

《高保真音响》系列丛书

电子管声频放大器 实用手册

唐道济 著

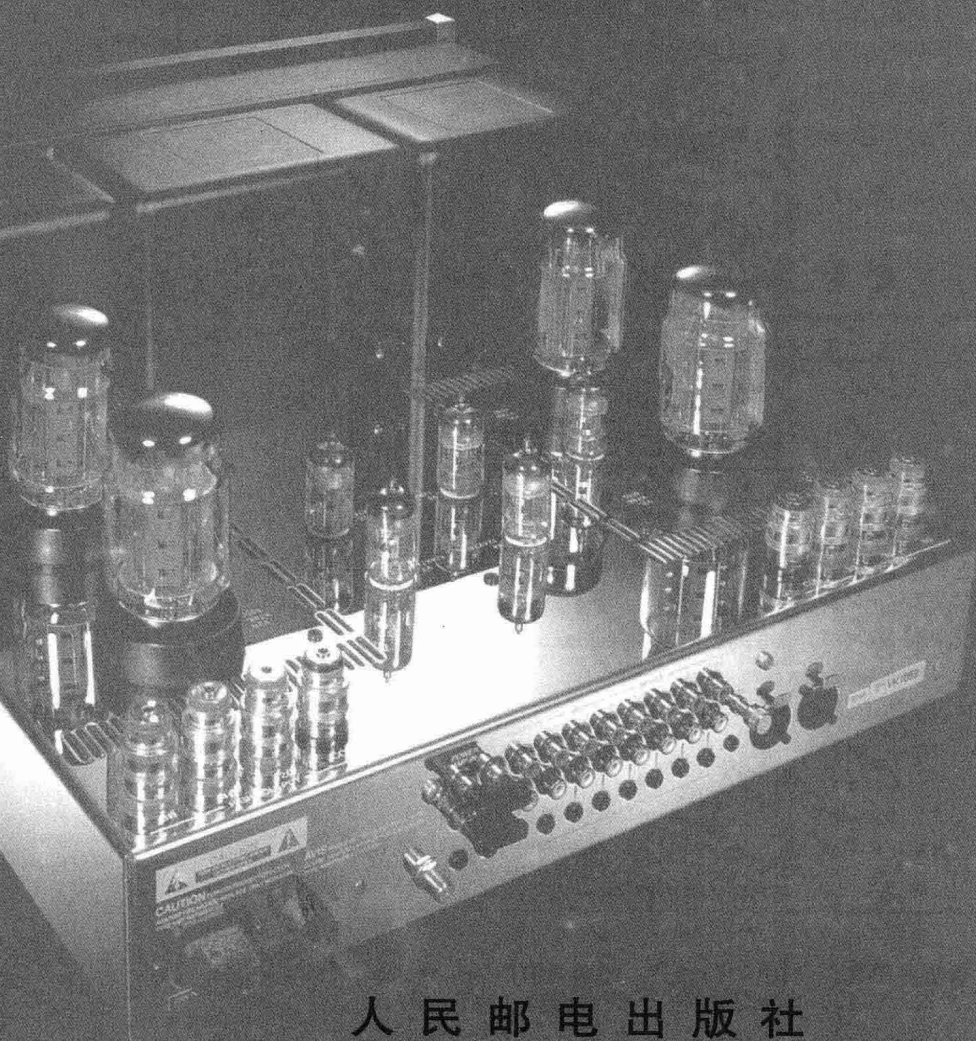


 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

《高保真音响》系列丛书

电子管声频放大器 实用手册

唐道济 著



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

电子管声频放大器实用手册 / 唐道济著. —北京: 人民邮电出版社, 2009. 6
(高保真音响系列丛书)
ISBN 978-7-115-19522-7

I. 电… II. 唐… III. 电子管—音频放大器—技术手册
IV. TN722. 1-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第202263号

内 容 提 要

由电子管原理、结构、特性谈起, 内容包括电子管的正确使用, 电子管在声频放大器中的各种应用, 电子管的替换, 以及装配、调试、检修和有关计算。内容深入浅出, 切合实用, 凡在实用上所必须了解的知识以及易被忽略的问题, 本书都有较详细的叙述, 并列大量适于应用的数据, 有很高的参考价值。

本书适合电子管音响爱好者及相关专业人士阅读参考。

《高保真音响》系列丛书

电子管声频放大器实用手册

-
- ◆ 著 唐道济
责任编辑 黄 彤
执行编辑 都学宁
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 15.5
字数: 294千字 2009年6月第1版
印数: 1-4000册 2009年6月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-19522-7/TN

