

科學圖書大庫

分立與積體電子電路

譯者 袁 杰

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

分立與積體電子電路

譯者 袁 杰

徐氏基金會出版

美國徐氏基金會科學圖書編譯委員會

科學圖書大庫

監修人 徐銘信 科學圖書編譯委員會主任委員

編輯人 林碧鏗 科學圖書編譯委員會編譯委員

版權所有

不許翻印

中華民國六十三年五月一日初版

分立與積體電子電路

基本定價5.00元

譯者 袁 杰 中山科學研究院副組長

內政部內版臺業字第1347號登記證

出版者 財團法人臺北市徐氏基金會出版部 臺北郵政信箱53-2號 電話 785250 號
783686 號

發行人 財團法人臺北市徐氏基金會出版部 林 碧 鏗 郵政劃撥帳戶 第15795號

印刷者 中 美 美 術 印 刷 廠

地 址：台 北 市 天 水 路 3 2 號

我們的工作目標

文明的進步，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力，在整個社會長期發展上，乃人類對未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同把人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之成就，已超越既往之累積，昔之認為絕難若幻想者，今多已成爲事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人有無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，允爲社會、國家的基本任務。培養人才，起自中學階段，學生對普通科學，如物理、數學、生物、化學，漸作接觸，及至大專院校，便開始專科教育，均仰賴師資與圖書的啓發指導，不斷進行訓練。從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啓導後學。旨趣崇高，至足欽佩！

科學圖書是學人們研究、實驗、教學的精華，明確提供科學知識與技術經驗，本具互相啓發作用，富有國際合作性質，歷經長久的交互影響與演變，遂產生可喜的收穫。我國民中學一年級，便以英語作主科之一，然欲其直接閱讀外文圖書，而能深切瞭解，並非數年所可苛求者。因此，本部編譯出版科學圖書，引進世界科技新知，加速國家建設，實深具積極意義。

本基金會由徐銘信氏捐資創辦，旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利。民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，返國服務者十不得一。另贈國內大學儀器設備，輔助教學頗收成效；然審度衡量，仍嫌未能普及，乃再邀承國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。主任委員徐銘信氏爲監修人，編譯委員林碧鐸氏爲編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱。「科學圖書大庫」首期擬定二千冊，凡四億言，叢書百種，門分類別，細大不捐；分爲叢書，合則大庫。從事翻譯之學者五百位，於英、德、法、日文中精選最新基本或實

用科技名著，譯成中文，編譯校訂，不憚三復。嚴求深入淺出，務期文圖並茂，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，有教無類，效果宏大。賢明學人同鑑及此，毅然自公私兩忙中，撥冗贊助，譯校圖書，心誠言善，悉付履行，感人至深。其旅居國外者，亦有感於爲國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬菲薄，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，報國熱忱，思源固本，僑居特切，至足欽慰！

今科學圖書大庫已出版七百餘冊，都一億八千餘萬言；排印中者，二百餘冊，四千餘萬字。依循編譯、校訂、印刷、發行一貫作業方式進行。就全部複雜過程，精密分析，設計進階，各有工時標準。排版印製之衛星工廠十餘家，直接督導，逐月考評。以專業負責，切求進步。校對人員既重素質，審慎從事，復經譯者最後反覆精校，力求正確無訛。封面設計，納入規範，裝訂注意技術改善。藉技術與分工合作，建立高效率系統，縮短印製期限。節節緊扣，擴大譯校複核機會，不斷改進，日新又新。在翻譯中，亦三百餘冊，七千餘萬字。譯校方式分爲：(1)個別者：譯者具有豐富專門知識，外文能力強，國文造詣深厚，所譯圖書，以較具專門性而可從容出書者屬之。(2)集體分工者：再分爲譯、校二階次，或譯、編、校三階次，譯者各具該科豐富專門之知識，編者除有外文及專門知識外，尙需編輯學驗與我國文字高度修養，校訂者當爲該學門權威學者，因人、時、地諸因素而定。所譯圖書，較大部頭、叢書、或較有時間性者，人事譯務，適切配合，各得其宜。除重質量外，並爭取速度，凡美、德科學名著初版發行半年內，本會譯印之中文本，廣即出書，欲實現此目標，端賴譯校者之大力贊助也。

