

电子管基本电路

中国人民解放军空军雷达学校

一九七八年十一月



数据加载失败，请稍后重试！



数据加载失败，请稍后重试！



数据加载失败，请稍后重试！

目 录

第一章 电子管

第一节 概述	1
第二节 电子现象的基础	2
一、电子的荷质比	2
二、电子在电场中的能量交换	3
三、电子在电场中的运动速度	3
四、逸出功	4
第三节 电子放射和热阴极	5
一、电子放射的种类	5
二、热阴极的材料	6
三、热阴极的结构	6
四、热阴极的运用	7
第四节 二极管	8
一、二极管的结构	8
二、二极管的导电特性	8
三、二极管的特性曲线	12
四、二极管的参量	13
五、各类二极管的特点	14
六、二极管的应用	14
第五节 三极管	15
一、三极管的结构	16
二、三极管的导电特性	16
三、三极管的特性曲线	18
四、三极管的参量	21
五、三极管的正栅工作特性	24
六、各类三极管的特点	28
七、三极管的极间电容	29
八、三极管的应用	29

第六节 帘栅管	30
一、五极管	30
二、集射管	38
第七节 辉光管	41
一、气体的电离和消电离	41
二、辉光管的结构	41
三、辉光管中的气体放电形式	42
四、辉光管的导电特性	42
五、辉光管的参量	43
六、辉光管的应用	44
第八节 电子管的使用	45
一、电子管的型号	45
二、电子管管底接线	45
三、极限运用数据	46
四、电子管的寿命	47
五、电子管的一般故障	47
附录 电子管的编号	48
一、我国电子管编号方法	48
二、常用电子管型号对照表	51

第二章 放大电路

第一节 基本放大电路	53
一、电路及放大的物理过程	54
二、图解法	57
三、等效电路法	66
四、单级放大电路的组成	72
第二节 电子管放大器的分类和性能指标	74
一、电子管放大器的分类	74
二、放大器的性能指标	76
第三节 低频电压放大器	84
一、阻容耦合放大器	85
二、阻容耦合放大器的补偿	95
第四节 低频功率放大器	99
一、单管低频功率放大器	100
二、推挽低频功率放大器	104

第五节 负反馈放大器	109
一、反馈的基本概念	109
二、反馈电路的分类	110
三、反馈放大器的放大倍数	112
四、负反馈对放大器性能的改善	114
五、负反馈对放大器输出阻抗和输入阻抗的影响	118
六、阴极输出器	121
七、多级负反馈放大器举例	127
第六节 多级放大器	128
一、放大倍数及增益	128
二、通频带	129
三、通过公共阳极电源的寄生耦合及其抑制方法	131
第七节 高频放大器	133
一、高频电压放大器	134
二、高频功率放大器	136
三、倍频器	143
附录 阴极自偏压电路偏压值的确定	145

第三章 振荡电路

第一节 基本工作原理	149
一、自激振荡条件的分析	151
二、自激振荡振幅的分析	155
三、自激振荡频率的分析	158
四、振荡器栅偏压的建立	163
第二节 三点式振荡器	166
一、电感三点式振荡器分析	166
二、电容三点式振荡器分析	168
三、两种三点电路的比较	170
四、三点式振荡器的变形电路	172
第三节 石英晶体振荡器	176
一、电路结构	176
二、振荡条件的分析	177
三、石英晶体振荡器的特点	180
四、电子耦合晶体振荡器	181
第四节 振荡器工作的检查	182

附 录 阻容式振荡器	182
一、零相移振荡器	183
二、反相移振荡器	185

第四章 调制、检波、变频及整流

第一节 调制	188
一、调幅的基本原理	188
二、阳极调幅的方法	191
第二节 检波	192
一、检波的基本概念	192
二、振幅检波的基本原理	192
第三节 变频	194
一、变频的基本概念	194
二、变频的基本原理	194
第四节 整流	197
一、整流的基本概念	197
二、整流电路	199
三、平滑滤波电路	207
四、电子管稳压电路	209
五、整流器的使用	211

第五章 脉冲电路

第一节 基础知识	213
一、脉冲的概念	213
二、暂态的概念	214
三、 $R-C$ 串联电路的暂态过程	215
四、 $R-L$ 串联电路的暂态过程	224
五、脉冲电路中电子管工作的特点	227
第二节 脉冲变换电路	228
一、微分电路	228
二、积分电路	230
三、耦合电路	231
四、 $R-C$ 分压器	232
五、钳位电路	234