定价: 38.00元

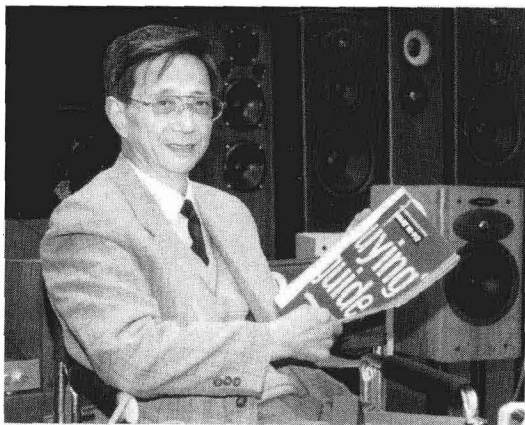
读者服务热线: (010)67132837 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

作者简介

唐道济(1939.12~),江苏无锡人。中国声学学会高级会员,中国电子学会会员,江苏省科普作家协会会员,现为无锡市音响技术专业委员会主任,无锡市科普作协秘书长。少年时对电器和机械装置有浓厚兴趣,20世纪50年代末即在专业刊物发表大量文章,1961年起从事电子技术教育工作,70年代起专事电声及电子产品开发工作,并组织大量科技讲座。90年代起为普及提高音响技术作了大量工作,1995年参加国家劳动部有关专业的国家标准及规范制定,并两次赴京担任专家组主审。

主要著作:《无线电元器件应用手册》1981,《扬声器放音系统实践》1984,《新编无线电元器件应用手册》1990,《实用高保真声频放大手册》1994,《音响发烧友必读》1994,《音响技术与音乐欣赏手册》2002。

主要论文:《声频放大器低噪声化探讨》1984,《印刷电路设计工艺》1985,《接地技术实践》1985,《声频放大器的瞬态失真与对策》1989,《音响电路中的运算放大器》1992。



序

《电子管声频放大器实用手册》是唐道济老师为普及真空管应用技术而奉献给广大音响爱好者的又一佳作。该书实用价值大、文字结构严谨，学术品位高，无论对电路的原理、分析、应用、调试、检测都有着不可取代的作用。

唐道济老师学识渊博，有着雄厚的电子、电声技术理论基础。在多年的实践操作探求过程中，注重理论与实践的结合，有着丰富的实践经验。他为人随和，平易近人，和蔼可亲。多年来他为众多企业解决各类电子、电声方面的技术疑难问题，从不计报酬；他对求学者总是循循善诱，充满着爱护之情。唐道济老师为人师表、助人为乐的精神令人尊敬。

唐道济老师自小爱好广泛，喜欢戏曲、音乐、美术、文学、机械结构、电气、电子技术。良好的教育使他从小就显示出极强的求知欲和勤奋执著的秉性。他至今仍有坚持读书、做笔记的良好习惯。他酷爱电子、电声技术。20世纪70年代就开始从事电声及电子产品的研究和开发工作，为普及我国的音响技术做了大量的工作；90年代参加国家劳动部有关专业的国家标准及规范的制定；1995年、1996年先后担任国家标准专家组的主审工作。唐道济老师对学术孜孜不倦、锲而不舍的精神更是大家的榜样。

唐道济老师有着十分扎实的理论基础知识，更有着丰富的实践经验。凭着对电子、电声技术的钟爱，20世纪80年代以来他先后出版了6本电子、电声方面的专著，成了广大音响爱好者的良师益友。

李克俭

2007年7月于浙江嘉兴

前 言

电子管发明迄今已逾百年，这个古老的器件，虽已从电子技术主舞台淡出，不再为大家熟悉，但在音响领域却保有一席之地，而且长盛不衰。声频放大器处理的是声音，声音有个音质问题不容易掌握，所以声频放大器才有其特有的电路技术。而且音响技术属于实验科学范畴，在设计时需要经验的融入。此外，在设计声频电路时，有必要把听觉因素考虑进去，并设法使它不受信号源和负载的影响。

鉴于电子管放大器历经衰落再东山再起，存在低谷期，致使现今有些设计人员，未能承袭昔日电子管电路之设计精髓，出现技术断层，在电子管应用上存在一些误区，甚至错误，导致某些产品性能欠佳，电子管过早夭折损坏。

现在有关电子管放大器的基础设计资料很少，笔者从事电子产品开发和音响技术研究数十年，近年来对电子管放大器作了温故、实验。2002年12月起《高保真音响》杂志连续刊载拙作“电子管特性及其应用”，历时两年，受到广大读者的欢迎。现对有关电子管放大器的理解、设计、制作问题及实用数据作了全面的充实，特别是一些易被忽视的问题都作了阐述，论述虽避免抽象的数学推导和繁琐的理论分析，但仍给予正确概念，现奉献给广大电子管放大器爱好者和有关专业人士，希望能对当前流传的一些误解，从原理上得到澄清，于实际工作上有所帮助。

