

上册目录

第一章 緒論	1
--------	---

第二章 低頻放大器

§ 2-1. 引言	4
§ 2-2. 电子管在放大器中的工作	8
§ 2-3. 放大器的主要指标	20
§ 2-4. 研究放大器的方法	27
§ 2-5. 放大級的輸入阻抗	33
§ 2-6. 阻容耦合放大級	35
§ 2-7. 变压器耦合及扼流圈耦合放大級	50
§ 2-8. 功率放大級	56

第三章 反饋概論

§ 3-1. 引言	76
§ 3-2. 反饋电路的分类	77
§ 3-3. 反饋对放大器輸入阻抗的影响	79
§ 3-4. 反饋对放大器輸出阻抗与輸出电压稳定性的影响	88
§ 3-5. 反饋对放大系数的影响	91
§ 3-6. 反饋对放大电路中产生的干扰及失真的影响	90
§ 3-7. 反饋对放大器的頻率和相位特性的影响	92
§ 3-8. 阴极輸出放大器中負反饋的应用	95
§ 3-9. 寄生反饋	98

第四章 特殊放大器

§ 4-1. 直耦放大器	101
§ 4-2. 微弱电流放大器	120
§ 4-3. 选(低)頻放大器	140
§ 4-4. 运算放大器	143

第五章 低頻振蕩器

§ 5-1. 文氏桥式振蕩器	153
§ 5-2. 移相式振蕩器	157
§ 5-3. 其他型音頻振蕩器	158

第六章 整流器、稳压器和稳流器

§ 6-1. 引言	160
§ 6-2. 简单的整流电路和基本定义	161

§ 6-3. 整流器件的型式、分类以及对它们的要求	162
§ 6-4. 整流电路	164
§ 6-5. 平滑滤波器	177
§ 6-6. 整流器的实用线路	182
§ 6-7. 整流器的计算步骤	184
§ 6-8. 整流器用小功率电源变压器的计算步骤	185
§ 6-9. 整流器的计算举例(包括变压器的计算)	186
§ 6-10. 稳压器和稳流器	191

第七章 低频应用仪器设备

§ 7-1. 稳压电源(自制)	200
§ 7-2. 电子管毫伏计(仿苏 JB-9-2 型)	204
§ 7-3. 选频放大器(仿匈 1313 型)	206
§ 7-4. 阻容音频振荡器(自制)	214
§ 7-5. 电离真空计(清华勤二型)	219
§ 7-6. 阴极射线示波器(匈 1531 型)	223
§ 7-7. 阴极射线示波器(苏 30-7 型及清华仿 30-7 型)	223

附录 I 无线路路的基本元件

§ I-1. 引言	233
§ I-2. 电容器在高频工作时的特点	234
§ I-3. 电容器的类型和结构	236
§ I-4. 电感线圈在高频工作时的特点	242
§ I-5. 电感线圈的结构	245
§ I-6. 电阻元件的高频性能和结构	250
§ I-7. 常用无线路元件的色标	253

附录 II 电场和磁场的屏蔽

§ II-1. 引言	259
§ II-2. 电场的屏蔽	259
§ II-3. 磁场的屏蔽	262
§ II-4. 单导线和双导线的屏蔽	269

第一章 緒論

电子綫路是研究具有电真空器件的电路的学科。它是器件的直接使用者,又是器件生产过程中不可缺少的工具。

从 1895 年俄国发明家波波夫发明无线电后,直到 1913 年应用三极电子管做振荡器,其后又用三极电子管做成放大器时,才使得无线电工程得到空前迅速的发展,并且使无线电工程有可能应用于其他技术领域,另外也使无线电工程和电子学結成了标志着现代科学水平的一种科学——无线电电子学。

电子綫路具有反应迅速、控制灵敏、工作准确等一系列的优点,使得在发明六十年后的今天,它已經远远超出了通訊的狹窄范围,而被普遍的应用到各个先进的科学部門了。例如导航,医学,采矿,冶金,天文以及正在迅速发展的原子能和宇宙航行等等方面已經都使用上了电子设备。可以說:哪个技术部門还没有电子綫路的应用,它就得不到迅速的发展。可以預言:无线电电子学的发展前途是无限远大的。它将随着原子能的发展,星际旅行的逐步实现,以及一切科学的发展而更为迅速的輝煌的发展起来,而发挥它无比的优越性。

