

構造・原理・装置・检修

電晶體放大器

設計基礎

宮沢一道 著



序 言

近代電子科學之進步可謂「日新月異」、「突飛猛進」，由於電子科學的發展，帶動了工業的起飛，產業的革新，情報交流的便捷，更進而促進了生活的改善，舉凡電視機、收音機、錄音機，以及本書所要介紹的音響等，均已成為今天吾人一日所不可或缺的娛樂設備了。

電晶體放大器為音響設備中的心臟部份，它負責將各種輸入信號，舉凡電唱機的唱頭、錄音機的錄放音頭或麥克風等輸出的信號加以放大，以足夠而不失真的電力供給揚聲器重現聲音。為了達到高傳真度的效果，放大器本身的性能必須配合各種輸入信號來源及輸出裝置的特性，充份發揮整體性能才能獲致完美的音響效果。

音響業在國內掀起一股熱潮，這是一個可喜的現象，顯示出我國人民生活之富足。音響是屬於大眾的，唯有普及才能達到「獨樂不如衆樂」的目的。譯者有鑑於此，提筆翻譯了這本書，希望能夠提供有興趣的同好作為參考。然以筆者才疏學淺，倉促成書，訛誤之處在所難免，尚祈先進之士不吝指正。

白中和 69，元月 8 日於台北

目 錄

第一章 HI-FI放大器的必備條件

1.1 HI-FI之變遷	4
1.2 由音響觀點所看之放大器規格的意義	5
1.2.1 頻率特性 (Frequency Character)	6
1.2.2 失真 (Distortion)	9
1.2.3 信號對雜音比 (S/N)	16
1.2.4 阻尼因數 (Damping Factor)	19
1.2.5 電力頻帶寬 (Power Band Width)	23

第二章 電晶體之各種不同構造及其特性之差異

2.1 電晶體構造的推移	27
2.2 電晶體的基本構造	29
2.2.1 合金接合型 (Alloy Junction Type)	29
2.2.2 Drift型 (Drift-Field Type)	33
2.2.3 Mesa型	35
2.2.4 擴散合金型 (Diffused-Junction Type)	38
2.2.5 三重擴散型 (Tripple-Diffused Type)	42
2.2.6 Epitaxial Planar Type	43
2.3 電場效應電晶體 (Field Effect Transistor)	45
2.3.1 接合型 (Junction) FET	46
2.3.2 MOS型 (Metal Oxide Semiconductor)	47
2.3.3 由構造上所看的接合型與MOS型的相異點	48
2.4 電晶體的構造與破壞的關係	50

第三章 TR的等效電路和基本特性

3.1 等效電路和參數 (Parameter)	55
3.1.1 h 參數 (h parameter)	56
3.1.2 T 參數	58
3.1.3 混合 π 參數 (Hybrid π Parameter)	59
3.1.4 Y Parameter (Y 參數)	60
3.2 基本電路的分析	61
3.2.1 射極接地電路	62
3.2.2 基極接地電路	65
3.2.3 集極接地電路	67
3.2.4 負回授電路 (Negative Feed-back Circuit) 和 h 參數	68
3.3 電路設計的基礎	73
3.3.1 電晶體的靜特性	74
3.3.2 溫度對特性的影響	78
3.3.3 安定度 (Stability)	82
3.3.4 最大定格	87
3.3.5 雜音指數 (Noise Figure)	94
3.3.6 截止頻率 (Cut off Frequency)	98
3.3.7 構造和諸特性	99
3.4 負回授電路 (Negative Feed-back Circuit)	104
3.4.1 N F B 的基本觀念	104
3.4.2 電壓回授的效果	107
3.4.3 電流負回授及其特性	111

