

高保真功率放大器制作教程



李柏雄 主 编
蒋冯辉 张国良 李金亮 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高保真功率放大器制作教程

李柏雄 主编

蒋冯辉 张国良 李金亮 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以项目引领、任务驱动的写作模式，一步步引领读者理解与掌握高保真功率放大器的基本知识和设计与制作流程。

全书共分五个项目：制作电子管功率放大器、制作晶体管功率放大器、制作场效应管功率放大器、制作集成电路功率放大器、数字功率放大器简介。每个项目以认识与检测元器件、选择制作电路、安装与调试电路为任务主线，以经典高保真功率放大器电路为实例，引导读者通过动手操作，掌握制作高保真功率放大器过程中的基础理论知识与基本技能。各项目最后均有小结及复习思考题，对读者在较短时间内理解并掌握本书内容有较大帮助。

本书可作为高职高专、技工学校、职业培训学校的音响技术课程教材，也可作为电子爱好者、音响发烧友的自学用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高保真功率放大器制作教程/李柏雄主编. —北京：电子工业出版社，2010.7

ISBN 978-7-121-11187-7

I. ①高… II. ①李… III. ①功率放大器—制作—教材 IV. ①TN722.705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 119650 号

策划编辑：陈韦凯

责任编辑：刘真平

印 刷：北京市顺义兴华印刷厂

装 订：三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×980 1/16 印张：14 字数：313.6 千字

印 次：2010 年 7 月第 1 次印刷

印 数：4 000 册 定价：29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

前 言

高保真功率放大器以其声音保真度高、电路简捷及用料讲究的特点越来越受到广大音响爱好者、音响发烧友及音响设计人员的青睐，但也以其动辄上万乃至数十万元的高昂价格而让众多的爱好者望而却步。为此，我们编写了这本《高保真功率放大器制作教程》，以期让读者能以较少的造价动手打造属于自己的高保真功率放大器。

本书紧紧围绕职业教育的特点，采用项目引领、任务驱动、实践导向的现代职业教育课程构建模式。全书共分五个制作项目：制作电子管功率放大器、制作晶体管功率放大器、制作场效应管功率放大器、制作集成电路功率放大器、数字功率放大器简介。每个制作项目以认识与检测元器件、选择制作电路、安装与调试电路为任务主线，以经典高保真功率放大器电路为实例，引导读者通过制作活动，掌握制作高保真功率放大器过程中的基础理论知识与基本技能，进而早日迈进音响发烧友的行列。

本书可作为高职高专、技工学校、职业培训学校中应用电子类专业的音响技术课程教材，也可作为初级音响爱好者及音响发烧友的参考用书。

教学建议：（1）采用项目教学，以工作任务为出发点，激发学生学习兴趣；（2）采用理论实践一体化教学模式，在“做”中“学”，在“学”中“做”；（3）以小组制作为主，培养学生团队合作精神；（4）教学评价采取项目模块评价，理论与实践相结合，作品与知识相结合。

参考课时分配如下。

序 号	项 目 名 称	参 考 课 时
1	制作电子管功率放大器	12
2	制作晶体管功率放大器	18
3	制作场效应管功率放大器	12
4	制作集成电路功率放大器	12
5	数字功率放大器简介	6
合 计		60

本书在编写过程中得到了 www.hifidiy.net 网站众多发烧友的大力帮助，书中引用了许多原版电路图及制作资料，谨向上述诸位及被引用了资料的作者表示衷心的感谢！

由于编者的水平有限，教材中的错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2010 年 4 月

目 录

项目一 制作电子管功率放大器	(1)
任务一 认识电子管	(1)
步骤一 认识电子管的外形	(1)
步骤二 了解电子管的工作原理	(6)
步骤三 检测常用电子管	(11)
任务二 选择电子管功率放大器的制作电路	(13)
步骤一 了解电子管功放电路的选择原则	(13)
步骤二 认识电子管功率放大器整机电路图	(19)
步骤三 电子管功率放大器电路工作原理分析	(30)
任务三 安装与调试电子管功率放大电路	(35)
步骤一 安装电路	(36)
步骤二 调试电路	(47)
小结	(56)
复习思考题	(57)
项目二 制作晶体管功率放大器	(58)
任务一 认识晶体管	(58)
步骤一 认识晶体管的类型	(58)
步骤二 了解晶体管的工作原理	(59)
步骤三 检测常用晶体管	(66)
任务二 选择晶体管功率放大器的制作电路	(73)
步骤一 了解晶体管功放电路的选择原则	(74)
步骤二 认识晶体管功率放大器整机电路图	(75)
步骤三 晶体管功率放大器电路工作原理分析	(88)
任务三 安装与调试晶体管功率放大电路	(95)
步骤一 安装电路	(96)
步骤二 调试电路	(99)
小结	(105)

