

电 子 电 路

(下 册)

西安交通大学 唐立森 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分三册。上、中册为晶体管电路部分，包括晶体管工作原理与特性，各种放大电路，线性集成电路，振荡、调制、解调与变频电路，电源和脉冲电路，数字集成电路基础等内容。下册为电子管电路部分，包括电子管的工作原理与特性，各种放大、振荡、调制电路等内容，着重讨论高频大功率放大电路。

本书可作为高等工科院校电真空器件专业和电子类非整机专业的教材，也可供有关人员自学与参考。

电子电路（下册）

西安交通大学 唐立森 编

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张16¹/₈ 372千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷 印数：00,001—22,300册

统一书号：15034·1953 定价：1.70元

前 言

本书是全国高等院校工科电子类电真空器件专业统编教材之一,也可以作为电子器件、电子物理等非整机专业学习电子电路课程的教材和科技人员的参考书。讲授本书的目的,是培养学生掌握一定的电子电路基础知识,对一般的电子电路能进行分析计算,并具有必要的实践技能。

在本书编写过程中,我们力求运用辩证唯物主义观点阐明电子电路的基本规律,讲清楚基本内容,又有较广的知识面,并注意理论联系实际,以培养学生独立思考和分析、解决问题的能力。本书的选材力求适应当前现实和发展的需要,删繁就简,适当地引进了一些新内容。

全书共分三册。上、中册为晶体管电路,由南京工学院电子技术教研组编写;下册(约50学时)为电子管电路,由西安交通大学电真空器件与技术教研室唐立森编写。全书由成都电讯工程学院裘明信主审,成都电讯工程学院陈汝全、吕祥珍,浙江大学王一鸣参加了审稿工作。南京工学院李仕澂、西安交通大学绘图组参加了本书的制图工作。在编写过程中,兄弟院校给了大力的支持和帮助,对此深表感谢。

为了便于读者单独选用电子管电路部分的内容,本书下册在编写时保留了适当的独立性。

由于我们水平有限,加之编写时间仓促,难免有不少缺点和错误,衷心希望使用本书的师生和读者,提出宝贵意见。

编者 1979. 2

目 录

第十二章 电子管的工作原理和特性1

§ 12.1 电子管的阴极和真空二极管1

12.1.1 电子管的阴极1

12.1.2 真空二极管的结构3

12.1.3 真空二极管的伏安特性和定额3

§ 12.2 真空三极管7

12.2.1 真空三极管的结构和栅极控制作用7

12.2.2 真空三极管的二分之三次方定律8

12.2.3 真空三极管的静态特性曲线8

12.2.4 真空三极管的参数和定额12

§ 12.3 真空四极管15

§ 12.4 真空五极管18

§ 12.5 束射四极管20

§ 12.6 大功率发射管22

§ 12.7 电子管与晶体管的比较30

附录12.1 电子管型号命名方法31

习 题33

第十三章 电子管低频放大电路34

§ 13.1 电子管低频放大器的基本电路和工作原理34

§ 13.2 电子管低频放大电路的分析方法36

13.2.1 图解法36

13.2.2 微变等效电路法46

§ 13.3 电子管低频电压放大电路50

13.3.1 阻容耦合电压放大器各元件的作用50

13.3.2 阻容耦合电压放大器的频率特性51

13.3.3 电子管的输入阻抗和阻容耦合放大器的频带加宽问题57

§ 13.4 电子管低频功率放大电路61

13.4.1 单管甲类功率放大器61

13.4.2 推挽功率放大器68

§ 13.5 电子管放大电路中的负反馈73

13.5.1 反馈放大器的放大倍数74

13.5.2 负反馈对放大器性能的改善76

13.5.3 串联电流负反馈79

13.5.4 串联电压负反馈79

13.5.5 负反馈在放大器中的应用举例82

§ 13.6 电子管低频放大电路与晶体管

低频放大电路的比较83

习 题86

第十四章 电子管高频功率放大电路94

§ 14.1 高频功率放大器的工作原理95

14.1.1 电路组成和特点95

14.1.2 电流和电压波形97

14.1.3 能量关系98

§ 14.2 高频功率放大器的工作状态和负载特性99

14.2.1 动态特性曲线和工作状态100

14.2.2 电子管特性曲线的直线理想化103

14.2.3 理想化动态特性曲线106

14.2.4 阳流脉冲的谐波分析和计算108

14.2.5 负载特性112

§ 14.3 高频功率放大器工作状态的计算113

14.3.1 工作状态计算的一般考虑114

14.3.2 用解析法计算放大器的工作状态115

14.3.3 用图解法计算放大器的工作状态123

§ 14.4 高频功率放大电路和调试136

14.4.1 馈电电路136

14.4.2 输出回路与级间耦合回路142

14.4.3 并联与推挽电路145

14.4.4 中和电路148

14.4.5 共栅极电路154

14.4.6 高频功率放大器的调试156

14.4.7 倍频器159

§ 14.5 丁类和戊类高频功率放大器的基本工作原理161

习 题164

第十五章 电子管自激振荡电路166

§ 15.1 电子管振荡器建立振荡的物理过程166

§ 15.2 电子管反馈式自激振荡器的平衡和稳定167

15.2.1 准直线性方法167

15.2.2 振荡的平衡条件170

15.2.3 振荡的稳定条件172

15.2.4 振荡器的稳定状态的建立174

15.2.5 振荡器电路参数对振荡振幅的影响	179	16.2.2 工作状态和调制特性	200
§ 15.3 电子管自激振荡器电路	180	16.2.3 阳极电路的功率和效率	201
15.3.1 自激振荡器电路的构成法则	180	§ 16.3 阳极调幅	203
15.3.2 互感耦合调阳振荡器电路的分析	182	16.3.1 工作原理	203
15.3.3 振荡器的调整	184	16.3.2 工作状态和调制特性	205
15.3.4 感应加热用高频电炉——电子管高频 振荡器电路举例	185	16.3.3 阳极电路的功率和效率	207
§ 15.4 寄生振荡的产生、检查和消除	188	16.3.4 阳极-屏栅极同调	210
15.4.1 寄生振荡的产生	188	16.3.5 被调放大器和调制器对发射四极管的 要求	211
15.4.2 寄生振荡的检查	190	§ 16.4 已调波放大	212
15.4.3 寄生振荡的消除	190	§ 16.5 脉冲宽度调制的调幅方法	214
§ 15.5 高频大功率振荡器对电子管的 要求	192	§ 16.6 单边带发送	217
习题	192	16.6.1 单边带信号的特点与单边带通信	218
第十六章 电子管调制电路	194	16.6.2 单边带信号的产生和发送	226
§ 16.1 振幅调制的一般原理	194	16.6.3 单边带信号的非线性失真	232
16.1.1 已调波的功率	195	16.6.4 单边带发射机线性放大器对发射四极 管的要求	241
16.1.2 调幅的方法	196	§ 16.7 脉冲调制器	241
16.1.3 对调幅的要求	198	16.7.1 脉冲调制的基本方法	242
§ 16.2 栅偏压调幅	199	16.7.2 刚性管制制器	243
16.2.1 工作原理	199	16.7.3 脉冲调制器对脉冲调制管的要求	248
		16.7.4 软性管制制器	249
		习题	251