电子綫路多种多样的用途,可以依工作目的概括为: 1) 通訊; 2) 控制和 3) 量測等几大类。而电子仪器设备内部的綫路又可以依工作原理划分为下列基本电路: 1) 整流; 2) 放大(低頻,高頻,脉冲等); 3) 振荡(低頻,高頻,非正弦波等); 4) 非綫性(調制,檢波,变频等)等。

从一开始到现在,无线电电子学的发展过程中,綫路和器件总是相互促进的。器件特性的改善和新类型的出現都促使綫路性能

的提高。反过来綫路的发展又要求更新更好的器件，这也就促使器件的生产向前发展。可以預言：今后的发展过程中綫路和器件仍将是相互促进的。在器件生产过程中还直接使用着許多电子仪器，例如：电离真空計；高频炉；特性測試台等等。可以用方块图說明它們所起的作用。

1) 电离真空計是用来量測真空系統中真空度的仪器。它是利用殘留在真空系統中的气体被电离后产生的离子电流 I_+ 的大小測定真空度的設備。图 1-1 表示电离真空計的方块图。其中放大器是把微弱的离子电流 I_+ 放大，以便用电流表指示。电源是为了供給电离計管和放大器正常工作所需电压的。

2) 高频炉是在生产电子管时用来烘烤去气的設備。它主要是由自激振蕩和电源两部分組成，其方块图示如图 1-2。其中自激振蕩器是用来把直流电能变为高频交流电能的电路，而电源部分是供自激振蕩器所需的直流电能等的。

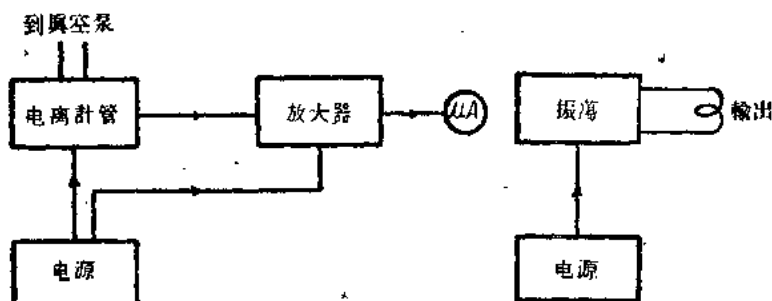


图 1-1. 电离真空計的方块图。

图 1-2. 高频炉的方块图。

3) 静态特性測試台是电子管生产中測定它的静态參量的設備。在測試中需要供給被測管各个电极以可以改变的电压，并且还要量測各电极的电压电流数值。它的方块图如图 1-3 所示。

4) 脉冲測試台是測定电子管脉冲特性的設備。它的方块图示如图 1-4。

从所举的几个例子可以看到电子线路在电子管生产过程中所起的作用。也可以看到基本电路在设备中所处的地位和所起的作用。显然不同的基本电路就要求不同类型的特性的电子器件。由此可知器件专业的从事人员必需具备一定的电子线路知识。

