

弗兰克-赫兹实验 指导书

目 录

目 录	I
实验注意事项	1
THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪实验指导书	2
一、实验目的	2
二、实验装置	2
三、实验原理	2
四、实验内容与步骤	7
附录 实验数据范例	12
THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪使用说明书	17

实验注意事项

1. 实验仪的外部接入电源为 220V/50Hz 的交流电源，保证电源的地线要妥善接地。
2. 实验时需用到外部交流供电示波器，其外壳应妥善接地。
3. 请参照“弗兰克-赫兹管”实验仪的仪器参数进行实验，以便得到较好的实验效果。
4. “弗兰克-赫兹管”实验仪内含昂贵的弗兰克-赫兹管，搬动时应轻拿轻放，以防损坏。
5. 若“微电流测量仪”显示超量程，应选择较大量程或适当降低灯丝电压 U_{F1F2} 。
6. 实验过程中，若微电流显示值突然剧增，表明弗兰克-赫兹管有可能被击穿，应立即将加速电压 U_{G2K} 和灯丝电压 U_{F1F2} 降下来，否则会损坏弗兰克-赫兹管。
7. 实验完毕，应及时关闭电源开关，整理好连接导线并放置到规定的位置。

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪实验指导书

一、实验目的

1. 学习关于原子碰撞激发和测量的方法；
2. 测定氩原子的第一激发电势；
3. 通过对氩原子激发电势的测量，证实原子能级的存在；

二、实验装置

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(电源一)，THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(电源二)，THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(微电流测量仪)，THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(弗兰克-赫兹管)，60MHz 双踪示波器（自配）；

双 Q9 头连接线（1m 长，4 根），双 5 芯航空插头连接线（1m 长，1 根），3 号导线（红色，80cm 长，4 根），3 号导线（蓝色，80cm 长，2 根），3 号导线（黑色，80cm 长，2 根）。

三、实验原理

1. 波尔原子理论要点

原子是由原子核和以核为中心沿各种不同直径的轨道运动的一些电子构成的。对于不同的原子，这些轨道上的电子数各不相同，一定轨道的电子具有一定的能量，当同一原子的电子从低能量的轨道跃迁到较高能量的轨道时（如从轨道 1 跃迁到轨道 2），原子处于受激状态，电子处在轨道 2，称为第一受激态，处在轨道 3，称为第二受激态，以此类推。波尔原子理论的前提是两条基本假设：

（1）定态假设

原子只能较长久地停留在一些称之为能级的不连续的稳定状态，简称定态。不同的定态是彼此分立的，具有不同的能量 E_i ($i=1, 2, 3, \dots, m, \dots$ 且 $E_1 < E_2 < E_3 < \dots E_m < \dots$)，它们的数值是不连续的，如果原子的能量变化，不管采用什么形式，它只能使原子从一个定态跃迁到另一个定态。

（2）频率定则

原子从一个定态跃迁到另一个定态时，要吸收或辐射一定频率的电磁波。原子吸收（获得）能量时可以从低能态跃迁到高能态，而发射能量时可从高能态跃迁回低能态。但不管是从具有能量为 E_m 的定态到具有能量为 E_n 的定态，还是反之，其吸收或辐射电磁波频率 ν 都是一定的，并满足以下公式：

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

式（1）中， $h=6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数， ν 为电磁波频率。

在正常情况下原子所处的定态是低能态，称为基态，其能量为 E_1 。当原子以某种形式获得能量时，它可由基态跃迁到较高能量的定态，称为激发态。激发态能量为 E_2 的态称为第一激发态，从基态跃迁到第一激发态所需的能量称为临界能量，数值上等于 $E_2 - E_1$ 。

通常在两种情况下可让原子状态改变：一是当原子吸收或发射电磁波时，二是用其它粒子碰撞原子而交换能量时。用电子轰击原子实现能量交换最方便，因为电子的能量 eU 可通过改变加速电势 U 来调节。弗兰克-赫兹实验就是用这种方法证明了原子能级的存在。

如果电子的能量 eU 很小时，电子和原子只发生弹性碰撞，几乎不发生能量交换；当电势 U 增加到 U_0 使电子能量 eU_0 达到临界能量时，电子与原子发生非弹性碰撞，实现能量交换，使原子从基态跃迁到第一激发态， U_0 称为第一激发电势，又称中肯电势或临界电势。第一激发电势与临界能量的关系可由下式表示：

