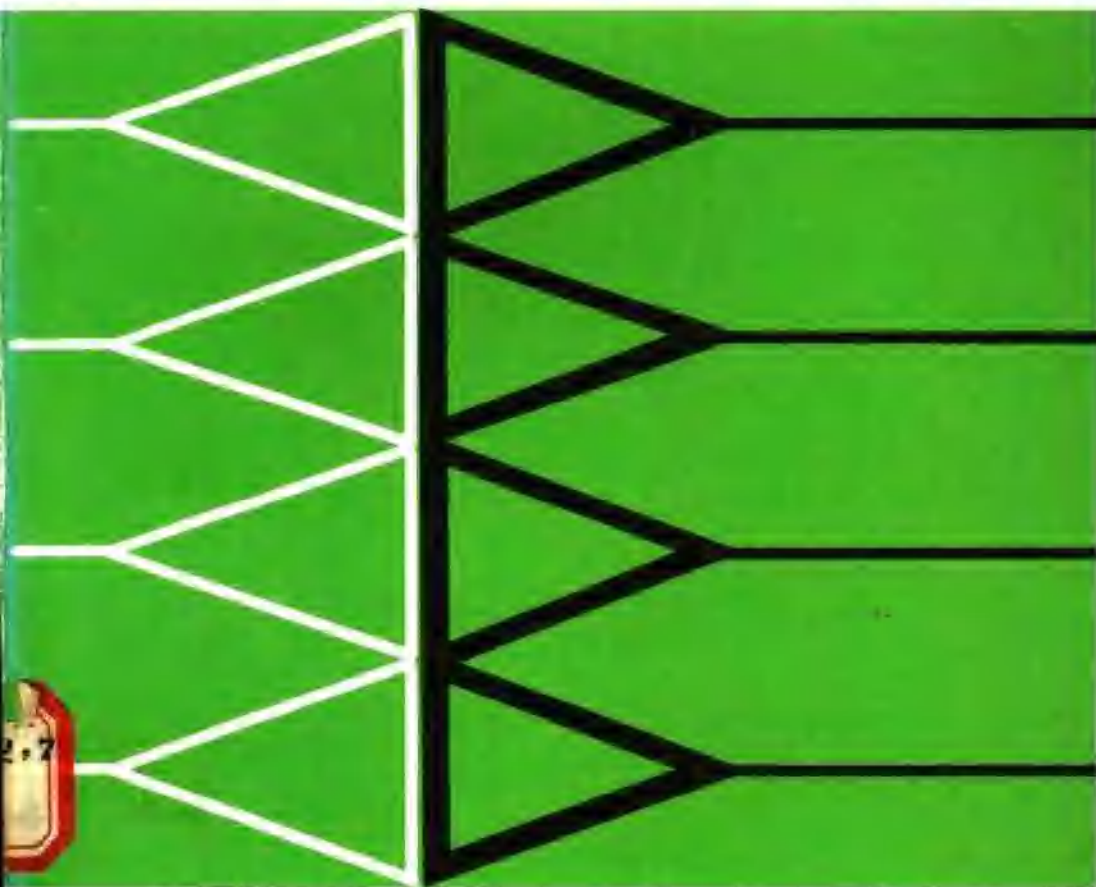


運算放大器原理與應用(Ⅲ)

(應用第 2 篇)

