

夫兰克-赫兹实验

1913 年，丹麦物理学家玻尔（N. Bohr）提出了一个氢原子模型，并指出原子存在能级。该模型在预言氢光谱的观察中取得了显著的成功。根据玻尔的原子理论，原子光谱中的每根谱线表示原子从某一个较高能态向另一个较低能态跃迁时的辐射。

1914 年，德国物理学家夫兰克（J. Franck）和赫兹（G. Hertz）对勒纳用来测量电离电位的实验装置作了改进，他们同样采取慢电子（几个到几十个电子伏特）与单元素气体原子碰撞的办法，但着重观察碰撞后电子发生什么变化（勒纳则观察碰撞后离子流的情况）。通过实验测量，电子和原子碰撞时会交换某一定值的能量，且可以使原子从低能级激发到高能级。直接证明了原子发生跃变时吸收和发射的能量是分立的、不连续的，证明了原子能级的存在，从而证明了玻尔理论的正确。由而获得了 1925 年诺贝尔物理学奖金。

夫兰克-赫兹实验至今仍是探索原子结构的重要手段之一，实验中用的“拒斥电压”筛去小能量电子的方法，已成为广泛应用的实验技术。

【实验目的】

通过测定氩原子等元素的第一激发电位（即中肯电位），证明原子能级的存在。

【实验原理】

1. 关于激发电位：

玻尔提出的原子理论指出：

（1）原子只能较长地停留在一些稳定状态（简称为定态）。原子在这些状态时，不发射或吸收能量：各定态有一定的能量，其数值是彼此分隔的。原子的能量不论通过什么方式发生改变，它只能从一个定态跃迁到另一个定态。

（2）原子从一个定态跃迁到另一个定态而发射或吸收辐射时，辐射频率是一定的。如果用 E_m 和 E_n 分别代表有关两定态的能量的话，辐射的频率 ν 决定于如下关系：

$$h \nu = E_m - E_n \quad (1-2-1)$$

式中，普朗克常数

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

为了使原子从低能级向高能级跃迁，可以通过具有一定能量的电子与原子相碰撞进行能量交换的办法来实现。

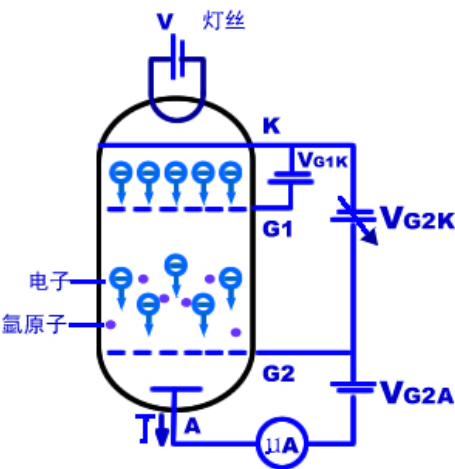
设初速度为零的电子在电位差为 U_0 的加速电场作用下，获得能量 eU_0 。当具有这种能量的电子与稀薄气体的原子（比如十几个氩的氩原子）发生碰撞时，就会发生能量交换。如以 E_1 代表氩原子的基态能量、 E_2 代表氩原子的第一激发态能量，那么当氩原子吸收从电子传递来的能量恰好为

$$eU_0 = E_2 - E_1 \quad (1-2-2)$$

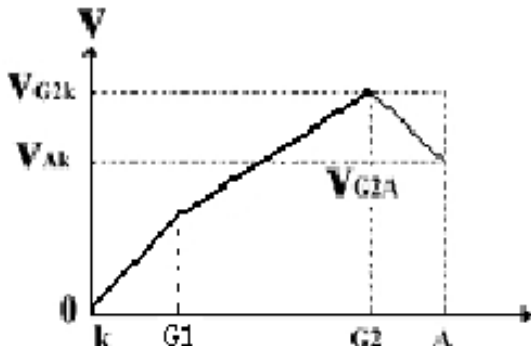
时，氩原子就会从基态跃迁到第一激发态。而且相应的电位差称为氩的第一激发电位（或称氩的中肯电位）。测定出这个电位差 U_0 ，就可以根据（1-2-2）式求出氩原子的基态和第一激发态之间的能量差了（其他元素气体原子的第一激发电位亦可依此法求得）。