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

只要测出第一激发电势 U_0 ，就可以得到基态与第一激发态的能量差，即临界能量。不同的元素第一激发电势不尽相同，如表 1-1 所示。

表 1-1 几种元素的第一激发电势

元素名称	钠 (Na)	钾 (K)	氩 (Ar)	镁 (Mg)	氖 (Ne)	汞 (Hg)
第一激发电势 U_0 /V	2.12	1.63	13.1	3.20	18.6	4.90

2. 弗兰克-赫兹实验原理

弗兰克-赫兹实验是通过弗兰克-赫兹（弗兰克-赫兹）管来实现的，其实验原理图如图 1-1 所示。

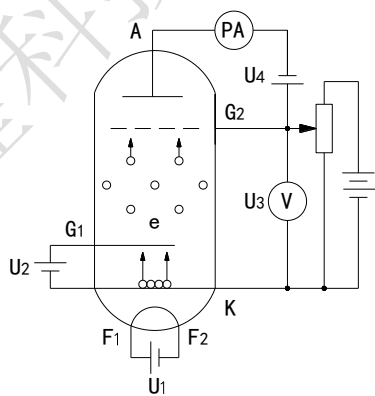


图 1-1 弗兰克-赫兹实验原理图

弗兰克-赫兹管是一种充氩气或其它气体（如氖、汞等）的特制三极管或四极管，其结构如图 1-1 所示。在玻璃管壳内同轴安装着灯丝 F_1 、 F_2 、间接式氧化物阴极 K 、网状栅极 G_1 、 G_2 和平面板板极（阳极） A 。管内抽成高真空后，充入高纯氩气或其它气体。另外，管内还施放有长效消气剂，以吸收管内残余杂质气体。为了保证有较高碰撞概率，阴、栅极间的距离比所充气

体的平均自由程小。

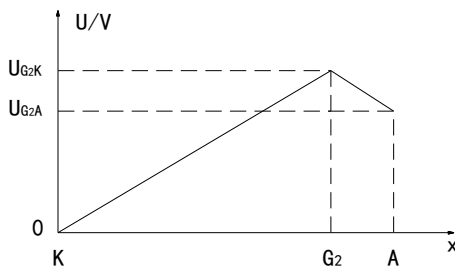


图 1-2 弗兰克-赫兹管内空间电势分布图

实验中弗兰克-赫兹管是一只充有氩原子气体的四极管。在灯丝 F_1 、 F_2 、阴极 K 、第一栅极 G_1 、第二栅极 G_2 和板极 A 间分别加有灯丝电压 U_{F1F2} (U_1)、栅极电压 U_{G1K} (U_2)、加速电压 U_{G2K} (U_3) 和拒斥电压 U_{G2A} (U_4)。 U_{F1F2} 用于加热灯丝使其发射热电子， U_{G1K} 用于控制管内电子流的大小以抵消阴极附近电子云形成的负电势的影响，它的变化将引起空间电荷的变化， U_{G2K} 和 U_{G2A} 空间电势分布如图 1-2 所示。电子由热阴极发射出来进入 KG_2 空间后，将受到加速电压 U_{G2K} 的作用而穿过栅极进入 G_2A 空间，进入此空间的电子又将受到反向拒斥电压 U_{G2A} 的作用。如果加速后电子的能量大于等于 eU_{G2A} 时，它将到达板极 A ，形成板流，由微电流放大器 PA 测出。显然，在没有其它情况发生的条件下，随加速电压 U_{G2K} 的增加，到达板极的电子越多，电流就越大。但实验结果并不完全如此，板流 I_A 与加速电压 U_{G2K} 的关系曲线如图 1-3 所示。