第四章 前置放大器的設計

4.1 前置放大器的功用	117
4.1.1 等化特性的必要性	117
4.1.2 能動範圍與 S/N	119
4.1.3 輸入阻抗	121
4.1.4 安定性	123
4.2 電路設計的方法	124
4.2.1 電晶體的選定	124
4.2.2 提高輸入阻抗的方法	127
4.2.3 水平圖 (Level Diagram)	131
4.2.4 動作點的設定	134
4.2.5 偏壓的安定化	140
4.2.6 純增益的計算	149
4.2.7 等化器 (EQ) 特性的決定	154
4.2.8 頻率及其他諸特性	160
4.2.9 S/N 比	172
4.3 直接交連 2 段前置放大器的設計	179
4.3.1 考慮 R_L 時的最適動作點	180
4.3.2 偏壓與安定度	184
4.3.3 增益和 f 特性	191
4.3.4 相位特性	193
4.3.5 動作時間	199
4.3.6 各種特性與附加電路	204
4.3.7 印刷電路板的設計和製作上的要點	211
4.4 具有特徵的前置放大器	215
4.4.1 附有射極隨耦器 (Emitter Follower) 的電路	215
4.4.2 達靈頓 (Darlington) 電路	221
4.4.3 NPN 和 PNP 的複合電路	223

4.5 低水平前置放大器 (Low level pre-amp)	224
4.5.1 LLP放大器的條件	225
4.5.2 基極接地放大的各種特性	227
4.5.3 實際的電路設計	230

第五章 控制放大器的設計

5.1 音調控制電路及其特性	241
5.1.1 方塊圖 (Block Diagram)	242
5.1.2 初級的設計	244
5.1.3 C R 音調控制的基本特性	249
5.1.4 N F 型音調控制的基本特性	259
5.2 音調控制電路的設計	269
5.2.1 C R 型音調控制電路的設計	269
5.2.2 N F 型音調控制電路的設計	279
5.2.3 響度控制 (Loudness Control) 電路	287
5.3 濾波電路的設計	295
5.3.1 C R 型濾波器	295
5.3.2 N F 型濾波器	304
5.3.3 濾波器與相位特性	312

第六章 主放大器的設計

6.1 主放大器的目標	319
6.1.1 主放大器的必要條件	319
6.1.2 各種輸出電路	321
6.1.3 功率Tr的選擇	328
6.1.4 放熱效果	333
6.1.5 相位反轉電路	340
6.2 SEPP OTL電路的分析	345

6.2.1	電路的基本動作	345
6.2.2	偏壓的安定化	353
6.2.3	PP 動作和失真	358
6.2.4	輸出和集極損失	360
6.2.5	負荷線和ASO	370
6.2.6	揚聲器負荷與諸特性	375
6.3	主放大器 (Main Amp) 的實際設計	378
6.3.1	電晶體的選定	378
6.3.2	電路的實際設計	390
6.3.3	各種特性	404
6.4	保護電路	413
6.4.1	保護電路之必要條件	413
6.4.2	保護方式	419
6.4.3	實際電路之設計	426
6.4.4	實用保護電路例	435

第七章 電源電路的設計

7.1	整流電路	443
7.1.1	整流方式	443
7.1.2	二極體之選擇以及整流電路之過渡現象	447
7.1.3	濾波電路	454
7.2	電源電路的設計	458
7.2.1	變壓器的設計	458
7.2.2	定電壓電路	464

◆◆◆◆◆ 第一章
Hi-Fi 放大器的必備條件



Hi-Fi之沿革

年代	錄音機	唱頭 唱馬	機 頭 臂 達	放 大 器	揚 聲 器
1927				交流燈絲真空管出現	發表號角型揚聲器 (W E 555 V 型) f 範圍 150~4,000Hz
29	蟲膠(shellac)圓板製品化, f 範圍50~6,000Hz				發表鐘形動圈式 (cone dynamic) 揚聲器 (Jensen)。
31					
34	蟲膠圓板之頻率範圍改善至30~8,000Hz	Worm gear之上發條式, 唱機出現, 拾音頭採用晶體, 針壓10~50g (外國製)		玻璃真空管時代開始	
35	Telefunken開始販賣magnetphone				
1937					
40	開發唱膠錄音帶	唱機由上發條方式改成電動式, 採用流液式馬達。			
45		感應馬達 (induction motor) 出現。		發表威廉森放大器。Hi-Fi一詞開始流行。	
1947					
48	唱膠唱片上市, f 範圍30~15,000Hz	同步馬達出現。唱針針壓10g以下 (GE)。日本國產唱臂出現。			
50	LP (33 $\frac{1}{2}$) EP(45)上市				無接縫號角形喇叭 (seamless horn speaker) 出現。
55				採用GT管之日本國產單音道放大器商品化。	低音反射型全端 (大型) JBL之Patagon。
56				採用小型真空管之立體放大器商品化。	密閉型出現 (小型) Good man
1957				All in one 商品化。	
58	日本國產立體音響安培公司開始販賣4音道立體錄音帶	皮帶驅動方式出現。日本國產晶體唱頭出現 (針壓5g) 動態平衡 (dynamic balance) 方式全盛期。		在美國發表了TR放大器。	
61				靜電晶體放大器商品化	
62				砂電晶體放大器商品化	
63		靜態平衡 (static balance) 方式, MC, MM輕針壓化。			書架型 (Book shelf) 揚聲器出現。
64					
66		MC型唱頭針壓低於1g		全晶體式放大器全盛期	
1967					