夫兰克-赫兹实验的原理图如图一所示。在充氩的夫兰克-赫兹管中，电子由热阴极发出，阴极 K 和第二栅极 G₂ 之间的加速电压 U_{G_2K} 使电子加速。在板极 A 和第二栅极 G₂ 之间加有反向拒斥电压 U_{G_2A} 。管内空间电位分布如图二所示。当电子通过 KG₂ 空间进入 G₂A 空间时，如果有较大的能量（ $\geq eU_{G_2A}$ ），就能冲过反向拒斥电场而到达板极形成板极电流，为微电流计 μA 表检出。如果电子在 KG₂ 空间与氩原子碰撞，把自己一部分能量传给氩原子而使后者激发的话，电子本身所剩余的能

量就很小，以致通过第二栅极后已不足于克服拒斥电场而被折回到第二栅极，这时，通过微电流计 μA 表的电流将显著减小。



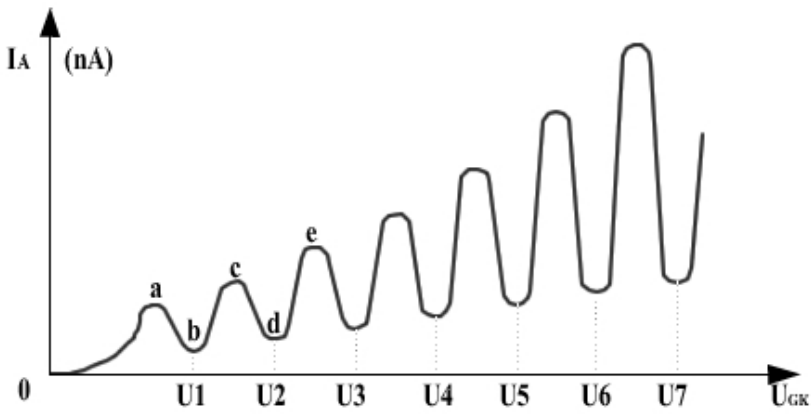
图一：夫兰克赫兹-原理图



图二：夫兰克-赫兹管内空间电位分布

实验时，使 U_{G2K} 电压逐渐增加并仔细观察电流计的电流指示，如果原子能级确实存在，而且基态和第一激发态之间有确定的能量差的话，就能观察到如图三所示的 $I_A \sim U_{G2K}$ 曲线。

图三所示的曲线反映了氩原子在 $KG2$ 空间与电子进行能量交换的情况。当 $KG2$ 空间电压逐渐增加时，电子在 $KG2$ 空间被加速而取得越来越大的能量。但起始阶段，由于电压较低，电子的能量较少，即使在运动过程中它与原子相碰撞也只有微小的能量交换（为弹性碰撞）。穿过第二栅极的电子所形成的板极电流 I_A 将随第二栅极电压 U_{G2K} 的增加而增大（如图三的 oa 段）。当 $KG2$ 间的电压达到氩原子的第一激发电位 U_0 时，电子在第二栅极附近与氩原子相碰撞，将自己从加速电场中获得的全部能量交给后者，并且使后者从基态激发到第一激发态。而电子本身由于把全部能量给了氩原子，即使穿过了第二栅极也不能克服反向拒斥电场而被折回第二栅极（被筛选掉）。所以板极电流将显著减小（图三所示 ab 段）。随着第二栅极电压的增加，电子的能量也随之增加，在与氩原子相碰撞后还留下足够的能量，可以克服反向拒斥电场而达到板极 A ，这时电流又开始上升（ bc 段）。直到 $KG2$ 间电压是二倍氩原子的第一激发电位时，电子在 $KG2$ 间又会因二次碰撞而失去能量，因而又会造成第二次板极电流的下降（ cd 段），同理，凡在