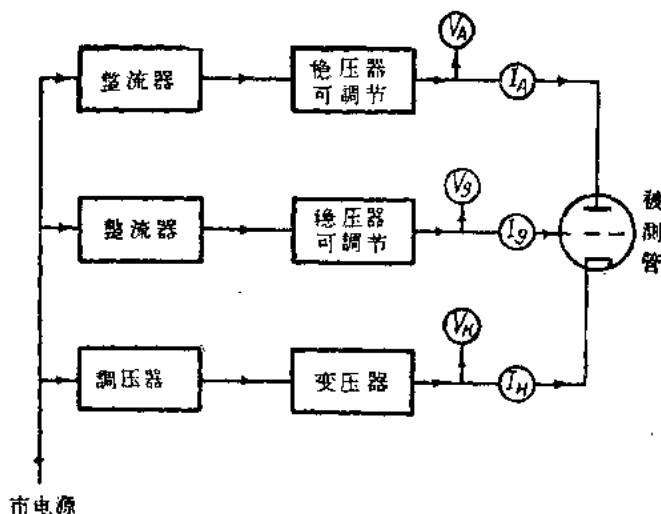


图 1-3. 三极管静态测试台方块图。

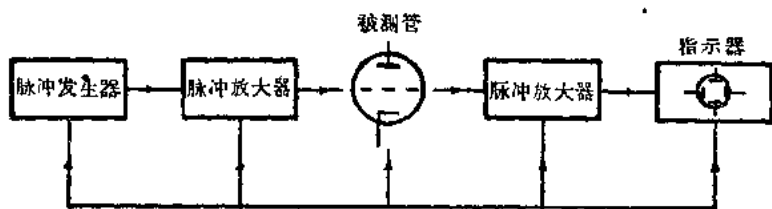


图 1-4. 脉冲测试台方块图。

第二章 低頻放大器

§ 2-1. 引 言

在現代工程或自然科學研究中，經常需要放大某些電的或非電的量，例如在有線廣播中要把聲音放大，在科學研究中要記錄宇宙綫輻射的強度或者水位的高低這些都要使用放大器，這些放大器都是“電”或“磁”的放大器，因為它們最方便，可靠，靈敏。

1. 放大器的分類

為了對放大器有一個全面的了解，應該把它作一個分類。

A) 按使用電子管與否來分類：

a) 無電子管放大器：如磁放大器，介質放大器，晶體管放大器等，本課程不研究它們。

b) 電子管放大器：在這種放大器中產生放大作用的是電子管，這類放大器是本課程所研究的對象，以後我們所談到的放大器都指這一類，現在這類放大器是應用得最多的。

B) 按放大器中放大信號的頻段來分類：

✓ a) 直流放大器：放大不變的或慢變的信號（頻率低至 0 或數赫），這種放大器在自然科學研究實驗室中應用較多，因為自然界中的很多信號是慢變的。

✓ b) 音頻及超音頻放大器：放大的信號的頻率屬於音頻範圍或者再高一些（比如說 10 赫——幾十千赫或更高一些）。有時也叫做低頻放大器，因為相對於無線電波的載頻（或稱高頻）而言，音頻是比較低的。這種放大器在無線電部門及與之有關係的部門中應用較多。

c) 寬帶放大器(或脉冲放大器): 这种放大器可以放大的信号的頻率範圍特別寬(比如說: 10 赫——10 兆赫)。一个寬帶放大器和一个脉冲放大器並沒有很大的区别, 要使被放大的脉冲信号放大以后的畸变小, 必須放大器的頻帶很寬。(以后会談到, 一个脉冲的平坦即慢变部分的畸变决定于放大器的低頻特性, 而其上升或下降即快变部分的畸变决定于放大器的高頻特性。) 所以一个脉冲放大器同时也是一个寬帶放大器, 只是它們的用途和研究方法上有些不同而已。寬帶放大器放大較寬頻帶內的单正弦波, 而脉冲放大器放大脉冲, 前者由頻帶的寬窄来設計, 而后者由允許的脉冲波形畸变来設計。

在这类放大器中有一种特殊的放大器叫視頻放大器, 它被用来放大电视中图象产生的信号, 其頻段大約是从 10 赫—6 兆赫。这类放大器是在低頻放大器的基础上建立起来的。

d) 選擇性放大器: 主要是高频(載頻)放大器, 其阳极的負載是有選擇性的振蕩回路, 其特点是只能放大在載頻附近相对于載頻很窄的頻段內的振蕩, 而对此頻段以外的振蕩放大很小或不放大。頻段复盖系数 $\frac{f_{\text{高}}}{f_{\text{低}}}$ 很小。

以上的放大器在本課程中都要討論, 但在本章中我們只研究 a) 及 b):

c) 按电子管的工作情况来分类:

图 2-1 是电子管在放大器中工作的原理图。在栅极上加一个正弦信号 u_g 我們来研究阳极电流 i_a (图 2-2) 的波形。

a) 甲类: 在 u_g 的整个周期以內都有 i_a 流通。 i_a 波形见图 2-2, b)。

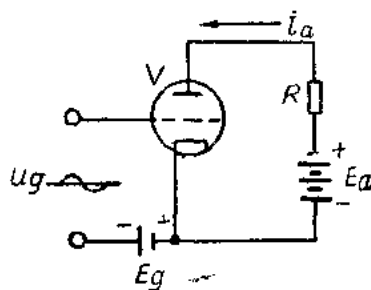


图 2-1. 电子管放大器工作原理图。

b) 乙类: 只在 u_g 的半个周期内有 i_a 流通, 其余半个周期内没有 i_a 流通(电子管被“截止”了)。

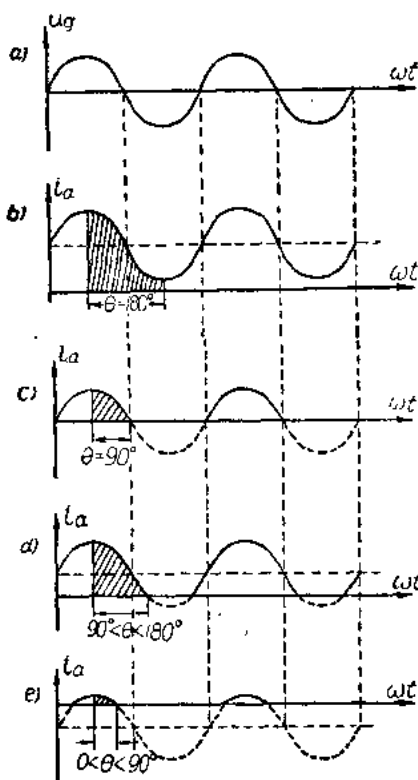


图 2-2. 电子管板流 i_a 流通情况图。

有时可以用“流通角”来表示“流通时间”。所谓流通角就是在一个周期内板流 i_a 从最大值到截止时(或者到最小值时)所需的时间。或者是在一个周期内板流流通时间的一半。所以甲类的流通角 $\theta = 180^\circ$; 而在乙类运用时流通角为 90° 。其板流 i_a 的波形见图 2-2, c)。

o) 甲乙类: 介乎甲类与乙类之间。 i_a 并不是整个周期都有, 但是 i_a 流通的时间大于半个周期, 或者说其流通角:

$$90^\circ < \theta < 180^\circ,$$

i_a 波形如图 2-2, d) 所示。

d) 丙类: 流通角:

$$0^\circ < \theta < 90^\circ,$$

即 i_a 流通的时间小于半个周期(图 2-2, e)。

在低频放大器中的电子管的工作情况可以是甲类(低频电压放大器全是用甲类); 乙类和甲乙类(低频功率放大器可以是这些类); 但不会是丙类。

D) 按放大器各级间耦合的形式分类(指低频放大器), 可分

为:

- a) 阻容耦合放大级;
- b) 变压器耦合放大级;
- c) 扼流圈耦合放大级。

其他的分类法还很多: 如有按放大器放大的是电压或功率划分为电压放大级或功率放大级, 按应用反馈与否分为反馈放大器与无反馈放大器等。

2. 放大器的方块图

一个完整的放大器通常是由很多放大级组成, 它们的方块图如图 2-3 所示。



图 2-3. 放大器的方块图。

由图可以比较清楚地看出一个低频放大器的作用是把由信号源来的微弱的信号的电压及功率放大后送给负载。这里的信号源可以是微音器, 收音机的检波器及前级放大器(或放大级)等, 负载可以是扬声器; 电话机, 无线电发射机的调制级, 录音器等。

一个放大器的级数可多可少, 视需要而定。当级数很多时, 图中的中间级可以不止一级。在各放大级中按功用来分可分为两类: 第一类是电压放大级, 顾名思义, 它是用来放大电压的, 当然在这同时也放大了原来振荡的功率, 但这个功率的数值是微不足道的, 下级对这一级也不需要它输出功率而只需要电压。一个放大器的前级和中间级常是电压放大级。第二类是功率放大级, 当在它的输入端加上信号电压时, 在其输出端可以输出功率给下级或负载,

一个放大器的末級一般多是功率放大級，有时末前級也是功率放大級。

所以把一个放大器或它的任一个放大級可以看作一个有源四端网络，经过它后，信号的功率可以得到放大，即

$$P_{出} > P_{入} \quad (2-1)$$

为了組成这个有源四端网络，我們利用了电子管。用一个小功率的輸入信号来“控制”电子管，使它把直流功率变成信号(交流)功率輸出。这个輸出的信号功率(或电压)可以比輸入信号功率(或电压)大得很多，这样就达到了放大的目的。