复习思考题	(106)
项目三 制作场效应管功率放大器	(109)
任务一 认识场效应管	(109)
步骤一 了解场效应管的类别	(109)
步骤二 了解场效应管的工作原理	(110)
步骤三 检测常用场效应管	(118)
任务二 选择制作场效应管功率放大器的电路	(120)
步骤一 场效应管功率放大电路的选择原则	(120)
步骤二 认识 Pass F5 场效应管功率放大器整机电路图	(121)
步骤三 Pass F5 场效应管功率放大器电路工作原理分析	(122)
任务三 安装与调试 Pass F5 场效应管功率放大电路	(124)
步骤一 安装电路	(124)
步骤二 调试电路	(125)
小结	(126)
复习思考题	(126)
项目四 制作集成电路功率放大器	(127)
任务一 认识集成功率放大电路	(127)
步骤一 了解功率放大集成电路的种类	(127)
步骤二 掌握功率放大集成电路的工作特点	(130)
步骤三 判断功率放大集成电路的质量好坏	(131)
任务二 制作集成电路功率放大器电路	(136)
步骤一 确定制作方案	(136)
步骤二 安装与调试电路	(139)
小结	(173)
复习思考题	(174)
项目五 数字功率放大器简介	(175)
步骤一 理解数字功率放大器的含义	(175)
步骤二 了解数字功率放大器的基本组成	(176)
步骤三 了解数字功率放大器的基本工作原理	(179)
步骤四 了解数字功率放大器的发展	(186)
小结	(187)
复习思考题	(188)

附录 A 常用音响互补对管主要参数	(189)
附录 B 功率放大器常用场效应管参数	(196)
附录 C 常用集成电路功放	(201)
附录 D 经典功放电路	(206)
附录 E 复习思考题答案	(211)
参考文献	(216)

项目一 制作电子管功率放大器

★ 本项目内容提要:

本项目首先从电子管的外形、电子管工作原理和电子管的检测三个方面详细介绍了电子管的基本知识;然后介绍如何选择电子管功率放大器的制作电路;最后详细讲解安装与调试电子管功率放大电路的步骤和技能。

★ 本项目学习目标:

- 了解电子管的基本知识
- 掌握电子管功率放大器的工作原理
- 学会动手制作电子管功放

任务一 认识电子管

☆ 本任务内容提要:

本任务主要介绍了制作功率放大器的专业基础知识:认识电子管的外形,了解电子管的工作原理,检测常用电子管。

☆ 本任务学习目的:

了解电子管基本理论知识,掌握电子管电路的识图能力,学会电子管检测技巧。

步骤一 认识电子管的外形

人们常说的胆管实际上就是电子管,又称“真空管”,胆机则是电子管功放机。晶体管放大器是一种“电流”放大器,而电子管放大器是一种“电压”放大器,它们的工作原理不同。电子管的信号失真特性大于晶体管,电子管放大电路中,信号的偶次谐波失真大,奇次谐波失真小,而晶体管正好相反。偶次谐波比较符合人耳的听觉特性,表现出的听觉感受是“温暖、柔和”,这就是人们常说的“听感好”。奇次谐波听觉感受上表现出“生硬、刺耳”等感觉,即人们常说的“金属声”。



1. 电子管介绍

电子管 (electron tube) 是一种在气密性封闭容器 (一般为玻璃管) 中产生电流传导, 利用电场对真空中的电子流的作用以获得信号放大或振荡的电子器件。