图三：夫兰克-赫兹管的 $I_A \sim U_{GK}$ 曲线

的地方板极电流 I_A 都会相应下跌，形成规则起伏变化的 $I_A \sim U_{GK}$ 曲线。而各次板极电流 I_A 下降相对应的阴、栅极电压差 $U_{n+1} - U_n$ 应该是氩原子的第一激发电位 U_0 。本实验就是要通过实际测量来证实原子能级的存在，并测出氩原子的第一激发电位（公认值为 $U_0 = 11.61\text{V}$ ）。

原子处于激发态是不稳定的。在实验中被慢电子轰击到第一激发态的原子要跳回基态，进行这种反跃迁时，就应该有 $e U_0$ 电子伏特的能量发射出来。反跃迁时，原子是以放出光量子的形式向外辐射能

$$U_{GK2} = n U_0 \quad (n=1, 2, 3 \dots\dots) \quad (1-2-3)$$

的地方板极电流 I_A 都会相应下跌，形成规则起伏变化的 $I_A \sim U_{GK}$ 曲线。而各次板极电流 I_A 下降相对应的阴、栅极电压差 $U_{n+1} - U_n$ 应该是氩原子的第一激发电位 U_0 。本实验就是要通过实际测量来证实原子能级的存在，并测出氩原子的第一激发电位（公认值为 $U_0 = 11.61\text{V}$ ）。

原子处于激发态是不稳定的。在实验中被慢电子轰击到第一激发态的原子要跳回基态，进行这种反跃迁时，就应该有 $e U_0$ 电子伏特的能量发射出来。反跃迁时，原子是以放出光量子的形式向外辐射能

原子处于激发态是不稳定的。在实验中被慢电子轰击到第一激发态的原子要跳回基态，进行这种反跃迁时，就应该有 $e U_0$ 电子伏特的能量发射出来。反跃迁时，原子是以放出光量子的形式向外辐射能

量。这种光辐射的波长为

$$eU_o = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \tag{1-2-4}$$

对于氩原子

$$\lambda = \frac{hc}{eU_o} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-19} \times 11.5} m = 1081 \text{ \AA}$$

如果夫兰克—赫兹管中充以其他元素，则可以得到它们的第一激发电位（表一）

表一 几种元素的第一激发电位

Element	Sodium (Na)	Potassium (K)	Lithium (Li)	Magnesium (Mg)	Mercury (Hg)	Helium (He)	Neon (Ne)
U_0 (V)	2.12	1.63	1.84	3.2	4.9	21.2	18.6
λ (Å)	5898 5896	7664 7699	6707.8	4571	2500	584.3	640.2

【实验系统构成】

- FH-2 智能夫兰克—赫兹实验仪 一台
- 示波器 一台

【实验内容及步骤】

1、 准备

1.1 熟悉实验仪使用方法（见附录 1）

1.2 按照附录 2 要求连接夫兰克赫兹管各组工作电源线，检查无误后开机。将实验仪预热 20~30 分钟。

开机后的初始状态如下：

- 实验仪的“1mA”电流档位指示灯亮，表明此时电流的量程为 1mA 档；电流显示值为 0000.（ $10^{-7}A$ ）；
 - 实验仪的“灯丝电压”档位指示灯亮，表明此时修改的电压为灯丝电压；电压显示值为 000.0V；最后一位在闪动，表明现在修改位为最后一位；
 - “手动”指示灯亮。
- 表明仪器工作正常。

2、 氩元素的第一激发电位测量

2.1 手动测试

- a、设置仪器为“手动”工作状态，按“手动/自动”键，“手动”指示灯亮。
- b、设定电流量程（电流量程可参考机箱盖上提供的数据）
按下相应电流量程键，对应的量程指示灯点亮。
- c、设定电压源的电压值（设定值可参考机箱盖上提供的数据），用↓ / ↑，← / →键完成，需设定的电压源有：灯丝电压 V_F 、第一加速电压 V_{G1K} 、拒斥电压 V_{G2A} 。
- d、按下“启动”键，实验开始。用↓ / ↑，← / →键完成 V_{G2K} 电压值的调节，从 0.0V 起，按步长 1V（或 0.5V）的电压值调节电压源 V_{G2K} ，同步记录 V_{G2K} 值和对应的 I_A 值，同时仔细观察夫兰克—赫兹管的板极电流值 I_A 的变化（可用示波器观察）。**切记为保证实验数据的唯一性 V_{G2K} 电压必须从小到单向调节，不可在过程中反复；记录完成最后一组数据后，立即将 V_{G2K} 电压快速归零。**

e、重新启动

在手动测试的过程中，按下启动按键， V_{G2K} 的电压值将被设置为零，内部存储的测试数据被清除，示波器上显示的波形被清除，但 V_F 、 V_{G1K} 、 V_{G2A} 、电流档位等的状态不发生改变。这时，操作者可以在该状态下重新进行测试，或修改状态后再进行测试。