为此我們必需研究电子管在放大器中的工作。

§ 2-2. 电子管在放大器中的工作

1. 电子管的特性

在本节中并不企图深入地研究电子管的基本性质，因为这方面的知識已經或将要在别的专门課程中仔細研究。在这里只繪出

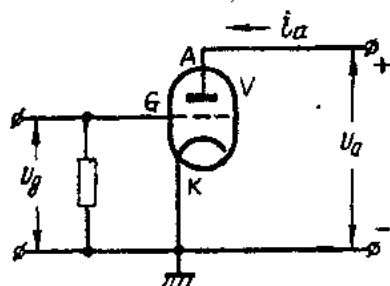


图 2-4. 三极管。

三极管及五极管的静态特性曲线族(其小信号等效电路及静态参量将要在后面讨论)，这是为以后放大器的分析所必需的。

A) 三极管的静态特性曲线族：

如图 2-4，一个三极管，如果把栅极与阴极間电压叫做 u_g ，阳极与阴极間的电压叫做 u_a ，则：

$$i_a = f(u_g, u_a). \quad (2-2)$$

即阳极电流 i_a 决定于栅极电压(对阴极而言) u_g 和阳极电压 u_a 。所谓静态特性曲线即在 u_g 固定不变的前提之下 i_a 和 u_a 的关系

曲线。对于每个不同的固定的 u_g 值又可以得到其他的静态特性曲线，这些不同的静态特性曲线就组成了所谓静态特性曲线族，根据实验及理论分析证明，三极管的静态特性曲线族如图 2-5 所示。

每一条静态特性曲线在下面都比较弯曲，而上面则近似一条直线，每条曲线之间的距离大致相同。

B) 五极管的静态特性曲线族：

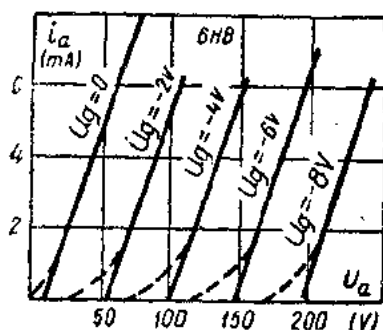


图 2-5. 三极管的静态特性曲线族。

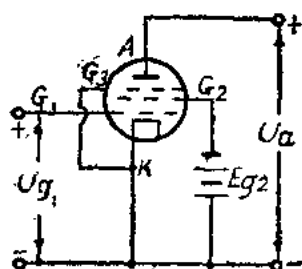


图 2-6. 五极管。

五极管的主要电极有五个(灯丝除外)，除了三极管原有的阴极(k)阳极(a)和控制栅极(g_1)以外，又加入了两个栅极。一个叫屏栅极(g_2)，一个叫抑制栅极(g_3)。前者的主要作用是把控制栅极和阳极“屏蔽”起来，使其间之电容量大为减少，这对线路的工作是有好处的(这点在以后要谈到)。后者(指抑制栅)的作用是抑制阳极的二次电子发射，这样可以改善电子管的特性。

在使用五极管时，一般屏栅极接在一个较大的电压 E_{g2} 上；而抑制栅则多与阴极相连，即在任何时候屏栅与抑制栅的电压(对阴极而言，以后类此)都不变。所以阳极电流 i_a 仍然决定于控制栅电压 u_g 和阳极电压 u_a (当 E_{g2} 和 E_{g3} 一定时)。这样又可以用同样方法求出五极管的静态特性曲线族。其形状如图 2-7 所示。

可是其形状与三极管的有很大不同，五极管静态特性曲线的特点是：

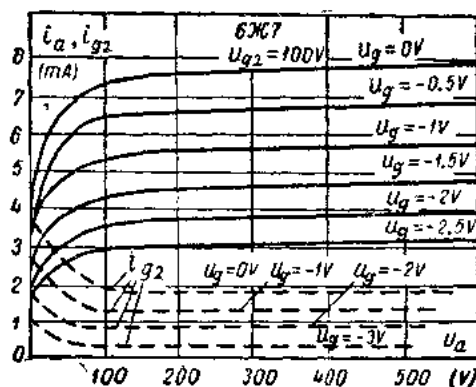


图 2-7. 五极管的静态特性曲线族。

a) 在 u_a 较小时, 不同 u_{g1} 的各特性曲线近似重合在一起。随着 u_a 的加大, i_a 很快加大。

b) 在 u_a 较大时, 再增加 u_a 时 i_a 几乎不变, 即 u_a 较大时, u_a 对 i_a 的控制作用很小, 这时曲线几乎变成水平直线。

c) 当 u_{g1} 的差别相同时, 作出的各特性曲线, 在平坦部分的距离是上面疏下面密。

有了上面的关于电子管的基本的知识就可以研究它在放大器中的工作原理了。

2. 放大级的工作原理

在研究这个问题之先, 让我们先回忆一下在电工基础中学过的非线性电路的分析。假如一个非线性电阻 R_1 和一个线性电阻 R_2 串联, 外加电压为 U_0 (图 2-8)。我们可以用图解法求出流过的电流 I 和两个电阻上的压降 U_{R_1} 和 U_{R_2} 。方法是这样的 (见图 2-9)。

