

濾波器

大東書局出版

濾 波 器

吳 興 吾 譯

大東書局出版

濾波器內容提要

本書首先從梯型衰減器的理論、公式和設計方法入手；然後利用梯型網絡的特性阻抗和傳播常數來討論梯型通低頻、通高頻和通頻帶各種濾波器的性質和設計。特別提出各種濾波器之間的相互關係，使實際方法獲得簡便。除各式梯型濾波器以外，並有德國考爾氏 X 型濾波器設計方法導論。而且有同軸電纜和波導濾波器特殊的高頻濾波器設計。本書可作中等以上電信技術專科學生以及中級電信工作技術人員參考學習之用。

原書名：Electric Filters

原著者：T. H. Turney

原出版者：Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd, London

原出版年月：1945年

濾 波 器

書號：5124

譯 者	吳 興 吾
出版者	大 東 書 局 上海福州路301號
印刷者	大 東 印 刷 廠 上海安慶路268弄

25 開 97 印刷頁 140,000 字 定價 9,000 元
一九五四年三月初版

(0001—3000)

上海市書刊出版業營業許可證出 034 號

上海市書刊發行業營業許可證發 061 號

導 論

許多電器祇有兩端，例如電燈、電鈴、電爐、電動機和電阻，以及線卷和容電器；而變量器則有四端。

在電話和電報工作方面，有許多電器跟變量器一樣，具有四線端，因此它們在一定的電壓下，接受一定的電流，而也許在不同的電壓下輸出電流。由純電阻構成的衰減器屬於現在所討論範圍內的一個例子。它有兩個輸入和兩個輸出端。

由純電阻構成的衰減器，在傳輸測驗方面用得很多。它們製造簡易，而且產生簡單而有一定的效應，因為它們在任何頻率的衰減相同。

在電話工作的初期，做傳輸測驗要用仿真電纜，那是由電阻和容電器所構成，來摹擬電纜的電阻和電容，和隨頻率而變的衰減。

但當加感通行以後，多數電纜有了相當平的衰減頻率曲線，所需要的仿真線路或衰減器，也要具有平的特性曲線。

解決這個要求，就是用純電阻來製成衰減器。

濾波器也有四端，能使某些頻率自由通過，而對於另外那些頻率而言則成爲障礙；其他網絡祇是把電流的相位移動。

如一個電路裏有電阻，好像一只衰減器，而且也有容電器和線卷，又好像一只濾波器。那末，它的結果就會介乎濾波器和衰減器之間；它會使各種頻率的衰減程度各有不同。那末，它可稱爲衰減均衡器，用來接入傳輸線路裏，使線路裏隨頻率變動的衰減變成均平。

再回顧濾波器，在通過範圍裏，使通過它的電流相位有所移動。如

濾波器的通過範圍包括零到無限頻，那末，它就叫做相移網絡，因它並不使任何頻率的電流有什麼衰減，而祇是使通過它的電流的相位有所移動。這樣的網絡能解除傳輸線路裏相移的有害作用。一般地說，一條一千哩長的線路，由於相移所致，要產生暫時電流，在這樣長的線路裏，相移對語言開始有所妨害。在另一方面，圖像傳遞由於電纜裏的相移而受嚴重妨害，如設計恰當，相移網絡能使圖像恢復清晰。

以上這些網絡的特點是都有四端，關於它們研究，可叫做四端網絡的研究。

工作的基本計劃

把這些網絡引入線路內，使之產生一定的後果，例如濾波器作用，而對於濾波器方面，我們一定要把濾波器端的反射效應計算在內，像第四章所示。然而，這也是困難的，因此首先不管反射效應，我們用無限數的相似鏈串節來討論，這就是，我們研究特性阻抗和傳播常數。這些好比是工作的磚（意思是說基礎材料）。

進一步的簡化，首先是不管線卷和容電器裏的電阻損失，這是在第四章裏討論的。這就是說我們一定要研究祇由純電抗構成的電路。

把電路畫成圖，一定要有某些形狀，這就是一定要屬於某些幾何圖型，因此，我們研究各種電路型，例如梯型、X-型和窗格型等。在導引出特性阻抗和傳播常數的初步公式時，用電阻比用電抗，更為簡單一些。那末這不過是開始。用電阻首先使代數簡化，而且也構成一種很實用的儀器——衰減器，這是在第一章裏討論的。