建议：手动测试 I_A-V_{G2K} ，进行一次或修改 V_F 值再进行一次。

2.2 自动测试

智能夫兰克-赫兹实验仪除可以进行手动测试外，还可以进行自动测试。

进行自动测试时，实验仪将自动产生 V_{G2K} 扫描电压，完成整个测试过程；将示波器与实验仪相连接，在示波器上可看到夫兰克-赫兹管板极电流随 V_{G2K} 电压变化的波形。

a、自动测试状态设置

自动测试时 V_F 、 V_{G1K} 、 V_{G2A} 及电流档位等状态设置的操作过程，夫兰克-赫兹管的连线操作过程与手动测试操作过程一样。

b、 V_{G2K} 扫描终止电压的设定

进行自动测试时，实验仪将自动产生 V_{G2K} 扫描电压。实验仪默认 V_{G2K} 扫描电压的初始值为零， V_{G2K} 扫描电压大约每 0.4 秒递增 0.2 伏。直到扫描终止电压。

要进行自动测试，必须设置电压 V_{G2K} 的扫描终止电压。

首先，将“手动 / 自动”测试键按下，自动测试指示灯亮；按下 V_{G2K} 电压源选择键， V_{G2K} 电压源选择指示灯亮；用 \downarrow / \uparrow ， \leftarrow / \rightarrow 键完成 V_{G2K} 电压值的具体设定。 V_{G2K} 设定终止值建议以不超过 85V 为好。

c、自动测试启动

将电压源选择选为 V_{G2K} ，再按面板上的“启动”键，自动测试开始。

在自动测试过程中，观察扫描电压 V_{G2K} 与夫兰克-赫兹管板极电流的相关变化情况。（可通过示波器观察夫兰克-赫兹管板极电流 I_A 随扫描电压 V_{G2K} 变化的输出波形）在自动测试过程中，为避免面板按键误操作，导致自动测试失败，面板上除“手动 / 自动”按键外的所有按键都被屏蔽禁止。

d、自动测试过程正常结束

当扫描电压 V_{G2K} 的电压值大于设定的测试终止电压值后，实验仪将自动结束本次自动测试过程，进入数据查询工作状态。

测试数据保留在实验仪主机的存储器中，供数据查询过程使用，所以，示波器仍可观测到本次测试数据所形成的波形。直到下次测试开始时才刷新存储器的内容。

e、自动测试后的数据查询

自动测试过程正常结束后，实验仪进入数据查询工作状态。这时面板按键除测试电流指示区外，其他都已开启。自动测试指示灯亮，电流量程指示灯指示于本次测试的电流量程选择档位；各电压源选择按键可选择各电压源的电压值指示，其中 V_F 、 V_{G1K} 、 V_{G2A} 三电压源只能显示原设定电压值，不能通过按键改变相应的电压值。用 \downarrow / \uparrow ， \leftarrow / \rightarrow 键改变电压源 V_{G2K} 的指示值，就可查阅到在本次测试过程中，电压源 V_{G2K} 的扫描电压值为当前显示值时，对应的夫兰克-赫兹管板极电流值 I_A 的大小，记录 I_A 的峰、谷值和对应的 V_{G2K} 值（为便于作图，在 I_A 的峰、谷值附近需多取几点）。

f、中断自动测试过程

在自动测试过程中，只要按下“手动 / 自动键”，手动测试指示灯亮，实验仪就中断了自动测试过程，原设置的电压状态被清除。所有按键都被再次开启工作。这时可进行下一次的测试准备工作。