六、限幅电路	241
第三节 振激振荡器	247
一、正弦波振激振荡器	247
二、脉冲波振激振荡器	249
第四节 多谐振荡器	251
一、多谐振荡器的一般概念	251
二、阳极耦合多谐振荡器	252
三、阴极耦合多谐振荡器	264
第五节 间歇振荡器	273
一、脉冲变压器中电流、磁通、感应电势的关系	273
二、外激间歇振荡器	275
三、自激间歇振荡器	281
四、线控间歇振荡器	283
第六节 同步与分频	286
一、同步与分频的概念	286
二、多谐振荡器的同步与分频	286
三、间歇振荡器的同步与分频	289
四、分频稳定度的分析	290
五、用积累电路分频	292
第七节 锯齿电压产生器	294
一、基本电路及工作原理	294
二、锯齿电压直线性的改善	296
三、锯齿电流的产生	299
第八节 幻象电路	302
一、电子管在双栅控制状态下阳流和帘栅流的分配特性	302
二、外激式帘栅耦合幻象电路	304
三、自激式帘栅耦合幻象电路	307
四、外激式阴极耦合幻象电路	309
附录 $R-C$ 串联电路充放电公式的推导	312
一、 $R-C$ 串联电路充电公式的推导	312
二、 $R-C$ 串联电路放电公式的推导	313
三、 $R-C$ 串联电路输入斜升电压时, 充电公式的推导	314

总附录一 信号的频谱.....	316
一、低频信号的频谱.....	316
二、高频信号的频谱.....	319
总附录二 技术符号代号及注脚符号表.....	324
一、技术符号代号表.....	324
二、注脚符号表.....	325
三、说明.....	325

第一章 电子管

内 容 提 要

电子管是电子设备中的一种主要元件。

本章主要讨论最常用的二极管、三极管和帘栅管。

所有这些电子管，其工作过程的本质，都是外加电压对管内电子流的控制作用。也就是外加电压的变化，通过影响管内电场的分布，控制管内电子的运动状态，从而引起相应的电流变化。

列宁说：“本质是有形式的”^①，“现象是本质的显现”^②。电子管的导电特性，就是上述本质的客观反映。

电子管的特性曲线和参量，是表征电子管导电特性的主要标志和有效方式。我们可以通过对各种管子特性曲线和参量的比较，进一步理解和掌握它们的特点和本质。

二极管虽然是所有电子管中结构最简单的一种，然而它却具有各种电子管所共有的最基本的特性。在学习中必须予以足够的重视。

三极管是讨论的重点。三极管具有的放大特性，也是帘栅管工作的基础。放大特性在电子设备中得到广泛应用，因此，掌握好三极管的特性是十分重要的。

第一节 概 述

电子管是电子设备中的主要元件之一。它由管壳和封在管壳内的几个金属电极构成。管内电极至少有两个：一个是放射电子的阴极，一个是收集电子的阳极。电子管工作时，电极之间有电子流流通，电子流的强弱与流通方向，受电极间电场或磁场的控制。

电子管包括真空管和充气管两大类。管内为高度真空的，称为真空管；管内抽去空气、充入少量惰性气体的，称为充气管。

以电子管为主要元件组成的各种电路，称为电子管电路，它是构成各种电子设备的基本单元。

毛主席说：“为要暴露事物发展过程中的矛盾在其总体上、在其相互联结上的特殊性，就是说暴露事物发展过程的本质，就必须暴露过程中矛盾各方面的特殊性，否则暴露过程的本质成为不可能”^③。因为各种电子管电路都是在电子管和它的外部电路互相联结、互相制约中工作的。所以，我们要研究电子管电路的工作过程，首先必须了解电子管的特性，在此