A) 先作出 R_1 的伏安特性曲线。

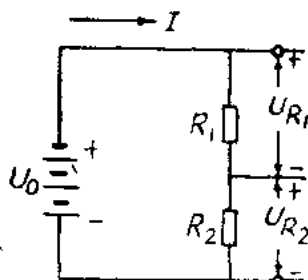


图 2-8. 线性电阻与非线性电阻串联电路。

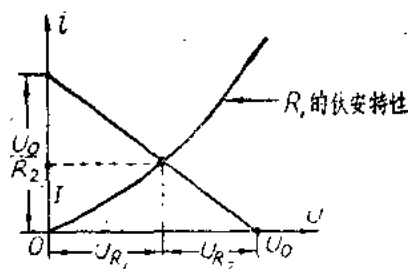


图 2-9. 图解法分析线性电阻与非线性电阻串联电路。

B) 在电压轴上找一点，大小等于外加的电压 U_0 ，在电流的轴上找一点其大小等于 $\frac{U_0}{R_2}$ ，通过此两点连一条直线。此直线与非线性电阻 R_1 的伏安特性曲线的交点决定了流过的电流 I 及 U_{R1}, U_{R2} 。

现在，我们把这个方法应用到放大级的分析上。

一个放大级的工作原理可用图 2-10 来说明，图中 V 是一个三极管，在其栅极电路上有两个电压，一个是直流的栅偏压 E_g （其极

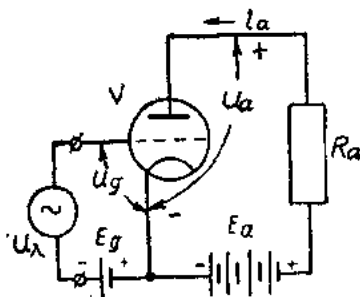


图 2-10. 三极管放大级原理图。

性为阴极是正，栅极是负），其功用是保证当放大级工作时（即栅极有交流信号 u_λ 存在时）的任何瞬间栅极电位永远小于阴极电位（即图中的 u_g 永远是负值）。另一个是交流的信号 u_λ ，它是将被这个放大级放大的信号。在 V 的阳极电路中

有一个直流电压电源 E_a 和一个负载电阻 R_a 。当栅极有信号 u_λ 存在时，由于栅极的控制作用在阳极电流中引起了相应的交流信号分量，它在 R_a 上形成了压降，这就是被放大的信号，以后就要在

R_a 上“取”出信号輸出。

比較一下图 2-8 和图 2-10 就可发现，图 2-10 的綫路也是一个直綫性电阻 R_a 和一个非綫性电阻 V 的串联。只是现在的非綫性电阻是一个电子管，它的伏安特性綫(i_a 和 u_a 的关系綫)还决定于栅极上的电压 u_g ，只要給定一个 u_g 就有一条伏安特性綫，給定另一个 u_g 又有另一个伏安特性。图 2-5 所示的静态特性綫族实际上也就是它的伏安特性綫族，所以我們可以应用上面提到的图解法来分析这个放大級的工作原理。

我們首先查出这个电子管的静态特性綫族，然后根据前面的方法通过 u_a 軸上的 E_a 点和 i_a 軸上的 $\frac{E_a}{R_a}$ 点連一条直綫，通常把这条直綫叫做負載綫(见图 2-11, c)。