本次测试的数据依然保留在实验仪主机的存储器中，直到下次测试开始时才被清除。所以，示波器仍会观测到部分波形。

g、结束查询过程回复初始状态

当需要结束查询过程时，只要按下“手动 / 自动”键，手动测试指示灯亮，查询过程结束，面板按键再次全部开启。原设置的电压状态被清除，实验仪存储的测试数据被清除，实验仪回复到初始状态。

建议：“自动测试”应变化两次 V_F 值，测量两组 I_A-V_{G2K} 数据。若实验时间允许，还可变化 V_{G1K} 、

V_{G2K} 进行多次 I_A - V_{G2K} 测试。

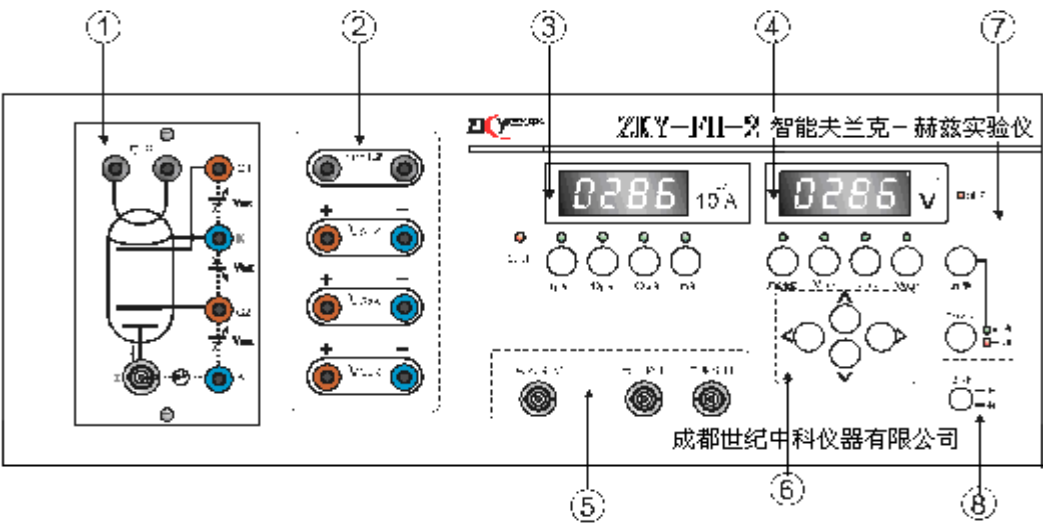
【数据与结果】

- 1、在坐标纸上描绘各组 I_A - V_{G2K} 数据对应曲线。
- 2、计算每两个相邻峰或谷所对应的 V_{G2K} 之差值 ΔV_{G2K} ，并求出其平均值 \bar{u}_0 ，将实验值 \bar{u}_0 与氩的第一激发电位 $U_0=11.61V$ 比较，计算相对误差，并写出结果表达式。
- 3、请对不同工作条件下的各组曲线和对应的第一激发电位进行比较，分析哪些量发生了变化，哪些量基本不变，为什么？