魏哲和博士 編著

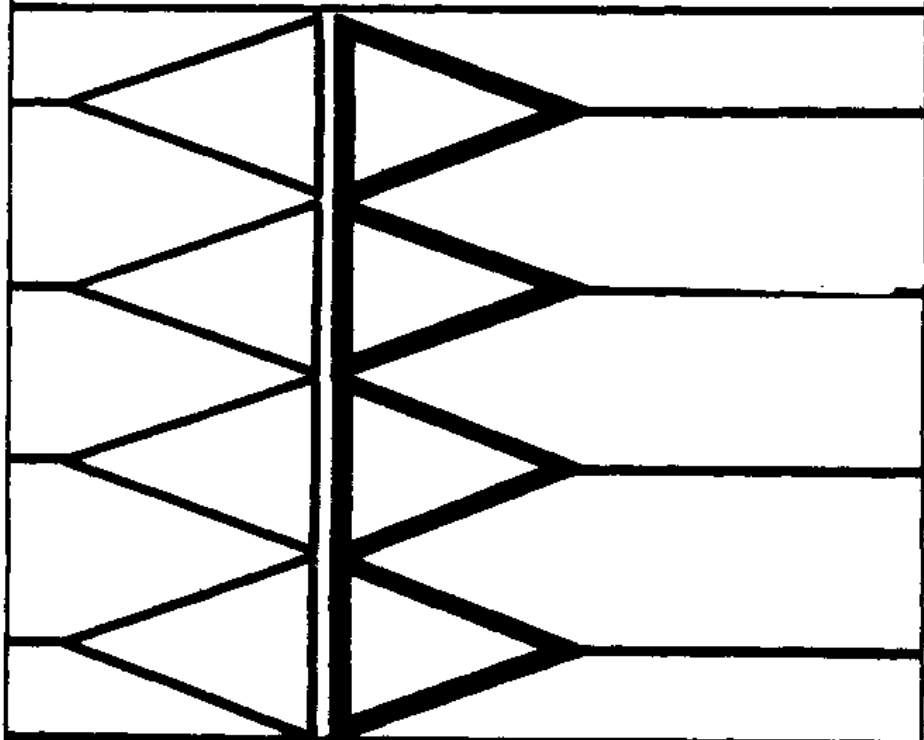


全華科技圖書公司印行

運算放大器原理與應用(Ⅲ)

(應用第 2 篇)

魏哲和博士 編著



全華科技圖書公司印行



全華圖書

法律顧問：陳培豪律師

運算放大器原理與應用(III)

魏哲和博士 編著

出版者 全華科技圖書股份有限公司

地址／台北市龍江路76巷20-2號2樓

電話／5811300（總機）

郵撥帳號／0100836—1號

發行人 陳 本 源

印刷者 華 一 彩 色 印 刷 廠

門市部 全友書局（黎明文化大樓七樓）

地址／台北市重慶南路一段49號7樓

電話／3612532・3612534

定 價 新臺幣 100 元

六版／76年 8 月

行政院新聞局核准登記證：局版台業字第〇二二三號

版權所有 翻印必究

圖書編號 026345

序

時至今日，運算放大器已因其性能優越、使用簡便，及價格低廉而成爲最普及的電子元件之一。非但在高級的電子儀器裏，運算放大器屢用不鮮；就是一般的消費性電子產品中，以運算放大器爲組成要項的線性積體電路也逐漸成爲寵兒。因是之故，對一個“稱職”的現代電子設計從業人員而言，熟習瞭解運算放大器的基本功能及其應用技巧者乃爲必備之知識。其實，在今日科技領域中，對許多非電子專業的科學或工藝工作者運算放大器也未必是陌生的元件。從事實驗工作的物理、化學、地質科學家均視運算放大器爲不可或缺的基本電子元件，這種元件已被廣泛的應用在度量及偵測儀器裏。而就核工、化工、控制、機械，及醫事工程師而言，運算放大器更大量被運用在其週遭。一般的科技人員如能就這種元件多所了解，顯然有助於其工作之遂行。

有鑑於此，應全華陳繩簾先生之邀，期能有助於海內外的中文讀者以其母語來研習此一重要之電子元件，乃有本叢書之編著。書分三冊，首

冊詳論線性積體電路之製作，運算放大器內部電路之解析、基本之特性及其作用，及介紹常見的運算放大器“家族”，希讀者能借此一窺放大器全貌，非僅皮毛而已。次冊則泛論正、反相放大器、比較器、波形產生器、計時器、穩流及穩壓電源、差類式之儀器及橋式放大器、加、乘法器、類比至數位(A/D)及數位至類比(D/A)轉換器等多項基本應用，期讀者能舉一反三，熟以生巧。最後一冊以通信之濾波器電路之應用為主，泛論各種調變、解調、變頻應用，更詳述各式常見之濾頻器之功能與設計，期能有助於日漸興起的電信工程於萬一。