二极管是最简单的电子管, 它有两个电极——阴极和屏极 (又称阳极), 如图 1-1 所示是电子管外形, 其中阴极具有发射电子的作用, 屏极具有接收电子的作用, 并有单向导电的特性, 也可用做整流和检波。增加一个栅极就成了三极管, 栅极能控制电流, 栅极上很小的电流变化, 能引起屏极很大的电流变化, 所以, 三极管有放大作用。当然还有多极管, 它在三极管内增加了一个或几个网栅 (称为控制栅), 主要是增加控制作用。晶体二极管有负极和正极, 相当于电子二极管的阴极和屏极; 晶体三极管的三个极: 集电极、基极、发射极, 分别对应于电子管的屏极、栅极和阴极, 主要用于放大电路和开关电路。图 1-2 所示是电子管实物。

电子管在电路中常用字母 “V” 或 “VE” 表示, 旧标准用字母 “G” 表示。

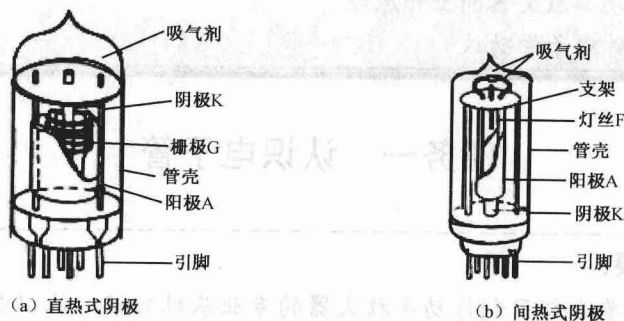


图 1-1 电子管外形

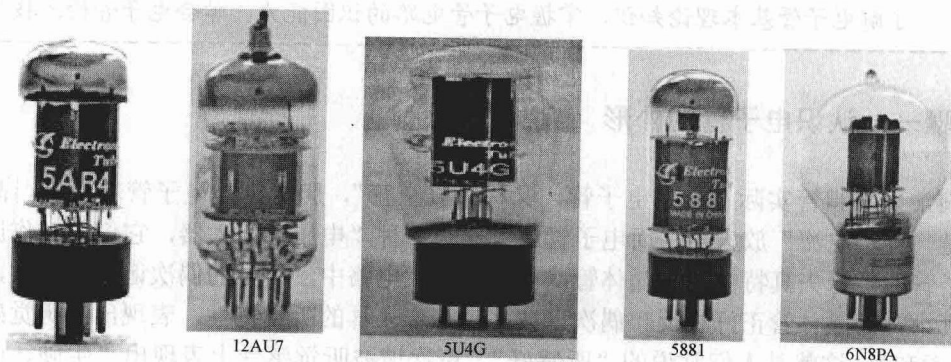


图 1-2 电子管实物

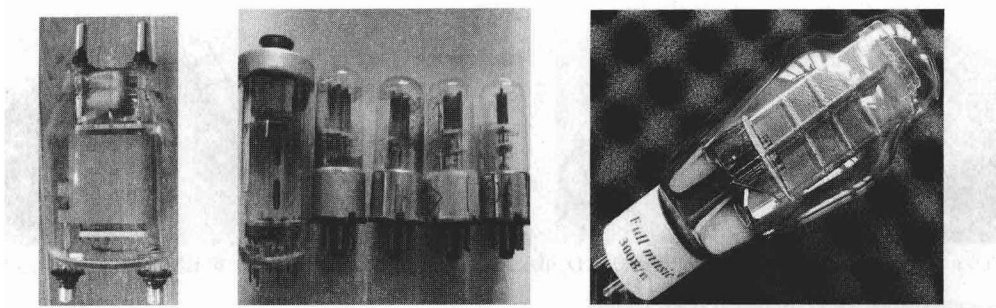


图 1-2 电子管实物 (续)