电子管DIY爱好者仿制一些名机时，有些实际问题需要注意。首先不要盲目模仿，因为复杂的电路并非一定都好，而且出于广告宣传常花很高代价追求并不合理的特性设计。其次在使用与原机牌号不同的电子管及不同类型的电容器时，声音效果会有差异，有时必须对相应元件值进行修正。另外有些非常著名的机器，由于几十年前技术条件的限制，在频率响应和分析力等方面已远不能适应现在的听音要求。历史上的名机，是那个时代的产物，可以视为古董，至于现实的实用性则是另一回事，排除商业因素，实在没有必要花费大量时间、精力去复古。

一台声频放大器，除了合理的电路设计，还需要适当的元器件相匹配，而元器件没有最好，只有最合适，更不能迷信所谓“发烧元件”。“发烧元件”常有极强的个性，难以取得正确、平衡的声音，所以对元器件的性能应有相当了解，并善加运用，以使电路性能的发挥达致最佳。

电子管放大器是装响容易装好难，指标与声音俱佳的电子管放大器并不好做，

绝不是罗列一些高档元件就能奏效那么简单，各级工作状态又如何调整，实在是
有好多问题可以研究探讨。

欢迎交流。

唐道所

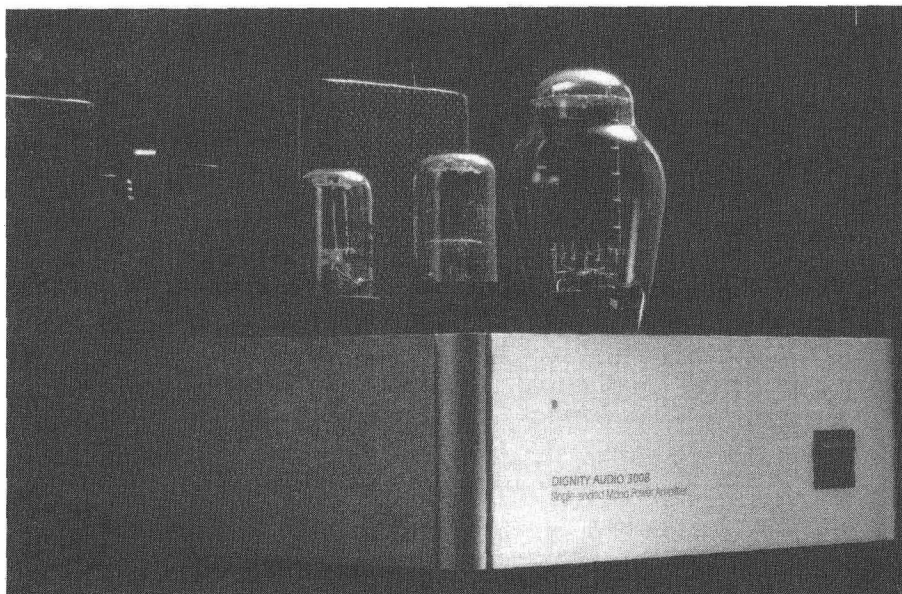
2006 年秋于无锡

目 录

导论 “胆”机与“胆”味	1
一、电子管及其特性	3
二、电子管的正确使用	13
三、电子管阻容耦合放大器	18
四、电子管级联放大器与 SRPP 电路	32
五、电子管功率放大器中的输出级	35
六、电子管功率放大器中的倒相器	51
七、电子管功率放大器中的前级管	57
八、多极电子管的三极管接法	60
九、电子管放大电路中的负反馈	63
十、电子管阴极输出器	72
十一、电子管电源电路	75
十二、提高电子管放大器信噪比的措施	85
十三、电子管的代换	87
十四、电压放大管互换指南	94
十五、功率放大管互换指南	109
十六、整流管互换指南	118
十七、换管调声须知	123
十八、电子管声频放大器实例	137
十九、电子管放大器的装配工艺	149
二十、电子管放大器的调整	157
二十一、电子管用输出变压器的计算	159
二十二、电子管放大器的测试	165
二十三、音质评价	173
二十四、电子管放大器的检修	177
二十五、简明电子管特性	182
二十六、附录	202
1. 接收电子管型号命名法	202
2. 电子管特殊性质的标志	204
3. 电阻规格的标志	205