本書之推出，除內容力求其完整可用，也兼顧理論之探討。所舉之例，力求詳明，可供讀者參考。雖不敢遽論巨細靡遺，但求“麻雀雖小，五臟俱全”。希望讀者們不吝指正。

編者謹誌於國立交通大學

我們的宗旨：



感謝您選購全華圖書
希望本書能滿足您求知的慾望

為保護您的眼睛，本公司特別採用不反光的米色印書紙。//

目 錄

第一部 主動濾波器的設計

第一章 濾波器簡介	1
1-1 低通濾波器	2
1-2 高通濾波器	5
1-3 帶通濾波器	6
1-4 帶截濾波器	7
1-5 全通濾波器	9
第二章 主動濾波器設計之要點	11
2-1 濾波器之靈敏度	11
2-2 特性頻率及Q值之靈敏度	11
2-3 增益靈敏度和時間延遲靈敏度	12
2-4 元件之選擇	14
2-5 主動濾波器設計之途徑	15
2-6 係數匹配法之應用	17
2-7 阻抗等比調整法與頻率等比調整法	19
第三章 模擬電感及頻依負阻抗之應用	23
3-1 模擬電感	23
3-2 通用阻抗變換器	26
3-3 高通濾波器之設計	37
3-4 低通濾波器之設計	39
3-5 帶通濾波器之設計	41

第四章	單放大器低階濾波器	43
4-1	二階低通濾波器	44
4-2	二階高通濾波器	48
4-3	二階帶通濾波器	51
4-4	二階帶截濾波器	55
4-5	全通網路	59
4-6	三階低通濾波器	62
4-7	三階高通濾波器	64
4-8	非理想的運算放大器特性對主動濾波器之影響	65
第五章	多放大器二階濾波器	71
5-1	狀態變數濾波網路	72
5-2	四放大器之雙二階濾波網路	77
5-3	前饋式的三放大器雙二階濾波網路	80
5-4	四放大器可變增益等化器	83
5-5	二放大器低階濾波器——GIC之應用	85
第二部	調變器、解調器與檢波器	
第六章	調幅器與調頻器	95
6-1	調幅器	95
6-2	脈衝振幅調變器	102
6-3	脈衝寬度調變器	106
6-4	調頻器	112
第七章	解調器與鑑別器	123
7-1	調幅解調器	123
7-2	調頻解調器	128
7-3	脈衝寬度解調器	133
第八章	檢波器與頻率控制器	141
8-1	峯值檢波器	141
8-2	相位檢波器	143

8-3 倍頻器.....	144
8-4 頻差檢測器.....	148



濾波器簡介

前冊裏所討論的運算放大器電路主要係應用於低頻放大器，穩壓電源供應器，信號產生器、比較器、儀表及橋式放大器，數位至類比或類比至數位轉換器以及其他特殊用途。本冊裏我們將討論一些應用於信號處理及通訊系統中的電路。首先我們要介紹的是將運算放大器應用於濾波網路中。濾波網路 (Filter) 的功用係在頻率領域 (Frequency Domain) 或時間領域 (Time Domain) 內將一個輸入信號改變成另一種形式的信號輸出。一般而言，濾波網路可分類為：低通 (Lowpass)、高通 (Highpass)、帶通 (Bandpass)、帶截 (Band-reject) 以及全通 (All-pass) 等濾波器。

早期的濾波器都是由電阻、電容以及電感等被動性元件 (Passive Element) 所組成，故稱之為被動性濾波器。近年來，人們發現如果使用主動性元件 (Active Device) (例如電晶體、運算放大器等) 於濾波電路中，那麼電感或電容之類的電抗性元件 (Reactive Element) 之一便可以省去不用。最近十幾年來單石 (Monolithic)、薄膜 (Thin Film) 及厚膜 (Thick Film) 積體電路技術進展很快，可用來大量地製造電阻器及

2 運算放大器原理與應用 (III)

電容器。然而，積體電路技術仍無法製造出高品質的電感器，因此一般的電感器仍是以“線繞”方式製成的分立式 (Discrete) 元件出現。此外由於低頻用的高品質電感器往往體積、重量大，價格昂貴，所以目前主動濾波器中使用的電抗性元件僅為電容器而避免使用電感器。

由運算放大器以及電阻、電容所組成的主動濾波器，其優點為體積小，重量輕，可靠度高而且易於大量生產。但是由於受到運算放大器本身的頻帶寬度及功率的限制，它祇適合於低頻範圍（約在30 千赫以下）之小信號濾波作用。這種主動濾波器往往是構成電話及資訊通訊網路、音響、電子音樂、醫學電子儀器、遙測、地震研究用儀器的重要部份。

