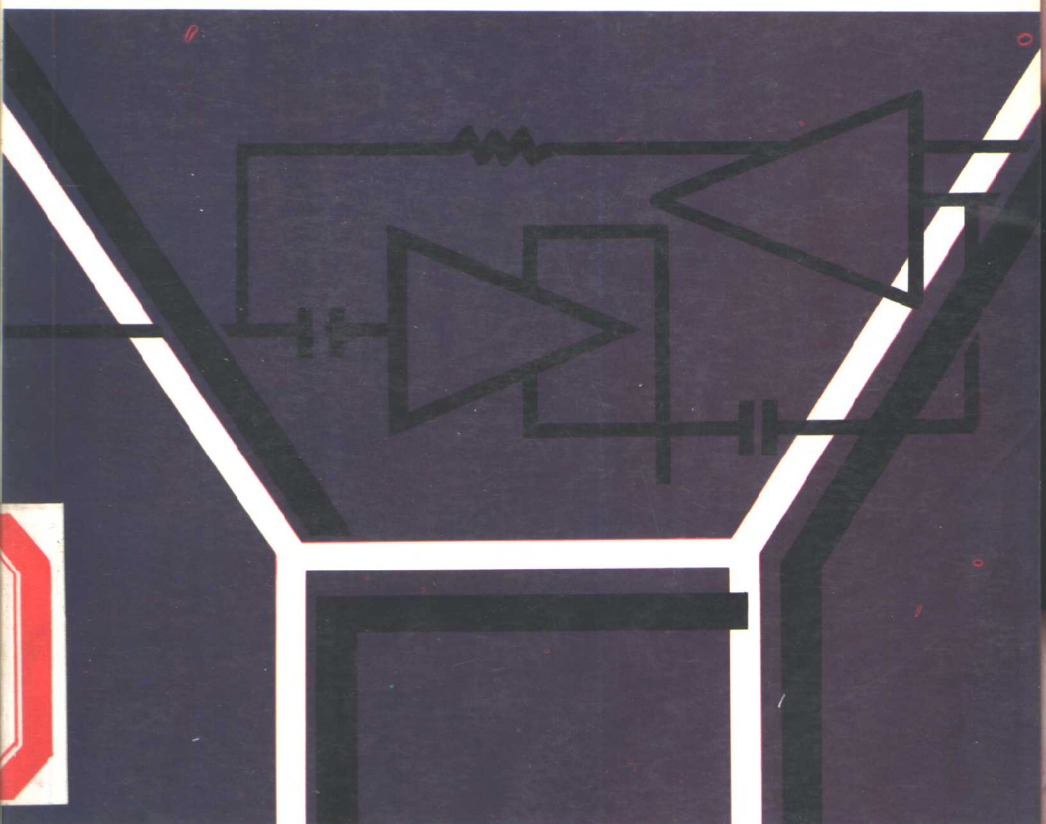


# Hi-Fi 擴大器

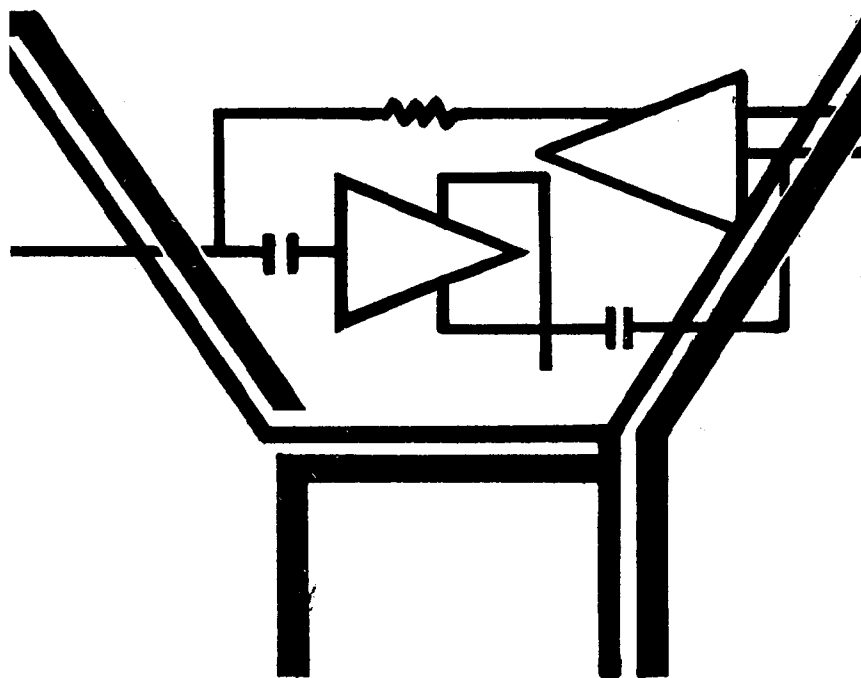
曾金龍編著



啟學科技系列 ⑪

# Hi-Fi擴大器

曾金龍 編著



---

## 序 言

---

一套音響設備的優劣主要是以處於心臟部位的 Hi - Fi 擴大器來判定之。因此對 Hi - Fi 擴大器的瞭解實為每一位音響迷所必具備的知識。環顧坊間專論此方面之好書却少之又少。本書乃作者積多年設計及製作擴大器之經驗並參閱許多國外書刊所編寫出的，內容從基本的電晶體電路，一直到實用 Hi - Fi 擴大器的製作均包括在內。尤其對電晶體之選用，電路之設計要點，線路原理，調整方法，製作要點，規格特性之要求等更是敘述詳盡。本書為求理論與實際配合，線路均以目前實際使用的線路加以說明此包括前置放大器、後級放大器、OTL 放大器及 OCL 放大器等，並附有二十四個參考電路以供讀者實際製作時參考。因此實例多為本書一大特色，又本書對各種理論均詳加說明，所用之數學僅為簡單之代數，因此稍具基本電子電路知識者均可暢讀本書。凡是業餘及專業人員要想深入瞭解 Hi - Fi 擴大器，本書乃最佳參考資料。

本書內容力求完備，編校方面亦盡量小心謹慎，如有疏漏之處尚希讀者不吝指教。

---

曾金龍 謹識

---

# 目 錄

|                               |          |
|-------------------------------|----------|
| <b>第一章 電晶體與放大器</b>            | <b>1</b> |
| 1-1 電晶體電路之基本型式                | 1        |
| 1-2 電晶體之工作特性                  | 1        |
| 1-3 放大器之設計要點                  | 2        |
| <b>第二章 低電平的聲頻放大器和調整電路</b>     | <b>3</b> |
| 2-1 前置放大線路設計                  | 3        |
| 2-1.1 訊號輸入的型式與調整              | 3        |
| 2-1.2 頻寬響應                    | 8        |
