所指定的工作頻帶內，其有效電阻 R_C 與電容阻抗 X_C 之比，非常渺小，我們可不予計算，而把電容器當作純電容性阻抗看待。

5. 由串接的交流電源、電感和電容所組成的電路，對諧振頻率和對諧振頻率鄰近的各種頻率電流，其阻抗是非常小的，而對其他頻率電流，阻抗很大，且離諧振頻率點愈遠，阻抗愈大。

從上面關於電感和電容與頻率關係的討論，不難看出，電容和電感在與通過電流的頻率關係上是相反的；電感阻抗隨頻率的增加而上升，而容抗却隨頻率的增加而下降。顯然，如果將電感、電容和電源串聯起來，則電感、電容所產生的阻抗彼此作用相反。因此可以說：此兩阻抗的符號相反，即其中之一如採用正號時，另一阻抗就可認為是負的。習慣上認為感抗是正的，而容抗則是負的。由於在低頻時容抗的減小較之感抗的增加為快，當頻率由零上升時，電路中的總阻抗逐漸減小，到達某一特定頻率時，兩阻抗（感抗和容抗）彼此相等，即電路中的總阻抗為零。當頻率繼續增加時，容抗的減少慢於感抗的增加，從而電路中的總阻抗又將增加。如果利用圖 1 和圖 2 並按照 $X = X_L - X_C$ 作出總阻抗 X 的變化曲線，更容易令人信服。作此圖解時，先從阻抗值大的減去阻抗值小的，以其結果值根據符號記在橫軸的上面或下面。一般是按照下述方法進行的。因為感抗和容抗具有不同的符號，則圖 1 和圖 2 中的曲線 X_L 和 X_C 可合併劃在一個圖內。把 X_L 的諸值（橫軸上方為正號）和

X_C 的諸值（橫軸下方為負號）相加（同一比度），這樣就得第5圖。那末我們就容易找出 X_L 、 X_C 與電源串聯電路的總阻抗變化曲線（取電源的阻抗為零）。取一只兩腳規量出在某頻率時兩阻抗中之小的阻抗值，並從大的阻抗值中減去。則橫軸與所得點的距離，不僅其數值等於總阻抗（按選定的比例尺度），而且也決定了它的符號。圖5示出600千週時求阻抗曲線的方法。

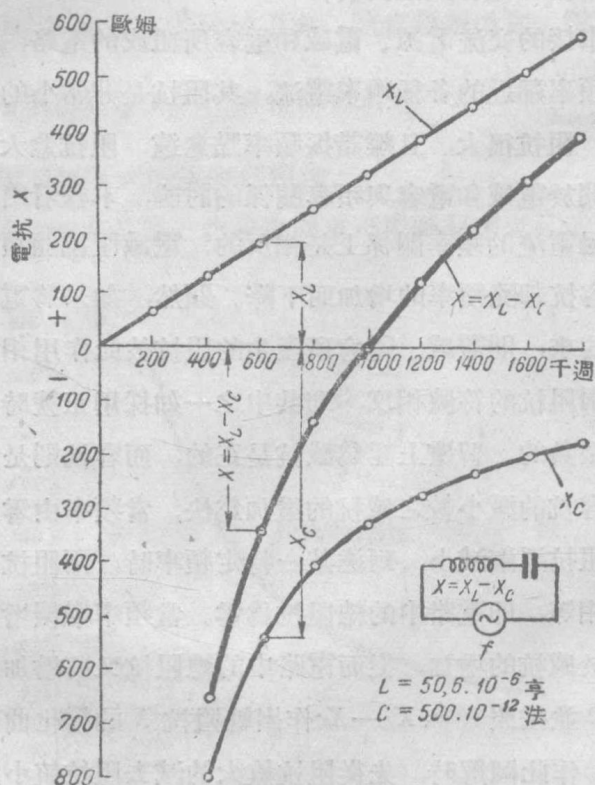


圖5 串聯電路阻抗與頻率關係的變化曲線：

f (千週)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
X (歐姆)	∞	1526	-667	-559	-142	0	117	218	310	395

從圖 3 中電路總阻抗的變化曲線可見，當週率 $f = 1000$ 千週時阻抗為零。當串聯的電感阻抗與電容阻抗相等時的頻率，即當 $X_L = X_C$ 或 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 時的頻率，叫做串聯電路的諧振頻率。在諧振頻

率 $\omega_P = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 或 $f_P = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ 時，可以得到電壓諧振或串聯諧振。此時的特點是能得到最大電流，因而電容和電感上得到的最大電壓，大大超過接在電路上的電源電壓。如果電路是理想的 ($R = 0$)，電壓可為無限大。