① 《黑格尔“逻辑学”一书摘要》。《列宁哲学笔记》，人民出版社1960年1月第二版，第151页。

② 《黑格尔“逻辑学”一书摘要》。《列宁哲学笔记》，人民出版社1960年1月第二版，第184页。

③ 《矛盾论》。《毛泽东选集》，人民出版社1967年袖珍本，第286页。

基础上，才能进一步了解电子管和外电路联结时这两方面特性之间的制约关系，才能暴露电子管电路工作过程的本质。下面我们主要讨论的，就是电子管本身的特性。

电子设备中常用的电子管如表 1—1 所示。

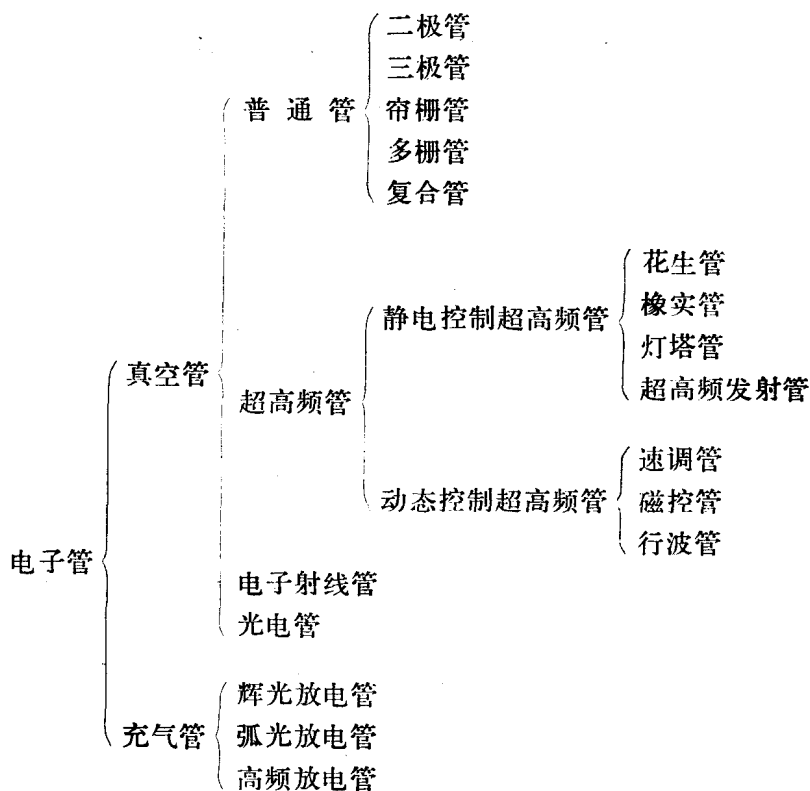


表1—1 电子设备中常用的电子管

本章只限于讨论普通真空管的工作原理和特性，作为研究电子管基本电路的基础。对于充气管中的辉光放电管作一般介绍。

第二节 电子现象的基础

一、电子的荷质比

电子管内部的电子运动，是电子管工作的基础。为了搞清管内发生的物理过程，下面首先复习有关电子的一些基本知识。

电子，是带有负电荷的基本质点。它的荷电量为：

$$e_0 = 1.601 \times 10^{-19} \text{ 库仑} .$$

电子的质量为：

$$\begin{aligned} m &= 9.1 \times 10^{-28} \text{ 克} \\ &= 9.1 \times 10^{-31} \text{ 千克} . \end{aligned}$$

电子的荷电量 e_0 与它的质量 m 的比值，称为电子的荷质比，其值为：

$$\begin{aligned} \frac{e_0}{m} &= 1.759 \times 10^8 \text{ 库仑/克} \\ &= 1.759 \times 10^{11} \text{ 库仑/千克} . \end{aligned}$$

可见, 电子的质量很小, 约为氢原子质量的 $\frac{1}{1840}$ 倍, 而它所带的电量却相对地很大 (每千克重电子所带的电量竟达 1.759×10^{11} 库仑)。因此, 人们很容易用电场或磁场来控制电子的运动。即便是微弱的电场作用于电子, 也会使电子的速度在瞬息之间发生变化; 而以微弱的磁场作用于电子, 也会使电子迅速地改变运动状态。因此, 只要用一定强度的电场或磁场作用于电子, 就可以达到预期的效果。电子管之所以被广泛应用的基本原因, 就在于电子具有这样的特性。

二、电子在电场中的能量交换

一般电子管内的物理过程, 都是在电极之间加以电场, 使电子在电场力的作用下, 按规定的方向运动。也有的电子管用磁场来控制电子的运动。为了进一步了解管内的电子现象, 有必要先讨论一下电子在电场中的能量交换情况, 至于电子在磁场控制下的运动情况, 将在雷达原理课程中讨论。