| 2-1.3 訊號與雜音比                  | 9        |
| 2-1.4 失真                      | 9        |
| 2-2 前置放大器中電晶體的選用              | 9        |
| 2-2.1 放大增益                    | 9        |
| 2-2.2 小信號放大電晶體的選用             | 11       |
| 2-3 低電平放大線路                   | 13       |
| 2-3.1 線路(1)——基本音頻(A. F)電壓放大   | 13       |
| 2-3.2 線路(2)——低失真高輸出的電壓放大器     | 19       |
| 2-3.3 線路(3)——緩衝放大器            | 19       |
| 2-3.4 線路(4)——麥克風放大器           | 21       |
| 2-3.5 線路(5)——混合放大器            | 21       |
| 2-3.6 線路(6)——電磁式唱頭前置放大器       | 23       |
| 2-3.7 線路(7)——唱頭、錄音頭和調諧器之前置放大器 | 25       |
| 2-3.8 線路(8)——標準型前置放大器         | 27       |
| 2-4 控制回路                      | 35       |
| 2-4.1 線路(9)——輸入選擇系統           | 35       |

## 2 HI-PI 擴大器

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 2-4.2 線路(10)——立體平衡控制              | 36 |
| 2-4.3 線路(11)——立體平衡電表              | 36 |
| 2-4.4 線路(12)——音調控制                | 38 |
| 2-4.5 線路(13)——音源面之立體效果控制          | 39 |
| 2-4.6 線路(14)——低通/高通濾波器            | 40 |
| 2-4.7 線路(15)——雜音與顫抖音 (Rumble) 濾波器 | 41 |
| 2-4.8 線路(16)——現場音感控制              | 42 |