第十二章 电子管的工作原理和特性

在本书前两册中,讨论了半导体器件的工作原理和特性,以及由它们组成的各种电子电路。从这一章起,将讨论电真空器件的工作原理和特性,以及由它组成的某些电路。由于半导体器件的迅速发展,具有体积小、重量轻、耗电省、寿命长、宜于实现集成化等优点,许多电子电路中的电真空器件逐渐被半导体器件所取代。但是,目前半导体器件还存在着它的弱点,尤其在高频大功率方面仍有很大困难。因此,在这些电路中还只能使用电真空器件(电子管)。此外,在现在新设计的整机中,为了充分发挥各器件的特点,在电路中也混合地使用着固体组件、晶体管和电子管。另外,还有不少电子管的仪器设备在使用着。因此,对电子管的某些电路也应有一定的了解。对于从事电真空器件设计和制造的人员来说,了解电子电路对电子管提出的技术要求,从而对电子管的特性和参量有进一步的了解,这对设计和制造性能优良的电子管来说也是很必要的。

§ 12.1 电子管的阴极和真空二极管

12.1.1 电子管的阴极

电子管是利用真空中的自由电子在电场作用下运动的原理所做成的电子器件,所以,电子管中发射电子的阴极,就成为电子管的“心脏”部分。为此必须首先了解常用阴极的主要性能特点。

电子管中应用最广的为热电子发射阴极,主要有以下三种:

一、纯钨阴极

纯钨阴极是电子管中使用最早的一种阴极,由于它具有发射稳定、富有延展性(可拉成细丝)的优点,又不因管内残余气体电离产生的正离子的轰击而降低发射性能,故适用于高阳极电压的电子管中。纯钨阴极的缺点是它的逸出功[●]大,工作温度高(2500~2650K),所以发射效率低,需要较大的加热功率,很不经济。因此,除了某些特殊情况之外,很少使用。

二、碳化钨钍钨阴极(简称碳化钍钨阴极)

这种阴极是在钨中加入少量的钍,然后经过碳化而成。在这种钍钨阴极中,由于钨阴极表面的钍单原子层的极化作用,降低了钨的逸出功,所以发射效率较高。在得到同样的阴极发射电流密度的条件下,它的使用温度较纯钨阴极为低(一般在2000K左右)。其主要缺点是机械强度较低,容易断裂。另外,阴极温度对它的寿命影响很大,因此,要求灯丝电压稳定。

三、氧化物阴极

氧化物阴极是在钨丝或镍管上涂一层由碳酸钡、碳酸钙和碳酸锶的细粉末和胶合剂组

● 在绝对温度零度时,金属中具有最大速度的自由电子从金属中逸出而必须由外界供给的能量,称为逸出功。

成的混合物,经过加热分解和激活而成。其优点为逸出功小,工作温度低(1000K左右)。因此,它是三种阴极中发射效率最高的一种。图12-1-1表示出三种常用的热阴极的发射电流密度 J_K 与阴极温度 T_K 的关系曲线。

氧化物阴极的优点除以上所述外,它还具有强大的脉冲发射特性。当在阳极和阴极间加以占空系数较大的脉冲电压时,可得到很大的脉冲发射电流,这是氧化物阴极特有的性能。所以这种阴极还广泛用于脉冲工作的电子管中。

氧化物阴极的缺点是容易“中毒”。所谓“中毒”,是指阴极在有害气体、固体等作用下阴极的逸出功增大、发射性能下降的现象。当灯丝电压不足,阴极温度过低,则氧化物阴极更易中毒。此外,氧化物阴极承受正离子轰击的能力较差,所以当阴极连续发射(非脉冲发射)时,只能适用于阳压低于3000伏的电子管中。

由上可见,氧化物阴极由于工作温度低、效率高,广泛应用于小功率电子管和脉冲发射管中。纯钨阴极虽工作温度高、效率低,但它发射稳定、耐正离子轰击能力强,所以在高压整流管和部分大功率发射管中仍有采用。而碳化钨钨阴极既有较低的工作温度,较高的发射效率,抗中毒能力和耐正离子轰击能力又较氧化物阴极强,因此随着真空技术的发展,现已广泛地应用于大功率发射管中。

热阴极的加热方式有直热式和间热式两种,如图12-1-2(a)、(b)所示。直热式阴

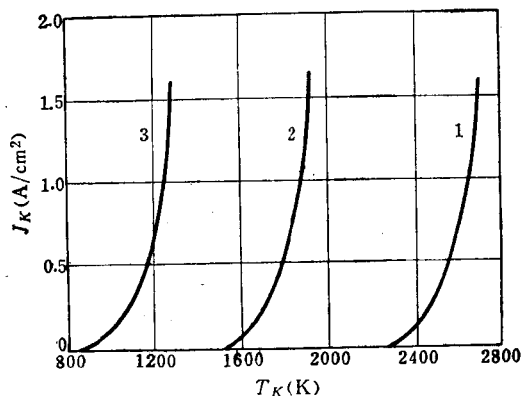


图12-1-1 三种常用的热阴极的发射电流密度 J_K 与阴极温度 T_K 的关系曲线

1—纯钨阴极; 2—碳化钨钨阴极; 3—氧化物阴极。

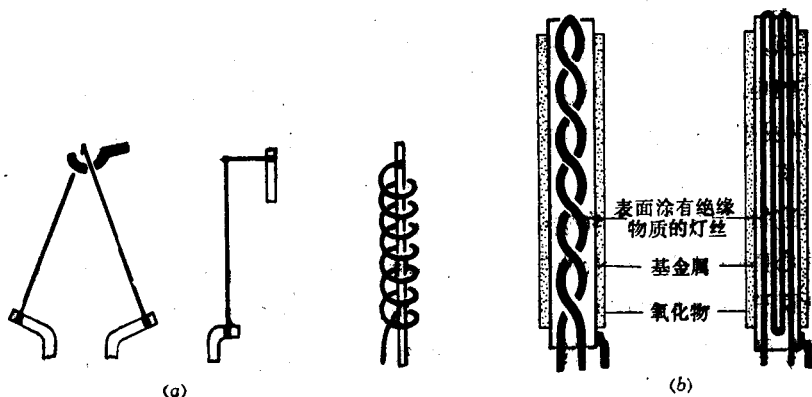


图12-1-2 直热式和间热式阴极

极也就是灯丝,当灯丝通以电流后被加热而直接发射电子;或者在灯丝上涂敷氧化物阴极材料,则灯丝加热后使氧化物阴极材料发射电子。间热式阴极和灯丝是互相绝缘的,灯丝通以电流使阴极间接被加热而发射电子。直热式阴极在用50赫交流电加热时,在阳极电流