謹特掬誠呼籲：

自由中國大專院校教授，研究機構專家、學者，與從事科學建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究學人、留學生；

大專院校及研究機構退休教授、專家、學者。

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或聯袂而來譯校叢書，或就多年研究成果，撰著成書，公之於世。本基金會樂於運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。祈學人們，共襄盛舉是禱！

譯 序

本書譯述目的，在介紹一本理論與應用並重之電子技術書籍。尤以近二、三十年來，電子組件之發展，可謂日新月異，自分立電晶體電路，以至積體電路，而目前對微型電路之應用亦日漸開展。鑒於吾人對電子領域之探求，起步稍緩，因而亟欲就有關資料中，介紹適當書籍，俾能對電子電路之基本工作原理，有一確切之瞭解，進而更能作實際之應用。電子組件在發展演變過程中，製造技術時有改進，惟其工作原理則一，如能切實把握，則對電子電路之設計及應用，仍可循其基本理論，運用自如。

本書共十四章，包含分立電晶體電路，及積體電路之分析及設計，並介紹半導體組件之基本概念，每章中除講述基本理論，並詳列可作實際應用之例題。且對學者數學背景之要求不高，但對電子網路分析之各基本定理，必須十分熟習，諸如克希荷夫定律，戴維寧定理等等。因此本書可作電子工程從業人員參考自修之用，而作為高工電子科教材尤為合適。

第一章至第八章，為低週之電晶體電路，包含電晶體等效電路之導出，電路設計程序；諸如偏壓設計，功率計算，以及複雜電路之計算等等。第七章之複級電晶體電路，則為第九章之積體電路開一先導。第八章介紹放大器之回授原理。第九章為積體電路之製造及設計技術，為一般電路分析書籍中所少見者。第十章討論場效電晶體電路，並述及不同結構場效電晶體之差異及其應用。

本書最後四章，偏重於電晶體電路對不同週率響應之分析。第十一章及第十二章為 RC 交連放大器之低週及高週響應，並加入電晶體開關電路之分析。第十三章討論調諧放大器，包括狹波帶及寬波帶放大器。第十四章為回授放大器週率響應，以及穩定問題，並論及正回授振盪器電路。

本書承徐氏基金會贊助出版，謹致謝忱！

袁 杰

中華民國六十二年十月十日

Handwritten signature and date: 11/13

目 錄

第一章 簡介

發射機-----	2	接收機-----	4
----------	---	----------	---

第二章 二極體電路分析

緒 言-----	7
2.1 非線性特性——理想的二極體-----	7
2.2 半導體二極體理論介紹-----	14
2.3 簡單二極體電路分析——直流負載線-----	19
2.4 小信號分析——動態電阻的觀念-----	22
2.5 小信號分析——交流負載線-----	28
2.6 大信號分析——失真及Q點偏移-----	29
2.7 齊納二極體-----	33
2.8 間段線性分析及其等效電路-----	38
2.9 溫度對二極體的影響-----	45
2.10 製造廠商供給的各種規格-----	49
2.10-1 整流二極體	2.10-2 齊納二極體

第三章 電晶體電路介紹

緒 言-----	53
3.1 接面電晶體中的導流結構-----	53
3.1-1 射極——基極接面	3.1-2 集極——基極接面
3.2 電晶體的電流放大-----	60
3.3 電晶體電路的圖解法-----	67
3.4 功率計算-----	75
3.5 無限大值旁路電容器-----	81

3.6	無限大值交連電容器-----	86
3.7	射極隨耦器-----	89

第四章 偏壓穩定

緒 言-----	96
4.1 β 值不定和 Q 點偏移-----	96
4.2 溫度對 Q 點的影響-----	100
4.3 穩定因數分析-----	103
4.4 以二極體偏壓作溫度補償-----	111
4.5 電晶體放大器中有關熱的問題-----	116
4.6 製造廠商所供規格——關於高功率電晶體-----	118