4. 高性能电子管放大器电路回顾	206
5. 音响设备中的电阻器	209
6. 音响设备中的电容器	213
7. 音响设备中的音量控制	218
8. 音响设备中的开关、接插件与连接线	221
9. 常用分贝 (dB) 表	223
10. 电子管特性的电压变换图	224
11. 典型电子管特性曲线	225
12. 印制电路板设计要领	236
参考文献	238

导论 “胆”机与“胆”味



随着声频放大器的晶体管化，技术指标虽然非常高，但音响爱好者却对其音质并不满意，鉴于电子管放大器的音色一般比较甜美温暖，特别是中频段更柔顺悦耳，所以电子管放大器得以在 20 世纪 70 年代末东山再起，与晶体管放大器分庭抗礼。加上早期激光唱机的声音较冷硬，正需要这种放大器作补偿，于是人们开始寻觅五六十年代的经典电子管放大器设计，并成再度热门。

电子管放大器在港台地区又称“胆”机，晶体管放大器在港台地区又称“石”机，由于晶体管和电子管传输特性的不同，造成两种放大器的声音有一定差异。晶体管功率放大器的长处在于大电流、宽频带、低频控制力，处理大场面时的分析力、层次感和明亮度要比电子管功率放大器优越，但电子管功率放大器的高音较平滑，有足够的空气感，具有一种相当部分人所喜欢的声染色，甜美润厚，尽管声音细节和层次少了些，但那种柔和的声音却是美丽的。

电子管功率放大器的谐波能量分布，是 2 次谐波最强，3 次谐波渐弱，4 次谐波更弱，直至消失。晶体管功率放大器的谐波能量分布，则直至 10 次谐波以上几乎是相等的量，其高次谐波量减少极小。可见，电子管功率放大器引起的主要是偶次的 2 次谐波，这种谐波成分非常讨人喜欢，恰如添加了丰富的泛音，美化了声音。而晶体管功率放大器产生的谐波中，多次谐波分量相当大，这就会引起听

觉的不适。而且当放大器处于过激励而进入过载状态时，晶体管放大器的谐波失真和互调失真会急剧增大，波形被削成梯形的平顶状，声音严重劣化，而电子管放大器则比较平缓，只是波形头部变圆或略呈弯曲，声音虽失真，但还能接受。

电子管功率放大器的负载阻抗—输出功率特性与晶体管功率放大器不同。三极电子管输出有一个最大输出阻抗值，大于或小于此值都会使输出功率减小；多极电子管输出在一定范围内，随着阻抗值的增大输出功率也增大。晶体管单端推挽输出则随着负载阻抗值的增大，输出功率相应减小。鉴于作为负载的扬声器阻抗，是随着频率的不同而变化，所以在相同条件下，电子管功率放大器的低音和高音重放声压级要比晶体管功率放大器的高。

此外，由于晶体管放大器比电子管放大器的过载性能差，所以同功率或同电平等级的晶体管放大器比电子管放大器要求有更高的功率储备量或电平储备量。如电子管放大器的最大输出功率应是其平均使用功率的3倍以上，而晶体管放大器就要求在10倍以上。

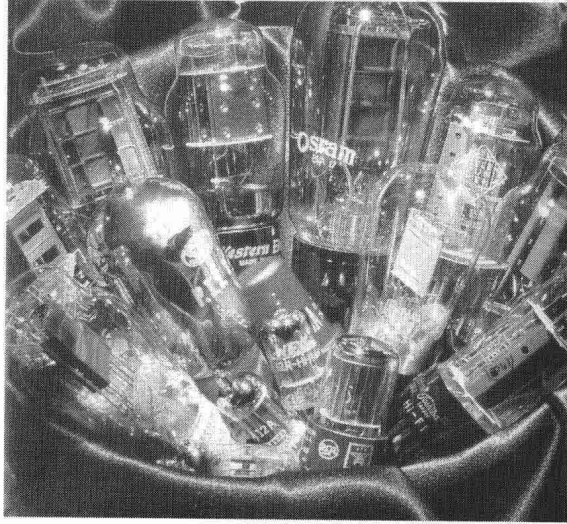
电子管功率放大器输出端的输出变压器，由于铁心的磁滞作用，会降低放大器的瞬态响应特性，丢失部分声音细节，但它使重放声变得比较“甜美温暖”。晶体管功率放大器输出端没有电抗性元件。电子管的内阻大，晶体管的内阻极小，故电子管功率放大器的阻尼系数远比晶体管功率放大器的小，对扬声器机械运动系统的控制能力较差，对低音表现不利。此外，电子管放大器需用高压电源、效率低、热量大、抗震性差、体积大、成本高、低频及高频上段较薄弱等都是它的弱点。不过电子管放大器有一个独特的好处，就是换插不同牌号或不同时期生产的电子管，会有不同的音色表现，可尽享玩“胆”之乐趣。