中会引起干扰, 故它除了在整流二极管中还使用外, 一般收音放大管中都采用间热式阴极。

12.1.2 真空二极管的结构

真空二极管的性能和用途与半导体二极管类似, 都具有单向导电性, 因此都可作整流、检波、开关和可变电阻之用。但它们的工作原理和结构却不相同。

图 12-1-3 绘出了 1Z11 型真空二极管的结构及其代表符号。它的外壳是一个密封的玻璃管, 管内抽成高度真空, 装入阴极 K 和阳极 a , 阴极为直热式氧化物阴极。阳极多用镍、镀镍铁或敷铝铁材料做成。灯丝引线与穿过玻璃芯柱的管针相连接。由于阳极与阴极间有高电压, 故阳极引线单独由管顶阳极帽引出。当阳极与阴极间加上正电压(阳极为正、阴极为负)时, 从阴极发射的电子, 受电极间电场的作用而飞向阳极, 在管外电路中形成电流。反之, 若加上反向电压时, 则电子管不导电。因此, 真空二极管具有单向导电的性能。

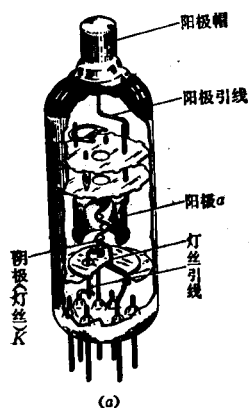


图 12-1-3 真空二极管的结构及其符号

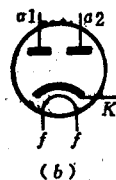
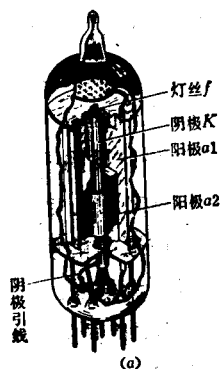


图 12-1-4 双二极管整流管的结构和符号

为了使用方便和特性一致, 通常把两个二极管密封在同一个管壳内, 组成双二极管。图 12-1-4 绘出了 6Z4 型双二极管整流管的结构和它的符号。管内有一个公共的间热式阴极和两个阳极。由于使用的阳-阴极间电压不高, 阳极引线都与灯丝、阴极引线都从管子底部的管针引出。

12.1.3 真空二极管的伏安特性和定额

为了研究真空二极管的性能, 可以利用图 12-1-5(a) 所示的电路, 用实验的方法测出管子的阳极电压 U_A 与阳极电流 I_A 的关系曲线, 如图 12-1-5(b) 所示。这种曲线称为真空二极管的伏安特性曲线。

由图 12-1-5(b) 可知, 真空二极管的伏安特性明显地分成二段。在曲线的上升部分 ab 段, 阳极电流 I_A 随着阳极电压 U_A 的增加而增加, 与阴极温度几乎无关。这时阴极所能发射的电子并不全部都能到达阳极, 只有一部分到达阳极构成阳极电流。伏安特性曲线的这个区域称为空间电荷限制区域。曲线的 bc 段呈平坦状, 这是因为阴极所能发射的电子全部到达阳极, 而使阳极电流出现饱和现象。这时阳极电流 I_A 几乎与阳极电压 U_A 无

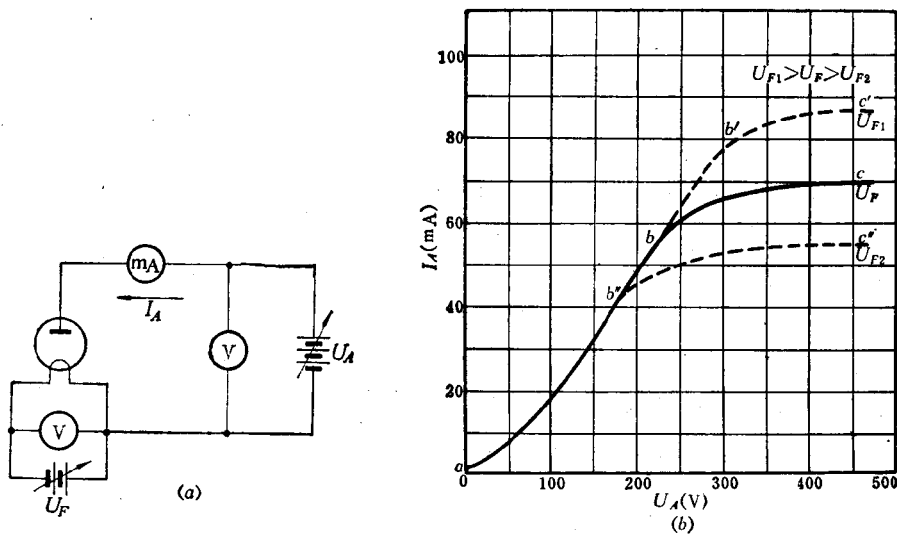


图12-1-5 真空二极管伏安特性测量电路及特性曲线

关，而只由阴极温度（或灯丝加热电压 U_F ）所决定。当灯丝加热电压增加到 U_{F1} 时，则发射电流增加，曲线 bc 段上升为 $b'c'$ 段；反之，当 U_F 降低到 U_{F2} 时，则曲线 bc 段下降为 $b''c''$ 段。伏安特性曲线的这个区域称为温度限制区域。下面就来讨论形成上述曲线的原因。

以平板二极管为例。设阴极和阳极是二块平行的金属板，且电极的长度和宽度比极间距离 d_{AK} 大得多，电极之间的电场垂直于电极表面。为了便于分析，再假定电子从阴极发射出来的初速为零。在通常的阴极温度下，电子离开阴极时的平均初始动能不超过 0.3 电子伏，所以在阳压不是太低时，电子的初速可以忽略不计。

