

無線電工程

第二冊

無線電工程

第二冊

陸鶴壽編

中華書局印行

目 次

第十章 真空管電路的分析基礎

10.1 真空管電路的基本符號	169
10.2 真空管電路中的電壓及電流關係	172
10.3 真空管的工作點及工作線	173
10.4 屏極電流譜量的圖解	175

第十一章 成音週率放大器(一)

11.1 放大器的分類及其定義	179
11.2 真空管放大器概述	182
11.3 電阻電容耦合放大器	184
11.4 變壓器耦合放大器	189
11.5 負回輸放大器	193
11.6 其他程式的電壓放大器	197
11.7 音週放大器的失真及雜聲	200
11.8 電流放大器	202

第十二章 成音週率放大器(二)

12.1 電力放大器總論	205
12.2 三極管甲類電力放大器	208
12.3 五極管及雙射管甲類電力放大器	212
12.4 輸出電 放	214
12.5 推挽電力放大，其論	218
12.6 甲類及甲乙類推挽式電力放大器	219
12.7 乙類推挽式電力放大器	221

第十三章 射電週率放大器(一)

13.1	中間週率放大器	225
13.2	單調諧耦合放大器	228
13.3	其他程式的射週電壓放大器	230
13.4	輸入導納及電容中和	234
13.5	射週放大器的實際問題	236
13.6	雜跨調幅	240

第十四章 射電週率放大器(二)

14.1	丙類電力放大器	243
14.2	倍週器	246
14.3	乙類直線性電力放大器	248
14.4	射週電力放大電路的分析	250
14.5	射週電力放大器雜論	256

第十五章 調波器

15.1	調波的意義及方法	259
15.2	調幅概論	260
15.3	屏極調幅法	261
15.4	柵極調幅法	264
15.5	其他程式的調幅法	267
15.6	調週的基本原理	270
15.7	調相與調週的比較	273

第十六章 振盪器

16.1	振盪器的基本原理	275
16.2	振盪電路的概論	278
16.3	各種普通振盪器	282

16.4	振盪器的週率穩定問題	286
16.5	石英晶體的特性	290
16.6	晶體振盪器	292
16.7	特種振盪器	294
16.8	外差接收機中的本地振盪器	295

第十七章 檢波器

17.1	檢波基本原理	299
17.2	直線性二極管檢波器	302
17.3	強電訊檢波器	306
17.4	弱電訊檢波器	309
17.5	外差檢波器	311
17.6	再生檢波器及超再生檢波器	315
17.7	檢波器雜論	317

第十八章 整流器

18.1	真空管的電源設備	319
18.2	半波整流	323
18.3	全波整流	328
18.4	各種普通整流器	332
18.5	電感圈輸入式濾波器	338
18.6	電容器輸入式濾波器	341
18.7	倍壓器	345
18.8	電源設備雜論	348

第十章 真空管電路的分析基礎

10.1 真空管電路的基本符號

真空管電路是一種極複雜的組織。真空管內部電極數目既多，各部份配用的電路常數亦各不相同。同時，電路中又有各種外施的電壓，以致電流存在後，電路中的交互關係，自然不會簡單。真空管用途衆多，分析時如無一定標準，結果必將雜亂無序。本書所用各種基本符號，除少數外，均是根據美國無線電工程師學會在公元 1938 年新訂的標準符號。最新出版的美國書籍雜誌已經改用這種標準制，本書讀者如能熟悉各種符號的意義後，進修時定感便利不少。各種符號的定義如下：

e_c	柵極總瞬時電壓
e_p	屏極總瞬時電壓
i_c	柵極總瞬時電流
i_b	屏極總瞬時電流
E_c	柵極電壓的平均值（偏電壓）
E_b	屏極電壓的平均值
I_c	柵極電流的平均值
I_b	屏極電流的平均值
E_{co}	柵極電壓的靜止(Quiescent)值
E_{bo}	屏極電壓的靜止值
I_{co}	柵極電流的靜止值
I_{bo}	屏極電流的靜止值
e_g	柵極電壓中，交流部份的瞬時值
e_p	屏極電壓中，交流部份的瞬時值
i_g	柵極電流中，交流部份的瞬時值
i_p	屏極電流中，交流部份的瞬時值
E_g	柵極電壓中，交流部份的有效值
E_p	屏極電壓中，交流部份的有效值