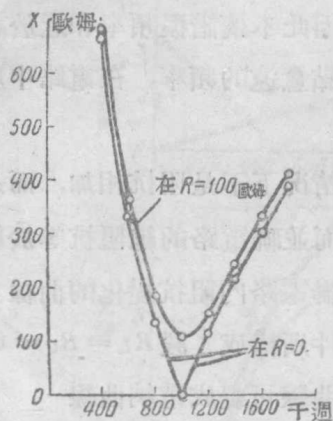


圖 4 串聯電路阻抗與頻率關係的另一種表示圖 (根據圖 3 數值)

其次，從圖 3 也可看出，在與諧振頻率相鄰的狹窄頻帶內，總阻抗的數值不大，且從諧振點向左向右，總阻抗都是同樣的增加，其變化曲線可用圖 4 的曲線表示之 ($R = 0$)，圖中 X 之值不計何種符號。

在實用電路中，因其中有電阻損耗 (有放電阻)，故所得的圖形略有不同。在電路中，或者習慣所說的線圈和電容器中總存在

着有效電阻，因此使得串聯電路的總阻抗 Z 在諧振頻率時也不等於零——在諧振時的總阻抗的最小值也等於有效電阻之和，即 $Z = R_L + R$ ，並且隨着離諧振頻率的兩旁愈遠總阻抗愈增加。有效電阻的大小影響到諧振頻率附近總阻抗的變化速度。有效電阻愈大，線圈的品質因數 Q 愈小。

$$Q = \frac{\omega \rho L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\rho}{R},$$

式中 $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ——叫做電路的特性阻抗或稱波動阻抗。電路阻抗變化愈慢，則阻抗變化曲線在諧振頻率附近愈是模糊不清（圖 4 是 $R = 100$ 歐姆的曲線）。換句話說，品質因數愈小，則電路理想性愈弱。

順便要指出的，電路的特性阻抗 ρ 也具有有效電阻的性質，並以歐姆計算。

4. 如果電容與電感並聯的電路和交流電源串接，則當諧振頻率時，此電路對於電源的阻抗很大，因此不讓諧振頻率和近於諧振頻率的交流電流通過，而其他離諧振點愈遠的頻率，在電路中所遇到的阻抗愈小。

電工理論已證明：在並聯電路的情況下不是阻抗相加，而是電納相加，即各分路阻抗的倒數相加，而並聯電路的總阻抗等於總電納的倒數，應用此理，我們可製成並聯電路內阻抗變化的曲線。並聯電路也是由上述串聯電路中各種元件所構成（設 $R_L = R_C = 0$ ）。並聯電路見圖 5 右下方。利用圖 1 的曲線可製成電納曲線

$$Y_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{2\pi fL},$$

其值等於阻抗的倒數，定為負值，由曲線變化可知當頻率 $f = 0$ ，電納 $Y_L = -\infty$ ，並且電納隨着頻率的增加而減小，當頻率很大時，電納趨近於零（因此時 X_L 很大）。利用類似的方法，可求出電路電容器分路的電納

$$Y_C = \frac{1}{X_C} = 2\pi fC,$$

設其值爲正。從曲線可知當頻率爲 0 時，此分路的電納等於零，隨着頻率的增加電納也增大。當頻率很大時，電納趨近無限大。這很容易了解：直流不通過電容器，也就是對 $f = 0$ (直流) 的電納爲零，正與我們開始所講的相符合。頻率很高時，電容器阻抗很小，也就是電納很大。

因爲隨着頻率的增加， Y_L 減小，而 Y_C 增加。顯然，在某一頻率時 Y_L 和 Y_C 會彼此相等。電納正與電抗一樣，彼此作用相反。在電納 Y_L 和 Y_C 相等而電路的總電納等於零時的頻率，即當 $Y_L = Y_C$