电子管放大器虽有其特有声音表现，但说它比晶体管放大器优秀实在是一种误解，一般中档的电子管放大器和晶体管放大器孰优孰劣是个见仁见智的问题，它们各有所长，也各有所短。

“胆”味是电子管放大器特有的一种音色，那种甜甜的、平滑而泛音丰富的声音，听起来非常悦耳。这种音色是因为一定量的2次谐波造成的修饰，由于大多数电子管放大器难以利用适当的负反馈提供良好的线性，加上输出变压器铁心的磁滞作用降低了瞬态响应，遂提供了这种2次谐波造就的泛音。实质上是电子管改变了原来音乐的色调，老式电子管放大器虽温暖柔和，但稍现朦胧的声音，难免有些软绵绵，现代电子管放大器则都有较高透明度、良好的声场、较少的电子管声染色。

电子管放大器的通病是有味无力，“胆”味不足，细节模糊，声音粗糙。好的电子管放大器具有醇厚的“胆”味、明快的速度以及宽阔的频响。电子管放大器以其微妙的“胆”味，充分体现了电子管的魅力，使不少音响爱好者为之痴迷、倾倒，并引发出“胆”“石”之争，历数十年而不息。自己动手制作电子管放大器，寻求其中的韵味奥秘，更是音响发烧之最大乐趣所在。

一、电子管及其特性



电子管（electron tube，英国称 valve）也叫真空管，香港地区称“胆”。它从电子教科书中删去已有 30 多年，已不再是人们所熟知的电子器件，但电子管在音响设备中仍占有一席之地，所以有必要对电子管及其工作进行了解。

电子管通常指一种密封管壳内抽成高真空，具有两个或多个电极的有源器件，它的基本工作原理是借助电场来控制真空中自由电子的运动。

阴极（cathode）是利用热电子发射原理而发射电子的电极。为发射电子而使热电子发射体达到高温的方法，有用表面涂有金属氧化物的细丝形或带形灯丝本身直接加热的直热式（direct-heated type）灯丝（filament），或用易发射电子材料覆盖的镍圆筒由里面放置的加热丝（heater）加热的旁热式（indirect-heater type，也称间热式）阴极，如图 1-1 所示。旁热式阴极的灯丝与阴极间是绝缘的，所以灯丝采用交流加热时不容易感应交流声，但电子管屏极电压在 1000V 以上时，出于寿命等原因，不能采用旁热式阴极。

直热式灯丝一般由折成 V 字形的镍丝构成，底部由两根硬线支承，顶部有弹簧拉紧。旁热式阴极是一个镍金属管，管内有加热用的螺旋形或发夹形镍丝或钨丝构成。

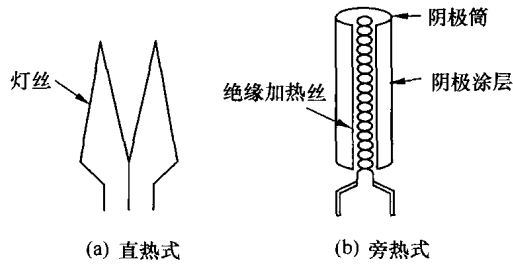


图 1-1 阴极结构

钨灯丝可以在高温下运用而且机械强度高，工作温度在 $2200\sim 2300^{\circ}\text{C}$ 之间，呈耀目的白色光辉。由于它发射效率低 ($2\sim 10\text{mA/W}$)，现在除高电压、大功率的发射管和旁热式加热灯丝外，都不采用钨作阴极。

钍钨灯丝也称敷钍钨灯丝，它的工作温度为 1650°C ，呈明亮的黄色光辉，发射能力为 $20\sim 40\text{mA/W}$ ，远大于钨灯丝，多用于 1000V 以上空气冷却的中等功率发射管。

氧化物阴极是用镍及其合金等为基金属，以稀土金属氧化物涂敷为发射层，它可在低得多的温度下具有大的发射能力，加热后呈暗红色，温度约 $700\sim 750^{\circ}\text{C}$ ，发射效率可达 $60\sim 100\text{mA/W}$ ，但这种阴极不能在高场强下工作，所有接收放大管都是氧化物阴极。电压在 1000V 以下而且屏极耗散较小的电子管，由于管内残留气体影响小，而且电极放散的气体也少，亦可使用氧化物阴极。