- I_g 柵極電流中，交流部份的有效值
 I_p 屏極電流中，交流部份的有效值
 E_{gm} 柵極電壓中，交流部份的最大值
 E_{pm} 屏極電壓中，交流部份的最大值
 I_{gm} 柵極電流中，交流部份的最大值
 I_{pm} 屏極電流中，交流部份的最大值
 E_f 絲極或陰絲極的端電壓
 I_f 絲極或陰絲極的電流
 I_s 總電子發射
 g_j j 極的電導
 r_j j 極的電阻
 g_p 屏極電導
 r_p 屏極電阻
 g_g 柵極電導
 r_g 柵極電阻
 g_{jk} k 極到 j 極的互導率
 $g_m (= G_{gp})$ 柵極到屏極的互導率
 $g_n (= G_{pg})$ 屏極到柵極的互導率，亦名反互導率 (Inverse Mutual Conductance)
 μ_{jkl} j 極及 k 極關於 l 極電流的 μ 因數
 μ 放大因數
 C_{gp} 柵極及屏極的電容
 C_{gk} 柵極及陰極的電容
 C_{pk} 屏極及陰極的電容
 C_{gh} 柵極及絲極的電容
 C_{ph} 屏極及絲極的電容
 C_g 柵極電容
 C_p 屏極電容
 C_k 陰極電容
 E_{inv} 嶺反電壓
 E_{fwd} 嶺順 (Forward) 電壓

- P_o 電力輸出
 P_i 電力輸入
 P_p 屏極(或陽極)消耗
 E_{bb} 屏極直流供電電壓
 E_{cc} 或 E_{cc1} 柵極(控制柵極)直流供電電壓
 E_{cc2} 簾極直流供電電壓
 E_{ff} 絲極或陰絲極直流供電電壓
 e_{c2} 簾極總瞬時電壓
 E_{c2} 簾極電壓的平均值
 R_c 柵極電路中的直流電阻
 R_b 屏極電路中的直流電阻

圖10.1是屏極電流波的圖示，圖中各值的定義就是本節所提出的，對照參考後，就易於明瞭各項關係。根據上列各種符號，可以歸納其原則如下：

- (一) 電流的基本符號是 I 或 i 。
 • 電壓的基本符號是 E 或 e 。電力的基本符號是 P 。電阻的基本符號是 R 。電導的基本符號是 g 。電容的基本符號是 C 。