第五章 線性音週功率放大器

緒 言-----	121
5.1 甲類共射極功率放大器-----	122
5.1-1 Q 點定值 5.1-2 功率計算	
5.1-3 最大消耗功率雙曲線	
5.2 變壓器交連放大器-----	134
5.2-1 功率計算	
5.3 乙類推挽式放大器-----	139
5.3-1 決定負載線 5.3-2 功率計算	
5.4 互補對稱放大器-----	147

第六章 低週小信號分析及設計

緒 言-----	151
6.1 混生參數-----	151
6.2 共射極型式-----	153
6.3 共基極型式-----	164
6.4 共集極型式（射極隨耦器）-----	168
6.5 三種基本型式的重要參數表-----	178
6.6 低功率電晶體廠商供給規格說明-----	179

第七章 複級電晶體放大器

緒 言	182
7.1 放大器各級串接	182
7.2 差信放大器	196
7.2-1 聯合排拒比值	7.2-2 射極恒流能源
7.3 達令頓型式複合放大器	208
7.4 疊接放大器	214

第八章 回授放大器基本原理

緒 言	220
8.1 回授基本概念	220
8.2 電壓回授放大器增益值	223
8.2-1 電壓回授——電流誤差	8.2-2 電壓回授——電壓誤差
8.3 回授放大器和敏感度函數	237
8.4 輸入及輸出阻抗	242
8.4-1 輸入阻抗	8.4-2 輸出阻抗
8.5 基本回授放大器分析舉例	248
8.6 回授放大器設計簡介	258
8.7 回授的其他應用	262
8.7-1 自動音量控制電路	8.7-2 調節電源供應

第九章 積體電路

緒 言	278
9.1 積體電路電晶體製作方法介紹	279
9.2 積體電晶體的等效電路	282
9.3 積體二極體	284
9.4 積體電容器	286
9.4-1 接面電容器	9.4-2 薄膜電容
9.5 積體電阻	287
9.5-1 接面電阻	9.5-2 薄膜電阻
9.6 積體電感	291
9.7 簡單積體電路設計	291
9.8 典型積體電路放大器—— $\mu A 709$ ——分析	292
9.8-1 靜態工作點的設計	9.8-2 小信號增益

9.9 串接積體電路放大器	301
---------------	-----

第十章 場效電晶體

緒 言	304
10.1 JFET 工作原理簡介	304
10.2 IGFET (MOSFET) 工作原理簡介	308
10.3 圖解分析及偏壓設計	311
10.4 大信號分析——失真	315
10.5 小信號分析	317
10.5-1 共源極電壓放大器	10.5-2 源極隨耦器
10.5-3 共閘極放大器	
10.6 製造廠商供給的典型規格	331

第十一章 RC 交連放大器低週響應特性

緒 言	334
11.1 電晶體放大器低週響應	335
11.1-1 射極旁路電容器	11.1-2 放大器轉換函數漸近圖解
11.1-3 交連電容器	11.1-4 基極和集極間交連電容
11.1-5 旁路和交連電容共同效應	
11.2 FET 放大器低週響應	352
11.2-1 源極旁路電容器	11.2-2 洩極交連電容器
11.2-3 閘極交連電容器	

第十二章 RC 交連放大器高週響應特性

12.1 電晶體放大器——高週信號特性	351
12.1-1 $h-\pi$ 型等效電路	12.1-2 共射極放大器高週狀態——密勒電容量
12.1-3 高週率射極隨耦器	
12.2 高週場效電晶體	377
12.2-1 高週共源極放大器的密勒電容量	
12.2-2 源極隨耦器高週特性	
12.3 串接 RC 放大器	385
12.3-1 FET 的串接	
12.4 增益——波帶寬乘積	391