图 12-1-6 绘出了在相同的阳压和不同的阴极温度下，平板二极管的几种极间电位分布的情况。曲线 1 表示阴极没有加热的情况，这时没有电子从阴极发射出来，电极间的电场是均匀的，极间电位分布呈直线。当阴极加热温度不高，阴极发射电子还较少时，由于在电极空间的电子形成负的空间电荷，使空间各点的电位下降，于是极间电位分布不再是直线而是稍稍下凹的曲线，如曲线 2 所示。由于空间电子数目还不太多，它们所形成的负的空间电荷的影响还不太大，

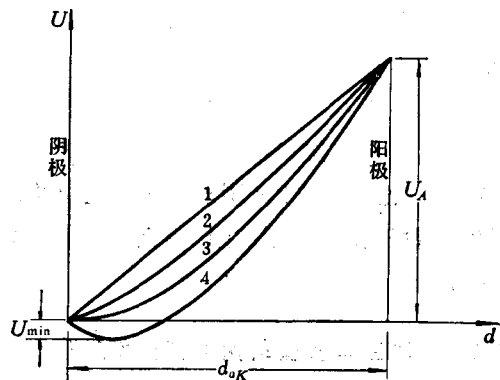


图12-1-6 平板二极管中的电位分布

所以在阴极表面的电场强度仍大于零，也就是说，在阴极表面存在着把电子向阳极方向加速的电场。这时，电子一旦从阴极发射出来就被拉向阳极。这样，从阴极发射出来的全部电子都一定能到达阳极，阳极电流等于阴极的发射电流，它决定于阴极的工作温度而与阳极电压没有明显的关系。这就是阳极电流受温度限制的情况。提高阴极的温度，阴极就发射更多的电子，于是阳流增大，空间的电子电荷密度增大，空间各点的电位进一步降低，电位分布曲线更加下凹，阴极表面的场强进一步下降。当阴极温度升高到一定值时，阳极

电压在阴极表面产生的外加电场可被电子电荷产生的电场所抵消,而使阴极表面的场强为零,如曲线3所示。这时如果再提高阴极温度,尽管阴极有能力提供更多的电子,但是能够进入电极空间到达阳极的电子数目却不再增加,因而阳流也就不会再增大。这时管内电子的运动处在动平衡状态,每秒钟到达阳极的电子数恰好等于从阴极进入电极空间的电子数。当阳极电压改变时,阴极表面的外加电场也跟着改变,由阴极进入电极空间的电子数也要相应地改变;但只要阴极具有足够高的发射能力,总会保持阴极表面场强等于零的动平衡状态。所以,阳极电流由于受电子空间电荷的限制,只与外加电压有关,而与阴极温度无关,这种现象称为电流受空间电荷限制。实际上,电子从阴极逸出具有一定的初速,这时在阴极前面形成与电子初速相当的最低电位点 U_{min} ,形成新的动平衡状态,如曲线4所示。

对平板二极管,在空间电荷限制情况下(即伏安特性曲线的上升部分 ab 段),假设电子从阴极发射出来时的初速为零,可以从理论上推导出阳极电流 I_A 与阳极电压 U_A 的 $3/2$ 次方成比例,即

$$I_A = GU_A^{3/2} \quad (12-1-1)$$

式中, G 是一个与电子管的几何结构及尺寸有关的系数。

真空二极管一般应用在特性曲线的 ab 段,它与半导体二极管的正向特性类似,但管压降较半导体二极管大。反向特性较半导体二极管为好,因为不存在反向电流,而且反向耐压也较高。真空二极管的正反向电流特性都不受环境温度变化的影响,所以性能比较稳定。电子管的主要缺点是需要灯丝加热,损耗电能较多,且寿命短、体积大。

有些纯钨丝阴极的二极管,则使用在伏安特性曲线的 bc 段,依靠改变灯丝电压来改变阳极电流。这时二极管当作一个可变电阻来使用,其阻值随灯丝电压改变而不同,通常用在交流电子稳压装置中,作为电压调整的敏感元件。

在使用电子管时,与使用半导体管一样,必须按照电子管的额定值使用,否则会使电子管工作不正常甚至损坏。真空二极管的主要定额有:

(1) 灯丝电压 U_f 和灯丝电流 I_f 。此值不能使用得太高,否则将使阴极温度过高,缩短电子管寿命;反之,若过小,则阴极发射不足,影响电子管的正常工作,对氧化物阴极还影响其寿命。通常允许在偏离额定值 $\pm 10\%$ 的范围内使用。

(2) 最大阳极反向电压 U_{arm} 。即当真空二极管工作于整流电路时,阳极与阴极间所能承受的最大的反向电压值。它决定于电子管的绝缘强度和真空度。如果使用的反向电压过高,会引起管内电极间气体放电,管外管脚间跳火,甚至绝缘被击穿,破坏了正常工作,严重的情况可使管子损坏。

(3) 最大阳极耗散功率 P_{am} 。当阴极发射的电子到达电位为正的阳极时,电子把在阴极和阳极之间的加速电场中积累起来的动能全部交给阳极,转变为热能而使阳极温度升高。单位时间内电子交给阳极的能量即为阳极得到的功率,称为阳极损耗功率。当阳压为直流电压 U_A , 阳流为直流 I_A 时,阳极损耗功率

$$P_a = U_A I_A \quad (12-1-2)$$

● U_f 表示直流灯丝电压, U_f 表示交流灯丝电压有效值。

当阳压和阳流随时间作周期性变化时, 则阳极损耗功率

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T u_A i_A dt \quad (12-1-3)$$

式中, u_A 、 i_A 分别为阳压、阳流的瞬时值。

阳极损耗功率所产生的热量应能及时地散发出去, 否则阳极温度过高会使阳极放气、发红甚至熔化。故阳极上所能承受的损耗功率就有一定的限制, 其最大允许值称为电子管的最大阳极耗散功率 P_{aM} 。因此, 使用电子管时, 必须使阳极损耗功率 P_a 小于最大阳极耗散功率 P_{aM} 。

在电子管手册中, 对二极管常常不给出 P_{aM} 值而给出最大的阳极电流的平均值 I_{a0M} , 它实际上是由 P_{aM} 值决定的。由于在整流时, 允许流过阳极的平均电流是一个常用的数据, 因此由 P_{aM} 换算过来的 I_{a0M} 值也同样反映电子管阳极耗散功率的大小。

(4) 最大阳极电流 I_{aM} 。它决定于阴极在额定加热电压时的发射能力。

(5) 阴极与灯丝之间的最大电压 U_{jKM} 。它决定于间热式阴极与灯丝之间的绝缘程度。若 U_{jK} 过高, 超过了定额 U_{jKM} , 会使阴极与灯丝间击穿, 使电子管损坏, 并会引起整流电源的直流电压正端对地短路。

