

高 頻 放 大 器 的 計 算

苏联 C. C. 阿尔申諾夫 著

叶 晦 之 湯 步 和 譯

編者序言

現引起讀者注意的这本“电子管放大器的計算”一書，是著名苏联无綫电專家 C·C·阿尔申諾夫的最后遺著，在他逝世以前不久才脫稿。

这本书講的是中小型發射机中輸出級和中間級所用的高頻放大器的計算方法。

C·C·阿尔申諾夫这部著作進一步發展了以 A·H·貝尔格院士为首的苏联科学家們所創立的高頻放大器計算方法。書中有許多新穎而且十分重要的原理，反映了現代的电子管技术和无綫电發送設備技术。

書中闡明了作者所得到的新結論。

C·C·阿尔申諾夫第一次嚴格地証明 了振盪功率的最大值不但能在边界状态，而且可能在欠压或过压状态上產生^①。这是与現在一般的看法不同的。

作者更進一步分析了电子管放大器的各种工作状态，并指出欠压状态的最大功率情况，不宜采用。如果把电源电压稍变一些，就能使放大器工作在边界状态，这时功率还是差不多，但效率却提高了，这时付出的代价則是柵極电路的工作状态变坏了一些（一般是可以容許的）。分析过压状态以后，就可得到証明：如果引用了近代放大管的典型数据，那么功率最大值就只能產生在弱过压状态，可是这时功率比边界状态的功率大不了多少。这就嚴格地論証了这样一个問題：对于用近代电子管裝起來的放大器而言，边界状态差

^① 应当指出，与 C·C·阿尔申諾夫同时，N·A·科托米娜也独立地得到了这个結論。

不多就是主要的工作状态。所以作者以后就把主要注意力集中在边界状态。

在边界状态的計算法方面，C·C·阿尔申諾夫有很多新的貢獻。如果說电子管放大器的原始計算数据以前主要是振盪功率，那么用了C·C·阿尔申諾夫的方法以后，就可以根据不同的数据，或者是振盪功率，或是輸入功率，或是板極損耗來設計放大器。后两个数量是决定近代放大管的主要工作数据。

按照C·C·阿尔申諾夫的方法，就能根据原始数据找出电子管在边界状态下的最佳使用条件。这在不能使用典型数据的情况下尤其重要。依靠这种方法，就可以算出一个最有利的板流通角，而不是猜測估計。可是要申明一句，这样算出來的通角，只是从板極电路來看才是最佳的。如果从獲得适当的柵路状态來考慮，往往就不用这个通角。在这里，作者又找出几个关系來判断板路的能量平衡在偏离最佳工作状态以后变坏到什么程度。这些新的原理不但对設計發送设备的人有很大的帮助，对于电真空工業方面的工作者來說，它也能指出一条可能而有益的改進放大管的道路。

本書所講的放大器板路的过压状态的計算法是值得注意的。板流和柵流的总和等于电子管的“理想”放射电流的假說，对于大多数近代放大管來說，是不切合实际的。阿尔申諾夫計算法的長处，就在于不以这个假說为基础。

由于尽量減少了电子管的計算参数，所以計算公式非常簡單，便于進行技术計算，物理意义也很明顯。

書中对倍頻器工作的分析也是很有意思的。分析中指出：如果用的是陰極放射率很高的电子管，那么放大器在倍頻状态下的功率和效率就会超过現時公認的数值。

作者在探討他的計算方法时，沿用了目前普遍采用的理想的靜

特性曲綫，即一組平行的直綫綫段。多年实际运用的經驗証明：这种方法能够使放大器的計算达到工程上需要的精确度。可是應該注意，很多放大系数高的近代电子管的特性曲綫都是扇形的。如果假定电子管的靜态参数不变（一般的理想化方法都会造成这个結果），激励电压和偏压的計算就会有很大的誤差。再加上参数表里的跨導不准，复合陰極电子管的靜特性曲綫又有一条逐漸弯曲的尾巴，这誤差就可能更大了。B·C·阿加方諾夫最先注意到这一点，他提出了一种計算跨導在动态下变化^①的方法。C·C·阿尔申諾夫提了另外一种求跨導的方法，它也能提高柵路电压計算的准确度。

作者很注意輸出級和中間級的設計。可以断言，從來沒有一本无綫电發送設備教程这样深刻、全面地討論过这些問題。

这本书的特点就是極其实际，但又結合深刻的理論分析。这就說明，C·C·阿尔申諾夫不但是个有才能的研究者，而且是在祖國无綫电工業方面卓著成效地工作了許多年的經驗丰富的設計師。