为了更清楚地了解电子管的内部结构,下面以图 1-3 所示电子管 6N1 和图 1-4 所示电子管 6N1 (玻壳破裂) 进行对比,读者可以仔细观察。

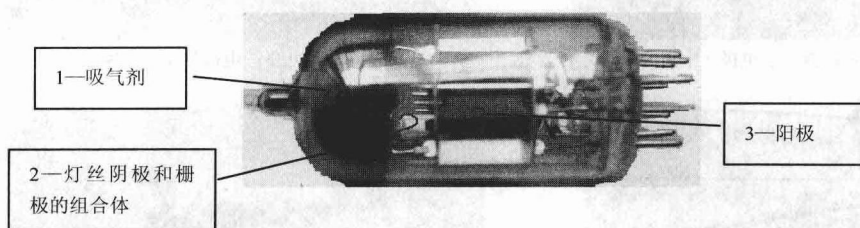
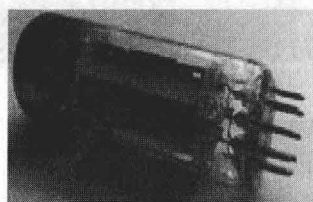
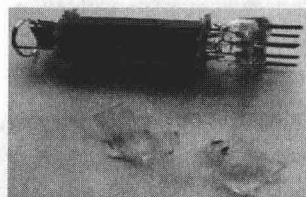