【附录 1】实验仪面板简介及操作说明

1. 夫兰克—赫兹实验仪前后面板说明

1.1、夫兰克-赫兹实验仪 前面板如下图所示，以功能划分为八个区：



区〈1〉是夫兰克-赫兹管各输入电压连接插孔和板极电流输出插座；

区〈2〉是夫兰克-赫兹管所需激励电压的输出连接插孔，其中左侧输出孔为正极，右侧为负极；

区〈3〉是测试电流指示区：

四位七段数码管指示电流值；

四个电流量程档位选择按键用于选择不同的最大电流量程档；每一个量程选择同时备有一个选择指示灯指示当前电流量程档位；

区〈4〉是测试电压指示区：

四位七段数码管指示当前选择电压源的电压值；

四个电压源选择按键用于选择不同的电压源；每一个电压源选择都备有一个选择指示灯指示当前选择的电压源；

区〈5〉是测试信号输入输出区：

电流输入插座输入夫兰克-赫兹管板极电流；

信号输出和同步输出插座可将信号送示波器显示；

区〈6〉是调整按键区，用于：

改变当前电压源电压设定值；

设置查询电压点；

区〈7〉是工作状态指示区：

通信指示灯指示实验仪与计算机的通信状态；

启动按键与工作方式按键共同完成多种操作；

区〈8〉是电源开关：

1.2 夫兰克-赫兹实验仪后面板说明

夫兰克-赫兹实验仪后面板上有交流电源插座，插座上自带有保险管座；

如果实验仪已升级为微机型，则通信插座可联计算机，否则，该插座不可使用。

2、基本操作：

2.1、夫兰克-赫兹实验仪连线说明

在确认供电电网电压无误后，将随机提供的电源连线插入后面板的电源插座中；

连接面板上的连接线(连线图见附录)。务必反复检查,切勿连错!!!

2.2、开机后的初始状态

开机后，实验仪面板状态显示如下：

●实验仪的“1mA”电流档位指示灯亮，表明此时电流的量程为1mA档；电流显示值为0000. $\times 10^{-7}$ A（若最后一位不为0，属正常现象）；

●实验仪的“灯丝电压”档位指示灯亮，表明此时修改的电压为灯丝电压；电压显示值为000.0V；最后一位在闪动，表明现在修改位为最后一位；

●“手动”指示灯亮，表明此时实验操作方式为手动操作。

2.3 变换电流量程

如果想变换电流量程，则按下在区<3>中的相应电流量程按键，对应的量程指示灯点亮，同时电流指示的小数点位置随之改变，表明量程已变换。

2.4 变换电压源

如果想变换不同的电压，则按下在区<4>中的相应电压源按键，对应的电压源指示灯随之点亮，表明电压源变换选择已完成，可以对选择的电压源进行电压值设定和修改。

2.5 修改电压值

按下前面板区<6>上的 \leftarrow/\rightarrow 键，当前电压的修改位将进行循环移动，同时闪动位随之改变，以提示目前修改的电压位置。

按下面板上的 \uparrow/\downarrow 键，电压值在当前修改位递增/递减一个增量单位。

注意：

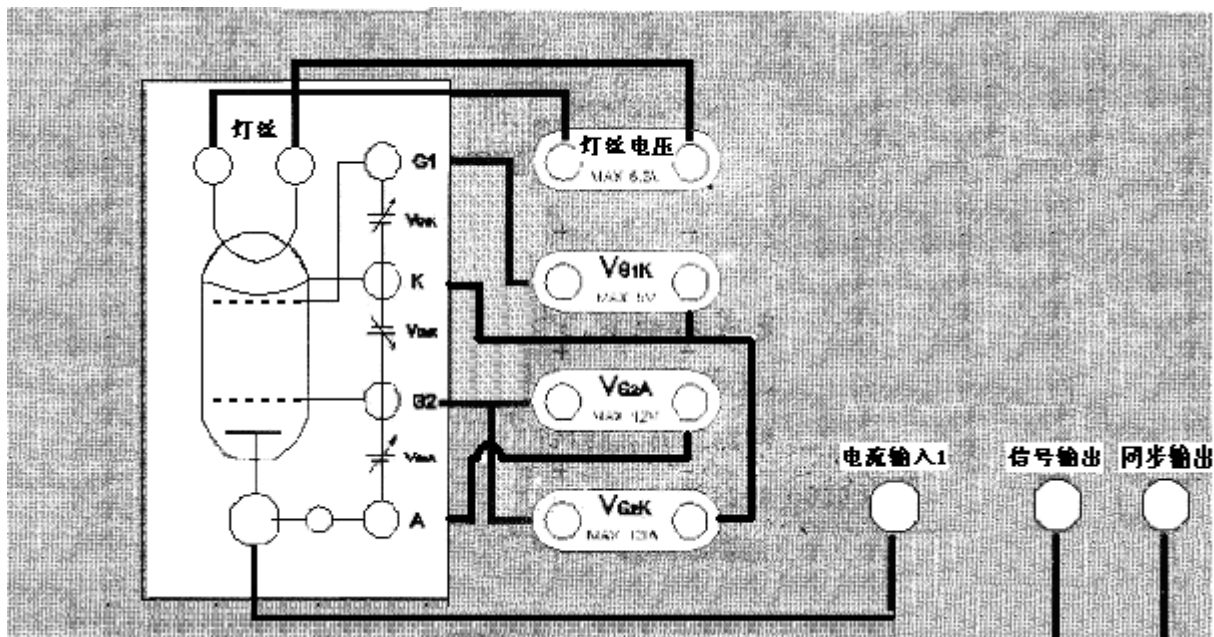
●如果当前电压值加上一个单位电压值的和值超过了允许输出的最大电压值，再按下 \uparrow 键，电压值只能修改为最大电压值。