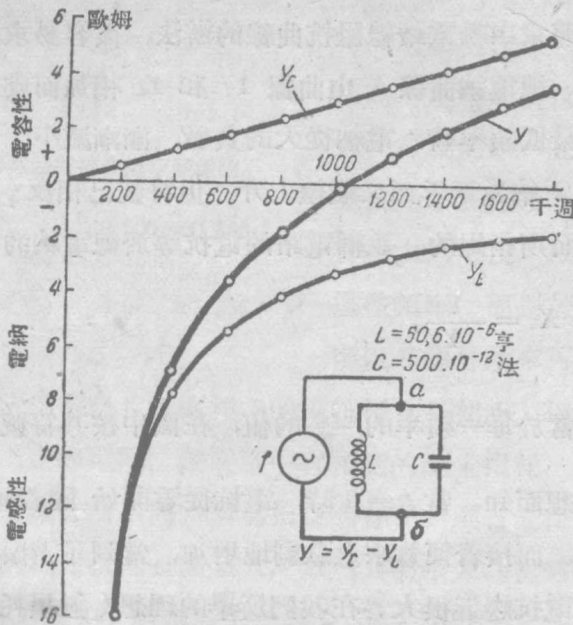


圖 5 並聯電路的分路電納和總電納對頻率關係的變化曲線：

f (千週)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
Y_L (姆歐)	∞	15.6	-7.8	-5.3	-3.9	-3.14	-2.62	-2.24	-1.9	-1.8
Y_C (姆歐)	0	0.63	1.3	1.9	2.5	3.14	3.76	4.4	5.0	5.7
Y (姆歐)	∞	-14.97	-6.5	3.4	-1.4	0	1.14	2.16	3.1	3.9

或 $\frac{1}{\omega L} = \omega C$, 或 $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, 或 $f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ 時, 叫做並聯

諧振頻率, 即所謂並聯諧振或電流諧振。並聯諧振的特徵是分路端點(圖5的 α, δ 點)上的阻抗最大, 從而在諧振回路外電路上的電流最小。同時在回路內的電流却最大。

顯然, 我們所示例的並聯電路之諧振頻率為 1000 千週。並聯諧振頻率與我們前面所研究的串聯諧振頻率是符合的, 這是理所當然。因為我們所研究的是同樣的回路, 祇不過此回路中與電源的關係, 不是串接, 而是並聯。

我們仿照求串聯電路總阻抗曲線的辦法, 很容易求出此電路的總電納曲線, 總電納曲線 Y 由曲線 Y_L 和 Y_C 相加而成。由電納曲線可知, 在最低頻率時, 電納從大的負數, 漸漸減小。當頻率到了 1000 千週, 電納通過零而又繼續上升, 但符號已相反(圖5)。

正如上面所指出的, 並聯電路的電抗等於總電納的倒數,

$$X = \frac{1}{Y}。$$

找出相當於每一頻率的 $\frac{1}{Y}$ 的值, 在圖中按其符號相加, 便得到圖6。可想而知, 當 $f=0$ 時, 電抗從零開始, 隨着頻率增加, 開始緩慢上升, 而接着便愈來愈急劇地增加, 當到了諧振頻率附近的各頻率時, 電抗趨近很大。在我們所舉的理想(無損耗)情形下, 當諧頻 $f_p = 1000$ 千週時, 電抗成為無限大。過了諧振頻率, 電抗以異號開始逐漸減小, 隨着越來越小, 頻率很大時, 電抗便接近於零。圖6中曲線的變化過程表示得很清楚, 因為在低頻時, 電路的電納基本上祇決定於分路中電感支路的電納, 且此時電納很大。電

納愈大，電抗便愈小。這種電抗是電感性的電抗（電納為負）；在

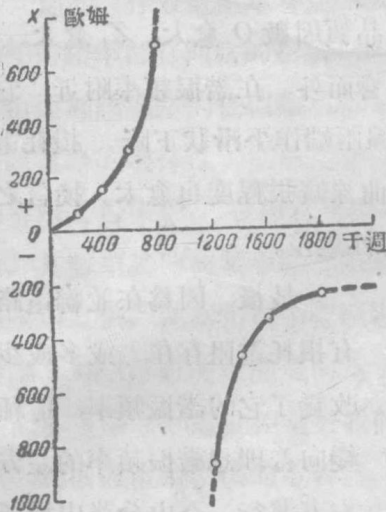


圖 6 並聯電路電抗與頻率關係的變化曲線：

f (千週) 0 200 400 600
800 1000 1200 1400 1600 1800

$X = \frac{1}{Y}$ (歐姆) 0 67 153 296

715 ∞ -875 -463 -323 -256

高頻時也得到同樣情形，祇是這時候起決定作用的是電容性的電納，因而電抗是電容性的（電納為正）。

並聯電路的電抗變化曲線也可以用圖 7 ($R=0$) 的曲線表示。此曲線很清楚地告訴我們，在諧振頻率附近的各頻率時，電路電抗很大；當諧振頻率時，電路的電抗成為無限大。這就是說：並聯電路對於諧振頻率及諧頻附近的各頻率有很大的電抗，以致完全截止這些頻率，而對於諧振頻率範圍以外的各頻率可以通行。

理想的並聯電路（無衰耗）的電抗變化是如此。但因任何實用電路總含有一定的電阻，在電路中有相應的能量損耗，所以總阻抗的變化情形實際有所不同。因為損耗的存在，則首先在並聯電路中就會使諧頻的總阻抗不是無限大，雖然其值很大，但終究還是有限值（圖 7 中為 $R=100$ 歐姆時的曲線），其大小既決定於引起損耗的電阻，也決定於電感、電容兩電路元件之間的比例。諧振時總阻抗