无疑，这本书在科学和实用兩方面都很有价值，它一定会成为高等工業学校师生以及設計无綫电發送設備的工程师的参考書。

Л·林 德

① B·C·阿加方諾夫：电报發射管的理論和計算，“苏联无綫电”出版社，1954年版。

序

电子管高频放大器的计算在很大的程度上决定发射机的能量平衡、价格以及其他技术方面和经济方面的特点。所以本书的重点就是如何获得最佳的能量关系和如何使工作状态的计算符合实际，也就是提高计算的准确度。为了这个目的，这里采用了计算放大器板路的边界状态的方法来计算三种基本情况，这个方法是作者和Л·А·科托米娜独立发展的。它是按理想特性进行计算的苏联方法(А·И·别尔格方法)的发展。凡计算输出放大器和中間放大器时碰得到的各种实际情况——也就是放大器的工作状态与负载有关的情况，这个方法都能适应，它也适用于倍频器的计算。书中又把С·И·耶夫洽诺夫在1936年提出的方法加以改进，以便计算过压状态，同时还采用了Б·С·阿加方诺夫的通用负载特性。栅路和线路元件的计算方法在这里也有所发挥。

本书的对象是学过高等学校或中等技术学校所用“无线电发送设备”教科书的高年级学生，无线电发送设备专业的工程师、技术人员。书中主要是讨论中、小功率的放大器，所以制造大功率放大器的许多问题——中和、多回路系统等都不讨论。中、小型放大器的计算方法的基本特点，就是不把电子管的饱和电流列为计算的原始参数(不论直接或间接)。现时大功率真空管也开始采用复合阴极，因此可以预计，这本书对制造大功率放大器的专家也会有用的。

作者向Л·А·科托米娜致谢，这里叙述的许多问题和某些观点，作者都同她讨论过，讨论结果或是在本书中有其反映，或是促使作者修正了自己的原理。

С·阿尔申诺夫

一九五三年四月

目 錄

序

編者序言

第 一 章 电子管放大器的工作状态

- 1—1. 基本概念和术语..... (1)
- 1—2. 无綫电發射机的能量平衡..... (4)
- 1—3. 中、小型功率放大管..... (7)
- 1—4. 放大管的靜特性..... (10)
- 1—5. 板流的动特性和脈冲波形..... (15)
- 1—6. 工作状态的强度和負載特性..... (20)
- 1—7. 放大管的典型工作状态..... (24)

第 二 章 电子管放大器的近似理論

- 2—1. 在苏联电子管放大器的分析計算法的發展..... (26)
- 2—2. 电子管特性曲綫的直綫化..... (29)
- 2—3. 根据理想特性决定电子管的計算参数..... (32)
- 2—4. 电子管放大器的基本方程式..... (35)
- 2—5. 板流脈冲的分解..... (39)
- 2—6. 負載特性的計算..... (49)
- 2—7. 电子管放大器的等效电路..... (52)

第 三 章 放大器板路工作状态的計算

- 3—1. 計算的主要任务..... (54)
- 3—2. 板路的最佳状态..... (56)
- 3—3. 基本工作方案和最佳通角的确定..... (62)
- 3—4. 边界状态的計算..... (69)

- 3—5. 鎢絲陰極電子管放大器的計算特点····· (77)
- 3—6. 板路的過壓狀態的計算····· (78)
- 3—7. 并聯綫路和推挽綫路的計算····· (82)

第 四 章 柵路的計算

- 4—1. 控制柵壓的計算····· (87)
- 4—2. 欠壓和邊界狀態下的柵流····· (92)
- 4—3. 過壓狀態下的柵流····· (94)
- 4—4. 柵路的能量平衡····· (99)
- 4—5. 控制柵極的饋電綫路和元件計算····· (100)
- 4—6. 簾柵饋電綫路和元件計算····· (107)
- 4—7. 抑制柵極的饋電綫路和零件····· (112)

第 五 章 超短波放大器

- 5—1. 限制電子管工作頻率的原因····· (113)
- 5—2. 超短波工作狀態的特点····· (120)
- 5—3. 簾柵管在超短波段中的應用····· (120)
- 5—4. 三極管在超短波段中的應用····· (123)
- 5—5. 共柵極綫路····· (123)