●如果当前电压值减去一个单位电压值的差值小于零，再按下 \downarrow 键，电压值只能修改为零。

【附录2】仪器使用注意事项

一、管子各组工作电源的连接及保护措施

1.先**不要开电源**，各工作电源请按下图连接，千万不能错!!! 待老师检查后在打开电源。



前面板接线图

2.保护措施:

2.1 灯丝电源

2.1.1 具有输出端短路保护功能，并伴随报警声（长笛声）。当出现报警声时应立即关断主机电源并仔细检查面板连线。输出端短路时间不应超过 8S，否则会损坏元器件。

2.1.2 测量灯丝电压输出端：

- 若面板显示的设置电压与相应的输出电压误差大
 - 输出电压为一恒定值
 - 无电压输出
- 则说明此组电源已经损坏。

2.2、 V_{G1K} 、 V_{G2A} 、电源

具有输出端短路保护功能，但无声音报警功能。

2.3、 V_{G2K} 电源

2.3.1 具有输出端短路保护功能，并伴随报警声（断续笛音）。出现报警声时应立即关断主机电源并仔细检查面板连线。输出端短路时间不应超过 8S，否则会损坏元器件。

2.3.2 测量 V_{G2K} 电压输出端：

- 若面板显示的设置电压与相应的输出电压误差大
 - 输出电压某一恒定值
 - 无电压输出
- 则说明此组电源已经损坏。

2.3.3 V_{G2K} 电压误加到灯丝上，会发出断续的报警笛音；若误加到夫兰克—赫兹管的 V_{G1K} 或 V_{G2A} 上，实验开始时，随 V_{G2K} 电压的增大，面板电流显示无明显变化，而无波形的输出。上述现象发生时应立即关断主机电源，仔细检查面板连线，否则极易损坏仪器内的夫兰克—赫兹管。

注：●当各组电源输出端自身短路时，在面板上虽能显示设置电压，但此时输出端已无电压输出，

若及时排除短路故障，则输出端输出电压应与其设置的电压一致。

●虽仪器内置有保护电路，面板连线接错在短时间内不会损坏仪器，但时间稍长会影响仪器的性能甚至损坏仪器，特别是夫兰克—赫兹管，各组工作电源有额定电压限制，应防止由于连线接错对其误加电压而造成损坏，因此在通电前应反复检查面板连线，确认无误后，再打开主机电源。

当仪器出现异常时，应立即关断主机电源。

二、实验仪工作参数的设置：

夫兰克-赫兹管极易因电压设置不合适而遭受损坏。新管请按机箱上盖的标牌参数设置。若波形不理想，可适量调节灯丝电压、 V_{G1K} 、 V_{G2A} （灯丝电压的调整建议先控制在标牌参数的 $\pm 0.3V$ 范围内小步进行，若波形幅度不好，再适量扩大调整范围），以获得较理想的波形。