表12-1列出了几种常用的真空二极管的参数。

表12-1 常用真空二极管(包括双二极管)的参数

型号①	阴极型式	用途	灯丝电压 U_f (伏)	灯丝电流 I_f (安)	最大反向阳压 U_{arM} (千伏)	最大阳极电流 I_{aM} (毫安)	最大阳极平均 电流 I_{a0M} (毫安)	灯丝与阴极间 最大电压 U_{jKM} (伏)
5Z2P	直热式 氧化物	全波整流②	5	2	1.4	375	2×62.5	—
5Z3P	直热式 氧化物	全波整流	5	3	1.55	750	2×112.5	—
5Z4P	间热式 氧化物	全波整流	5	2	1.35	375	2×62.5	
6Z4	间热式 氧化物	全波整流	6.3	0.6	1.00	300	2×37.5	+100 -400
6H2	间热式 氧化物	检波及小功率全波整流	6.3	0.3	0.45	90	2×10	± 350
1Z11	直热式 氧化物	电视接收机中行扫描 回程脉冲电压整流	1.2	0.2	20	2	0.3	—
2Z2P	间热式 氧化物	高电压小电流整流	2.5	1.75	12.5	100	7.5	
6Z19	间热式 氧化物	电视机行扫描输出 电路中作阻尼管	6.3	1.05	最大阳极脉冲 电压 4.5 千伏	450	120	750

① 国产真空二极管的型号组成的意义参见附录12.1 “电子管型号命名方法”。

② 凡“用途”栏中填“全波整流”者均为双二极管。对于这些管子, 最大阳极平均电流 I_{a0M} 为两管之值, 即为每个二极管的两倍。 U_{arM} 和 I_{aM} 均为每个二极管之值。

§ 12.2 真空三极管

12.2.1 真空三极管的结构和栅极控制作用

在真空二极管的阳极和阴极之间加装一个栅状或网状的电极，即构成了三极管，如图12-2-1所示。这栅状电极称为控制栅极或第一栅极（简称栅极） g （或 g_1 ）。阴极和阳极

的构造与二极管类似。栅极一般是用金属细丝绕在金属支持杆上，栅丝之间留有空隙，以便让阴极发射出来的电子通过栅极间隙而飞向阳极。当改变加在栅极上的电压时，就能改变阳极电流的大小，这就是栅极的控制作用。但是栅极电压是如何影响阳极电流的呢？控制作用的本质是什么？

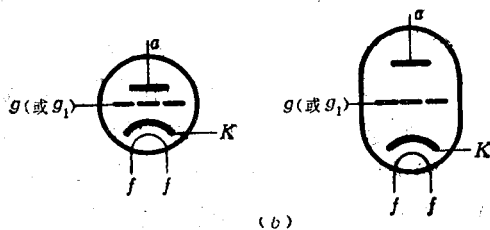
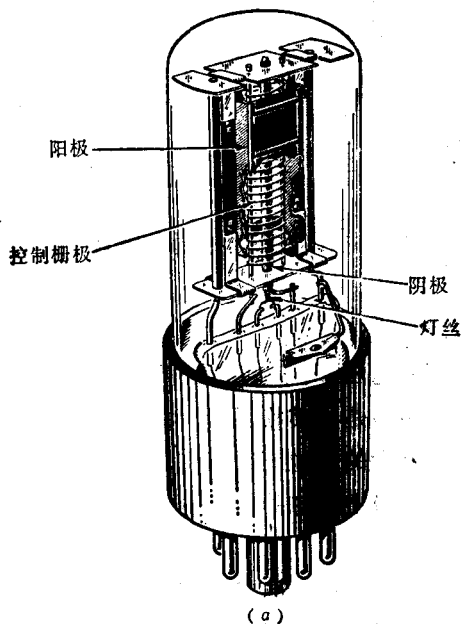


图12-2-1 真空三极管的结构和符号

为了回答这个问题，须先回忆一下二极管中电流流通的本质。在二极管中，由阳极电压 U_A 在阴极表面形成的外加电场使电子离开阴极。在空间电荷限制情况下，达到动平衡状态时，这个外加电场为空间电荷电场所抵消，因此阴极表面电场等于零。当 U_A 改变时，外加电场也随之改变，因此进入空间的电子数量也相应地改变，但总是保持阴极表面电场等于零的动平衡状态。

现在，在三极管中，阴极表面的外加电场是由阳极电压 U_A 和栅极电压 U_g 共同产生的合成外加电场，它决定了阴极电流的大小。当栅极电压改变时，势必引起阴极表面合成外加电场的改变，于是，阴极电流将随栅极电压而改变。当栅压为负时，因为栅流等于零，故阴极发射电流 I_K 应等于阳极电流 I_A 。当栅压为正时，则由阴极发射出来的电子将有一部分到达栅极，形成栅流 I_{g0} 。这时阴极总发射电流等于阳流和栅流之和，即 $I_K = I_A + I_{g0}$ 。

由上面讨论可知，在栅极上加以不同大小和不同极性的电压，就能够控制由阴极跑向阳极去的电子数目，也就是说，栅极有控制阳极电流 I_A 大小的作用。应当指出，由于栅极比阳极更靠近阴极，阳极电场又受到栅极的屏蔽作用，所以栅极电压变动1伏所引起 I_A 的变量，比阳极电压变动1伏所引起的 I_A 的变量要大得多，即栅极能起灵敏的控制作用。这是具有控制栅极的电子管（又称栅控管）的一个重要的特点。正因为如此，真空三极管的应用范围比二极管大为扩大了。与晶体三极管一样，利用它们可做成各种放大器、振荡

器、调制器、脉冲发生器以及其他电子装置。

12.2.2 真空三极管的二分之三次方定律

由于三极管在电流流通期间, 阴极表面的电场几乎是处处相等的, 因此通常就把三极管当作一个等效二极管来研究, 从而获得三极管中阳极电流 I_A 与栅极电压 U_G 及阳极电压 U_A 之间的关系。所谓等效二极管, 就是这样
一个二极管: 它的阳极置于三极管的栅极处 (图12-2-2), 在此阳极上加一等效电压 U_E , 使其在阴极附近所产生的电场, 与三极管中由阳压 U_A 和栅压 U_G 在阴极表面所产生的合成电场等效。这样, 等效二极管中流通的电子流与三极管中流通的电子流完全相等。根据这一概念, 等效电压 (又称控制电压) U_E 可近似写为