图 1-3 电子管 6N1



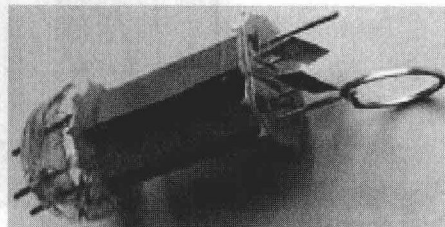
(a) 第一步: 电子管实物



(b) 第二步: 破壳后的电子管实物

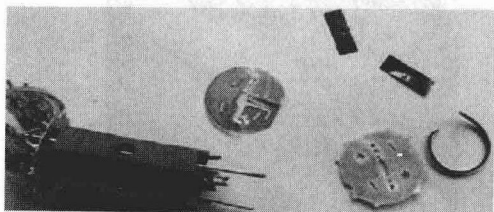


(c) 第三步: 破壳后近距离拍摄的电子管实物

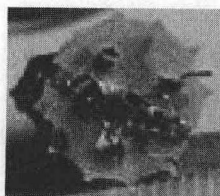


(d) 第四步: 破壳后近距离 (拍摄角度不同) 的电子管实物

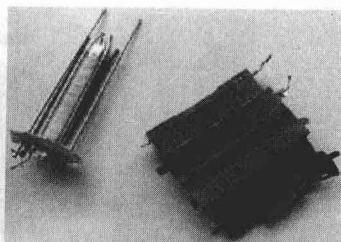
图 1-4 电子管实物解剖图解



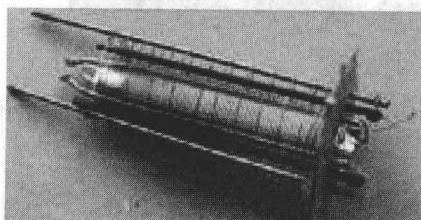
(e) 第五步：将固定电极的支架拆开后的电子管实物



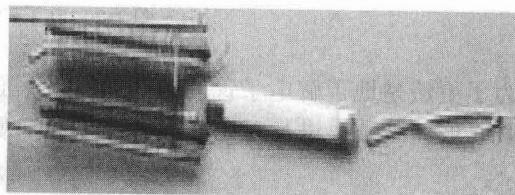
(f) 第六步：从电子管引脚方向拍摄



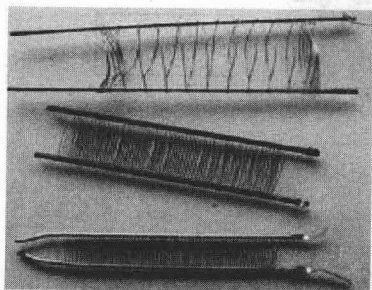
(g) 第七步：黑色的屏极与支架分离



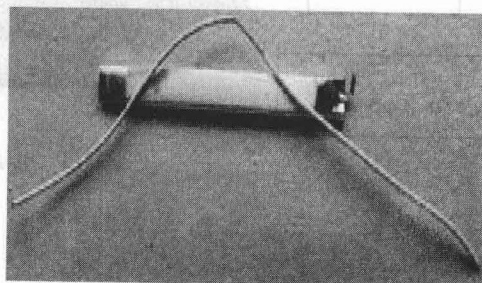
(h) 第八步：露出了电极（中间的引线）



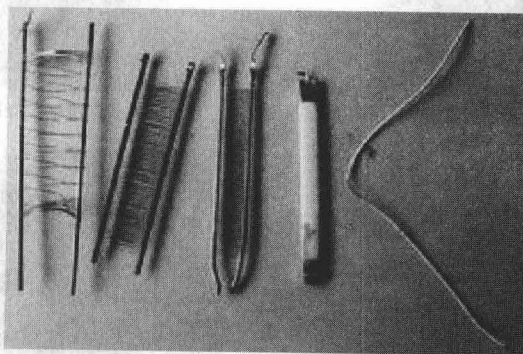
(i) 第九步：电极与支架分离



(j) 第十步：阴极、栅极和帘栅极

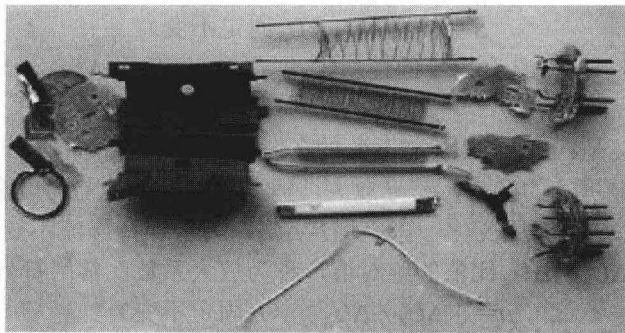


(k) 第十一步：灯丝



(l) 第十二步：电子管电极

图 1-4 电子管实物解剖图解（续）



(m) 第十三步：拆散后的电子管照片

图 1-4 电子管实物解剖图解（续）

2. 电子管的参数

1) 电子管基本参数

- (1) 灯丝电压 U_f : 单位是 V。
- (2) 灯丝电流 I_f : 单位是 mA。
- (3) 屏极电压 U_a : 单位是 V。
- (4) 屏极电流 I_a : 单位是 mA。
- (5) 栅极电压 U_g : 单位是 V。
- (6) 栅极电流 I_g : 单位是 mA。
- (7) 阴极接入电阻 R_k : 单位是 Ω 。
- (8) 输出功率 P_o : 单位是 W。

2) 电子管重要参数

- (1) 放大系数 μ : 无单位。
- (2) 跨导 S : 单位是 mA/V。
- (3) 内阻 R_i : 单位是 $k\Omega$ 。

下面对影响电子管动态特性的重要参数进行说明。

电子管的动态特性 (Dynamic Characteristic) 是指电子管对细微变化所引起的反应。决定电子管动态特性的参数有三个, 即跨导、放大系数与内阻。下面我们来了解这三个参数的意义与相互的关系。

跨导的概念是: 在屏压保持不变时, 栅压 U_g 在某一工作点上变化一微小增量 ΔU_g 会引起屏流 I_a 相应地变化一个增量 ΔI_a , 比值 $\Delta I_a / \Delta U_g$ 称为跨导, 用符号 S 表示, 即



$$S = \Delta I_a / \Delta U_g \quad (U_a \text{ 固定不变})$$

从概念可以看出,跨导具有电导的性质,跨导的单位是 mA/V 。一般三极管的跨导值为 $0.5 \sim 10 \text{ mA/V}$ 。

跨导的物理意义是:在屏压固定不变的条件下,栅压变化 1V 时,屏流变化了多少 mA 。它表明栅压控制屏流的能力,跨导愈大,栅压控制屏流的能力就愈强。

放大系数的概念是:屏压变化一微小增量 ΔU_a , 为了保持屏流不变,栅压 U_g 必须相应地变化一个 ΔU_g , 取 ΔU_a 与 ΔU_g 比值的绝对值,称为放大系数,常用符号 μ 表示,即

$$\mu = |\Delta U_a / \Delta U_g| \quad (I_a \text{ 固定不变})$$

放大系数是一个无量纲,没有单位。在上面的公式中为了保持屏流不变, ΔU_a 和 ΔU_g 的符号必定相反,它们的比值是一个负数,然而放大系数应该是一个正数,所以要取绝对值。