灯丝电压不宜过高，否则加快 FH 管老化；

V_{G2K} 不宜超过 85V，否则管子易被击穿。

由于夫兰克-赫兹管使用过程中的衰老，每只管子的最佳状态会发生变化，有经验的使用者可参照原参数在下列范围内重新设定标牌参数。

灯丝电压：DC0~6.3V

第一栅压 V_{G1K} ：DC0~5V

第二栅压 V_{G2K} ：DC0~85V

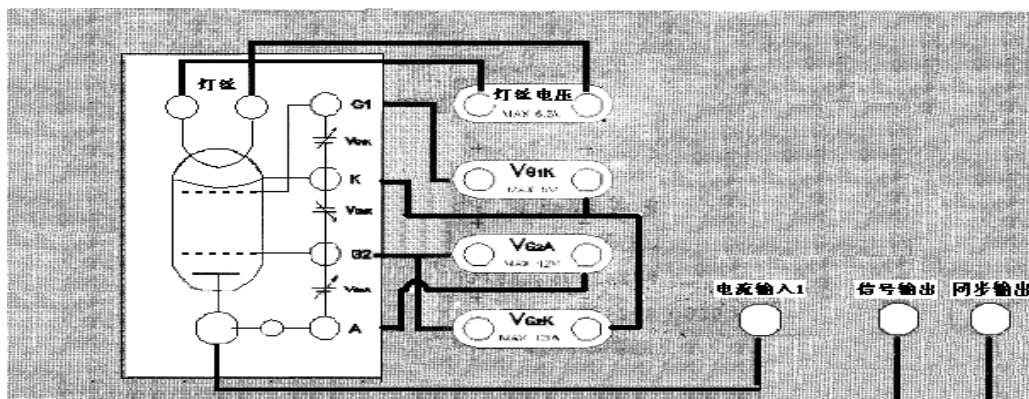
拒斥电压 V_{G2A} ：DC0~12V

夫兰克-赫兹实验步骤（示例）

一、准备工作：

1、按照下图所示，连接好各组工作电源线，仔细检查，确定无误。

连接示波器，以直观观察 I_A - U_{G2K} 的波形变化情况



- 2、打开电源，将实验仪预热 20~30 分钟。
- 3、检查开机后的初始状态（如下），确认仪器工作正常：
 - ① 实验仪的“1mA”电流档位指示灯亮，电流显示值为 0000. ($10^{-7}A$)
 - ② 实验仪的“灯丝电压”档位指示灯亮，电压显示值为 000.0 (V)
 - ③ “手动”指示灯亮。

二、手动测试：

- 1、按“手动/自动”键，将仪器设置为“手动”工作状态。
- 2、按下相应电流量程键，设定电流量程（电流量程可参考机箱盖上提供的数据）。
- 3、用电压调节键 $\leftarrow\rightarrow$ 调节位， $\uparrow\downarrow$ 调节值的大小，设定灯丝电压 V_F 、第一加速电压 V_{G1K} 、拒斥电压 V_{G2A} 的值（设定值可参考机箱盖上提供的数据）。
- 4、按下“启动”键和“ V_{G2K} ”档位键，实验开始。
用电压调节键 $\uparrow\downarrow\leftarrow\rightarrow$ ，从 0.0V 开始，按步长 1V (0.5V) 的电压值调节电压源 V_{G2K} ，并记录下 V_{G2K} 的值和对应的电流值 I_A 。同时可用示波器观察板极电流 I_A 随电压 U_{G2K} 的变化情况。
注：为保证实验数据的唯一性， V_{G2K} 的值必须从小到大单向调节，不可在过程中反复；记录完成最后一组数据后，立即将 V_{G2K} 电压快速归零。
- 5、测试结束，依据记录下的数据作出 I_A-U_{G2K} 图象。

三、自动测试：

- 1、按“手动/自动”键，将仪器设置为“自动”工作状态。
- 2、参考机箱上提供的数据设置 V_F ， V_{G1K} ， V_{G2A} ， V_{G2K} 。
注： V_{G2K} 设定终止值建议不超过 85V。
- 3、按面板上“启动”键，自动测试开始，同时用示波器观察板极电流 I_A 随电压 U_{G2K} 的变化情况。
- 4、自动测试结束后，用电压调节键 $\leftarrow\rightarrow\uparrow\downarrow$ 键改变 V_{G2K} 的值，查阅并记录本次测试过程中 I_A 的峰值、谷值和对应的 V_{G2K} 值。
- 5、依据记录下的数据作出 I_A-U_{G2K} 图象。
- 6、自动测试或查询过程中，按下“手动/自动”键，则手动测试指示灯亮，实验仪原设置的电压状态被清除，面板按键全部开启，此时可进行下一次测试。
注：可变化 V_F ， V_{G1K} ， V_{G2K} 的值，进行多次 I_A-V_{G2K} 测试。
各电压设置参数在参考数据附近变化，灯丝电压不宜过高。