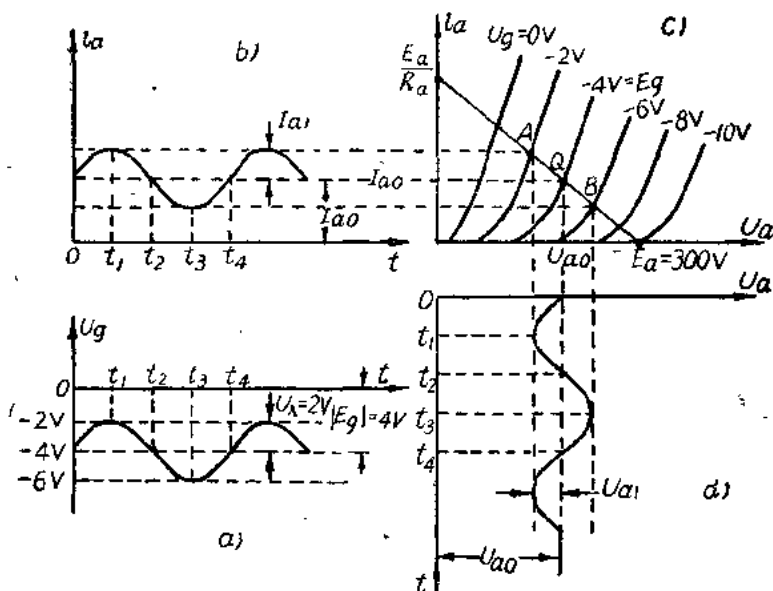


图 2-11. 图解法分析三极管放大級的工作原理。

a) 栅极输入訊号；b) 阳极波形；c) 阳极电流静态特性綫及負載綫；d) 阳极电压变化波形。

如果在栅极上还没有加信号, 即 $u_g = E_g + u_{\lambda} = E_g$ (见图 2-10)。设 $E_g = -4$ 伏, 这样电子管的伏安特性曲线就是 $u_g = -4$ 伏的一条静态特性曲线, 它与负载的交点 Q 决定了没有信号时的阳极电流 I_{a0} 和阳极电压 U_{a0} , 我们把这一点 Q 叫做工作点。

如果栅极上加了信号, 即 $u_g = E_g + u_{\lambda} = E_g + U_{\lambda 1} \sin \omega t$ (见图 2-11, a)。在本例中 $E_g = -4$ 伏, $U_{\lambda 1} = 2$ 伏。可以根据各个时间的 u_g 找出新的静态特性曲线, 再由它与负载线之交点求出此时的 i_a 和 u_a 。例如当 $t = t_1$ 时, $u_g = -2$ 伏。此 $u_g = -2$ 伏的一条静态曲线与负载线交于 A 点, 这点决定了 $t = t_1$ 时的 i_a 和 u_a , 同理可以求出 $t = t_2, t_3, t_4$ 时的 i_a 和 u_a 。根据这些 i_a 和 u_a 值, 可以作出 i_a 和 u_a 的波形(图 2-11, b 和 d)。

由这些波形图中可以得出下面几条简单的理论:

A) 如果: $u_g = E_g + U_{\lambda 1} \sin \omega t,$ (2-3)

则 $i_a = I_{a0} + I_{a1} \sin \omega t,$ (2-4)

$u_a = U_{a0} - U_{a1} \sin \omega t,$ (2-5)

即 i_a 和 u_a 中也有一个直流分量和交流分量。

B) i_a 中的交流(信号)分量和 u_g 中的交流分量(输入信号 u_{λ})同相, 而 u_a 中的交流分量和 u_g 中的交流分量反相。由图 2-10 的线路图很容易说明这一点, i_a 的方向是由阳极通过电子管到阴极, 它在 R_a 上造成压降是下正上负, 与 u_a 所标明之方向(阳极是正阴极是负)相反。对其交流分量而言 u_a 之交流分量与 i_a 之交流分量反相, 故也与 u_g 之交流分量反相。

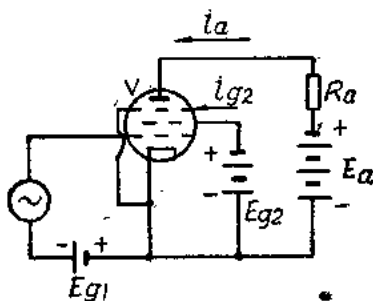


图 2-12. 五极管放大器的工作原理图。

C) U_{a1} 可以比 $U_{\lambda 1}$ 大得多, 在本例中 U_{a1} 大约有 40 伏, 而

U_{A1} 只有 2 伏, 放大系数 $K = \frac{U_{A1}}{U_{A1}}$ 大約为 20。

对于五极管我們可以用同样方法来图解分析, 下面简单的說明一下:

假設栅极电压和上面三极管放大級的栅极电压一样:

$$u_g = E_g + u_{A1} = E_g + U_{A1} \sin \omega t = -4 + 2 \sin \omega t \text{ (伏)},$$

其波形如图 2-11, a) 所示, 我們可以用和分析三极管放大級时完全一样的步驟去求出 i_a 和 u_a 的波形(如果說有不同的話, 只是特性曲綫的形状不同而已), 在这里就不再重复了。