长寿命电子管的阴极温度较低，工作时阴极的亮度较暗，也需要稍长时间预热才能进入最佳状态。

二极管 (diode) 由真空密封管壳内的阴极和屏极 (plate 也称板极，英国称阳极 anode) 组成，屏极是包围在阴极外的镍 (或镀镍钢) 椭圆管状或匣状电极，如图 1-2 所示，为提高热辐射能力，屏极常碳化处理呈灰色，或配备散热片帮助耗散热量。当屏极电位比阴极电位正时，来自阴极的自由电子被正电位的屏极所吸引，产生电流，当反向偏置时，屏极不能吸引电子而没有电流，故真空二极管的特性与半导体二极管相似，都是单向导电。

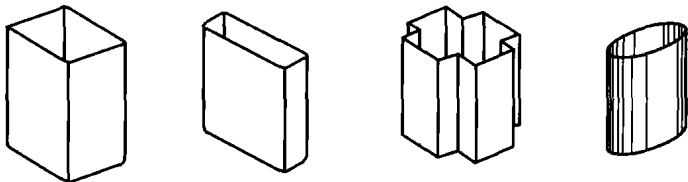


图 1-2 屏极的外形

三极管 (triode) 比二极管多一个控制栅极 (control grid)，它是在支架上以螺旋形状用金属丝绕的一定圈数，位于阴极附近，它可以用静电控制的方式控制

从阴极流到屏极的电子流，如图 1-3 所示。对于给定屏极电压时，栅极电压可以控制屏极电流的大小，这种栅极的控制效果，就是三极管放大的关键。在三极管的控制栅极上加一个交流信号电压后，就能控制屏极电流相应变化，该信号电压的微小变化，能引起屏极电流很大的变化，这些屏极电流的变化，再使屏极电路电阻两端的电压改变，所以三极管具有电压放大作用。为了保证信号幅度工作在所需特性曲线区域内，作线性放大，栅极必须适当地加以负偏压 (bias)。三极管自发明以来，一直被广泛使用在电子设备中，用来放大低频信号，但由于栅极—屏极间极间电容大、增益低，一般不适宜作高频放大。

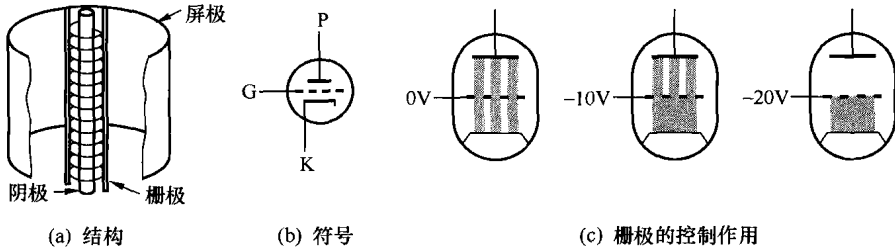


图 1-3 三极管

表示三极电子管特性的基本参数有 3 个，放大系数 μ ，屏极内阻 r_p (或 R_i) 和互导 g_m (或 S)。

$$\mu = \frac{\text{相同屏极电流变化所需屏极电压的变化值 } \Delta V_p}{\text{相同屏极电流变化所需栅极电压的变化值 } \Delta V_g} \quad (\text{屏极电流为常数时})$$

$$r_p = \frac{\text{屏极电压的变化 } \Delta V_p}{\text{屏极电流的变化 } \Delta I_p} \quad (\text{栅极电压为常数时}) \text{ 单位 } \Omega \text{ 或 } k\Omega$$

$$g_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta V_g} \quad (\text{屏极电压不变时}) \text{ 单位 } mA/V(m\bar{O}), mS \text{ 或 } \mu A/V(\mu\bar{O}), \mu S$$

3 个参数间的关系，可用方程式 $g_m = \frac{\mu}{r_p}$ 表示。其中 g_m 和 r_p 随电子管栅极电

压和屏极电压不同而异，是变量， μ 在一定屏极电压和栅极电压范围内，几乎不变，可视作常数。电子管参数与屏极电流或者栅极电压的关系曲线见图 1-4。

传统的栅极是螺旋形结构，两根边杆的相对位置靠栅丝的弹性维持，栅极易变形，难以确保栅丝在一个面上，所以不宜用在阴—栅距离小和要求栅丝细的电子管中。为了克服螺旋形栅极的缺点，1958 年出现了框架栅极 (frame grid)，框架栅极由坚固的焊接框架构成，绕以钨丝，在张力的作用下，结构稳定精密，能准确定位，框架栅极的公差可做到小于 $\pm 5\mu m$ ，适于阴—栅距离小的高互导管。