电子在电场中, 受到电场力的作用, 电场力 F 与电子所处位置的电场强度 E 成正比, 由于电子带负电荷, 电场力的方向与电场的方向相反, 即

$$F = -e_0 E$$

在电场力 F 的作用下, 电子将被加速或者减速, 它的速度和动能将随之而变, 与电场发生能量交换。

设电子在静电场中从 a 点移动到 b 点时, 电子的速度由 v_a 变为 v_b , 那末电子动能的变化量为:

$$\Delta W = \frac{1}{2} m v_b^2 - \frac{1}{2} m v_a^2$$

根据能量守恒定律可知, 电子动能的变化量 ΔW 应该等于电场力对电子所作的功。设 a 点电位为 U_a , b 点电位为 U_b , 电子由 a 点移到 b 点时, 电场力所作的功与电子经过的路径无关, 仅仅决定于终点与起点之间的电位差 U_{ba} 。

$$U_{ba} = U_b - U_a$$

则电场力所作的功为 $e_0 U_{ba}$ 。

当 U_b 高于 U_a , 电子从低电位向高电位移动时, 电子被加速, 动能增大, 增大的动能等于电场力所作的功; 当 U_b 低于 U_a 时, 电子从高电位向低电位移动, 电子被减速, 动能减小, 减小的动能等于电子克服电场力的作用所作的功。这就是说, 电子从低电位向高电位运动时, 从电场获得能量; 电子从高电位向低电位运动时, 把一部分能量交给电场。

三、电子在电场中的运动速度

图1—1表示两个平板型的平行电极, 其中 K 为阴极、 A 为阳极, 两电极间的距离为 d 。我们将阴极 K 接地, 处于零电位, 阳极 A 接正电压 U_a , 这样在电极之间就会产生均匀电场, 电场强度为:

$$E = \frac{U_a}{d}$$

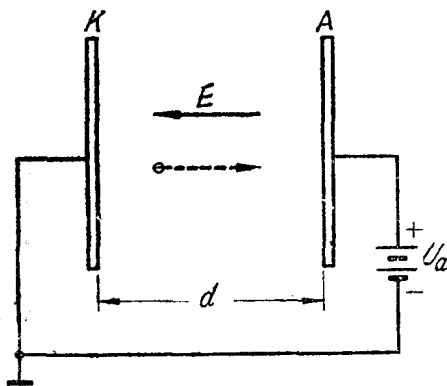


图1—1 平板电极间的电场

在一般电子管中，从阴极放射出来的电子速度很小，可以认为电子在逸出阴极表面、进入阳—阴间电场时的初速度为零。在电场的作用下，电子的运动速度不断加快，迅速到达阳极。

可见，电子在电场中从阴极到达阳极，它的速度由零变为 v ，电子动能的变化量为：

$$\Delta W = \frac{1}{2} m v^2 - 0.$$

电场对电子所作的功为 $e_0 U_a$ 。据此，可以求出电子到达阳极时的速度为：

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2 e_0 U_a}{m}} \\ &= 5.931 \times 10^5 \sqrt{U_a} \text{ (米/秒) }, \\ v &\approx 600 \sqrt{U_a} \text{ (千米/秒) }. \end{aligned} \quad (1-1)$$

根据该式计算，在一般小型电子管中，阳极电压 U_a 约为 100~200 伏左右，电子到达阳极时的速度约为 6000~8400 千米/秒；在具有 10000 伏阳压的大型发射管中，电子速度可达 60000 千米/秒。电子以这样高的速度撞上阳极，把动能转化为热能消耗在阳极上。

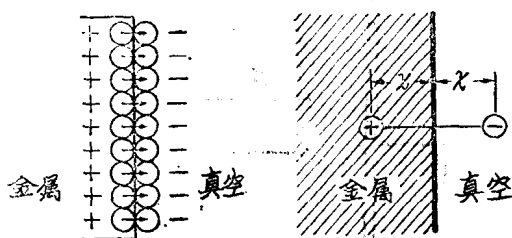
电子从阴极飞达阳极所需要的时间，称为电子渡越时间。由于电子的速度非常高，电子渡越时间极短，通常只有千分之一微秒左右。当电子管中的控制电场作周期性变化时，只要电子渡越时间远小于控制电场变化的周期，小到可以忽略不计，那末，就可以认为，电子从阴极飞达阳极是不化时间的。这样，飞向阳极的电子流，就能随着电场的变化而变化。