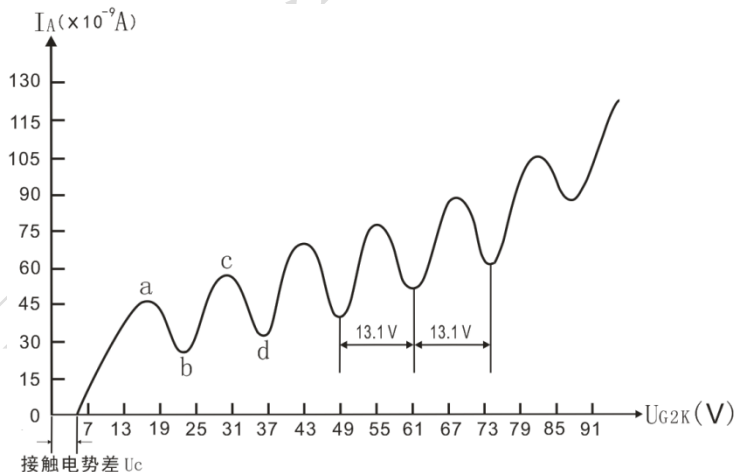


图 1-3 充氩弗兰克-赫兹管的 I_A-U_{G2K} 曲线

图 1-3 中的曲线有如下规律：(1) 板流 I_A 随加速电压 U_{G2K} 的增加不是单调的上升，而出现一系列的极大值（峰值）和极小值（谷值）；(2) 相邻的峰值之间对应的加速电势差均为 13.1V 左右，只有第一个峰值的电势差不是 13.1V。

现对图 1-3 中的曲线进行分析。当加速电压 U_{G2K} 逐渐增加时，电子在 KG_2 空间被加速，而获得越来越大的能量。在初始阶段，由于电压相对较低，电子的能量较小，即使在运动过程中

与氩原子相碰撞，也只能是弹性碰撞，几乎没有能量交换， U_{G2K} 从零逐渐增加，空间电荷区域减弱，导致阴极发射电子流增加，而且电子速度增加，所以板流 I_A 随加速电压 U_{G2K} 的增加而增大，如图 1-3 中 oa 段。当电子的能量随 U_{G2K} 的增加达到或超过氩原子的临界能量，即 U_{G2K} 达到氩原子的第一激发电势 U_0 时，电子与氩原子将发生非弹性碰撞，实现能量交换，使氩原子跃迁到第一激发状态，而电子能量减小。此种电子即使穿过第二栅极也不能克服反向拒斥电压 U_{G2A} 所形成的电场而被排斥折回第二栅极。此时板流 I_A 将明显减小，如图 1-3 中 ab 段。随加速电压 U_{G2K} 的增加，在碰撞中失去大部分能量的电子，其能量又将随之增加，可以克服反向拒斥电场而到达板极 A，这时，板流 I_A 又开始上升，如图 1-3 中 bc 段。当 KG_2 空间中的电压 U_{G2K} 两倍于氩原子的第一激发电势 $2U_0$ ，即电子能量再一次达到氩原子的临界能量时，电子与氩原子在 KG_2 空间又将发生非弹性碰撞而失去能量，造成板流 I_A 第二次下降，如图 1-3 中 cd 段。以后，当加速电子达到氩原子的第一激发电势 U_0 时，被加速电子在向第二栅极 G_2 运动过程中，都会与氩原子发生非弹性碰撞，板流 I_A 都会下降，形成有规则的起伏变化（有峰和谷）的 I_A - U_{G2K} 曲线，即图 1-3 所示的曲线。而与各次板流 I_A 下降到最低点相对应的相邻加速电压电势差 $U_{m+1}-U_m$ 就是氩原子的第一激发电势 U_0 。

$$U_{G2K} = nU_0 \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

通过对氩原子第一激发电势的测量，就可证实原子能级的存在。氩原子第一激发电势的公认值是 13.1V。

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，就有 eU_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，对应光辐射的波长为

$$eU_0 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

对于氩原子，

$$\lambda = \frac{hc}{eU_0} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{1.602 \times 10^{-19} \times 13.1} \text{ nm} = 94.7 \text{ nm}$$

在光谱学的研究中人们确实观测到了 $\lambda = 94.7 \text{ nm}$ 的光。

需要说明，实验 I_A - U_{G2K} 曲线中板流 I_A 的下降并不是完全突然的，并不十分陡峭， I_A 的极大值附近出现的“峰”总有一定的宽度，这主要是由于管中阴极发出的热电子的能量具有统计分布规律，另外，板流 I_A 并不下降到零，这主要是由于电子与氩原子的碰撞有一定的几率，会有一些电子逃避了碰撞。而峰高递增现象可由热电子发射的理查逊定律解释。随着 U_{G2K} 的增加，电子获得的能量越大，速度越快，它在氩原子附近停留的时间很短，来不及进行能量交换，从而降低了电子与氩原子碰撞的几率，因此，穿过第二栅极的高能电子增多， I_A 增加。