为了减小屏极与控制栅极之间，屏极与阴极之间的极间电容，在屏极和控制栅极间加进一个帘栅极 (screen grid)，在屏极和控制栅极间起静电屏蔽作用，帘

栅极的引入，还减少了屏极电流对屏极电压的依赖。这种四极管，在屏极电压低于帘栅极电压时，由于帘栅极加的是正电压，对电子具有加速作用，这些加速的电子打到屏极时会使屏极表面产生不可忽视的二次电子发射，形成电子云空间电荷，使屏极电流下降，出现严重失真。

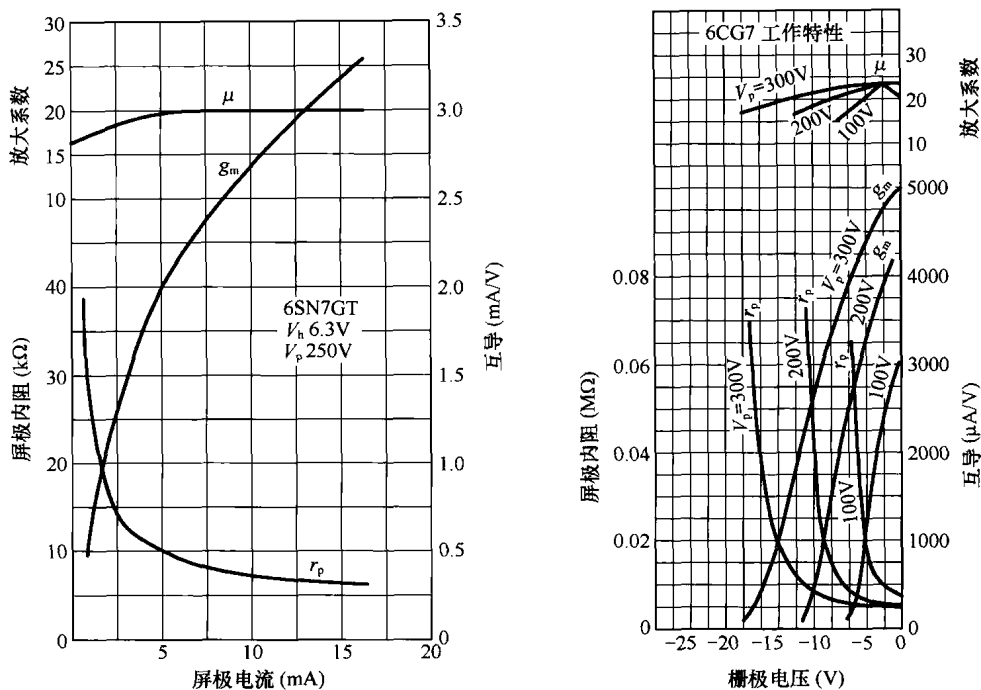


图 1-4 工作点对电子管参数的影响

为了克服二次电子发射，就在帘栅极与屏极之间又增添一个绕得很稀疏的抑制栅极 (suppressor grid)。它通常与阴极相连，并不阻碍从阴极来的高速电子通过，但能把屏极发射的二次电子排斥回屏极不致形成电子云，这就是五极管 (pentode)，见图 1-5。五极管增益高、极间电容小，在屏极电压达到一定值后，屏极电流几乎不受屏极电压的影响，并且屏极内阻高，被广泛用作射频、中频和声频放大。

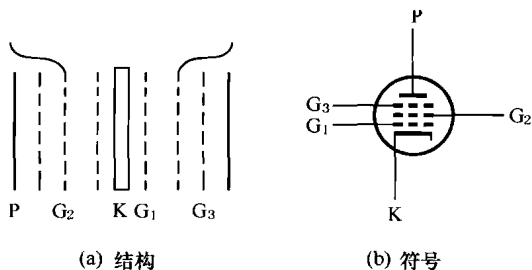


图 1-5 五极管

当电子管的控制栅极栅圈的间距相等时，其屏极电流随着栅极电压变负有较陡的截止特性，称锐截止（sharp cut-off）管。当栅极栅圈的间距有疏密时，其屏极电流随栅极电压变负时截止较慢，称其为遥截止（remote cut-off）管或可变互导管，见图 1-6。高频宽频带放大电子管的特点是高互导，低输入、输出电容，低噪声以及小的非线性失真等。不少的五极管在其整个电极结构的外面，围有屏蔽用金属网（或片），用来减小外界电场对电子管的影响。