## 第三章 功率放大器 45

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 3-1 工作特性                    | 45 |
| 3-1.1 總 論                   | 45 |
| 3-1.2 失 真                   | 45 |
| 3-1.3 音響動態區域                | 46 |
| 3-1.4 阻尼因素                  | 47 |
| 3-1.5 功率頻帶響應                | 47 |
| 3-1.6 輸出功率                  | 47 |
| 3-2 輸出級的裝置                  | 48 |
| 3-2.1 概 論                   | 48 |
| 3-2.2 互補輸出級的工作原理            | 50 |
| 3-2.3 半對稱互補原理               | 52 |
| 3-3 功率放大器的電晶體研究             | 53 |
| 3-3.1 電池電源供給式的電晶體           | 53 |
| 3-3.2 矽質推動電晶體與功率電晶體         | 54 |
| 3-4 聲頻放大電路的實際應用             | 55 |
| 3-4.1 概 論                   | 55 |
| 3-4.2 接地回路                  | 55 |
| 3-4.3 雜散電場                  | 58 |
| 3-4.4 電源供給                  | 58 |
| 3-5 實用電晶體功率放大器              | 58 |
| 3-5.1 線路(17)——1W 立體拾音放大器    | 58 |
| 3-5.2 線路(18)——2W 立體拾音/收音放大器 | 60 |

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| 3-5.3 線路①9——4W 單聲道汽車收音放大器                           | 63         |
| 3-5.4 線路②0——5/10W 經濟型放大器                            | 64         |
| 3-6 Hi-Fi 高傳真功率放大器                                  | 67         |
| 3-6.1 線路②1——8W Hi-Fi 功率放大器<br>(功率電晶體為AD 161/AD 162) | 67         |
| 3-6.2 線路②2——15W Hi-Fi 功率放大器<br>(輸出電晶體BD 181)        | 70         |
| 3-6.3 線路②3——20W Hi-Fi 功率放大器<br>(輸出電晶體BD 181)        | 75         |
| 3-6.4 線路②4——25W Hi-Fi 功率放大器<br>(輸出電晶體BD 182)        | 77         |
| 3-6.5 線路②5——40W Hi-Fi 功率放大器<br>(輸出電晶體BD 182)        | 87         |
| 3-7 20W OTL 電路製作(7)                                 | 101        |
| <b>第四章 線路製作分析</b>                                   | <b>111</b> |
| 4-1 前置放大器製作(1)                                      | 111        |
| 4-2 前置放大器製作(2)                                      | 114        |
| 4-3 前置放大器製作(3)                                      | 116        |
| 4-4 前置放大器製作(4)                                      | 119        |
| 4-5 後級放大器製作(5)                                      | 125        |
| 4-6 後級放大器製作(6)                                      | 127        |
| 4-7 20W OTL 電路製作(7)                                 | 129        |
| 4-8 30W×2 OTL 電路製作(8)                               | 129        |
| 4-9 60W×2 OCL 電路製作(9)                               | 133        |
| 4-10 4-CH 音響製作(10)                                  | 137        |
| <b>第五章 參考線路</b>                                     | <b>147</b> |
| 參考線路(1)                                             | 147        |
| 參考線路(2)                                             | 148        |
| 參考線路(3)                                             | 149        |

#### 4 HI-FI 擴大器

|               |     |
|---------------|-----|
| 參考線路(4).....  | 150 |
| 參考線路(5).....  | 151 |
| 參考線路(6).....  | 152 |
| 參考線路(7).....  | 153 |
| 參考線路(8).....  | 154 |
| 參考線路(9).....  | 155 |
| 參考線路(10)..... | 156 |
| 參考線路(11)..... | 157 |
| 參考線路(12)..... | 158 |
| 參考線路(13)..... | 159 |
| 參考線路(14)..... | 160 |
| 參考線路(15)..... | 161 |
| 參考線路(16)..... | 162 |
| 參考線路(17)..... | 163 |
| 參考線路(18)..... | 164 |
| 參考線路(19)..... | 165 |
| 參考線路(20)..... | 166 |
| 參考線路(21)..... | 167 |
| 參考線路(22)..... | 168 |
| 參考線路(23)..... | 169 |
| 參考線路(24)..... | 170 |



# 電晶體與放大器

## 1-1 電晶體電路之基本型式

電晶體電路包括三種基本型式：共射極型 (Common Emitter)、共基極型 (Common Base)、共集極型 (Common Collector)，前置放大級與功率放大級一般均為共射極型與共集極型電路，共基極型電路則適用於射頻 (R.F) 放大線路中。