第一章 HI-FI放大器的 必備條件

爲了追求「高傳真度 (High Fidelity)」，人們歷盡千辛萬苦去研究，去探討個中奧秘。在追尋過程中，充滿了酸甜苦辣的滋味，相信過來人都已飽嘗過了。然而，高傳真音響的發展前途是無可限量的，擺在我們前面的Hi-Fi 坦途正有待我們去走完它。

隨著科學的進步，我們的日常生活也起了很大的變化；尤其是電子科學的進步更和我們的日常生活息息相關，其影響力不可謂不大。最近，音響技術的突飛猛進帶給人們「餘音繞樑，三日不絕」的最佳聽覺享受，這就是電子科學造福人羣的代表例子。而音響技術也潛在著深遠的發展潛力，其發展前途是無可限量的。

要想將聲音忠實地重現原本，就是一件很困難的事情，由拾音器 (pick-up)開始，以至於錄音機器，再生機器，再傳達到人耳，其間歷經十數段各個互不相同的分野，其中如果有任一部份的開發速度稍慢，都會影響整個音響系統的傳真效果。因此，爲了謀求整個音響系統趨於盡善盡美，構成系統的每一部分都必須向最優性能挑戰，以盡其一己之責。

電子技術飛躍的發展，已使放大器 (Amplifier) 的性能有令人刮目相看的進步。甚至於可以說近年來放大器技術之進步速度早已凌駕其他各專門技術之上。在放大器裏，可以利用儀器來測定的因素固然很多，但是，音色音質控制器之特性亦在放大器中佔相當重要的地位，這一點不容我們忽視。

本章準備就音響和放大器性能間之關係加以說明。

1.1 Hi-Fi之變遷

欲瞭解今後音響應走的路線，似可由過去的歷史中推測得出今後發展趨向。

在西元1877年，愛迪生發明了錄音術，當時他在一個捲繞著錫箔的圓筒上作了人類第一次的錄音。

在西元1882年，史上第一部蓄音機誕生了。當時的錄音方法是將聲音集中在喇叭狀的容器開口內，然後利用容器尖端的顫動帶動記錄針而錄下聲音。雖然這一次的錄音不久就消失了，但不是一個劃時代的進步。

其後再經過不斷的研究改良，乃在西元1887年由“Emil”開發出今天唱片（Disc）的前身：圓板橫波錄音方式。當被圓板使用蠟（Wax）作成，是十分原始的材料，在1929年材料改用塑膠，頻率響應範圍也拓寬至50~6000Hz。此時之再生系統全部是機械方式。唱盤之轉動是手搖式。拾音器則是將針的振動傳達至振動板，而後利用喇叭狀的長管而將聲音加大放大。