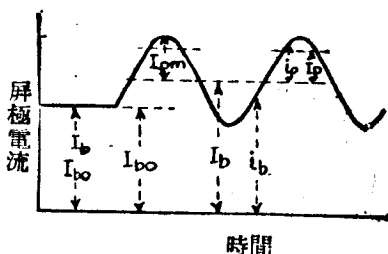


圖10.1 屏極電流波的圖示

- (二) 腳附符號 (Subscript) (簡稱腳號) c 及 g 代表柵極或柵極電路。腳號 b 及 p 代表屏極或屏極電路。

- (三) 符號小寫體代表交流量的瞬時值。符號大寫體代表直流值、平均值、或均方根值。

- (四) 符號小寫體連腳號 c 及 b 代表交流量的總瞬時值。

- (五) 符號小寫體連腳號 g 及 p 代表交流量的瞬時值。

- (六) 符號大寫體連腳號 c 及 b 代表直流或交流平均值。

- (七) 符號大寫體連腳號 g 及 p 代表交流量的均方根值。

- (八) 第二腳號 o 代表靜止值。第二腳號 m 代表交流量的巔值。

- (九) 多極管中，各柵極加用第二腳號 1 及 2 以資區別。腳號 1 代表控制極；在普通的情形下，不論是三極管或多極管，這腳號 1 常可

不加。脚號2代表簾極。脚號數愈大，這電極的位置離陰極愈遠。

(十)各電極直流供電電壓概疊用各脚號。

10.2 真空管電路中的電壓及電流關係

圖10.2是真空管電路的一種，圖中真空管是屬直流陰絲極式三極管。如果這三極管尚有陰極，則各電壓 e_c 及 e_b 的共同點是陰極，而非絲極的負端。根據圖10.1及圖10.2，可將電路中的電壓及電流關係列出，主要的幾項是

$$e_c = E_c + e_g \quad (10.1)$$

$$e_b = E_b + e_p \quad (10.2)$$

$$i_c = I_c + i_g \quad (10.3)$$

$$i_b = I_b - i_p \quad (10.4)$$

假使電路中尚有負荷電阻，則

$$E_b = E_{bb} - I_b R_b \quad (10.5)$$

$$E_c = E_{cc} - I_c R_c \quad (10.6)$$

當柵極無電流時，公式10.6中， $I_c R_c$ 等於零。所以柵極偏電壓亦就是柵極直流供電電壓。

圖10.2及以上各公式是真空管屏極電流波在靜止值上下並不對稱時的電路工作狀況。這種狀態常易發生，因為真空管的特性曲線既不是直線，工作的範圍亦不限於特性曲線上平直的部份，以致屏極電流波失去正弦波的特性，在時軸(Time Axis)上有不對稱的現象發生。如果工作點的位置正確，而工作範圍亦在特性曲線的平直部份，所有電流及電壓的平均值均將與靜止值符合。亦就是說，電波將與時軸對稱（如果時軸並不與靜止值符合，真空管工作情形更是複雜。所以本書分析各電路，均假定靜止值與時軸符合）。在這種情形下，各公式中的 I_b 、 I_c 、 E_b 、及 E_c 值將分別由 I_{b0} 、 I_{c0} 、 E_{b0} 、及 E_{c0} 替代。再詳細研究圖10.2可知，在普通的電路中：(一)柵極電路中有輸入電訊電壓，但無電流；及(二)屏極電路中不加額外電訊電壓。所以，屏極電路中

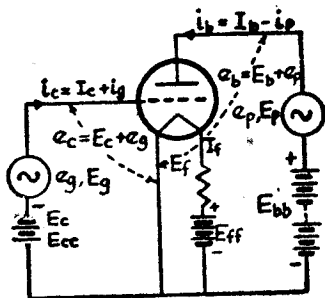


圖10.2 真空管電路的一種

交流部份的瞬時值(e_p)，全是屏極電流中交流部份的瞬時值(i_p)在負荷阻抗上產生的電壓降。

10.3 真空管的工作點及工作線

當真空管的柵極電路並無電訊電壓輸入時(屏極本無電訊輸入電壓)，各電極的平均電壓及電流就是真空管的靜(Static)工作電壓及電流。在屏極 i_b-e_b 特性曲線或 i_b-e_c 特性曲線上，各指定的靜工作電壓及電流，相交任一點，這是靜止點或靜工作點，由Q點代表。當柵極電路有電訊電壓輸入時，真空管各電極的電壓及電流是動(Dynamic)工作電壓及電流。在屏極 i_b-e_b 特性曲線上，這種動工作值的相交點點是動工作點。僅在屏極電流波是一對稱波時，靜工作點與動工作點方能符合在一點。

當真空管柵極並無電訊輸入時，屏極電路中的電壓及電流關係，可由下式表示。就是(由公式10.5化導)：

$$I_{bo} = \frac{E_{bb} - E_{bo}}{R_b} \quad (10.7)$$

假使 R_b 是一固定數，公式10.7是一直線。在 i_b-e_b 特性曲線上，這直線與電壓軸線相交在 $e_b = E_{bb}$ 點(見圖10.3)。這直線的斜度(Slope)