共射極型放大器之輸入阻抗很低，電壓增益高，適合於低電平訊號放大，共集極型放大器具有極高之輸入阻抗與低輸出阻抗，可配合各型式訊號源作為緩衝級之用，其電壓增益小於1，無放大之作用，又因輸出阻抗低，故不易受電磁場及其他雜音訊號干擾或感應等影響，共集極型電路因此適用於音量及音調控制等極易感應交流聲之電路中。共基極型電路則由於極低的輸入阻抗，可直接匹配射頻天線之低阻抗輸入，又因高輸出阻抗，可適於高頻諸振線路中，而不致於對L.C諸振網路發生阻尼作用。

## 1-2 電晶體之工作特性

銻電晶體之工作接合面溫度限制在 $100^{\circ}\text{C}$ 以下，矽電晶體則達 $175^{\circ}\text{C}$ 尚可工作，所以銻電晶體之輸出功率易受溫度變化之限制，散熱問題應特



別注意。通常銻電晶體集射極間之漏電電流約為數毫安，而矽電晶體却低於數微安，所以溫度上升導致漏電電流之增加，將嚴重影響銻電晶體電路之靜態電流和穩定性，而矽電晶體電路中則可容許此溫度變動，故適用於大功率輸出級使用之，當溫度每增加  $10^{\circ}\text{C}$  時，銻與矽電晶體之漏電電流皆增加一倍左右。

銻電晶體 PN 接合面之順向導通電壓為  $0.2\text{ V}$  左右，矽電晶體則為  $0.6\text{ V}$  左右，溫度每增高  $1^{\circ}\text{C}$  時，銻電晶體之順向電壓降低  $2.1\text{ mV}$ ，矽電晶體降低  $2.3\text{ mV}$ 。

欲增加輸出功率，必須增加電源供給電壓，故功率電晶體的耐壓問題必須慎加考慮。由於矽功率晶體容許溫度變化較大，因此散熱問題比較容易解決，又因其耐壓較高，輸出訊號電平得以擴展，低音及高音動態範圍加大，音色更為傳真，因此一般多採用矽功率晶體完成後級輸出放大。

### 1-3 放大器之設計要點

一完善的音響設備必須包括優良的調諧器、錄音機或唱盤、唱頭、唱針以及高傳真性能的揚聲器，才能達到重播的傳真效果，本書中討論的內容主要為放大器之設計與應用，以下幾點為放大電路設計所需注意事項：

- (1) 輸出功率大小與電源電壓之關係
- (2) 輸出功率以及揚聲器之匹配
- (3) 功率電晶體之集極消耗功率、工作溫度及散熱處理
- (4) 前置放大電路的輸入與輸出訊號電平之關係
- (5) 前置放大電路的輸入與輸出阻抗匹配之關係
- (6) 頻率響應特性以及高低頻之相位偏移
- (7) 音調及音量控制
- (8) 電晶體之截止頻率與接合面電容量的影響
- (9) 電晶體之電流放大與電壓放大增益
- (10) 電源供給電路、穩壓電路與接地線之安排
- (11) 諧波失真、互調失真及雜音指數
- (12) 雜音感應的避免與消除



## 低電平的聲頻放大器和調整電路

### 2-1 前置放大線路設計

#### 2-1.1 訊號輸入的型式與調整

一般諸位所收聽的節目訊號，大都來自無線電收音機、唱片或錄音機的播放，至於麥克風的使用，只有當節目錄製時，連接音源與錄音機兩者之間需要用到而已。

收音機調諧器適用於低電平信號輸入，高傳真輸出的放大器中，調諧器輸出變化範圍通常在  $15\text{ mV} \sim 250\text{ mV}$  之間，而輸出端阻抗高達  $100\text{ K}\Omega \sim 500\text{ K}\Omega$ 。

晶體唱頭拾音器則需要極高輸入阻抗的前置放大級，否則低音將被衰減，此種唱頭約可拾得  $1\text{ V}$  電壓，欲將此信號電壓完全耦合至前置放大級之輸入端，需要特別注意當唱頭接觸唱片的瞬間，可能產生  $100\text{ V}$  脈衝電壓，而將輸入端晶體燒燬，晶體拾音器一般需要配合輸入阻抗  $0.5\text{ M}\Omega \sim 1\text{ M}\Omega$  的前置放大級，因此在設計線路時必須注意此阻抗的匹配與訊號電平大小。