然後，電抗可用來構成濾波器，如第二章和第三章裏所講的。線卷裏損失，以後可以用複數來計算在內，如第四章內所講的。此後，研究一般的實際方面所遭遇的反射效應；以及當電路跟其他電器聯接時，這些電路將做些什麼，如第四章所示。

這些是所包括的工作。還要討論其他網絡，和關於測量的方法。

將近結束時，有一章關於基本原理。從歐幾里德觀點，這些應當放在開端；但先觀察了特殊事件以後，一般性定理就容易懂了。因此這一章，從邏輯方面說應屬於開端，而不放在開端，這是作者個人的看法究竟怎樣好，讓讀者來判斷吧。

關於考爾氏的工作，用許培契夫多項式，也概括地講了一些。

原 序

濾波器已開始引起了很多的興趣，可以想到儘有餘地來寫一本書，把這個主題用儘可能簡單的方式來講，這就是說，要用說明的方式。

著者的目的在把和這個主題有關的各方面，講些導論，包括考爾氏設計方法在內。

實用的各種電路，例如通頻帶濾波器節，並不完全分別地討論和解答。這些工作早已有人做得相當完善了。本書內祇包括這些，足以表明處理問題的方法；因此本書的企圖祇是作為課本而並不作為參考書。第十章關於考爾氏濾波器問題須要當做填補空隙看待。結論這一章表示著者對於濾波器將來發展應當試探的方向的看法，指出這方面應走的道路。

著者相信在這個主題方面，他已有所發現。這就是如此，如你出去購買了隨便多少只線卷和容電器，大小隨便，帶回家來，隨便怎樣把它們聯接起來——把電路裏隨便那兩個線端作為輸入端，和另外的隨便那兩個線端作為輸出端——你已經造成了一只濾波器。這濾波器可能有很多通過範圍在各個不同的頻率出現，而且在各個通過範圍裏可能顯示奇異的特性阻抗。然而它的確是一只濾波器，具有一切濾波器所共有的相當突出的結果。在通過範圍內的任何頻率試驗時（除了線卷和容電器方面的損失以外），它不會使電壓和電流減弱，也沒有衰減，不管你輸入電流的電路有多少相似電路都統統接成一串，還是這樣的情況。

但如在衰減範圍內的任何頻率試驗時，它會有些衰減；那末，祇需要造成足夠數量的相似電路，把它們終端對終端地聯接起來，獲得所需的結果。爲了要瞭解這條一般性定理起見，有些詳細情況須要知道，例如，要沒有衰減，就應使負載電阻的數值正確。然而這個敘述的成立，包含着出於意料的廣泛範圍和廣義性。

爲了要獲得關於頻率所需的通過範圍和適合一定的負載電阻起見，就需要懂得設計。本書的目的就在教這些。那末，著者歸納式的概論究竟有些什麼用處呢？有這些：那些由各發明者敘述作爲濾波器的電路，確實是濾波器，這並不是一件偶然的事情，它們一定是這樣的。它們不可能不是濾波器；而因爲一切由電抗組成的電路是濾波器，那末，顯然地就有無限的園地可供研究和設計。

目 錄

導論
原序
表

第一章 衰減器..... 1

幾何級數和指數——T 衰減器的電阻值——電阻線卷繞線——
低電阻繞法——網絡的對地平衡

第二章 梯型濾波器..... 17

雙跨接終端接續梯型——簡單梯型通低頻濾波器的組合元件公
式——通低頻濾波器阻抗——半串接情況——雙跨接情況——通低
頻濾波器的衰減——梯型濾波器的衰減公式——梯型濾波器傳播常
數公式的證明——對線遠端斷路和短路後的阻抗之簡易證明——
電纜被短路——衰減公式的應用——通低頻濾波器作用的簡單解說
——濾波器裏的相位變動——通低頻梯型濾波器的衰減曲線——**通
用**曲線的應用—— $\cosh P$ 和衰減的關係——通高頻濾波器——**梯
型**通高頻濾波器的兩種終端接法——對地平衡的通高頻濾波器——
通高頻濾波器的阻抗——通頻帶的組合元件——怎樣從電路方面來
認識阻抗曲線——梯型通頻帶濾波器————梯型通頻帶濾波器的
終端——通頻帶濾波器作用的簡單解說——通頻帶濾波器的對地平
衡——導引式梯型濾波器——導引式通低頻濾波器——通高頻和通
頻帶濾波器的導引——跨接導引濾波器——在衰減範圍內的濾波器