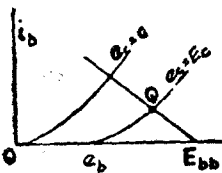


圖10.3 靜負荷線的圖示

是一負值。所以這代表屏極電路中的直流負荷電阻。假使屏極電路中的直流負荷電阻及直流供電電壓固定不變，公式10.7是所有可能靜工作點的軌跡(Locus)，稱作靜負荷線(Static Load Line)。這種電路有電訊輸入時，公式10.5亦可化到公式10.7的形式。在正確對照配合時，各直流屏極電壓及電流

亦必位在靜負荷線上。

當真空管的負荷是一阻抗時，所有相對的屏極瞬時電壓及電流的軌跡是動工作線。圖10.4就是 i_b-e_b 曲線上動工作線的圖示。負荷阻抗中有電抗部份，所以工作線成一橢圓形。工作Q點僅是這橢圓線的中心。唯如這負荷中的電抗部份減小時，圖10.4中的橢圓負荷線，亦將變成更扁的橢圓線。在任何情形之下，如果負荷中的電阻部份不增

不減，橢圓工作（負荷）線頂點聯接線的斜度，亦能保持不變。在電抗部份完全消滅時，橢圓形工作線又併合成一直線，其斜度亦直接代表負荷電阻。在普通的電力放大電路中，負荷線總是由一直線表示。意思就是，屏極電路中並無電抗。或者，屏極交流電壓與柵極交流電壓的相位差是180度。

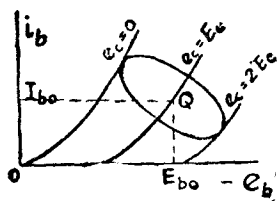


圖10.4 動阻抗負荷線的圖示

圖10.5中，Q點是工作點。柵極的電訊輸入，使屏極電流隨負荷線變化。這負荷曲線已與原來的靜特性曲線不同。特點有：（一）動負荷線的斜度較小，如果柵極輸入的電訊電壓不變時，屏極電流的波幅

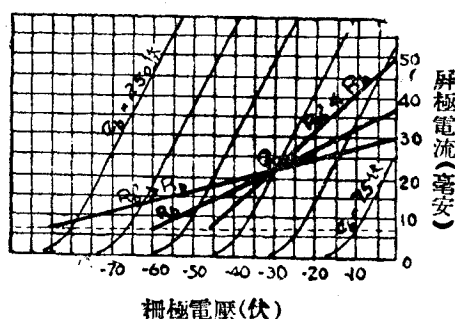


圖10.5 $i_b - e_c$ 特性曲線上動負荷線及工作狀況的圖示

較小。（二）動負荷曲線比較靜特性曲線平直。如果柵極輸入的電訊電壓不變時，屏極電流中的諧失真一定較低。或者，諧失真量不變時，輸入的電訊電壓的波盪範圍可以增加。（三）動負荷線的斜度隨屏極電路中的負荷電阻攷變。屏極電路中有電阻時，真空管屏極實在所受到的

的電壓，必定低於直流供電電壓；二者的差數，就是負荷電阻上的電壓降。所以在柵極輸入電訊電壓的正半週波盪，負荷電阻上的電壓降是一正值（因為屏極電流 i_b 大於 I_{b0} 值），屏極電壓 E_b 必低於供電電壓 E_{bb} 。唯在輸入電訊電壓的負半週的波盪，負荷電阻上的電壓降是一負值（因為屏極電流 i_b 小於 I_{b0} 值），屏極上的有效電壓 E_b 遂能高於供電電壓 E_{bb} 。上述各種特點均可見圖10.5明之。當然，電路中的負荷電阻愈大，動負荷線愈是平直，斜度亦愈小。事實上，這種負荷電阻亦有一最佳值。電阻低，屏極電流大。電阻高，工作範圍（指柵極電訊電壓的波盪）可以展廣，但是屏極電流降低。正確的負荷電阻可由下式