第 六 章 中短波和短波放大器的負載回路

- 6—1. 回路的主要類型、參數和接入系數····· (134)
- 6—2. 有載回路的能量關係····· (138)
- 6—3. 負載回路的濾波性能····· (140)
- 6—4. 綫圈的計算····· (143)
- 6—5. 扼流圈的計算····· (156)
- 6—6. 可變電容器的計算····· (162)
- 6—7. 固定電容器的計算····· (165)
- 6—8. 負載回路各主要參數之間的關係····· (169)

第 七 章 超短波放大器的負載回路

- 7—1. 超短波放大器負載回路的类型…………… (173)
- 7—2. 集中常數回路和过渡式回路…………… (174)
- 7—3. 長綫式回路的計算…………… (177)
- 7—4. 空腔諧振器式回路的計算…………… (186)
- 7—5. 長綫和空腔諧振器的調整…………… (190)
- 7—6. 長綫、空腔諧振器与負載的耦合…………… (193)

第 八 章 具有簡單綫路的輸出放大器的計算

- 8—1. 具有簡單綫路的輸出放大器的应用範圍…………… (196)
- 8—2. 按既定負載电阻計算有簡單輸出綫路的放大器…………… (197)
- 8—3. 按既定参数 A_1 或 C_1 計算有簡單輸出綫路的放大器… (202)
- 8—4. 按既定板耗計算最佳边界状态…………… (205)
- 8—5. 按既定天綫功率計算最佳边界状态…………… (210)
- 8—6. 按既定輸入功率求最大天綫功率的計算法…………… (214)

第 九 章 具有複合綫路的輸出放大器的計算

- 9—1. 具有复合綫路的輸出放大器的使用範圍…………… (216)
- 9—2. 傳輸到天綫回路的能量…………… (217)
- 9—3. 天綫回路的基本綫路和能量平衡…………… (224)
- 9—4. 具有高加載能力的复合式輸出放大器…………… (233)
- 9—5. 根据既定板耗計算有复合輸出綫路的放大器…………… (236)
- 9—6. 根据既定天綫功率計算有复合輸出綫路的放大器…………… (239)
- 9—7. 根据既定輸入功率計算有复合輸出綫路的放大器…………… (242)
- 9—8. 在非全諧振情況下，具有复合綫路的輸出放大器…………… (243)
- 9—9. 天綫不調諧式复合綫路…………… (252)

第 十 章 中、短波波段輸出放大器的計算

- 10—1. 波段放大器的工作状态…………… (255)
- 10—2. 不对称天綫的参数与頻率的关系…………… (257)
- 10—3. 天綫变感器的参数的頻率特性…………… (265)

- 10—4. 具有簡單輸出綫路的放大器的等效負載电阻在波段內
保持恆定的問題…………… (269)
- 10—5. 在过压狀態下具有簡單輸出綫路的波段放大器的計算 (278)
- 10—6. 在过压狀態下具有复合輸出綫路的波段放大器的計算 (281)
- 10—7. 輸出放大器的濾波度…………… (285)

第十一章 級間放大器

- 11—1. 級間放大器的用途、特点和綫路…………… (287)
- 11—2. 电容耦合級間放大器的計算…………… (291)
- 11—3. 电感耦合級間放大器的計算…………… (299)
- 11—4. 直接耦合級間放大器的計算…………… (304)
- 11—5. 緩冲狀態…………… (306)

第十二章 二倍倍頻器和三倍倍頻器

- 12—1. 倍頻器概論…………… (309)
- 12—2. 倍頻器的边界狀態…………… (311)
- 12—3. 二倍倍頻器板路的計算…………… (313)
- 12—4. 三倍倍頻器板路的計算…………… (319)
- 12—5. 倍頻器控制綫路的电压…………… (323)
- 12—6. 倍頻器的工作狀態和綫路…………… (324)

第十三章 計算举例

- 13—1. 2—4 章的例題…………… (326)
- 13—2. 5—7 章的例題…………… (334)
- 13—3. 8—10 章的例題…………… (345)
- 13—4. 11、12 章的例題…………… (351)
- 參考書目…………… (354)