对于五极管还有一个特殊的问题——还要找出屏栅电流 i_{g2} 的波形, 因此必須先有屏栅电流对阳极电压的关系曲綫, 图 2-13

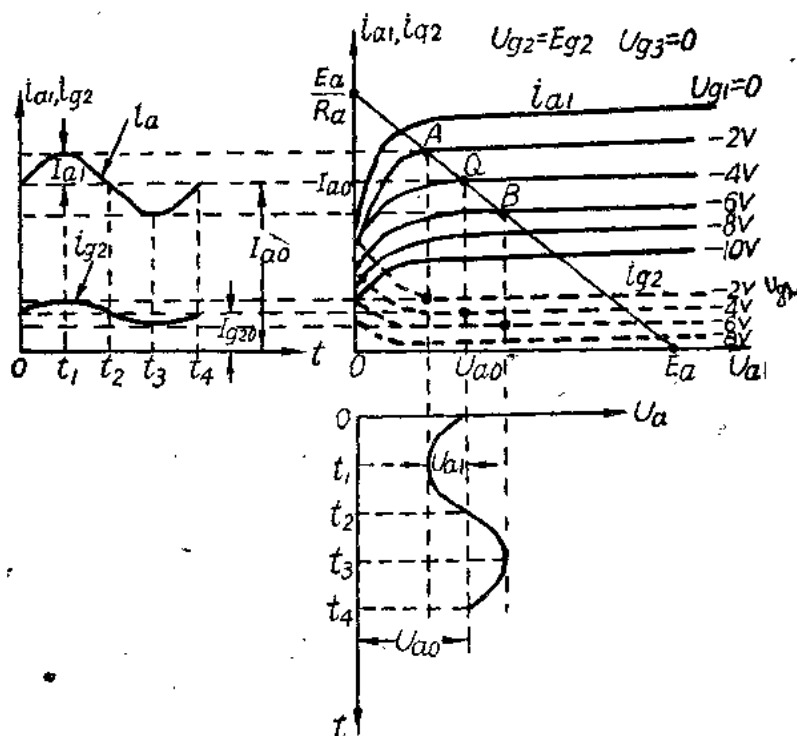


图 2-13. 图解法分析五极管放大級的工作原理。

下面的四条虚曲线就是,它们分别对应于 $u_{g1} = -2$ 伏, -4 伏, -6 伏, -8 伏(在 $u_{g2} = E_{g2} =$ 常数, $u_{g3} = 0$ 伏),这些曲线的特点是:

A) u_{g1} 愈大, i_{g2} 也愈大;

B) 当 u_a 很小时, i_{g2} 很大(此时 i_a 很小),而当 u_a 较大时, i_{g2} 很小,并且随 u_a 的变化很小(曲线趋于水平)。和 i_a 的曲线形状比较一下可知,两者的变化趋势相反,这是由阳极和屏栅极电流分配关系所决定的,在 u_a 很小时通过控制栅极的电子大都被屏栅极截去,故 i_{g2} 大,而 i_a 小。在 u_a 较大时这些电子大都被阳极夺去,故 i_a 大而 i_{g2} 小。在任何 u_a 之下,他们的总和大致是不变的。

有了 i_{g2} 对 u_a 的关系曲线就可以求出 i_{g2} 的波形。见图 2-13, 对应于工作点 Q , 阳极电压 $u_a = U_{a0}$, $u_{g1} = -4$ 伏, 根据这两个数值就可以找到这时的 i_{g2} 值(注意: E_{g2} 和 u_{g3} 在工作过程中永远是常数), 此时 $i_{g2} = I_{g20}$ 。当 $t = t_1$ 时, $u_{g1} = -2$ 伏, $u_a = u_a(t_1)$, 又可找到 t_1 时的 i_{g2} 值……这样下去即可找每个时间的 i_{g2} 值, 于是 i_{g2} 的波形也就得到了(图 2-13, 左面下的图形), 由这里又可得出结论: i_{g2} 中也包含着直流分量和交流(信号)分量; 其交流分量与栅极输入信号分量同相。

3. 放大级的各部分电路

图 2-10 给出的线路只是一个原理线路, 实际的线路比它要复杂些, 图 2-14 是一个比较完整的线路。

与图 2-10 比较, 这里多了 C_{g1} , R_{g1} 与 C_g , R_g , 现在来说明其作用:

A) 耦合电路:

C_g 和 R_g 的作用是把被这一级放大后的输出信号引出去故名耦合电路。

前面已提到, 当输入端有信号作用时, 放大级上的电压除了有