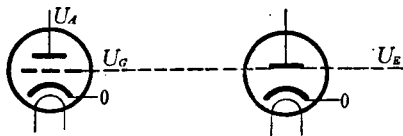


图12-2-2 三极管及其等效二极管

$$U_E = U_G + DU_A \quad (12-2-1)$$

式 (12-2-1) 表明, 加到等效二极管阳极上的等效电压 U_E 应包括三极管中栅极电压 U_G 的全部和阳极电压 U_A 转换到栅极的数值 DU_A 。式中 D 是一转换系数, 称为渗透率。它表明阳极电场渗透过栅极而作用在阴极表面的程度。三极管的栅丝绕得愈密, 阳极电场渗透到阴极附近的程度将愈小, 故 D 值也小, 这时相当于栅极上所加的等效电压也小了。反之亦然。渗透率 D 是一个小于 1 的数值, 无量纲。

根据上面所引用的等效二极管的概念, 就可以和前面所讨论的二极管一样, 利用二分之三次方定律求得三极管中电流流通的规律。这时, 阴极电流 I_K 与控制电压 U_E 的 $3/2$ 次方成比例, 即

$$I_K = GU_E^{3/2} = G(U_G + DU_A)^{3/2}$$

当栅压为正值时, 栅极电流为 I_G , 这时

$$I_K = I_G + I_A = GU_E^{3/2} = G(U_G + DU_A)^{3/2} \quad (12-2-2a)$$

当栅压为负值时, 栅流 $I_G = 0$, 则

$$I_A = I_K = G(U_G + DU_A)^{3/2} \quad (12-2-2b)$$

12.2.3 真空三极管的静态特性曲线

由前节讨论可知, 在阴极温度保持恒定的情况下, 三极管的阳流 I_A 是栅压 U_G 和阳压 U_A 的函数,

$$I_A = f(U_G, U_A) \quad (12-2-3)$$

改变这两个电压中的一个, 并保证另一个电压不变, 可以测得两组特性曲线簇, 即

(1) 阳极特性曲线簇 $I_A = f(U_A)|_{U_G = \text{常数}}$

(2) 阳栅特性曲线簇 $I_A = f(U_G)|_{U_A = \text{常数}}$

这些特性曲线一般用实验方法测得, 其原理性实验电路如图 12-2-3 所示。

● 式中 U_G 和 U_A 分别表示栅极到阴极和阳极到阴极之间的电压, 应写成 U_{GK} 和 U_{AK} 。但是为了简便起见, 把脚注中的 K 略去了。有时为了避免混淆, 也可不略去。

图 12-2-4 为 6N8P 型双三极管 $\bullet$ 中每一个三极管 $\left(\frac{1}{2}6N8P\right)$ 的阳极特性曲线簇 (相当于晶体三极管的输出特性曲线簇)。每一条曲线表示当栅压固定在某一定值时的 U_A 与 I_A 的关系。当栅压为零时, 曲线形状与二极管的伏安特性相似。当栅压向负方向增加时, 曲线由坐标原点向右移动。从式 (12-2-2 b) 可知, 为了保持同样的阳流 I_A , 阳极电压 U_A 必须随着负栅压向负方向增加而增加。

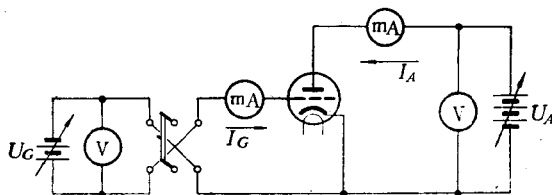


图12-2-3 测量真空三极管静态特性曲线的实验电路原理图

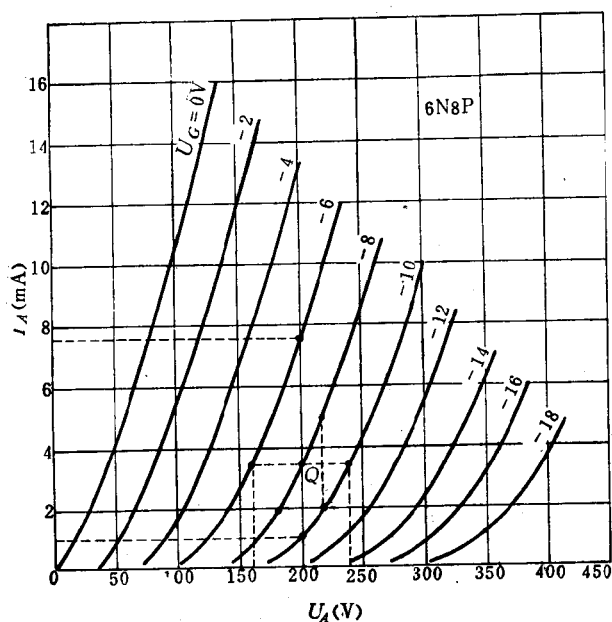


图12-2-4 真空三极管 $\left(\frac{1}{2}6N8P\right)$ 的阳极特性曲线簇

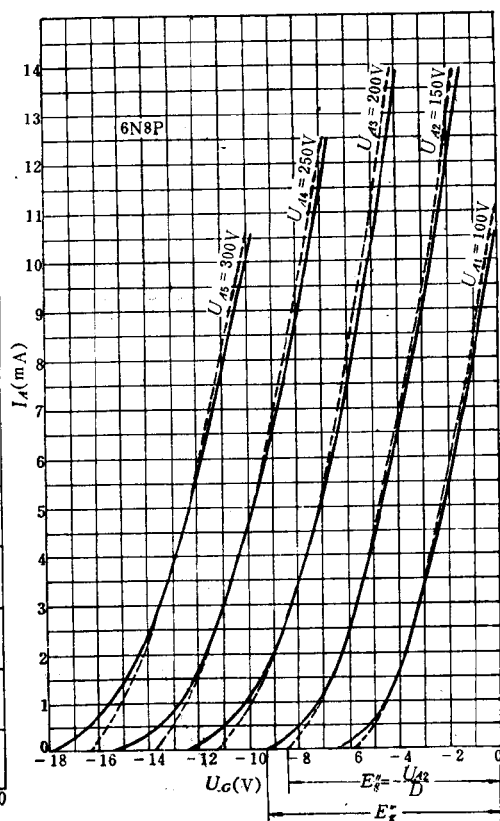


图12-2-5 真空三极管 $\left(\frac{1}{2}6N8P\right)$ 的阳栅特性曲线簇

图 12-2-5 为同一三极管的阳栅特性曲线簇 (或称栅极转移特性曲线簇)。它表示栅压对阳流的控制作用。图中每一条曲线表明当阳压固定在某一定值时的 U_G 与 I_A 的关系。实线为实验测得的实际阳栅特性曲线, 虚线则为按 $3/2$ 次定律计算而得的理论曲线。