四、逸出功

电子管内，电子是以脱离金属电极在空间运动的状态出现的，下面就来讨论电子是怎样离开金属的。

(一) 偶电层

金属内的自由电子可以在金属内部自由运动，却不能脱离金属而逸出。这是因为当这些电子在金属内部时，受到晶格中正离子的引力是各向对称的，总的合力趋于抵消，所以这些电子可以在金属内部自由运动。如果电子跑出金属表面，电子所受正离子的作用力就不再是对称的、而是指向金属内部，阻止电子离开金属，电子又会被拉回金属内部。由于这种情况的不断发生，在金属表面就会存在一个电子气层。这些带负电的电子和金属最外层的正离子之间，形成了一个阻止电子逸出金属的偶电层，如图 1—2 (a) 所示。这样一来，金属内部的电子想要逸出金属，首先要克服偶电层的阻力。



(a) 偶电层示意图

(b) 电象力示意图

图1—2 偶电层和电象力

(二) 电象力

如果电子所具有的动能足以克服阻力而越过偶电层，那还必须考虑电子离开金属表面后，由静电感应产生的吸引力，这吸引力称为电象力，如图 1—2 (b) 所示。这就是说，电子越过偶电层后，还必须克服电象力的吸引，才能完全脱离金属而逸出。

(三) 逸出功的定义

设电子为克服偶电层和电象力需要做的功为 W_0 ，金属内部自由电子在绝对零度(-273°C)时，所具有的最大能量为 W_i ，那末，为使电子逸出金属而需要外加的最低能量为：

$$W_0 = W_0 - W_i$$

W_0 称为逸出功，它的大小用电子伏特数来表示。

各种金属的逸出功不尽相同，通常约为1~10电子伏特。逸出功小于4电子伏特的纯金属有钍、铯、钙、钡、铯等。逸出功在4电子伏特以上的纯金属有钨、镍、钼、汞、钨等。用逸出功小的金属作阴极材料，意味着容易放射电子。

小 结

所有的电子管，都是以管内的电子运动作为运用的基础的。而电子，则由于它的荷质比极大，使人们便于以较为微弱的电、磁场来控制它们的运动。

初速为零的电子，在电场力的作用下，将由低电位向高电位运动，从电场获得能量，其速度越来越快，动能越来越大。如果电子由高电位向低电位运动时，则将能量交给电场，速度减慢、动能减小。

金属中的自由电子，必须克服偶电层和电象力的阻力才能逸出。逸出功表示：为使自由电子逸出金属，外界必须给予的最低限度的能量值。

第三节 电子放射和热阴极

一、电子放射的种类

为了使大量的电子从阴极放射出来，必须设法提高自由电子的动能。按照供给能量的方法不同，电子放射可以分为下列几种：

(一) 热电放射

利用加热的方法，使阴极中自由电子的动能增加，当增加的动能等于或大于逸出功时，电子就能逸出阴极表面。这种电子放射现象，称为热电放射，是电子管中应用最多的一种电子放射形式。

阴极材料的逸出功愈低，阴极加热的温度愈高，热电放射的电子数就愈多，放射率(即单位面积的放射电流)就愈高。

(二) 二次放射

物体受到外来电子(或离子)的轰击，使自由电子的动能增加而放射出来的现象，称为二次放射。用来轰击物体的电子，称为一次电子或原电子，放射出来的电子，称为二次电子。

在一定的范围内，一次电子的数量愈多、速度愈高，二次放射的电子数就愈多，放射率愈高。辉光管就是利用二次放射产生电子的。

(三) 场致放射

在外加电场作用下，物体内的电子受到一个向外的电场力，如果电场力足够大，会使电子逸出体外，这种现象叫做场致放射。

(四) 光电放射

物体在光的照射下，体内电子吸收了光波中的能量而逸出体外，这种现象叫做光电放射。光电管就是利用光电放射产生电子的。

二、热阴极的材料

利用热电放射产生电子的阴极，称为热阴极。对热阴极材料的主要要求是逸出功小和熔点高。目前常用的热阴极材料大体分为三类，即纯金属阴极、敷正电性物质阴极和敷半导体物质阴极。

(一) 纯金属阴极

用作纯金属阴极的材料主要有钨、钼、钽等，其中以钨用得最多，一般制成丝状应用。钨丝的逸出功虽然较大，但它的熔点很高。

钨丝阴极的基本优点是放射性能稳定，适用于大型电子管和需要放射性能稳定、供测量仪器用的电子管中。一般可使用800~1000小时。

(二) 敷正电性物质阴极

为了减小金属的逸出功，可以在底金属（钨）的表面，敷以另一种逸出功小的金属（如钍）薄层。金属钍由于逸出功小，它的自由电子容易趋向底金属而使自己带正电，这样就在金属表面形成了一个偶电层。这个偶电层所产生的电场，对电子放射来说是加速电场，能帮助电子逸出。