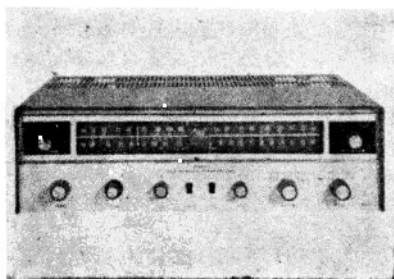
到了1934年，使用塑膠板之唱片的頻率響應範圍已可達30~8000Hz。這個響應範圍已相當的高傳真化了。這個時期旋轉機構雖然未改進為馬達，但是拾音器則有了大的改進。現在已利用晶體等將機械振動轉變為電能。揚聲器方面則誕生了動錐形（Dynamic cone）。音質大大地改善了。當然放大器系統尚未有像現在我們所常用的主放大器（main Amp），而是和收音機共用一個放大器。這個時候正是玻璃真空管廣泛地使用的時候。

揚聲器的開發似乎較其他部門稍微慢了一些，但是，據說RCA在1930年開發成功了多重音錐（cone）的多重系統（multi-system）揚聲器，利用多重音錐的方式彌補了一個揚聲器的限界。

在1950年，揚聲器之圓錐紙盆改用紙漿流入模具內，利用壓力予以成形，製造成功了無接縫的揚聲器。

1948年唱片之材料有了革命性的改革，而且記錄密度也比以前增加了3倍。頻率響應範圍延伸至30~15000Hz而達到Hi-Fi的領域。這種唱片就是LP (Long play) 唱片的前身。在此同時，其他各部門也不甘示弱，均有長足的進展。驅動馬達方面呢？由感應馬達 (induction motor) 演變為同步馬達；拾音器之針壓雖然仍然維持10g以下，但是音質却已有了很大的改善，可以正式派用上場。然而，這個時候能夠欣賞得起LP的，還只是少數幾個人而已，一般的業餘音樂愛好者只能臨淵羨魚了。馬達方面是渦流形（在磁鐵間放上圓盤），由磁場感應嚴重的交流哼聲，體積也大得出乎我們的意料之外，儘管如此，機械式唱機一躍而成為電唱機畢竟是一項了不起的成就，有了電唱機，各種再生技術可以充分的發揮了。

製造廠商推出電唱收音兩用機是在1950年代，當時的外箱十分龐大，板厚有30mm之多，其容積之大令人咋舌。想當年由巨大的箱子裏發出沈重的低音震撼整個在場聽衆的場面至今記憶猶新。從這個時候開始，音響界的目標就急速地轉向音質的追求了。

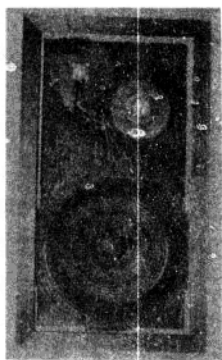


《早期的真空管式放大器TRIO W-36》

1.2 由音響觀點所看之放大器規格的意義

聽覺這件事，因人而異，如果研究耳朵本身的特性的話是相當複雜的一件東西，這是研究Hi-Fi的人衆所周知的事。由儀器所測得的

數值來看，即使兩部放大器的測定值沒有什麼差別，耳朵也能很明確地聽出它們之間的差異出來；由此可見耳朵是多麼精巧，如果忽視了它就無從談Hi-Fi。也就是說，放大器必須具備有何種程度的性能才足夠呢？這一點必須事先調查清楚性能的界限。然而，耳朵本身的特性未必完全為人們所了解，因此，我們只要從音響的觀點來了解規格和品質之間的關連性即可。現在就讓我們由這樣的觀點來看看一個放大器的規格。

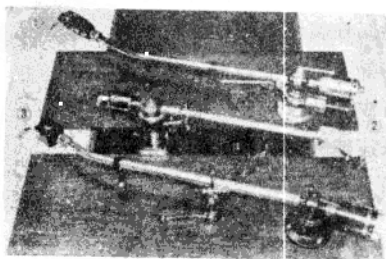


《小型揚聲器系統》

1.2.1 頻率特性 (Frequency Character)

我們人耳在捕捉聲音的時候，聲音的振動由外耳開始經過鼓膜、中耳、內耳而達內部，把振動變換為電的脈衝而傳達到大腦，在這些過程之中，聲音必須經過各種不同特性的系統才能到達大腦。這些系統的頻率響應限界為多少呢

？據說最低可達8~40Hz，最高可達12,000~35,000 Hz之範圍。因此，一般將其平均值20~20,000Hz 當作必要的頻帶寬度。如果放大器不能將此頻帶寬內之所有信號均加以放大的話則不配稱為Hi-Fi。同時，更重要一點