令式 (12-2-2 b) 中的 $I_A = 0$, 则可得

$$U_G = -DU_A \quad (12-2-4)$$

此式给出了当三极管的渗透率 D 和阳极电压 U_A 一定时, 要使三极管截止 (即阳流 $I_A = 0$),

● 为了使用方便和求得性能一致, 常将两个三极管装在同一管壳内成为复合管。还有许多其他形式的复合管, 如双二极三极复合管、三极五极复合管等。

在栅极上所需加的负电压值。这个电压称为三极管的截止栅压，用 E_g'' 表示。故式(12-2-4)又可写成

$$E_g'' = -DU_A \quad (12-2-5)$$

由此可知，对于同一三极管， D 为定值。当阳压愈高，则 E_g'' 愈负，曲线愈向左移。对于不同的三极管，当阳压为定值时，则渗透率 D 愈大，曲线愈向左移而使阳栅特性曲线大部分在坐标原点之左，故称这种电子管具有左特性；反之， D 小的管子，则具有右特性。

按式(12-2-5)算出的 E_g'' ，只是理论上的截止栅压值。实际的截止栅压值 E_g''' (绝对值) 大于理论值 $|E_g''|$ ，如图 12-2-5 所示。这是因为理论上假定电子初速为零，且阴极表面电场是均匀的，但实际上电子有初速，阴极附近的电场也不是均匀的。而且当栅极不够长时，电子还会绕过栅极两端跑向阳极，而使栅极对这部分电子的控制作用很弱 (称为栅极的边缘效应)。因此，使管子截止的实际栅压 E_g''' 值比按理论计算的截止栅压 E_g'' 值更负。

以上特性曲线簇都是电子管的静态特性曲线簇 (简称静特性)。由于 U_A 、 U_G 和 I_A 三个参数之间是相互关联的，因此如果知道一簇特性曲线，就可用作图的方法描绘出另一簇特性曲线。在手册中，通常给出阳极特性曲线簇，有时也同时给出其阳栅特性曲线簇。

图 12-2-6 表示从三极管的阳极特性曲线簇求其阳栅特性曲线簇的作法。

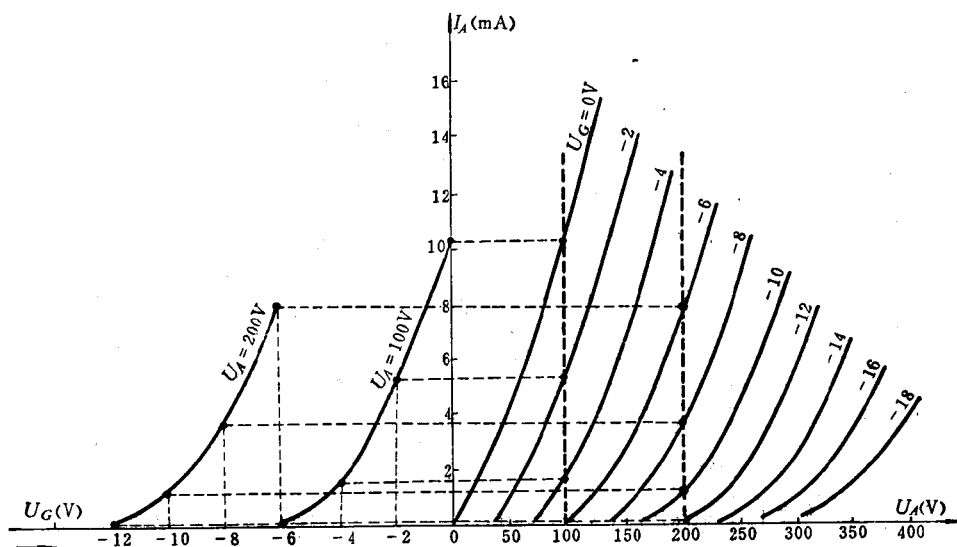


图12-2-6 三极管的阳栅特性曲线的作法

由于工作在负栅压下的三极管的栅流为零，栅极输入电阻为无穷大，因此，从三极管的阳栅特性曲线可以直接找出在某一确定阳压 U_A 值下，栅压与阳流的关系，而不像晶体三极管那样必须通过输入特性来找出基极电压与集电极电流之间的关系，因此比较简单。

三极管用作电压放大器件时，栅压通常为负值。但是在高频功率放大、振荡以及脉冲状态下工作时，则栅压常常工作到正值。这时阴极发射电流要分配到阳极和栅极上构成阳流和栅流。随着栅压的增加，栅流渐渐增大，阳流增长的速度减慢，继而停止增长，甚至减小，但总电流 $I_K = I_G + I_A$ 仍然增加，如图 12-2-7 所示。可见，在正栅时影响阳流曲线形状的原因主要是电流分配问题。当栅极电压刚为正时，电流分配还属于直接截获状态。

所谓直接截获状态是指栅流的形成全靠电子向阳极运动时直接打到栅丝上而形成的。这时，随着栅压 U_G 的增大， I_A 、 I_G 几乎成正比地增大。但当栅压增大到比 U_A 还要大得多时，在阳栅空间形成减速场，而使通过栅极隙缝进入阳栅空间的部分电子返转到栅极，这时，电流分配就由直接截获状态变为反转状态。这时，栅极电流由直接截获的电子和反转的电子两部分组成。这就促使栅流迅速增加，而阳流的增长却愈来愈慢，甚至最后还会下降。