敷正电性物质阴极有钨—钍阴极和碳化钨—钍阴极等。前者的使用时间较长可达3000小时，但在正离子的轰击下，钍原子容易脱离底金属而使放射性能降低。碳化钨—钍阴极中的钍原子与底金属的结合比较牢固，放射性能比较稳定，但是它的机械强度较差，使用时应避免震动。

(三) 敷半导体物质阴极

这是一种在底金属表面敷上一层能放射电子的半导体物质的阴极。最常用的是氧化物阴极，它是用钽和铌的氧化物敷在底金属（镍或镍合金）的表面构成的。

氧化物阴极的逸出功小，主要是因为半导体的自由电子很少，表面的电子气层密度很小，偶电层的电场强度远比金属为弱。使用氧化物阴极，可以在阴极温度不很高的情况下，获得很大的放射量。它还具有脉冲放射的特性，在极短的时间内（如几个微秒），在很强的加速电场作用下，可以放射很大的电流，因此，它不仅广泛地应用于一般的电子管中，而且还适用于脉冲式工作的电子管。使用时间一般可达2000小时。

三、热阴极的结构

热阴极的加热，都是以电流流过金属导线的方式实现的。具体的结构有两种。

一种是电流直接通过放射体，使其温度升高而放射电子，这种阴极，称为直热式阴极，通常采用纯钨、钨—钍和碳化钨—钍材料。常见的直热式阴极的结构型式如图1—3所示。

还有一种阴极是电流通过热丝（也叫灯丝），温度升高后，再把热量传给放射体。这种阴极称为旁热式阴极。它的结构型式如图1—4所示。外面是镍或镍合金

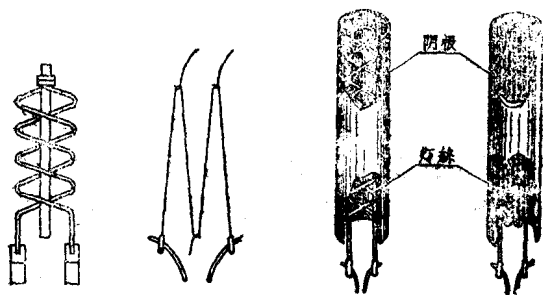


图1—3 直热式阴极的结构

图1—4 旁热式阴极的结构

做成的套管，套管表面为氧化物热电放射体，里面是钨丝做成的灯丝，用以加温。灯丝表面敷有一层耐高温的绝缘物（如氧化铝）以避免灯丝与阴极形成通路。

四、热阴极的运用

热阴极的工作状况和性能，对电子管的效能和寿命有直接的影响。对于大功率电子管，必须注意限制阴极的起始电流于安全值以下，并控制好阴极的温度。

我们知道，金属在低温时的电阻远比在高温时为小，因此，当电源刚接上阴极时，阴极电流将大大超过正常工作时的额定值，例如钨丝阴极的起始电流可达十倍于额定值。对于形状复杂（如W形）的阴极来说，过大的起始电流所产生的磁场，可能在阴极的各线段之间引起相当大的机械力，从而使阴极变形、甚至毁坏。因此在大功率管中，通常在阴极电路中串联可变电阻，将阴极的起始电流限制在安全值。

阴极工作温度的变化，对电子管的工作和寿命有很大的影响。阴极温度过低时，放射量要降低；阴极温度过高时，又将急剧地缩短其使用期限。为了控制阴极的温度，可以在灯丝电路中串接电流表或并联电压表，利用电表的指示，调整串联在灯丝电路里的可变电阻器，维持灯丝电流或灯丝电压不变。

小 结

所有的电子管，都具有放射电子的阴极。为了使阴极放射大量的电子，必须提高阴极中自由电子的动能。根据供给电子能量的方法不同，电子放射分为热电放射、二次放射、场致放射和光电放射。真空管基本上都是应用热电放射；二次放射则在充气管中有所应用。

根据加热方式的不同，电子管的阴极有直热式和旁热式之分。目前大量应用的直热式阴极主要是钨丝阴极；旁热式阴极主要有氧化物阴极。

电子管的寿命和正常效能的发挥，与热阴极的工作状况和性能直接相关。使用中要注意控制阴极的温度，大功率管更应注意限制阴极的起始电流。