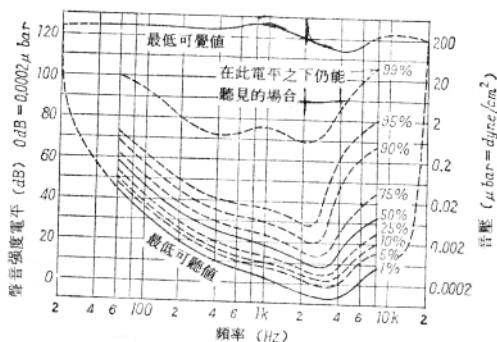


《最近之唱臂①SME #3012，②Audio and Design，③Oltho 》

是頻率響應必須平坦，如果有凹凸之現象時音色會發生變化，這一點從以往的經驗中即可獲得明確的結論，不可不注意。

在再生電路裏頭，輸入信號由前置放大器（Pre-Amp）輸入，經過控制電路，而到達主放大器（Main-Amp）。這幾個電路都是容易發生相位偏移的電路，動輒易發生彎彎曲曲的特性。在音響裏有所謂「清徹的聲音」，「原音」，「平衡音」等均和 f 特性有著密切的關係。

現在就讓我們來分析一下耳朵對於外來聲音的反應，分辨能力吧。



第1.1圖 聽覺的範圍

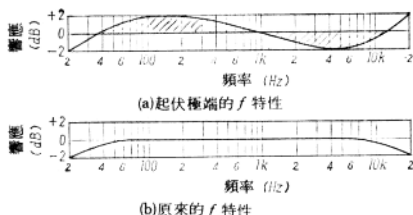
第1.1 圖表示聽覺水平對頻率的關係，最下面的曲線是表示最低可聽限界特性；最上面的曲線是身體可直接「感覺」的最低可覺曲線。也就是說顯示了聽覺和感覺的兩個極端。

由特性曲線我們可以發現，在 3,000Hz 附近人耳的靈敏度最佳，此時之壓力為 0.0002 dyne/cm^2 以下（換算為功率則為約 $4 \times 10^{-10} \mu\text{w/cm}^2$ ）。只要耳鼓膜面積為 1 cm^2 的人即可聽到如此微弱的聲音，的確是很驚人的靈敏度。

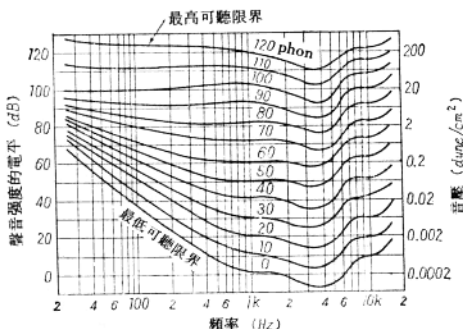
人耳對於頻率變化的分辨能力如何呢？中心頻率 60Hz 的場合 0.9% (0.54Hz)，100Hz 時 0.6% (0.6Hz)，250Hz 時 0.4% (1Hz)，

500Hz以上則大約為0.3%。2kHz時0.3%則為6Hz。即使在再生系統裏不會有任何頻率偏移，但是我們却不能不對耳朵的靈敏有一個正確的認識。

一個放大器的規格如果是： $20 \sim 20,000\text{Hz} \pm 2\text{dB}$ 時，最壞狀況之場合如1.2圖(a)所示，頻率響應曲線以1000Hz為中心作大幅度的起伏波動。如此一來，斜線部份被改變成音色，因而失去忠實度。相反地，第1.2圖(b)則為理想之特性。中音域絕對不讓其有起伏不平的現象，同時盡量延伸頻率響應範圍。



第1.2圖 $\pm 2\text{dB}$ 範圍內的起伏

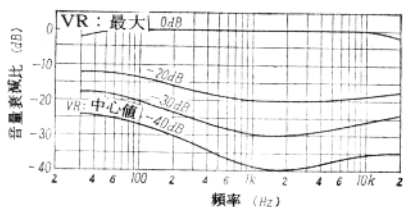


第1.3圖 Fletcher · Munson聽感曲線

人耳更有一種重要的特性，那就是有名的“Fletcher Munson”聽感曲線。這是由Bell公司的Fletcher先生和Munson先生所研究出來的，如第1.3圖所示。