12.4-1 單級放大器 GBW 乘積	12.4-2 串接放大器 GBW 乘積
12.5 電晶體開關	----- 399

第十三章 調諧放大器

緒 言	----- 408
13.1 單調諧放大器	----- 409
13.1-1 r_{be} 對單調諧放大器週率響應的影響	
13.1-2 以阻抗匹配增進增益	
13.2 疊接放大器	----- 426
13.3 中 和	----- 431
13.4 同步調諧放大器	----- 437
13.5 間隔調諧及雙調諧放大器	----- 441
13.5-1 間隔調諧放大器	13.5-2 雙調諧放大器
13.6 旁路提升	----- 450
13.7 分佈放大器	----- 454

第十四章 回授放大器週率響應

緒 言	----- 460
14.1 波帶寬和增益波帶寬乘積	----- 461
14.2 三極點放大器穩定性問題	----- 465
14.3 尼寇斯穩定準則	----- 466
14.4 穩定網路	----- 469
14.4-1 非週率性補償	14.4-2 簡單滯後補償
14.4-3 較複雜滯後網路	14.4-4 超前補償
14.5 例 題	----- 481
14.5-1 滯後補償回授放大器	14.5-2 滯後補償積體電路放大器
14.5-3 超前補償	
14.6 供能濾波器的回授	----- 488
14.6-1 積分器	14.6-2 Q 值倍增器
14.7 振盪器	----- 493
14.7-1 移相振盪器	14.7-2 維恩電橋振盪器
14.7-3 調諧式振盪器	14.7-4 考畢子振盪器
14.7-5 哈特萊振盪器	

第一章 簡 介

本書的目的為介紹電子領域中的一部份，由於電子領域包含廣泛，如欲加以分類，將有不勝其分之感。廣義言之，多數電子工作的主要目的是在製成一轉換或傳遞能量或消息之系統，諸如收音機、電視機、計算機、衛星通信系統及自動航行系統等，都是電子系統領域中的一小部份。

上述各系統有一共同的特性，即為可分為次系統或者組件等等。電子組件包括電阻、電感、電容、電晶體、積體電路等等，甚至一個完整的放大器亦可稱謂組件。因此電子工程師可選擇其中的一個作為工作目標——系統或組件。而兩者都選亦可。

就本書來說，以討論電子電路，而且特別着重在線性放大器為主。任何電子系統，至少應該有一個放大器，用來處理含有能量或消息的信號。放大器可為線性者，亦可為非線性者。舉例來說，設在線性電壓放大器，如果輸入信號為

$$v_i(t) = A \cos \omega_o t \quad (1.1)$$

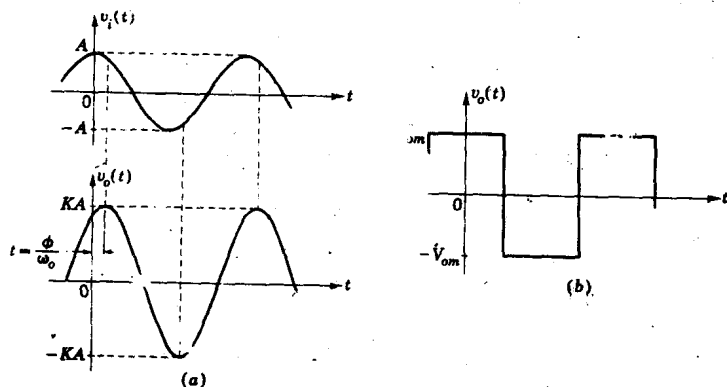


圖 1.1 線性及非線性放大器之信號 (a) 線性放大器 (b) 非線性放大器。

2 分立與積體電子電路

則在放大後的輸出為

$$v_o(t) = KA \cos(\omega_o t + \phi) \quad (1.2)$$

K (通常應大於 1) 及 ϕ 各為定值。如圖 (1.1a) 所示，為其輸出及輸入信號。如輸出信號有和 (1.2 式) 所表示的不同時，這一信號稱為失真。在線性放大器中不希望有失真存在，故在線性放大器設計時，應儘量避免產生失真。