電磁式唱頭可適用於高傳真放大器中，其輸出電壓較晶體唱頭為低，所以需要一高增益之放大器。今假設前級放大必須供給  $300\text{ mV}$  的輸出電壓去推動後級功率放大，則前置放大增益應為 100，因此種唱頭拾得電壓

約為  $3\text{mV}$ 。在前置放大設計中必須注意接線要愈短愈好，以避免引起回授和穩定性不良現象而且還需要避免唱頭拾得 Hum（哈姆聲）雜音，至於接地造成的迴路影響也應儘可能減至最小。電磁式唱頭需要輸入阻抗為  $50\text{K}\Omega$  的前置放大器。

表 2.1 唱片錄音特性表

| 頻率<br>(Hz) | early Decca |       | H.M.V. | American |        | BSI, AES, RIAA<br>IEC |       |
|------------|-------------|-------|--------|----------|--------|-----------------------|-------|
|            | 78          | 33    | 78     | 45       | N.A.B. | 78                    | 33/45 |
| 20         | -18         |       | -15    |          |        | -15.5                 | -18.6 |
| 30         |             |       |        |          |        | -14.8                 | -17.8 |
| 50         | -11         | -14   | -12    | -26      | -16    | -14.0                 | -17.0 |
| 60         |             |       |        |          |        | -13.1                 | -16.1 |
| 70         |             |       |        |          |        | -12.3                 | -15.3 |
| 80         | -7          | -13   | -8     |          | -15    | -11.6                 | -14.5 |
| 100        | -5          | -12   | -7     | -18      | -8.75  | -10.2                 | -13.1 |
| 150        |             |       |        |          |        | -7.6                  | -10.2 |
| 200        |             |       |        | -11      |        | -5.8                  | -8.3  |
| 400        | 0           |       | 0      |          |        | -2.3                  | -3.8  |
| 500        | 0           | -3    | 0      | -2.5     | -1.75  | -1.5                  | -2.6  |
| 700        | 0           | 0     | 0      | -1       |        | -0.7                  | -1.2  |
| 1000       | 0           | 0     | 0      | +1       | +1.3   | 0                     | 0     |
| 1500       | 0           |       |        |          |        | +0.7                  | +1.4  |
| 2000       | 0           | +2    | 0      | +3       | +4.2   | +1.4                  | +2.6  |
| 3000       | 0           | +4    |        | +6       |        | +2.8                  | +4.7  |
| 4000       | +1          | +6    | 0      |          | +8.5   | +4.2                  | +6.6  |
| 5000       | +2          | +6    | 0      | +9       | +10.2  | +5.5                  | +8.2  |
| 6000       | +3.5        |       |        |          |        | +6.7                  | +9.6  |
| 7000       |             | +9    | 0      | +11.5    | +13    | +7.7                  | +10.7 |
| 8000       |             |       | 0      |          |        | +8.7                  | +11.9 |
| 10000      |             |       | 0      | +11.5    | +16    | +10.5                 | +13.7 |
| 12000      |             | +11.5 |        |          |        | +11.9                 | +15.3 |
| 14000      |             |       |        |          |        | +13.2                 | +16.6 |
| 16000      |             |       |        |          |        | +14.3                 | +17.7 |
| 18000      |             |       |        |          |        | +15.3                 | +18.7 |
| 20000      |             |       |        |          |        | +16.2                 | +19.6 |

播放唱片所需使用的前置放大器，需要附加具有錄音特性的等化器，目前所錄製的唱片都是根據美國 RIAA 特性規格製作，若想播放早期唱片，則需加裝不同的等化特性選擇之，表 2.1 為一些過去和現在所使用的錄音特性，本章 2-3.6 中線路 (6) 即為之。

除播放唱片外，還有來自錄音帶的訊號需要放大，其輸出型式有兩種：(一)為高電平  $250\text{mV}$  已經前置放大輸出，(二)為低電平約  $300\mu\text{V}\sim 500\mu\text{V}$ ，自放音頭直接輸出，此低電平將受錄音機轉速的變化等因素而影響。