下面我們將分別討論各類低階濾波器的轉移函數 (Transfer Function) 以及其特性。濾波網路的轉移函數可表示為：

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

上式中， s 為複數頻率。 $V_i(s)$ 及 $V_o(s)$ 分別表示輸入及輸出信號之電壓幅度。

1-1 低通濾波器

低通濾波器的作用是使低頻信號通過，而將高頻信號去掉或衰減。理想的低通濾波器，其幅度函數 (Amplitude Function) $T(j\omega)$ 多信號頻率的關係可由其幅度響應曲線 (Amplitude Response) 表示如圖 (1-1)

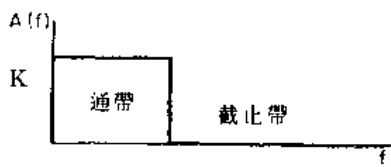


圖 1-1 理想的低通濾波器特性曲線

，其中 ω_c 稱之為截止頻率。電路理論中一個重要的準則，也就是柏利一維諾準則 (Paley-Wiener Criterion)，告訴我們一個轉移函數若能夠實現化 (realizable)，那麼它的幅度函數隨頻率改變之斜率不能超過一個指數函數 (Exponential Function) 之變化率。因此理想的低通

濾波器事實上不可能存在。常見的一階 (First-Order) 低通網路之轉移函數可寫成下式

$$T(s) = \frac{K\omega_p}{s + \omega_p} \quad (1-1)$$

上式中 K 爲一常數。

它的幅度函數爲

$$|T(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2}} \quad (1-2)$$

二階的低通濾波器之轉移函數可寫成

$$T(s) = \frac{K\omega_p^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_p}{Q_p}\right)s + \omega_p^2} \quad (1-3)$$

它的幅度函數爲

$$|T(j\omega)|^2 = \frac{K^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_p Q_p}\right)^2}} \quad (1-4)$$

在式 (1-3) 中, ω_p 稱爲極位頻率 (Pole Frequency), Q_p 稱爲極位 Q 值 (Pole Q)。二階低通網路之幅度響應曲線可由圖 (1-2a) 表示。圖中

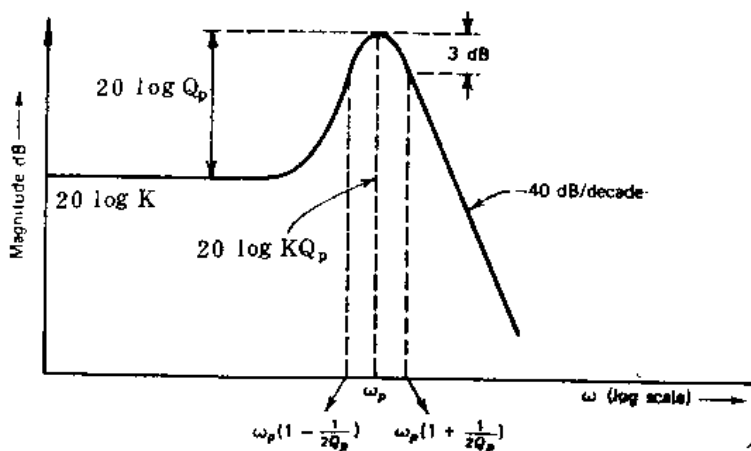


圖 (1-2a) 二階低通網路之幅度響應曲線

4 運算放大器原理與應用 (III)

隆起部分的最大高度受到參數 Q_p 的影響很大。一般而言， Q_p 愈大則隆起之高度也愈大，其關係可由圖 (1-2b) 表示。若 $Q_p > 5$ ，則隆起部分最高點之頻率約為 ω_p 。若 $Q_p < 0.707$ ，則曲線無隆起部分成單調式響應曲線