計算，就是

$$R_b = r_o \left[\left(\frac{E_c}{\frac{E_{bo} - E_o}{\mu} - E_c} \right) - 1 \right] \quad \text{歐} \quad (10.8)$$

其中 R_b 是最佳的負荷電阻(歐)； r_p 是真空管在工作點的內部屏極電阻(歐)； E_{bo} 是工作點的屏極電壓(伏)； μ 是真空管的放大因數； E_o 是柵極偏電壓在零值時，屏極電流斷絕所需的屏極電壓(伏)； E_c 是正確均柵極負偏電壓(伏)，負偏電壓時，公式10.8中的 E_c 是正值。這偏電壓亦可以用相反的方法推算，就是(由公式10.8化導)：

$$E_c = \frac{E_{bo} - E_o}{\mu} \left(\frac{R_b + r_p}{R_b + 2r_p} \right) \quad \text{伏} \quad (10.9)$$

其中各值的定義仍如上式。

圖10.5是根據 i_b-e_c 特性曲線而製成的負荷工作線。這種曲線亦可以轉移在 i_b-e_b 特性曲線上，圖10.6就是一例。圖中柵極輸入電訊的波盪，已不能再如圖10.5的簡單繪法，這須將各曲線展長成一直線，再在指定的 E_c 線上繪出電訊波形。唯負荷電阻線可以直接以 i_b 及 e_b 的比數，比較容易。屏極電流波亦可照常用投影法描繪。

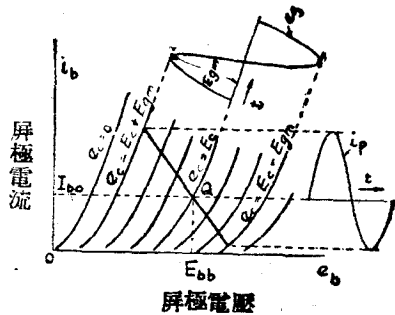


圖10.6 i_b-e_b 特性曲線上動負荷線及工作狀況的圖示

10.4 屏極電流諧量的圖解

真空管屏極特性曲線的彎曲部份，在工作範圍內(就是，柵極輸入電訊電壓的波盪範圍)，常不能避免。或者，屏極電路中有交直流電流疊加，以致屏極電流中不免有諧波失真量存在。同時，屏極電流的平均值亦受到影響，而有變化。所以，真空管柵極電路有輸入電訊電

壓時，屏極交流電流的週率，並不與電訊週率相同。換句話說，屏極電流（交流部份）不但不全是有用的部份，且有諧波的失真部份。分析真空管電路時，諧波量（基本週率包括在內）的分解極是重要。本來電波的諧分析，可以利用傅立葉級數。這種方法必先有電波的波形方能計算。現在希望有一直接的方法，從真空管的特性曲線推算諧

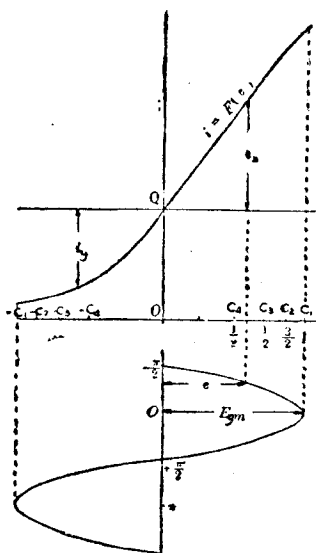


圖10.7 真空管屏極特性曲線的一種

波量。經各方面研究的結果，圖解法比較準確，且可不先得電波的圖形。本節所列的解法，是由却飛氏 (E.L. Chaffee) 所導出。

假使圖10.7是一屏極特性曲線的一種。Q是工作點， E_{gm} 是柵極交流電壓（電訊）的最大波盪。在圖中的橫坐標上，這是由1代表。工作點則由0代表。在1及0之間，分成多點，例如， $\pm C_1$ 、 $\pm C_2$ 、 $\pm C_3$ ……。在0點的右邊的C值是正數，其在0點左邊的C值是負數。實際上，正負值並無關係。C值與0點的距離，可見表10.1。所以，不論分點如何，在每點必可從曲線上取得一讀數。假使 $+C_2$ 值所得的讀數是