麥克風輸入並非經常使用，一般於公共場所播音時使用。晶體式麥克

風的工作特性與晶體唱頭拾音器相同，而其頻率響應與高傳真的動圈式麥克風不能相比；動圈式麥克風與電磁式唱頭相似，其信號電壓輸出只有  $3 \sim 4 \text{ mV}$ ，需要前置放大輸入阻抗  $20 \text{ K}\Omega \sim 50 \text{ K}\Omega$  匹配之。

為避免輸入訊號變化時引起互相干擾，可在無訊號輸入時將輸入端短路，為完成此接地裝置，特設置一輸入選擇開關。

除了輸入選擇開關之外，另有音量、音調控制旋扭，其高低音之衰減和提升範圍通常為  $\pm 10 \text{ dB}$  到  $\pm 20 \text{ dB}$  之內，因為此調整的作用為使聲音的重播達到完全傳真再生，避免失真的增加，所以並不需要太大的調整範圍，如果是立體放大電路，通常僅增加一平衡控制電位器來調整，使其左右聲道輸出平衡。

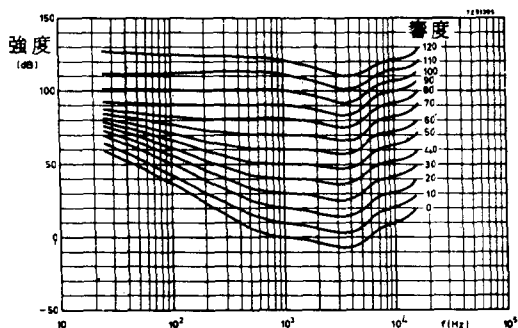


圖 2.1 Fletcher-Munson 響度等高曲線

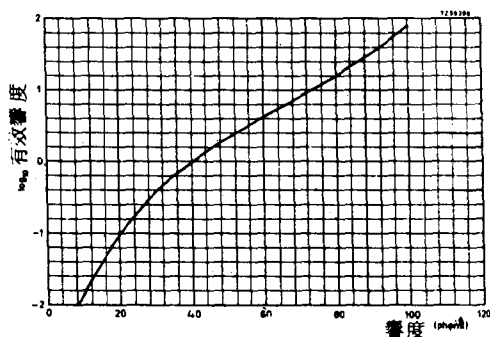


圖 2.2 有效響度與響度電平之關係



欲將歌唱或樂器所演奏的樂曲音響有效的傳送到聽衆的耳中，使樂隊猶如呈現眼前，這種感受稱為現場感（Presence），一般爲大眾所喜愛的是特別加強 2 KHz～3 KHz 的中頻放大。在音響設備不完善的場所中，中頻大部分被室內環壁吸收，因此放大器中的現場（Presence）控制電路，特別對中頻 2 KHz～3 KHz 的選擇範圍有 6 dB 左右的增益控制，圖 2.5 顯示爲修正後的頻率響應曲線。

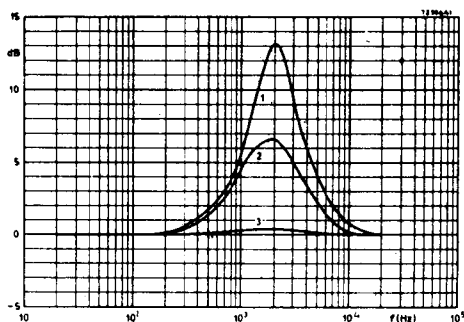


圖 2.5 現場感控制之波幅與頻率特性  
曲線 1：最大，曲線 2：中等，曲線 3：最小

有些立體放大器裝有訊號輸入之音源面（Source Width or dimension）控制，此爲連續性可調控制，當此控制調整於最低端時，在兩聲道間產生 100 % 的同相串音（cross-talk）使其成爲單聲道，此時聲音音源如同在兩個喇叭位置中間輸出，即呈現同相平衡現象。當調整控制反轉於另一方向使其產生反相串音，約至 20 % 左右，則此兩聲道逐漸完全分離，在串音達 24 % 時，聲音面即產生分裂而轉變爲不悅耳的現象，此聲音所呈現的音源面（Source-Width）可由此控制其變化。