與線性放大器相對的，為各種不同型的非線性放大器。二進位放大器 (Binary amplifier) 為其中的一例，如以 (1.1) 式所示的正弦波加於輸入端，但在輸出端所得的是交變的矩形波，如圖 (1.1b) 所示。

在調幅無線電系統中的組件，有許多可為線性放大器的範例，這個系統從播音室中播音員的聲音開始，傳送到裝在車上或室內的收音機為止。

發射機

由播音員的聲音引起空氣顫動，經過微音器的轉換，而成電壓顫動，如圖 (1.2) 所示

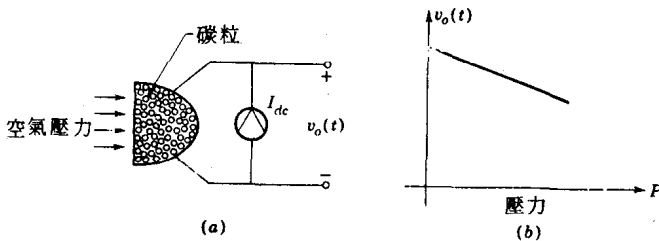


圖 1.2 碳粒式微音器
(a) 碳粉粒受空氣顫動變化改變其阻抗，因而產生一對應的電壓。
(b) 空氣壓力增大，碳粉粒被擠緊，電阻減小，電壓下降。

由微音器產生的電壓甚小，通常以毫伏 (millivolts) 為單位，在將這一信號發射前，必先經過放大。放大器可用電晶體或真空管組成。

語言與音樂的週率屬於音週範圍，大約自 20 Hz 到 20 kHz，由於音週不能以電磁放射形式，作有效的長距傳播。故在傳遞以前，必先經調變手續加載波信號，如圖 (1.3a)。

調幅為調變技術的一種。簡單來說，實際上是乘積過程。設要傳送之信

號為

$$v_m(t) = 1 + m \cos \omega_m t \quad (1.3)$$

m 稱為調變指數 ($m \leq 1$)，載波信號為

$$v_c(t) = A \cos \omega_c t \quad (1.4)$$

則調變信號成為

$$v_r(t) = v_m v_c = A (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_c t \quad (1.5)$$

上式中兩者相乘後，經三角公式代換， $v_r(t)$ 將包含三個週率， ω_c ， $\omega_c + \omega_m$ 及 $\omega_c - \omega_m$ ，如圖 1.3b 所示。調變過程可將音週信號 ω_m 轉換到甚高的 $\omega_m \pm \omega_c$ 週率（標準調幅週率為 0.55 至 1.65 MHz）。調變後則可用在長距傳播。