放大系数表示栅压对屏流的影响比屏压对屏流的影响大多少倍。一般三极管的放大系数为 $2.5 \sim 100$ 。

内阻的概念是:在栅压保持不变时,屏压 U_a 在某一工作点上变化一微小增量 ΔU_a 时引起屏流 I_a 相应地变化一个增量 ΔI_a , 比值 $\Delta U_a / \Delta I_a$ 称为内阻,用符号 R_i 表示,即

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \quad (U_g \text{ 固定不变})$$

它的单位是 $\text{k}\Omega$ 。

内阻的物理意义是:在栅压固定不变的条件下,要屏流变化 1mA , 屏压需要变化多少 V 。它表明屏压对屏流的控制能力,内阻愈小,屏压控制屏流的能力就愈强。

电子管的三个参数 S 、 μ 和 R_i 之间具有如下关系:

$$\mu = S \times R_i$$

这个公式被称为电子管的内部方程式。

3. 电子管的优缺点

1) 优点

电子管带负载能力强,线性性能优于晶体管,在高频大功率领域的工作特性要比晶体管更好,所以仍然在一些地方继续发挥着不可替代的作用。

2) 缺点

电子管体积大,功耗大,发热量大,电源利用效率低,结构脆弱而且需要高压电源。

步骤二 了解电子管的工作原理

电子管一般均为玻璃外壳的真空管(俗称“胆管”),体积较大,现在以下面几种常见



的电子管为例介绍其工作原理。

1. 二极管

二极管分为整流二极管、阻尼二极管和充气二极管等，其内部由阴极 K、屏极 A 和灯丝 F 等组成。

二极管有直热式和间热式之分。直热式二极管的灯丝 F 与阴极 K 为一体，称为丝极。间热式二极管的灯丝 F 与阴极 K 之间是隔离的。图 1-5 所示是二极管的电路图形符号。

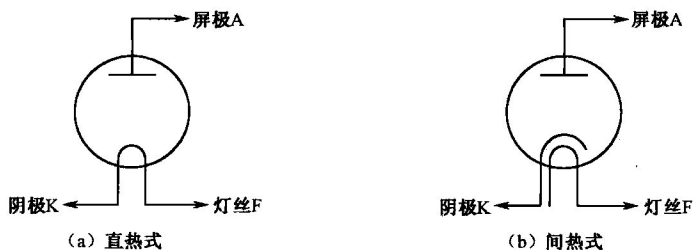


图 1-5 二极管的电路图形符号

当灯丝（阴极）被加热，温度达到 800°C 以上时，就会形成电子的加速运动，到灯丝（阴极）表面以外的空间。若在这一空间加上一个十几至几万伏的正向电压（屏极电压），这些电子就会被吸引飞向正向电压极，流经电源而形成回路电流。把阴极、灯丝、屏极封装在一个适当的壳里，即上面说的玻璃（或金属、陶瓷）封装壳，再抽成真空，就是电子二极管。需要说明的是，由于制造工艺、杂质附着以及材料本身等原因，管内会残留微量余气，成品管都在管内涂敷了一层吸气剂。吸气剂一般使用掺氮的蒸散型钨钼或钨钒材料。目前除特殊用途外（如超高频和高压整流等），为便于使用和增加一致性，均为两只二极管，或二极、三极，或三极、三极以及二极、五极等合装在一个管壳内，这就是复合管。

2. 三极管

二极管的结构决定了它的单向导电的性质，当在阴极与屏极之间再加上一个带适当电压的电极时，这个电压就会改变阴极的表面电位，而影响阴极热电子飞向屏极的数量，这就是调制极。它一般用金属丝做成螺旋状的栅网，所以又把它称为栅极。由此可知，当作为被放大的信号电压加在栅极-阴极之间时，由于它的变化必然会使屏极电流发生相应的变化，又由于屏极电压远高于阴极，因此栅-阴极间微小的电压变化同样能使屏极产生相应的几十至上百倍的电压变化，这就是三极管放大电压信号的原理。