i_x (見圖10.7)， $-C_2$ 值可以是 i_y 。同時令

$$S = |i_x| + |i_y| \quad (10.10)$$

$$D = |i_x| - |i_y| \quad (10.11)$$

表10.1 諧分析的C值表

C次序	C_1	C_2	C_3	C_4
與O點的距離	1.00	0.866	0.707	0.500

現在C值是 $\pm C_2$ ，S及D亦加腳號，由 S_2 及 D_2 代表，以資區別。其他各C值的電流，亦可用同樣方法求得。再根據公式10.10及公式10.11

的關係，就可推算各相關的S及D。最後一步是用下列各項關係，直接計算各諧波的成分。

表10.2 五點分譜法（全週波共九點）

諧波	計算公式
$I_b - I_{b0}$	$D_1/6 + D_4/3$
I_{p1}	$S_1/4 + S_4/3$
I_{p2}	$D_1/4$
I_{p3}	$S_1/6 - S_4/3$
I_{p4}	$D_1/12 - D_4/3$

表10.3 七點分譜法（全週波共十三點）

諧波	計算公式
$I_b - I_{b0}$	$D_1/8 + D_3/4$
I_{p1}	$S_1/4 + S_2/2\sqrt{2}$
I_{p2}	$5D_1/24 + D_3/4 - D_4/3$
I_{p3}	$S_1/6 - S_4/3$
I_{p4}	$D_1/8 - D_3/4$
I_{p5}	$S_1/12 - S_3/2\sqrt{2} + S_4/3$
I_{p6}	$D_1/24 - D_3/4 + D_4/3$

表10.4 九點分譜法（全週波共十七點）

諧波	計算公式
$I_b - I_{b0}$	$1/6 (D_1/2 + D_2 + D_4)$
I_{p1}	$1/6 (S_1 + \sqrt{3}S_2 + S_4)$

I_{p2}	$1/6(D_1 + D_2 - D_4)$
I_{p3}	$1/6(D_1 - 2S_4)$
I_{p4}	$1/6(D_1 - 2D_3)$
I_{p5}	$1/12(S_1 - 3\sqrt{2}S_3 + 4S_4)$
I_{p6}	$1/12(D_1 - 2D_2 + 2D_4)$
I_{p7}	$1/12(S_1 - 2\sqrt{3}S_2 + 3\sqrt{2}S_3 - 2S_4)$
I_{p8}	$1/12(D_1/2 - 2D_2 + 3D_3 - 2D_4)$

此外尚有十一點及十三點分譜法二種。因為算式比較複雜，在普通的情形下，已非必需。應用這種分譜法時，尚須注意下列各點：

(一)如果特性曲線並無大彎曲時，分點可少。這樣可以省事不少。

(二)如果工作點的半邊並無電流（例如乙類及丙類放大器的工作點），S值等於D值。因為 $i_y = 0$ ，算式亦可簡化。

(三)計算S及D時，僅將 i_x 及 i_y 的絕對值照式相加或相減。

(四)這種分譜法僅限屏極負荷是純電阻。同時 E_{gm} 及 E_{pm} 的相位須差180度。

(五)算出的各值均是電流各諧波的顛值。

第十一章 成音週率放大器(一)

11.1 放大器的分類及其定義

放大是無線電機構中的主要部份。利用真空管的放大器 (Amplifier)，應用最便，亦最廣泛。真空管放大器常用的分類方法有兩種，就是：

(一)根據工作的週率分類：有成音週率放大器，簡稱音週放大器，及射電週率放大器，簡稱射週放大器二類。此外，中間週率放大器，簡稱中週放大器，亦屬於射電週率放大器的一種。因為中間週率本來就是射電週率，而這二種放大器間的工作特性，亦完全相同。在普通情形下，音週放大器的工作週率範圍是30週到10千週。中週放大器的工作週率，常位置在100千週及500千週之間。射週放大器的工作週率，自然亦起碼100千週（低於100千週的射週並不常應用）。在目下，已經實用的最高射週約是400兆週，所以，音週及射週各不相同。近年來，電視盛行後，電視所用的影像週率 (Vedio Frequency)，簡稱像週，其作用與音週相似，但其週率却高達4兆週之譜，以致音週及射週的區別，已不再存在。至於直流放大器的工作週率則是零。