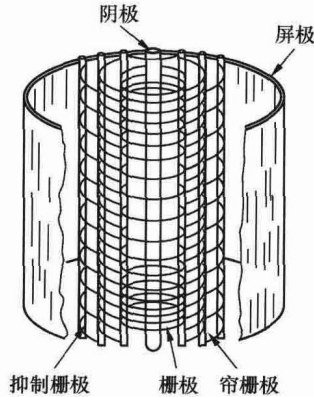


图 1-6 遥截止五极管结构

功率放大用电子管，以前习惯上称强放管，除三极管和五极管外，还有一种电子注管——集射功率管（beam-power tube），它应用定向电子射束显著增加电子管的功率容量，其控制栅极和帘栅极金属丝基本上对齐，所以帘栅极电流很小，而且从阴极发射出的电子流收敛成一系列扇形射束状高密度电子流，在帘栅极和屏极空间内形成极低的电位区域，阻止屏极的二次电子发射返回帘栅极，与阴极相连的集射屏对电子流起收敛作用，防止特性曲线扭曲及效率减低，如图 1-7 所示。

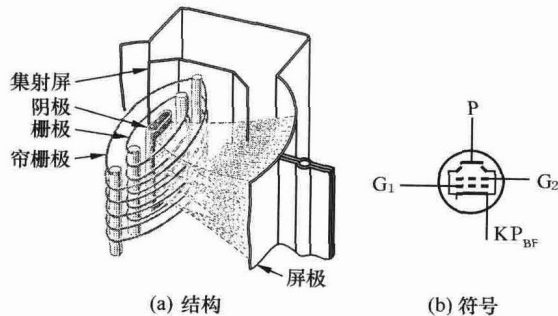


图 1-7 集射管结构及符号

电子管内须保持高度真空，这对电子管的使用寿命及正常运作至关重要。但

电极发热后会有气体逸出，故电子管内设有吸气剂，蒸发在电子管壳内表面，以消除管内残留的微量气体。

为了减小体积、降低功耗，在一个管壳内封装两组或两组以上的电极系统，并通过各自独立的电子流，这种电子管称为复合管（multiple-unit tube），如双二极管、双三极管、三极·五极管等。

某些设备要求应用特别的接收管，它们的性能在一个或多个方面进行了改进，超过了一般用于电视、音响和收音机的类型，这些特别品质电子管（special quality tube），包括高可靠型和长寿命型，是工业和特殊用途（如交通设施）所必需。它们通常可为一般品质原型的直接替代品。高品质电子管有优良的设计，高精度的制造规格，以及材料和制造过程的严格品质管理，使它们具有比同类型管平均寿命长得多的寿命。

电子管手册是一种工具书，它提供各种电子管的简单介绍，并列工作条件、特性、额定值、管基接线图等，对电子管电路及电路设计能提供有用资料。

各种电子管都有不同的特性，公开发表的曲线和数据仅能反映其中心值，而实际上典型的电子管特性常被忽略，图 1-8 为不同电子管类型的典型屏极特性曲线。五极管特性基本成为水平线，而三极管特性则倾向为垂直线，也就是说，五极管近似于恒流特性，而三极管对某一给定的栅极电压，接近于恒压特性。常用电子管的屏极特性曲线见附录 11。

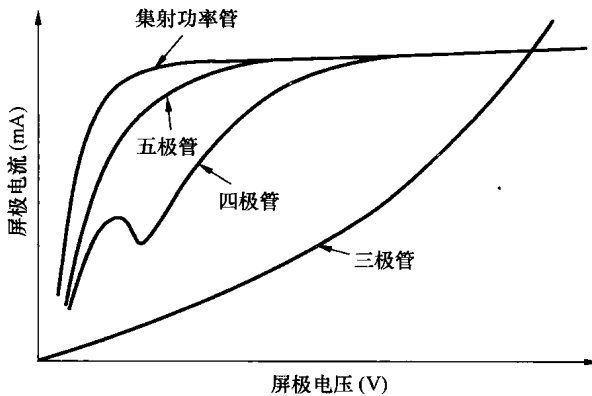


图 1-8 电子管 V_p/I_p 特性曲线

电子管正常工作时，必须对控制栅极进行偏置，如图 1-9。固定偏压电路，采用独立的栅—阴负电源 V_{gg} 使栅极保持适当的负值，从而使输入的交流信号能控制屏极电流 I_p 。阴极偏压电路，这是最流行的一种自给偏压电路，它不需要专门的或附加的偏压电源，在电子管的阴极电路中利用一个电阻提供栅偏压，通过阴极电阻 R_K 的电流为屏极电流 I_p ，它使阴极对地产生一个正电压，故对阴极而言，栅极被偏置为负，即 V_{gk} 为负电位。