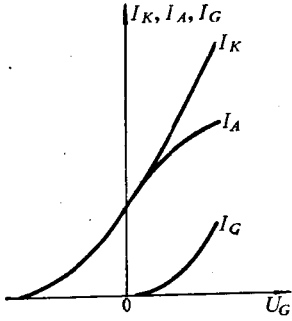


图12-2-7 三极管正栅时的阳栅特性曲线

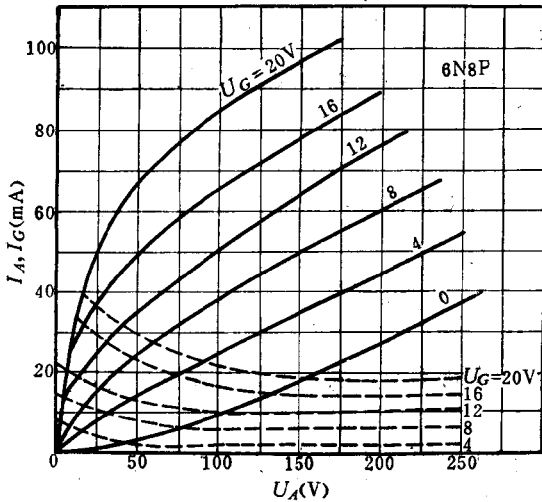
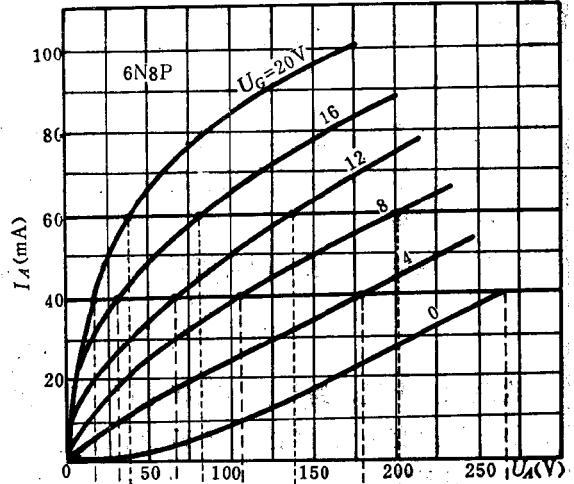


图12-2-8 真空三极管栅压为正值时的阳极特性曲线簇

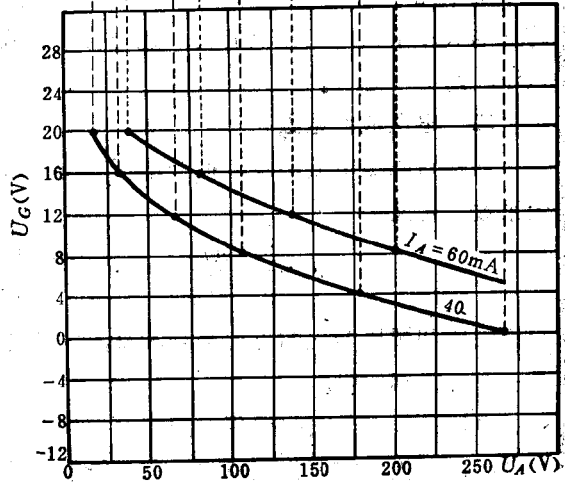


图12-2-9 三极管的恒流特性曲线

图 12-2-8 为 6N8P 型双三极管中每一个三极管栅压为正值时的阳极特性曲线簇。

在某些情况下（如大功率发射管应用 in 高频电路时），用阳极特性曲线来进行计算就显得很不方便，通常需用电子管的第三种静态特性曲线簇——恒流特性曲线簇，即

$$U_G = f(U_A) |_{I_A = \text{常数}}$$

也就是当阳极电流固定在某一定值时的阳极电压与栅极电压之间的关系。它表示栅极电压对阳极电流的控制作用大于阳极电压对阳极电流控制作用的程度。恒流特性曲线可由实验测出，也可以从阳极特性曲线上作图得出。图 12-2-9 作出了 6N8P 的一个三极管当阳流 $I_A = 40$ 毫安和 60 毫安时的恒流特性曲线。

从式(12-2-2b)可知,当阳流 I_A 为常数时,等效电压 $U_G + DU_A$ 也近似为常数。因此,恒流特性曲线是一根直线,其斜率为 D 。但在阳压较低时,由于电流分配由直接截获状态转变为返转状态而使栅流增加,以致恒流曲线向上弯曲。由于电子管的渗透率只与电子管结构有关而与外加电压关系不大,因此,当阳压较高时恒流特性曲线几乎是一簇平行的直线。

12.2.4 真空三极管的参数和定额

与晶体三极管一样,真空三极管也可用微变参数来表征其放大性能和适用范围,以便作为选用电子管的依据。此外,在选用时还须注意它的极限定额,以免损坏电子管。

真空三极管的微变参数有跨导 s 、电压放大系数 μ 和微变内阻 r_a 。

一、跨导

当阳极电压为某一固定值时,阳极电流和栅极电压的微变量比值称为跨导 s 。

$$s = \frac{\partial I_A}{\partial U_G} = \frac{dI_A}{dU_G} \Big|_{U_A=\text{常数}} = \lim_{\Delta U_G \rightarrow 0} \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G} \Big|_{\Delta U_A=0} \quad (12-2-6)$$

从物理意义上说,跨导代表栅极电压对阳极电流的控制能力。也就是当阳极电压保持不变,栅极电压改变1伏时阳极电流改变的毫安数,单位是毫安/伏(或微姆欧)。在几何关系上,跨导是阳栅特性曲线上工作点的斜率。一般收信放大三极管的跨导 s 约为1~6毫安/伏,某些小功率宽频带放大三极管的 s 可达十几毫安/伏,而大功率发射管则高达几十~几百毫安/伏。跨导的大小不仅与工作点有关,还与管子结构有关。阳极有效面积愈大,阴、栅极间距离愈小,跨导 s 愈大。

二、电压放大系数

当保持阳极电流不变,栅极电压改变1伏所需改变的阳极电压的伏特数,称为电压放大系数。定义为

$$\mu = -\frac{\partial U_A}{\partial U_G} = -\frac{dU_A}{dU_G} \Big|_{I_A=\text{常数}} = \lim_{\Delta U_G \rightarrow 0} -\frac{\Delta U_A}{\Delta U_G} \Big|_{\Delta I_A=0} \quad (12-2-7)$$

由于阳压和栅压变化的方向必须相反,才能使阳流保持不变,故式子前面有一个负号。 μ 是一个无量纲的量。

电压放大系数表明栅压对阳流的控制能力比阳压对阳流的控制能力大多少倍。所以, μ 愈大,栅极的控制作用愈强。三极管的 μ 约在13~100范围内。

真空三极管的 μ ,对应于双极型晶体管的 β ,不过前者为电压放大系数,而后者为电流放大系数。

在12.2.2节介绍等效电压的概念时引出了渗透率 D ,其物理意义是表示阳极电压对阴极表面的静电作用比栅极电压的作用弱多少倍。而阴极表面电场的强弱直接决定了总电流 I_K 的大小,因而用 D 可表示阳极电压对总电流的控制作用比栅极电压的作用弱多少倍。因此,当 U_G 在负值范围内, $I_G = 0$,这时 $I_K = I_A$,

$$\mu = \frac{1}{D} \quad (12-2-8)$$

当 U_G 在正值范围内, $I_K \neq I_A$,因此 μ 和 D 的倒数关系不再成立。但在近似计算中,如果