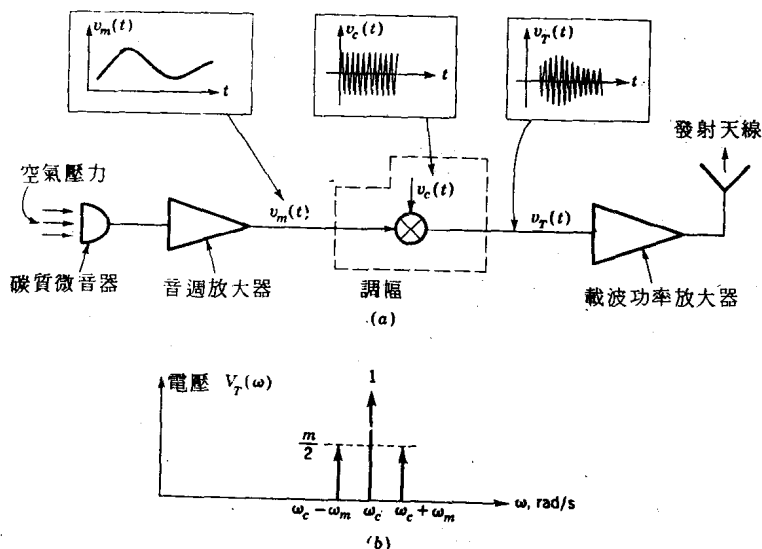


圖 1.3 發射機 (a) 調幅發射機 (b) 調變信號之波譜

圖中所示，信號用單一週率表出，事實上任何信息都包含在一個週率帶內。本例的單一週率僅用作簡化說明。

調變信號再經功率放大器放大後發送。功率放大的程度，依需要傳送的距離來定。調幅廣播發射機的輸出，通常有高達數萬瓦的。

接收機

由接收機天線端，所接收的信號，通常的強度約為 5 到 50 微伏 (microvolts)。這類信號需先經過放大，然後檢波再放大，最後將信號電壓送到揚聲器，轉換成可聽的信號。而在這一連串過程中，所產生的失真，必須小到可以容忍的範圍之內。

接收機的第一個作用，是將所需的載波信號檢出。收音機的調諧鈕，轉動天線調諧電路的可變電容，來完成這一功能，調諧電路是使要收的信號通過，而使其他的信號受到衰減。不過，亦常會有在同一刻度上，收到兩個電台的情形。原因之一，可能是相鄰的電台，發射功率太大，接收機的調諧電路，不能完全阻止它通過。

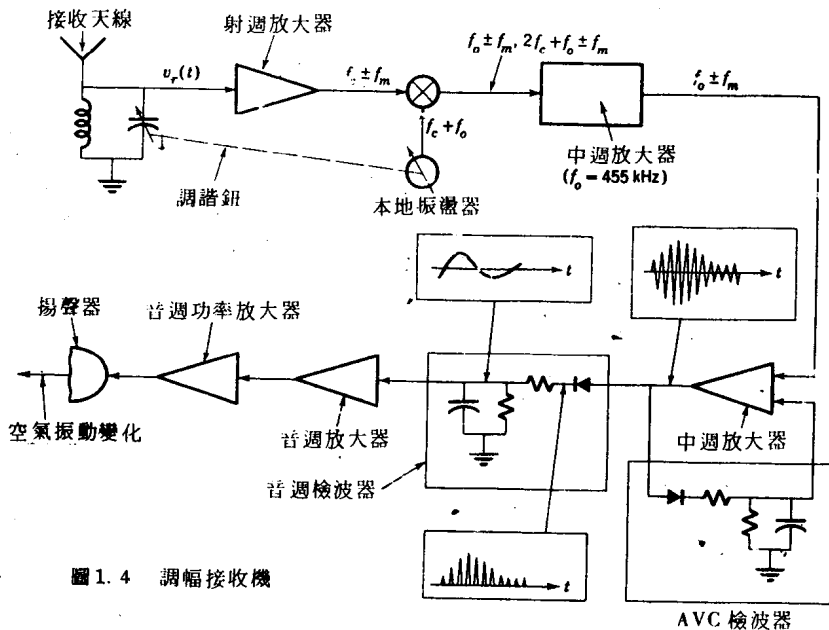


圖 1.4 調幅接收機

圖 1.4 所示，接收信號 $v_r(t)$ 先在射週 (RF) 放大器中放大。射週放大器用來放大低輸入信號電壓，而且亦應是為低雜音及低失真者。有時亦可加濾波電路，使不需要的信號衰減更大，為求易於得到足夠的放大，射週載波信號可經外差或混週程序，轉換成較低的中週信號——455 kHz。亦因為有

這一過程，所以調幅接收機又可稱為超外差接收機。載波信號 (ω_c) 與本級振盪信號 ($\omega_c + \omega_0$) 相乘，可得固定的中週信號 (ω_0)。在調變過程中曾提到。兩者相乘可得和差週率的信號，差週信號 ($\omega_0 = 455 \text{ kHz}$) 可經調諧濾波電路取出。在一般的調幅接收機中，是藉機械交連同調的天線調諧電容，和本級振盪調諧電容完成的。但在未來的接收機中，如用高增益寬波帶的積體電路放大器，可能將外差方法淘汰。祇須在天線電路上接上一個積體放大器，即可獲得需要的增益。而且調諧亦可用二極體的電子調諧，取代機械方法。這類特殊的二極體，是一種電壓控制的電容器。