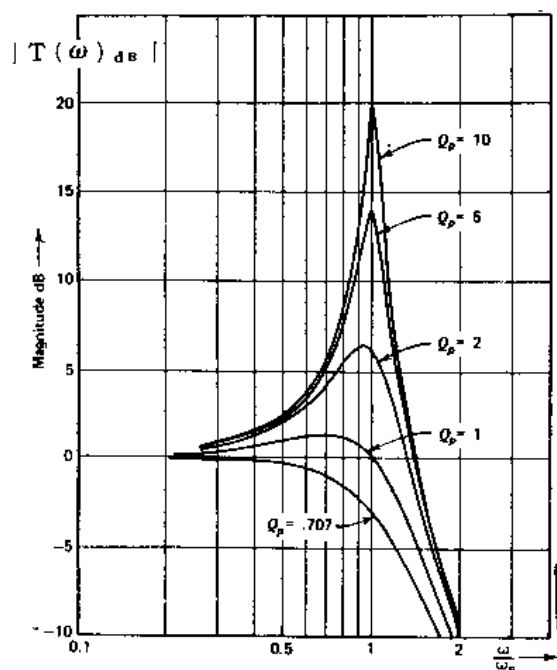


圖 1-2b 低通濾波器特性曲線和 Q 值之關係

。假設 $Q_p \gg 1$ ，幅度函數之最高值可約略表示成 $|T(j\omega_p)| \simeq KQ_p$ 。

。讓我們計算一下頻率為 $\omega_1 = \omega_p \left(1 \pm \frac{1}{2Q_p}\right)$ 時幅度之大小：

$$|T(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(1 \pm \frac{1}{2Q_p}\right)^2\right]^2 + \left(1 \pm \frac{1}{2Q_p}\right)^2 \frac{1}{Q_p^2}}}$$

因 $Q_p \gg 1$ ，故得 $|T(j\omega_1)| \simeq \frac{KQ_p}{\sqrt{2}}$ 。由此可知，在 $\omega = \omega_p \left(1 \pm \frac{1}{2Q_p}\right)$ 時，幅度比它在最高點時小 3 分貝 (3dB)。此網路之 3 分貝頻率

寬度 (3dB Bandwidth) 爲 $(BW)_p = \frac{\omega_p}{Q_p}$ 。

1-2 高通濾波器

高通濾波器的作用就是使高頻信號通過，而將低頻信號去掉或衰減之。理想的高通網路之幅度響應曲線如圖 (1 - 3) 所示。圖中 ω_c 亦稱爲截止頻率。常見的一階高通濾波器之轉移函數可寫成



圖 1-3 理想的高通濾波器特性曲線

$$T(s) = \frac{Ks}{s + \omega_p} \quad \dots\dots\dots (1-6)$$

其幅度函數爲

$$|T(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (1-7)$$

二階高通濾波器之轉移函數可寫成

$$T(s) = \frac{Ks^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_p}{Q_p}\right)s + \omega_p^2} \quad \dots\dots\dots (1-8)$$

其幅度函數爲

$$|T(j\omega)|^2 = \frac{K^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_p}{\omega Q_p}\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (1-9)$$

當 $Q_p \gg 5$ 時，幅度之最高值發生於 ω_p ，且 $|T(j\omega_p)| \simeq KQ_p$ ，其三分貝頻帶寬度爲 $(BW)_p \simeq \frac{\omega_p}{Q_p}$ 。幅度函數與頻率之關係可大略地由圖 (1-4) 表示。

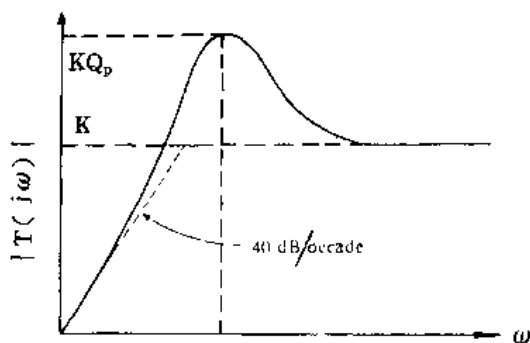


圖 1-4
二階的高通濾波器特性曲線

1-3 帶通濾波器

帶通濾波器能使某特定頻帶的信號通過，而截掉或衰減其他頻率信號。理想的帶通網路其幅度響應曲線如圖(1-5)所示。它的特性由 ω_{c1} ， ω_{c2} 及 K 決定。從 ω_{c1} 至 ω_{c2} 之頻率範圍稱為通帶(Passband)。最低階的帶通網路轉移函數為二階函數，它可寫成

$$T(s) = \frac{K \left(\frac{\omega_p}{Q_p} \right) s}{s^2 + \left(\frac{\omega_p}{Q_p} \right) s + \omega_p^2} \quad (1-10)$$

其幅度函數為

$$\begin{aligned} |T(j\omega)| &= \frac{K \frac{\omega_p \omega}{Q_p}}{\sqrt{(\omega_p^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega_p \omega}{Q_p} \right)^2}} \\ &= \frac{K}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{\omega_p^2 - \omega^2}{\omega_p \omega} \right) \frac{Q_p}{\omega_p \omega} \right]^2}} \quad (1-11) \end{aligned}$$