附 錄

- 表 II—1. 尖頂余弦脈冲的分解系数…………… (358)
- 表 II—2. 边界狀態下的放大器效率 (以 A_1 为参数)

$$\eta_r = f_1(\psi, A_1) \dots\dots\dots (363)$$

表 II-3. 边界状态下的放大器效率(以 B_1 为参数)

$$\eta_r = f_2(\psi, B_1) \dots\dots\dots (363)$$

表 II-4. 边界状态下的放大器效率(以 C_1 为参数)

$$\eta_r = f_3(\psi, C_1) \dots\dots\dots (364)$$

表 II-5. 函数 $S_{zp}R_s = \phi_1(\psi, A_1)$ 的数值 $\dots\dots\dots (365)$

表 II-6. 函数 $S_{zp}R_s = \phi_2(\psi, B_1)$ 的数值 $\dots\dots\dots (365)$

表 II-7. 函数 $S_{zp}R_s = \phi_3(\psi, C_1)$ 的数值 $\dots\dots\dots (366)$

第一章

电子管放大器的工作状态

1-1. 基本概念和术语

无线电发送设备包括高频振荡器、振荡调制设备、电源以及为调谐、控制和闭锁而用的辅助仪表和机件。

高频振荡器包括一级主振器或自激振荡器，和一级或几级他激振荡器（或功率放大器）。本书只讨论他激放大器。

以天线为负载的放大器叫做输出放大器，其余的都叫中间放大器。凡是在板极负载中产生高次谐波功率的中间放大器（有时是输出放大器），都叫做倍频器。产生二次谐波的叫二倍倍频器，产生三次谐波的叫三倍倍频器。

放大器的板路中多半都接着一个振荡回路，叫做负载回路或放大器的负载。后面这个名称不大确切，因为输出放大器的负载本来是天线的电阻，而中间放大器的负载是后级的栅路输入电阻；但是这个名称已经用惯了，所以我们以后还用它。

振荡回路用来使负载与放大器匹配，并检出所需的谐波分量。

圖1—1是两种五极管放大器的线路。

圖1—1, a 和 b 两种线路的区别只在于板路、栅路和灯丝的供电方式不同，圖1—1, a 的线路采用直热式电子管，板极电源 E_a 、振荡回路 L_1C_1 和电子管依次串联，所以叫做串馈线路。各栅极各由单独的电源供电；象这样的栅路馈电系统就叫做独立系统。激励电压 U_{c1} 由前级回路通过耦合电感 L_{cs} ，加到控制栅极上。高频振荡由板

極回路 $L_1 C_1$ 通过变压器 $L_1 L_2$ 傳輸到負載电阻 r_n 上去。 $C_{61} - C_{65}$ 是几个容量很大的旁路电容器，用作高频电流的通路；扼流圈 L_{ap} 防止高频电流通过板極电源。振盪回路 $L_1 C_1$ 調諧在板流的一次諧波上（在二倍倍頻器或三倍倍頻器中則調到二次或三次諧波）。

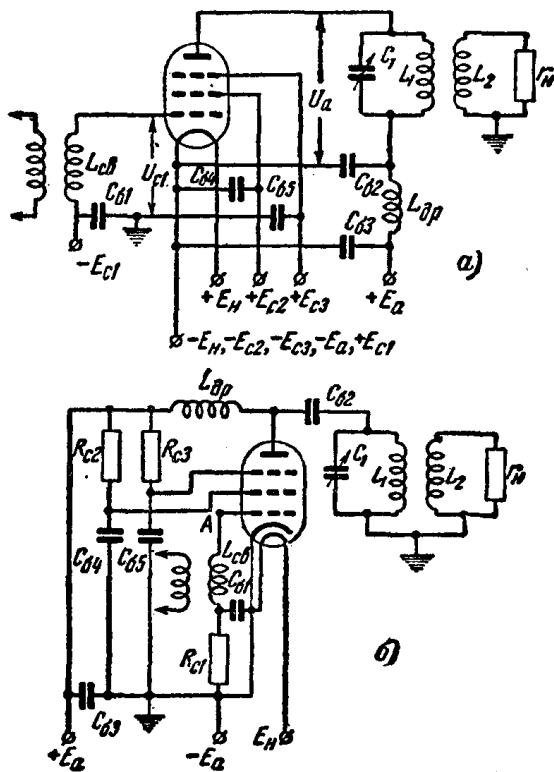


圖 1—1. 放大器綫路

振盪回路通过变压器和負載耦合，回路在諧振时对板流一次諧波的等效电阻用 R_s 表示，无載回路的等效电阻用 R_{s0} 表示，回路上的高频电压降叫做振盪电压，按絕對值來說，它就等于电子管板路中的交流电压，也就是板極和陰極之間交流电压。交流电压的振幅与板極电源电压之比叫做板極电压的利用系数，記作 ξ ：

$$\xi = \frac{U_a}{E_a} \quad (1-1)$$

圖 1—1, 6 是一个采用旁热式电子管的放大器，它的板压按并联方式饋給——板極电源、振盪回路和电子管接成并联。扼流圈 L_{op} 和电容器 C_{o2} 的功用是分开电子管板流的直流分量和交流分量。