最後可能用到幾種濾波網路，如馬達雜音（Rumble）和唱片刮花（Scratch）濾波網路，適用於消除因轉盤和唱片所引起的雜音。且此刮花濾波網路設計的另一優點爲濾掉收音調諧器所接收到的雜音訊號。此外在擴音放大器中尚有低通和高通濾波器的組合，此種可變的交叉型網路，可選擇頻率而將其濾去，同時衰減度亦有一定的大小。就另一方面而言，此可變的濾波網路，自某一固定頻率開始調整，其衰減比例可分段變化如線路（14）低通高通濾波器所示，爲一可變交叉濾波網路，其衰減度爲每



### 2-1.3 訊號與雜音比

任何電阻性零件中都會因溫度上升而產生雜音，此因熱而導致的雜音頻譜幾乎為無窮大，在擴音機再生電路中之訊號與雜音比，其雜音成份在頻譜響應中並非如圖 2.1 所示之特性曲線，雜音的測量是經由一具有 Fletch-Munson 成反比的頻率響應特性網路，通常選用 70 phons 特性曲線而求出的訊號與雜音比，稱為 weighted 訊號/雜音比。交流聲 (Hum) 成分亦可一併計算在內，稱為 unweighted 訊號/雜音比，而 weighted 訊號/雜音比於測量時衰減交流聲 (Hum) 約 10 dB。

對於有經驗的聆聽者而言，可容許之訊號/雜音比為 70 dB，今前置放大電路中使用低雜音的電晶體及碳膜電阻等零件裝配，可達成更高的訊號/雜音比，2-3.8 節線路 (8)——標準型前置放大電路中，選擇開關位於電磁式唱頭輸入位置時，unweighted 訊號/雜音比大於 90 dB，十分理想，因此可以明瞭何以此前置放大電路頻率響應可以自 10 Hz ~ 35 KHz。

### 2-1.4 失真

在任何型式的電路上，失真度愈小愈好。耳朵對於 1 % 的諧波失真 (Harmonic Distortion) 不易察覺，目前使用無輸出變壓器的半導體電路中，諧波失真僅達 0.1 %。然而由於非線性所引起的互調失真現象 (Intermodulation Distortion) 更為重要，此種失真現象大部分從輸出級產生，僅需數值很小的互調失真，即可從耳朵上分辨出來，我們留待在第三章功率放大器中，再作詳細討論。

前置輸入放大級之失真度必須限制於極低的範圍內，如放大級數愈多亦將使失真度增大；所以前置輸入級電路中，最好使用高增益低雜音的電晶體，再加上適當的負回授，以便得到線性的工作效果。

## 2-2 前置放大器中電晶體的選用

### 2-2.1 放大增益

電晶體的工作參數，即指放大增益，漏電電流等而言，在某些特定情況下，此參數可得一定的數值，而溫度即為其中特定情況之一，因為溫度



變動將影響工作點的偏移，為避免此情況發生，必須先穩定工作點的電流，圖 2.7 中所示之偏壓供給電路為一般銻電晶體應用實例，如今就圖中所示線路之放大增益討論漏電電流。

使流經電阻  $R_1$  與  $R_2$  之電流值  $I$  加大，約為基極電流  $I_b$  與漏電電流  $I_{CBO}$  總和的 10 倍以上，此洩放電流  $I$  由電源供給，即  $V_b$  除以洩放電阻  $(R_1 + R_2)$  決定之，因為銻電晶體的漏電電流在  $T = 45^\circ\text{C}$  時為  $10 \sim 60 \mu\text{A}$ ，所以  $R_1$  與  $R_2$  選用較低阻值的電阻。

若電池的內電阻與  $R_1$ 、 $R_2$  電阻值相比，可以忽略不計，則圖 2.7 可改為圖 2.8 所示之等效電路，其中洩放電阻  $R_1$  與  $R_2$  並聯後得一低值阻抗，再與電晶體的輸入電阻相並聯，僅得少量的  $I_b$  分流流經電晶體，故此級放大增益將受漏電電流影響，若漏電電流  $I_{CBO}$  極小，其放大增益可加大。

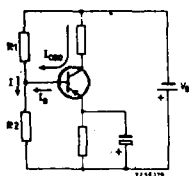


圖 2.7 自給電壓式之偏壓供給電晶體電路

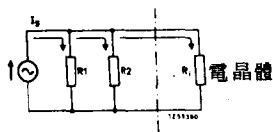


圖 2.8 自給電壓式之偏壓供給電晶體等效電路

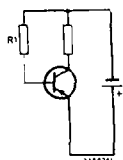


圖 2.9 電流式之偏壓供給電晶體電路