从电场的角度来分析,也可以这样来理解:电子管(三极管)是由阴极 K、屏极 A、栅极 G 组成的。阴极是电子管电子流的源泉,当阴极被灯丝加热到一定程度时,就会不断地向空间发射电子。在屏极与阴极间加上直流电压,使屏极电位高于阴极电位时,在屏极电场的作用下,从阴极发射的电子就会源源不断地奔向屏极,即所谓的真空管正向导通。根据电流方向与电子流方向相反的定理,电流便从屏极流向阴极,这就是所谓的屏流—— I_a 。栅极是决定电子管放大作用的电极,位于阴极和屏极之间靠近阴极的位置。栅极的作用是抑制由阴极向屏极发射电子。当栅极加上相对于阴极为负的电位即栅负压时,便在管内屏、阴之间形成两个电场:

- 一是屏极的正电压产生的正电场,对空间电荷区的电子起到吸引的作用;
- 二是栅极的负压产生的负电场,对空间电荷区的电子起到排斥作用。

栅极电压越负,排斥作用越强,屏极电流就越小。改变栅极负压即可改变屏极电流。而栅极比屏极更靠近阴极,对屏极电流的抑制作用远比屏极电压更大,约大 4~100 倍。栅极电压的微小变化,便能引起屏极电流的较大变化,从而实现电子管的电流放大作用。

三极电子管由外壳、灯丝 F、屏极(也称板极或阳极) A、栅极 G、阴极 K 及引脚等组成,如图 1-6 所示。其中,灯丝用来加热阴极。阴极 K(类似于半导体三极管的发射极和场效应管的源极)在温度升高到一定值时开始发射电子。栅极 G(也称控制栅极,类似于半导体三极管的基极和场效应管的栅极)用来控制阴极发射电子的数量,即控制阴极电流的大小。屏极 A(类似于半导体三极管的集电极和场效应晶体管的漏极)用来收集阴极所发射的电子。阴极发射电子的基本条件是:阴极本身必须具有相当的热量。阴极又分两种,一种是直热式,它由电流直接通过阴极使阴极发热而发射电子;另一种称间热式阴极,其结构一般是一个空心金属管,管内装有绕成螺线形的灯丝,加上灯丝电压使灯丝发热从而使阴极发热而发射电子,现在日常用的多半是这种电子管。由阴极发射出来的电子穿过栅极金属丝间的空隙而达到屏极,由于栅极比屏极离阴极近得多,因而改变栅极电位对屏极电流的影响比改变屏极电压时大得多,这就是三极管的放大作用。换句话说,就是栅极电压对屏极电流的控制作用。我们用一个参数跨导(S)来表示。另外还用参数 μ 来描述电子管的放大系数,它的意义是:说明栅极电压控制屏极电流的能力比屏极电压对屏极电流的作用大了多少倍。

三极电子管一般用于放大电路中,它按阴极的加热方式可分为直热式阴极三极电子管和间热式阴极三极电子管。图 1-6 所示是三极电子管的电路图形符号。

常用的中、小功率三极电子管有 6N1~6N4、6N6、6N8P、6N9P、6N11、6DJ8、12AX7、12AU7、12AT7、6C3~6C5 等型号。常用的大功率三极电子管有 211、845、WE300B、6N5P、6N13P 等型号。

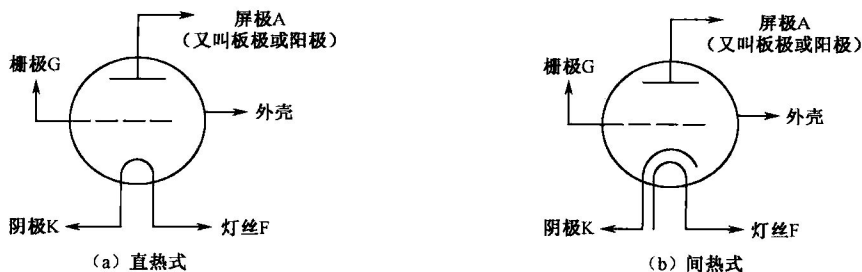


图 1-6 三极电子管的电路图形符号

3. 四极电子管

三极管因极间电容较大不能工作于高频，栅极对屏极的屏蔽不完善也无法进一步提高放大系数。后来人们发现在栅极和屏极间加入一网状电极（帘栅极）可克服此缺点，这就是一般的四极管。如图 1-7 所示为四极电子管的电路图形符号。由于帘栅极具有比阴极高很多的正电压，因此也是一个能力很强的加速电极，它使得电子以更高的速度迅速到达屏极，这样控制栅极的控制作用变得更为显著，因此比三极管具有更大的放大系数。但是由于帘栅极对电子的加速作用，高速运动的电子打到屏极，这些高速电子的动能很大，将从屏极上打出所谓二次电子，这些二次电子有些将被帘栅吸收形成帘栅电流，使帘栅电流上升导致帘栅电压下降，从而导致屏极电流下降，为此四极管的放大系数受到一定限制，一般用于高频放大等电路。代表型号有 6J3、6J5 等。