(二)根據電訊放大部分分類：有電壓放大器 (Voltage Amplifier)、電流放大器 (Current Amplifier)、及電力放大器 (Power Amplifier) 三種。其中電壓放大器及電力放大器的用途最廣。在接收方面，收到電訊的強度常極低微，這時放大部分是電壓。迨電壓升高到相當的數值時，再加用電力放大器，就能獲得適當的輸出量；發射方面，電訊（這是指載波電訊）的電壓常高，主要的放大部分遂是電訊的電力。

(三)根據電路的組織分類：有電阻電容耦合放大器 (Resistance-Capacitance-Coupled Amplifier)、變壓器耦合放大器 (Transformer-Coupled Amplifier) 等多種。這是指真空管屏極電路的構造說。往昔，在無線電發明的初期，變壓器耦合電路的應用最是普通。近年來，

電阻電容耦合電路已取其地位而代之，因為這種電路的優點衆多，變壓器耦合電路遂少應用。唯今日普通放大器在電力放大時，仍多採用變壓器耦合。其他程式的耦合電路尚有多種，唯因應用不廣，例如，阻抗耦合 (Impedance-Coupled) 電路；或因用途專門，例如闊波段 (Wide Band) 放大電路。本書的分析，亦將從略。

(四)根據特性曲線上工作條件分類：有甲類 (Class A) 放大器、甲乙類 (Class AB) 放大器、乙類 (Class B) 放大器、及丙類 (Class C) 放大器等多種。這項分類法應用日趨普遍，美國無線電工程師學會在1933年的新定標準中，對於各類放大器的意義，已有明確的規定。

甲類放大器的柵極偏電壓 (Grid Bias Voltage) 及交流柵極電壓 (A.C. Grid Voltage) 經正確配合後，能使放大真空管在全部電週內 (Electrical Cycle) 均有屏極電流。在理想的甲類放大器中，其輸出波形與輸入波形完全相同。但是交流柵極電壓的巔值必須小於其偏電壓。圖11.1是利用一三極管的特性曲線，說明甲類放大器的定義及工作狀況。在這種工作情形下，直流屏極電流的平均值，並不因負荷的改變而受影響。唯屏極效率 (Plate Efficiency) 極低，在全量負荷時，僅及百分之廿到百分之卅。

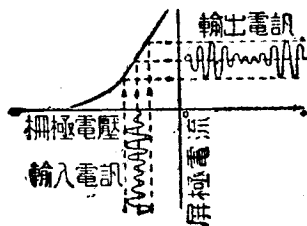


圖11.1 甲類放大原理的圖示

甲乙類放大器的柵極偏電壓及交流柵極電壓正確配合後，能使放大真空管在電週一半以上(但不是全部)有屏極電流，這類放大器又分二種，即(甲乙)₁類及(甲乙)₂類。假使外來電訊電壓的巔值小於放大管的偏電壓，全部工作範圍內柵極電流始終是零，這是(甲乙)₁類放大器。荷電訊電壓的巔值增高而大於放大管的偏電壓時，柵極中將有電流，這是(甲乙)₂類放大器，其效率及電力輸出均較(甲乙)₁類略高。但是柵極電流存在後，不免有柵極損失，結果，(甲乙)₂類放大器的推勵電力必須較實需的電力大量提高，以減低柵極電路中的失真。事實上，(甲乙)₂類放大器的直流屏極電流變化極大，所以屏極供電電源必須具有優良的電壓調節，方能維持固定的輸出量，而避免額外的失真。