控制柵極上的直流电压（即偏压）是由柵流的直流分量在柵極电阻 R_{c1} 上形成的。这样造成的偏压叫做柵極自給偏压，电阻 R_{c1} 就叫做自給偏压电阻。激励电压加在 A 点和陰極之間。电子管柵極（A 点）和陰極之間的扼流圈防止激励电源短路。

帘柵电压和抑制柵極电压由板極电源通过降压电阻 R_{c2} 和 R_{c3} 饋給。在圖 1—1 的兩種綫路中，旁路电容器 C_{o4} 和 C_{o5} 都用來消除帘柵極和抑制柵極的高頻电压。

在动态之下，电子管工作时的板流有时被截止，就是說，在激励电压的一部分周期內，板路里沒有电流。所以板流是一串以激励电压的頻率不断出現的不連續的脈冲，因而內中包含直流分量 I_{a0} 、基波分量和高次諧波 I_{a1} 、 I_{a2} 等等。基波电流的振幅与直流分量之比用 γ_1 表示：

$$\gamma_1 = \frac{I_{a1}}{I_{a0}} \quad (1-2)$$

板流高次諧波分量的振幅与直流分量之比用 γ_n 表示：

$$\gamma_n = \frac{I_{an}}{I_{a0}}, \quad (1-3)$$

式中 n 是諧波次数（ $n = 1, 2, 3, \dots$ ）。

柵極电流——控制柵流、帘柵流、抑制柵流也是周期性的脈冲，也包含直流分量、基波分量和高次諧波分量。以后就用下角註

來表示各種柵流，下角註的第一个數字說明它是第幾次諧波，字母C后面的一個數字說明是第幾個柵極。所以 I_{1c1} 這個符號就代表控制柵極（第一柵極）電流的一次諧波振幅， I_{0c2} 這個符號就代表宿柵極（第二柵極）電流的直流分量，其餘依此類推。

1-2. 無線電發射機的能量平衡

無線電發送設備的電子管放大器有幾種功能，總起來說，就是把直流電源的能量變為高頻振盪的能量。

能量轉換首先要用效率來鑑定。尤其是中、小型無線電發送設備，效率更是重要。這是因為：第一、它是用得最多的無線電台；第二、小型無線電台通常都是由價格昂貴的初級能源供電的，譬如用化學電池供電，或是用柴油機通過一系列效率很低的轉換設備供電，所以送到發射機電子管上去的一千瓦小時電能要比一千瓦小時工業電能貴上幾十倍甚至幾百倍；第三、初級能源需要一些不易補充的材料；要製造這些材料，就得加重工業的負擔，要送到使用地點，又得加重運輸業的負擔；第四、電子管的額定功率和發射機的體積、重量都跟效率有關，而這些因素又決定發射機的价格，決定發射機是否便於搬運。對於流動無線電台——飛機上的、汽車上的、便攜式的，等等——來說，後面這一點尤其重要。

近代發射機的質量要求是非常高的，要想滿足它，差不多總要用上好幾級。這幾級，有的產生具有一定頻率穩定度的振盪，有的倍頻，有的調制，有的放大功率並且把強大的振盪傳輸到天綫上去。

輸出放大器是消耗電源能量的主要器件。但是在中型特別是小型發射機中，前幾級對總的能量平衡也可能有很大的影響。

在滿足各項質量要求的條件下取得最高效率，這是一個最重要

的任务，只有正确选择线路、电子管的型类和工作状态、线路零件（特别是构成振荡回路的零件），才能解决这个问题。

发射机的放大器的板极效率应该很高，就是说，高频振荡功率与输入板路的直流功率之比应该很大：

$$\eta_r = \frac{P_1}{P_0} \quad (1-4)$$

在这个公式中：

P_1 是一次谐波的振荡功率；

P_0 是板路所消耗的直流功率；

η_r 是放大器的板极效率。

振荡功率等于振荡电压振幅与板流基波振幅乘积的一半，输入功率等于板极电源电压与板流直流分量的乘积，所以效率公式又可以写成：

$$\eta_r = \frac{1}{2} \frac{I_{a1} U_a}{I_{a0} E_a},$$

代入 (1-1) 和 (1-2) 的数值，使得：

$$\eta_r = \frac{1}{2} \gamma_1 \xi \quad (1-5)$$

板极效率还不能完全说明放大器的能量平衡。一方面，放大器负载回路的效率在能量平衡中也有重大的影响，另一方面，放大器的灯丝电路和栅极电路也消耗功率。以 P_k 表示灯丝功率，以 P_{oc2} 表示帘栅电路消耗的功率，以 P_{ic1} 表示控制栅极电路消耗的功率，就可以把总效率当做一次谐波功率与上列各项功率（包括板路的输入功率）之比而加以确定：