阻抗——倒置阻抗——從節來構成濾波器

第三章 X-型濾波器..... 69

等效 X-和梯型公式——X-型濾波器的通過範圍的軌範

第四章 電路元件中的損失..... 77

濾波器裏損失的效應——對於近於 0° 或 90° 或 180° 向量的處理——曲線圖表應用——電路組合元件——損失概論——介入損失——兩端各異的情況——曲線圖的用法(第 50 圖)——關於終端反射效應的定理

第五章 等效網絡..... 93

梯型和 X-型網絡——X-型和窗格型網絡——窗格型和梯型網絡——橋 T 網絡——星網定理——在濾波器設計中互感的應用——X-型網絡中的互感——調諧變量器通頻帶濾波器

第六章 相移網絡..... 105

相移網絡的應用——相移網絡的設計——簡單的 X-型相移網絡

第七章 衰減均衡器..... 112

衰減均衡器的所需要具備的性質——定電阻(單向)“L”型均衡器——定電阻“L”型均衡器之電阻恆定的證明——這個電路的降壓比率——支臂設計——“L”型定電阻(單向)均衡器的一個簡單例子——倒置臂的構成——定電阻(雙向)衰減均衡器——“L”型均衡器的卡圖——卡圖的製作法

第八章 測量..... 120

電橋和測量方法——容電器作為標準——探測器——電橋中的 阻抗關係——負串接電橋的證明——負並接電橋——正並接電橋 ——正串接電橋——羅賓生頻率電橋——建立一個電容標準——混 合線卷電橋——四端網絡相位的測定方法——略論濾波器的衰減 測量	
第九章 一般性定理	132
1. 戴維南定理——2. 最大伏安定理——3. 純電阻四端網絡—— 4. 濾波器定理——5. 甘拜耳氏定理——6. 阻抗倍數定理——7. 福 斯特氏電抗定理——8. 阻抗頻率定理——9. 變動供應頻率定理—— 10. 電抗網絡中的電阻——11. 阻抗倒量——12. 頻率倒量——13. 無 衰減網絡——14. 匯效的柯希霍夫定律——15. 電阻結果的推廣—— 16. 互易定理——17. 直線性定理——18. 交變電流的簡單性	
第十章 考爾式濾波器	147
三角的應用是為避免用算術——阻抗特性——基本函數——通 頻帶濾波器	
第十一章 電路用特殊元件的濾波器	167
石英晶體濾波器——同軸電纜式濾波器——波導管濾波器	
第十二章 結論	175
附 錄	176
一 有限頻率範圍運用的濾波器設計 二 濾波器中的線卷和 容電器稍欠正確對於其行為性能的所產生的影響	

表

1. 電壓(和電流)比對分貝的關係.....	2
2. “T”型衰減器的電阻值.....	7
3. 簡單梯型通低頻濾波器(半串接終端)在截止頻以上的阻抗.....	20
4. 在通過範圍內的上升阻抗(雙跨接終端的通低頻濾波器).....	21
5. 在衰減範圍內的阻抗(雙跨接終端的通低頻濾波器).....	21
6. 簡單的通低頻梯型濾波器的衰減曲線和通過範圍內的相移.....	35
7. 顯示通高頻濾波器的例子.....	41
8. 適合一只 100 週寬, 600 歐阻抗的通頻帶濾波器用的串聯容電器和 跨接線卷.....	50
9. 計算梯型濾波器的電感和電容值表.....	52
10. 梯型導引濾波器在通過範圍裏的阻抗.....	57
11. 梯型導引濾波器在衰減範圍的阻抗.....	58
12. 串接導引通低頻梯型濾波器.....	59
13. 在通過範圍內的濾波器阻抗.....	63
14. 一般性公式.....	75
15. 一種有用的函數.....	85
16. 簡單的 X-型相移網絡.....	107
17. 更複雜的相移網絡.....	110
18. 衰減均衡器.....	116
19. 考爾第 1 類濾波器.....	152
20. 簡易計算的函數表.....	157
21. 導引梯型濾波器的一節.....	163
22. $Q(1)$ 的性質. 第 1 類濾波器的數據.....	164
23. 同軸電纜濾波器.....	172
24. 波導諧振器和普通調諧電路之間的相似比較.....	173