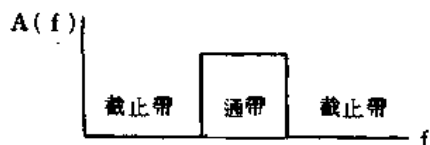


圖 1-5 理想的帶通濾波器特性曲線

幅度之最高值一定產生於 $\omega = \omega_p$ 點，而且 $|T(j\omega_p)| = K$ ，如圖(1-6)所示。假定在 ω_1 及 ω_2 之頻率時幅度比最高值小三分貝，亦即

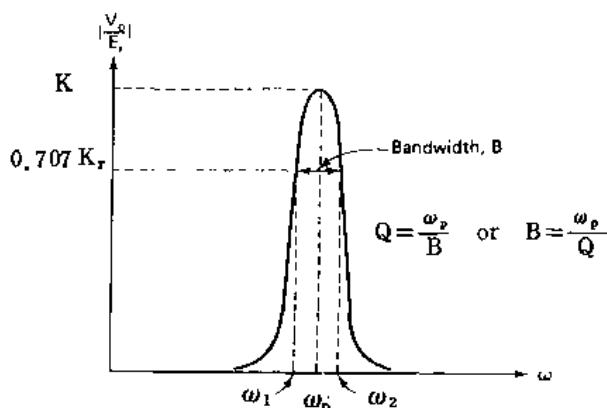


圖 1-6 二階的帶通濾波器特性曲線

$$|T(j\omega_{1,2})| = \frac{K}{\sqrt{2}}$$

則

$$\left[(\omega_p^2 - \omega_{1,2}^2) \frac{Q_p}{\omega_p \omega_{1,2}} \right]^2 = 1$$

解之得

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\omega_p^2}{2Q_p} + \omega_p^2} - \frac{\omega_p}{2Q_p}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\omega_p^2}{2Q_p} + \omega_p^2} + \frac{\omega_p}{2Q_p}$$

故得三分貝頻帶寬度為

$$(BW)_p = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_p}{Q_p}$$

1-4 帶截濾波器

帶截濾波器能截掉某特定頻帶的信號，而通過其他頻率的信號。理想的帶截網路之幅度響應曲線如圖(1-7)所示。最低階的帶截網路亦為二

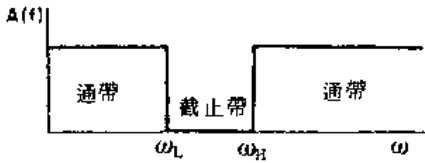


圖 1-7 理想的帶載濾波器特性曲線

隨其轉移函數可寫成

$$T(s) = \frac{s^2 + \omega_z^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_p}{Q_p}\right)s + \omega_p^2} \quad (1-12)$$

其幅度函數為

$$|T(j\omega)| = \frac{\omega^2 - \omega_z^2}{\sqrt{(\omega_p^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega \omega_p}{Q_p}\right)^2}} \quad (1-13)$$

上式中， ω_z 稱為零位頻率 (Zero Frequency)。當時 $\omega_z = \omega_p$ 時，幅度函數與頻率之關係如圖 (1-8a) 所示，此種網路有時也稱為凹陷濾波器

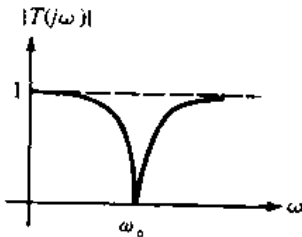


圖 1-8a 凹陷濾波器

(Notch Filter)。當 $\omega_z \gg \omega_p$ 時，此種網路亦稱為低通一凹陷濾波器 (Lowpass Notch) 如圖 (1-8b) 所示。當 $\omega_z \ll \omega_p$ 時，此種網路又稱為高通一凹陷濾波器 (Highpass Notch) 如圖 (1-8c) 所示。

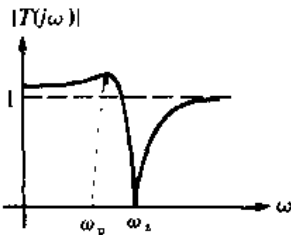


圖 1-8b 低通一凹陷濾波器

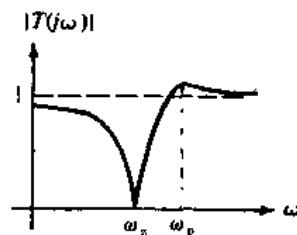


圖 1-8c 高通一凹陷濾波器