$$\eta = \frac{P_1}{P_0 + P_k + P_{oc2} + P_{ic1}} \quad (1-6)$$

总效率說明一級的能量平衡，它是正确工作状态的重要指标。板路所消耗的功率和各个栅極所消耗的功率是互相联系的，所以往往不得不在最高板極效率和最高总效率之間進行抉擇。

在选择电子管的类型和額定功率的时候，板極效率有着决定性的意义，这是因为：放大管的板極損耗等于电源功率与振盪功率之差：

$$P_a = P_0 - P_1 \text{ 或 } P_a = P_0(1 - \eta_r), \quad (1-7)$$

而这个損耗不得超过所用电子管的容許損耗。

發射机的主要能量指标就是它的技术效率，即天綫功率与全部电源所供給的功率之比：

$$\eta_m = \frac{P_A}{\Sigma P_{\Pi}} \quad (1-8)$$

在这个公式中， η_m 是發射机的技术效率；

P_A 是天綫功率；

ΣP_{Π} 是全部电源供給的功率之和。

从能量平衡的观点來看，發射机的質量决定于輸出級的板極效率，决定于輸出級总效率和發射机技术效率接近板極效率的程度，还决定于振盪功率由輸出放大器到天綫的傳輸效率。輸出放大器的电子管的灯絲功率愈經濟，帘栅电路消耗的功率愈小，激励功率愈小，或功率放大系数愈大，則輸出放大器的总效率愈接近板極效率，功率放大系数等于一次諧波振盪功率与激励功率之比：

$$A_P = \frac{P_1}{P_{1c1}} \quad \circ$$

發射机技术效率与輸出放大器总效率的接近程度决定于一系列的对發射机質量的要求。为此，往往就必須增加級数，降低發射机所用电子管的功率放大系数，首先是輸出放大管的功率放大系数。

1-3. 中、小型功率放大管

絕大多數中、小型近代發射機，不論是長波的、中波的、中短波的、短波的還是米波波段的，都采用帘柵管，其中又以氧化物陰極和碳化塗鈹陰極的束射四極管和五極管為主。

在這幾個波段內采用帘柵管，第一，就可以不必中和板極——控制柵極電容的有害影響；因此不但綫路以及調諧和調整的步驟得以簡化，零件得以減少，而且在許多情況下效率也能顯著提高；第二、帘柵管的控制柵流小而跨導大，並且實際上沒有板極反作用（帘柵管的滲透系數極小），所以它的功率放大系數很大，三極管遠比不上。功率放大系數高，對於提高整個發射機的效率特別有利，因為這樣就可以把中間放大器的級數和功率減到最小。

帘柵極所消耗的功率對帘柵管——四極管和五極管的能量平衡有很大的影響。帘柵極往往是由放大器的板極電源通過降壓電阻供電的，所以帘柵直流與板極直流之比決定帘柵電路輸入功率與板極電路輸入功率之比。舊式帘柵管的帘柵電流在總電流中佔有很大的比重。

在電子注四極管中（圖 1—2），電子流聚焦成束（如虛綫所

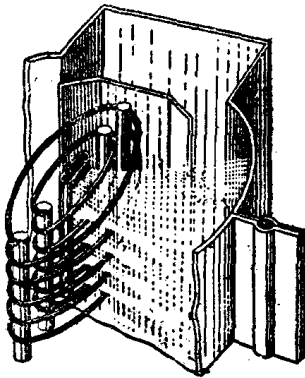


圖 1—2. 電子注四極管各電極的構造

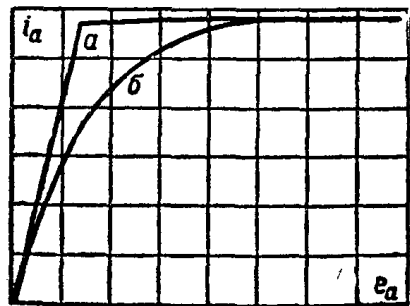


圖 1—3. 帘柵管的理想板極特性