第一章 衰 減 器

由純電阻構成的衰減器有這樣一個優點，就是它的衰減^①，並不牽涉頻率，而且它的特性阻抗是一個恆定的電阻。倘若衰減器的製造準確，當它的遠端接一個適當電阻時，不管頻率和衰減值多少，從近端看入衰減器的阻抗也是一個恆定電阻。這樣，電壓的計算就變成容易了。

電阻是從電壓和電流的衰減比率計算的。這個比率可叫做 N 。獲得這個比率時，遠端接有負載。相當於若干分貝的 N 值，可由下列公式計算：

$$\text{分貝} = 20 \text{ 對數 } 10 N$$

$$\text{或} \quad N = \text{反對數 } 10 \left(\frac{\text{分貝}}{20} \right)$$

特別要注意的傳輸測量是電流、電壓、和功率比的對數。

10:1 的電壓或電流比是 20 分貝，但是假設所用的負載電阻是相同的，那末，100:1 的功率比也是 20 分貝，因功率是電壓或電流比的平方。我們雖然可以寫成：

$$\text{分貝} = 10 \text{ 對數 } 10 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)$$

(以上的 W 的單位是瓦)，但並無兩種分貝。第一表顯示電流和電壓比 N 對分貝的關係。

任何衰減器所需要的特點是這個網絡必須跟 R 歐(假定)的一對線相匹配，所以它產生的衰減一定要在遠端接 R 歐時測定。在這樣情況下，發送端的阻抗也是 R 歐。衰減器可以是固定的或是可變的。

^① 衰減的簡要意義，就是電流的減弱。

第一表 電壓(和電流)比對分貝的關係

比 值 N	分 貝	分 貝	比 值 N
0	無限	0	1
1	0	1	1.18
2	6.02	2	1.256
3	9.56	3	1.416
4	12.04	4	1.586
5	13.98	5	1.777
6	15.58	6	2
7	16.9	7	2.24
8	18.06	8	2.51
9	19.12	9	2.82
10	20	10	3.16
15	23.54	15	5.63
20	26.02	20	10
30	29.56	25	17.77
40	30.04	30	31.6
50	33.93	35	56.3
100	40	40	100
1,000	60	45	177.7
10,000	80	50	316
100,000	100	60	1,000
1,000,000	120	70	3,160
		80	16,000
		90	31,000
		100	100,000

圖 1 的 π 網絡具有這樣一種性質，就是它沿着網絡逐步把電壓和電流減低。倘若它的長度是無限的，從它的端接頭測量所得的電阻就趨向一定的數值。這就是說，它好像電纜一樣的具有特性阻抗。

至於它也造成衰減，從它事實上是一只重複疊接的電位計來看，就可以明白的。倘若它是很長的，通過遠端的電流就微小到不足道了；所以遠端接上什麼，根本沒有關係。從近端測量所得電阻值，祇是由梯型

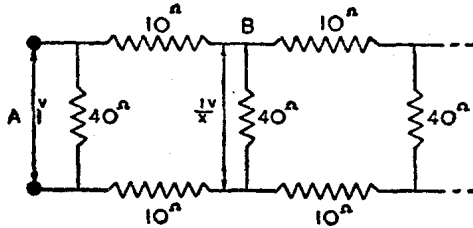


圖 1 無限梯型網絡

兩邊和橫檔的電阻決定的。換句話說，這就是特性阻抗，它是網絡的特徵。

爲了證明沿着整個無限網絡每節的電流減少是一個相同的固定因素起見，假想第 1 圖所示網絡的長度是無限的，然後在起端邊加上一節，如圖 2 所示。

在圖 1 內，如接上 1 伏電壓於 A 端，則在 B 處電壓可算是 $\frac{1}{x}$ 伏；在第 2 圖內，如果把較高電壓 x 接到起點 S，則在 A 點的電壓是 1 伏。因爲圖 1 和圖 2 網絡都假定是無限長，形式相似，而且由於歐姆定則的比率關係；這個定則用直線性定理表達的（參看第九章“一般性定理”）。