$Z_0 = \frac{L}{RC} = \frac{\rho^2}{R}$ 是電阻性的，損耗電阻 $R = R_L + R_C$ 愈小，電

感 L 與電容 C 之比值愈大，即電路特性值 $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 愈大，則此電阻性的總阻抗愈大。換句話說，品質因數 Q 愈大， Z_0 愈大。

電路中的損耗電阻除有上述影響而外，在諧振頻率附近，它影響 Z_0 變化不太急劇，即總阻抗曲線兩端作平滑狀下降，損耗電阻愈大，則曲線兩端離諧頻點愈遠，曲線擴張程度也愈大。換言之，品質因數 Q 愈小，並聯電路的理想性愈差。

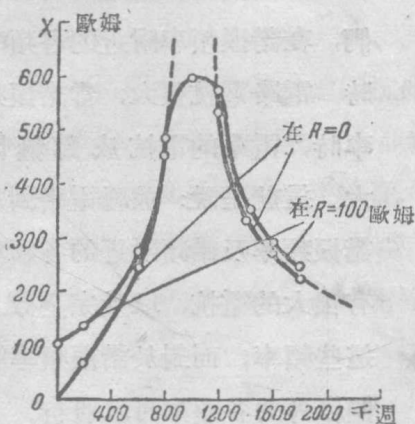


圖 7 並聯電路電抗與頻率關係的另一種表示法（根據圖 6 的數值）

最後，因為在並聯電路中有損耗電阻存在，或多或少地改變了它的諧振頻率，這種改變向着理想諧振頻率的左方或右方進行，全由分路中損耗電阻的比例來決定。質言之，對於同樣的實用電路，串聯諧振的頻率與並聯諧振頻率並不吻合，且如損耗電阻愈大，即品質因數 Q 愈小，兩種諧頻之差異就愈大。我們在實際所採用的

諧振電路中，並不計算這種差異。

這樣，我們可選擇大小適合的電容和電感或由幾個電感和電容共同組成的電路，保證（在理想的情況下）隨心所欲地對各種頻率的電流在任意程度上起着濾波器的作用，也就是保證截止或通過任何頻率的電流。

換言之，既然上述每一簡易電路對於通過它的某種頻率的電流能够應付自如，則顯然已經是濾波器了。但因其各元件中總含有一

定的電阻，影響所及，不能起高度的濾波作用。

自然，有效電阻本身並不具有任何濾波性能。因為它對通過它的任何頻率都有同樣的影響，並且對該電路所截止的任何頻率以及自由通過該電路的任何頻率都不起決定影響。但是有效電阻能決定各該電路的選擇性、靈敏度和濾波作用的程度；傳輸頻率與截頻間的界限是否尖銳，也由它來決定。損耗電阻愈小，品質因數 Q 愈大，其截頻與傳輸頻率的界限愈顯尖銳。以我們敘述過的簡單電路的應用為例，在高頻電子管振盪器為並聯供電時屏極回路內的扼流線圈，可以讓直流電流通向電子管，而不讓高頻電流通過供電電路（直流電路），這就相當於我們所研究過的圖 1。

與振盪電路串接的電容器，在振盪管為並聯供電時，截止直流電流，而使高頻電流由電子管通向振盪電路，這就相當於我們研究過的圖 2。

正如人們所共知的，天線相當於串聯的諧振電路，所以可以認為是一個濾波器，因為它能從無數作用於它的電波中，最有效地與

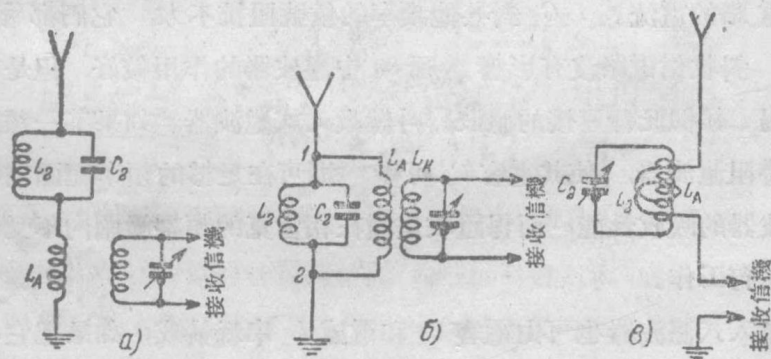


圖 8 在收音機輸入電路中帶阻濾波器的應用

a. 陷波式濾波器；b 及 c 吸入式濾波器