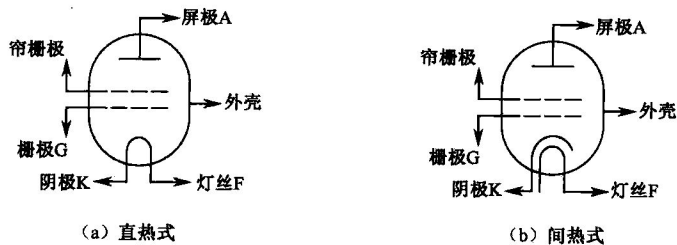


图 1-7 四极电子管的电路图形符号

4. 五极电子管与束射四极管

四极管会产生“二次电子发射”使屏极特性曲线起始段起伏不定，严重影响其正常工作。因此，人们又在帘栅极和屏极之间再加一网状电极（抑制栅极）来抑制“二次电子发



射”，使屏极特性曲线起始段变得平滑。这种胆管称为五极管。如图 1-8、图 1-9 所示是五极管的电路图形符号。

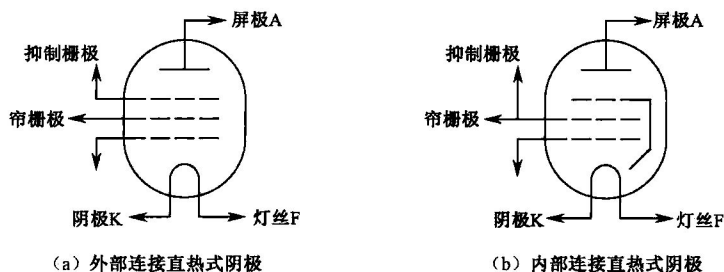


图 1-8 五极管的电路图形符号 (1)

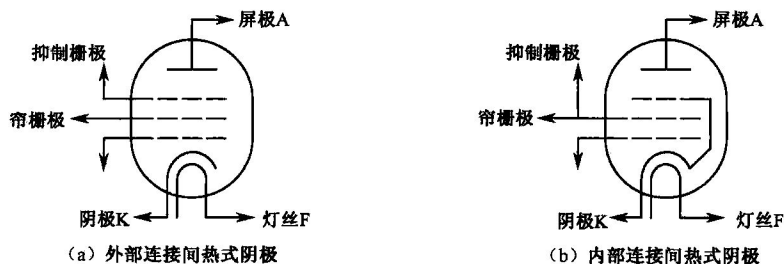


图 1-9 五极管的电路图形符号 (2)

另外还有一种管，它没有抑制栅极而是在管内加上两片与阴极相连的集射板，同样也能有效地抑制“二次电子发射”。它在四极管帘栅极外的两侧再加入一对与阴极相连的集射极，由于集射极的电位与阴极相同，所以对电子有排斥作用，使得电子在通过帘栅极之后在集射极的作用下按一定方向前进并形成扁形射束，这扁形电子射束的电子密度很大，从而形成了一个低压区，从屏极上打出来的二次电子受到这个低压区的排斥作用而被推回到屏极，从而使帘栅电流大大减小，电子管的放大能力得到加强，这种电子管称为束射四极管。束射四极管不但放大系数较三极管高，而且其屏极面积也较大，允许通过较大的电流，这种管比五极管有更好的综合性能，很适合作功率放大。因此现在的功放机常用它作为功率放大。

束射四极管全部是功率管，对功率管的要求是产生尽可能大的屏极电流。束射四极管在电极的结构上做了一些特殊的安排，使其在保持和其他功率管体积差别不大的前提下，能够形成比其他功率管更大的屏极电流。

束射四极管有以下几个结构特点。

(1) 阴极为椭圆形，这就增加了阴极的有效发射面积，从而增加了热电子的发射量。