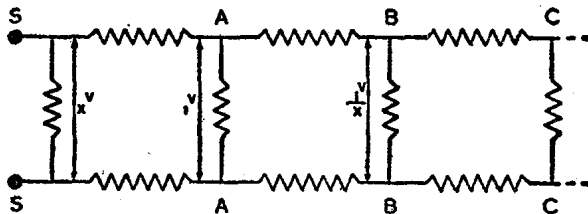


圖 2 梯型網絡增加一節並增加發送端電壓，則網內電流不變

所以在圖 2 裏 A 點 1 伏，就使同圖內 B 點得 $\frac{1}{x}$ 伏，因爲在圖 1 裏 A 點 1 伏，使 B 點得 $\frac{1}{x}$ 伏，而這兩圖裏的 A 點和 A 點；B 點和 B 點，完全是相同的。

最後，我們可以知道這個梯型網的起首三節， S 、 A 和 B 的三個電壓的比率是 $x:1:\frac{1}{x}$ ，是一個幾何級數。推廣上述理由足以證明幾何級數的關係對於這種網絡全體都是適用的。結論如此，在第 2 圖裏， S 點的 x 伏，必須在 A 點產生 1 伏，因為在圖 1 裏 A 點 1 伏，使 B 點產生 $\frac{1}{x}$ 伏。

幾何級數和指數

以下是關於指數方面一條不大著名的定理：

凡有幾何級數關係的，就有指數衰落，可用對數表示。因此，一個梯型網絡就有一個傳播常數存在。然後我們把網絡內並接電阻叫做 b 、串接電阻叫做 a ，於是着手求出特性阻抗和傳播常數的公式，都用 a 和 b 來表達。那末，這種公式就適用於梯型網絡。

如果用一只等於特性阻抗 R 的電阻來把這網絡一端閉合，則發送端的電壓對電流比是 $\frac{E_s}{i_s} = R$ ，恰好像遠端方面依照歐姆定律，跨接電阻 R 兩端的電壓被 i_r 除，獲得 R 一樣。

換句話說

$$\frac{E_s}{i_s} = \frac{E_r}{i_r}$$

上式亦可寫成

$$\frac{E_s}{E_r} = \frac{i_s}{i_r}$$

這裏，我們已經證明以前說過的 N 是電壓比也就是電流比，因為它們是彼此相等的。

求出電壓比 $\frac{E_s}{E_r}$ ，把它等於 N ，就獲得了計算支臂電阻所需的一個方程式或一個條件了。另外一個條件就是電流比也必須是 N 。倘若 π -網絡的特性阻抗等於它的終端電阻 R ，第二條件就成立了。因為，通過特性阻抗這個觀念，電壓比等於電流比，由此產生兩方程式，各有一比數，而這兩個比數是互等的。

從第3圖,解決“T”衰減器問題。設令串接電阻各為 a 歐姆,並接電阻為 b 歐姆;終端電阻 R 內的電流為 i_r 。則並接電阻端電壓 $E_b = (R+a)i_r$ 。電阻 R 是衰減器輸出的電阻,也就是衰減器為這個電阻而設計的。 b 內電流,可叫做 i_b ,等於 E_b 被 b 除,

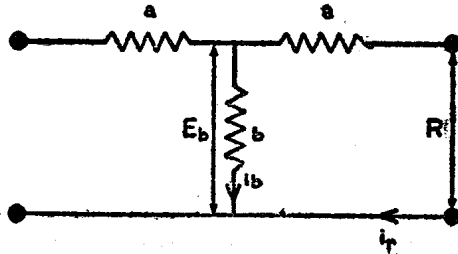


圖 3 T-型衰減器

或
$$i_b = \frac{(R+a)i_r}{b}$$

發出電流等於上式電流加上 i_r , 就是

$$\frac{(R+a)i_r}{b} + i_r$$

發出電流除以接收電流 i_r , 就是電流比, 可以叫做 N

則
$$N = \frac{R+a}{b} + 1$$

所以從電流方面, 我們獲得

$$N = \frac{R+a+b}{b}$$

這是一個方程式。從這個和聯合使用的另一個方程式, 可求出未知電阻 a, b , 用 R 和 N 來表達, 因此這個網絡就可以組成了。為獲得另一個方程式起見, 我們乃着手討論電壓。

接收端電壓是 $E_r = Ri_r$, 而發送端電壓 E_s 則等於跨越電阻 b 的電壓和在第一電阻 a 裏所損失的電壓的和。

於是這電壓比成爲