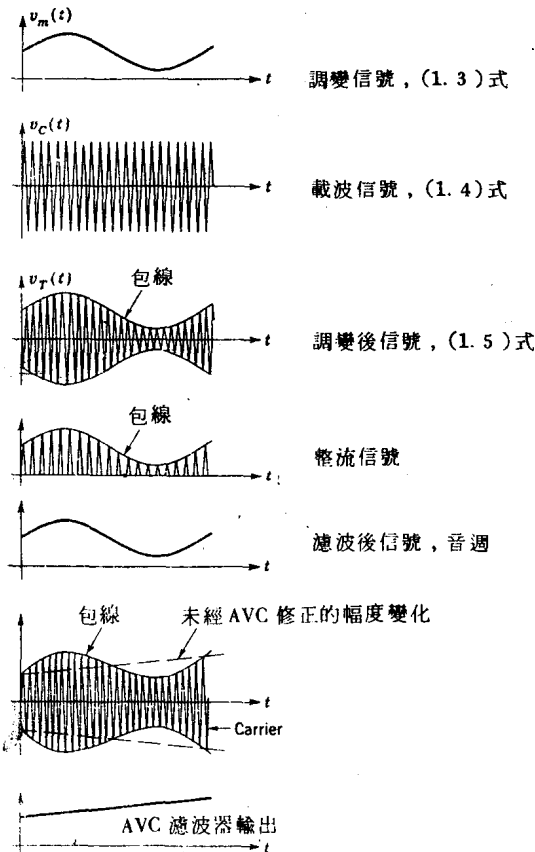


圖 1.5 各種有關波形

自中週放大器中，取得足夠的增益後，信號再經檢波，回復為音週信號。這一過程是在檢波電路中完成。在檢波電路中，經整流及濾波後的信號，和中週信號的外包線成比例，這個信號就是用作調變的音週信號。圖 1.5 所示為信號的轉換過程。在檢波器輸出端的音週信號，再經功率放大，然後送到揚聲器，由揚聲器將電的音週信號，轉換為聲波（空氣壓力的顫動）。

接收機中的電晶體（或真空管），須自直流電源中取得能量，才能維持正常工作。電池為能源之一，但通常則取自交流市電，經整流及濾波而得到直流電能。在接收機中，這個工作由電源供應擔任。電源供應都有穩壓裝置，因此任何市電電壓或負載的變化，都不致影響送到電晶體電路的直流輸出。

調幅接收機中，還有一種相當複雜的電路，稱為自動增益控制，亦可稱為自動音量控制，這個裝置，用來自動補償輸入載波信號強度的緩慢偏移或變動（變化頻率低於 1Hz）。如果沒有自動增益控制，這種緩慢的信號強度變化，將在揚聲器中，形成一種煩人的音量變易。輸入信號的緩慢變化，是由於同一週率信號，經不同傳播路程到達接收機，或由於轉換電台後，先後電台輸出功率不同，或者和接收機的距離亦不同。自動音量校正，是藉回授方法完成。簡單自動增益控制系統如圖 1.4。信號波形則如圖 1.5 所示。略述工作原理如下：中週放大器的輸出，接到一個與音週檢波相似的檢波器，其間差別，為所用濾波電路的截止週率，約為 1Hz，因而只有緩慢變化才有作用。檢波器的輸出，以負回授形態送到輸入級，因此當載波信號增強時，將使輸入級的增益降低，如是，則可使中週放大器的輸出，維持在一定值。

放大器、整流器、回授，及自動增益控制，以及許多別的電路，俱將在本書中討論。書中除分析電路外，亦討論這類電路的設計。而且所有用來說明原理的電路，都經製作測試，並得到預期的結果，為使能徹底瞭解這些電路，讀者應儘可能仿製測試。