這種特性曲線是將人耳所感覺到的音量強度以Phon為單位作為參數(Parameter)所測定出來的曲線。Y軸是dB分割，以音壓 0.0002 dyne/cm^2 當作0dB而作對數比之分割表示出來。Phon愈大，則聽覺響應愈平坦，Phon較小時，在低頻率及高頻率時必須提高聲音強度才能獲得同樣大的Phon。

例如，在0 Phon的場合，100Hz的聲音必須比1,000 Hz的聲音強約40 dB（100倍）才能令人耳之聽感有相同程度的反應。Phon愈大，則其間的差異也就愈小；在90Phon左右時其響應顯示接近平坦的曲線。



第1.4圖 Loudness Control

爲了配合上述這種聽感特性，在放大器裏設有「響度控制」（Loudness Control）電路，利用電位器位置之變化使放大器之特性大致和Fletcher Munson聽感曲線相一致。第1.4圖示音量由最大處逐漸衰減時低頻、高頻同時被逐漸加強。

但是，這種特性是因人而有所不同的，因此，無法定得非常準確。

還有，第1.3圖的3,000 Hz附近有尖峯出現，這是因爲外耳道諧振於該頻率的緣故。

1.2.2 失真 (Distortion)

原來的波形發生失真，造成原音之透明度及分離度惡化；這是在Hi-Fi再生的時候所遭遇的最大敵人。在一個放大器所訂定的規格裏，多少%的失真是表示高諧波失真的程度。也就是說高諧波（Harmonics）對於原音頻率（基本波）之比率（含有率）。假設基本波電壓爲E，2次，3次，……n次高諧波電壓爲 E_2 ， E_3 …… E_n 的話，則高諧波失真率如下式所示：

$$\text{高諧波失真率} = \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2}}{E} \times 100\% \quad (1.1)$$

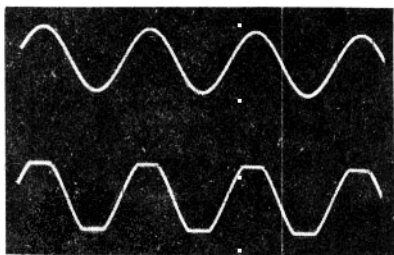
失真，除此之外，尚有混調變失真（Intermodulation Distortion）、過渡失真（Transient Distortion）、相位失真（Phase Distortion）等。其中高諧波失真（H·D）及混調變失真（IM）幾乎全是因為電路的非直線性所造成的，因此，必須盡量改善電路之方式以減少非直線性。

（1）高諧波失真（H·D）

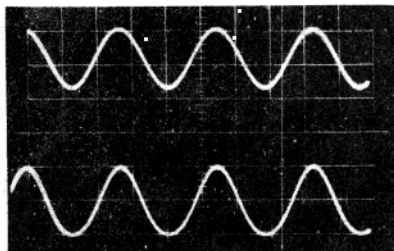
照片1.1輸入過度或者是輸出過度時所產生的波形，兩者都是因為電路之能動範圍（Dynamic Range）不足而導致波形被剪裁掉。像這種情形，波形上下對稱地被切掉的場合只含有奇數次之高次諧波，發生第3，第5，第7次高諧波。這種失真所造成的聲音刺耳難聽，必須特別注意。

照片1.2顯示波形之單邊因非線性而發生失真的例子；電流放大率特性升起之部份發生彎曲而導致波形被壓縮。像這類場合，必須考慮選用直線性良好的電晶體，或者是將偏壓點移往直線部份之中央。這個時候所產生的高諧波為偶數次，也就是說第2，4，6次高諧波。發生這種失真時聲音混濁，含混不清。如果偶次高諧波佔基本波之1%時則可感覺得到音質有所變化。

照片 1.3 所示之波形



照片1.1



照片1.2 原波形（上）和偶數次失真波形（下）