应当指出，由于阴极、板极以及连接导线一般是采用不同材料制成，从而产生接触电位差，

这样对 I_A 的第一个峰值位置有影响，使 I_A-U_{G2K} 曲线沿电压轴偏移，即第一个吸收“谷”对应的电压值大于 13.1，但相邻峰值或谷值（极小值）的间隔仍然是 13.1V 左右。

灯丝电压 U_{FIF2} 对曲线的影响较大。灯丝电压过大，阴极发射的电子数目过多，易使微电流放大器饱和，引起 I_A-U_{G2K} 曲线阻塞；灯丝电压过小，参加碰撞的电子数少，反映不出非弹性碰撞的能量交换，造成曲线峰谷很弱，甚至得不到峰谷。一般灯丝电压取 2.5V~4.0V 较好。

栅极电压 U_{G1K} 对曲线也有一定的影响。栅极电压可以消除电子在阴极附近的堆积效应，起到控制电子流大小的作用。

拒斥电压 U_{G2A} 对曲线也有较大的影响。偏小时，起不到对非弹性碰撞失去能量的电子的筛选作用，峰谷差小。太大时，衰减作用太明显，使本来很多能达到板极的电子筛去，导致峰谷差小。实验时，参照给出的仪器参数 U_{FIF2} ， U_{G1K} ， U_{G2A} ，调节到相应大小。

3. 实验结果的理论说明

通过对实验数据进行逐差处理，求出金属电极的接触电势差 U_C 和第一激发电势 U_0 ，但求出的第一激发电势 U_0 与氩原子第一激发电势公认值 13.1V 有一定的差距。这是由于在用接触电势差进行处理时，仍是近似的用功函数代替了金属的化学势（费米能级），同时材料逸出功的分布也不可能完全均匀所致。

某些原子在基态与第一激发态之间有一个或几个特殊的能态，这个能态的特性与基态或激发态的特性都不相同，称为亚稳态。

具体到氩原子，基态与第一激发态之间有两个亚稳态。从光的波粒二象性理论可知，该电子在亚稳态的停留时间（ $10^{-3}s$ ）比在第一激发态的停留时间（ $10^{-8}s$ ）长 10 多万倍。如图 1-4 所示。

相对准确的氩原子能量状态表明，氩原子的基态电势（电离电势）是 $U_0=15.76V$ ；两个亚稳态的电势分别是 $U_1'=4.21V$ ， $U_1''=4.04V$ ；第一激发态的电势是 $U_1=2.68eV$ ；基态与两个亚稳态的电势差分别是 $\Delta U_1'=U_0-U_1'=11.55V$ ， $\Delta U_1''=U_0-U_1''=11.72V$ ；两个亚稳态与基态的能量差分别是 $\Delta E_1'=11.55eV$ ， $\Delta E_1''=11.72eV$ 。

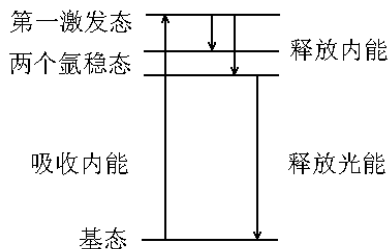


图 1-4 相对准确的氩原子轨道状态能量模型

在弗兰克-赫兹实际实验中，氩原子的电子吸收内能从基态激发到了第一激发态，由于第一

激发态的寿命很短，氩原子迅速释放内能从第一激发态跃迁到了两个亚稳态中的任意一个。吸收的内能来自非弹性碰撞过程，释放的内能又还给了非弹性碰撞过程，这个过程可看成电子吸收内能从基态跃迁到了两个亚稳态中的任意一个。因此运动电子的动能大于 11.72eV 时，即可与氩原子发生非弹性碰撞。弗兰克-赫兹实验中测得的氩原子第一激发电势应为基态与两个亚稳态的电势差，介于 11.55V 和 11.72V 之间，公认值为 11.61V 。

4. 自动测量及数据采集原理

实验中的自动测量和数据采集原理框图如图 1-5 所示。单片机系统为主控制器系统，通过串口与按键显示单元进行数据通讯。自动测量时，主控制器通过光耦隔离控制 DA，从而控制输出“弗兰克-赫兹管”的第二栅压 U_{G2K} ，通过电流检测及控制 AD 采集“弗兰克-赫兹管”的输出电流 I_A ，将采集的电流信号输出到示波器接口“信号输出”和“同步输出”，便于通过示波器进行观测。同时将采集的第二栅压和电流存储到数据存储单元，以便查询。

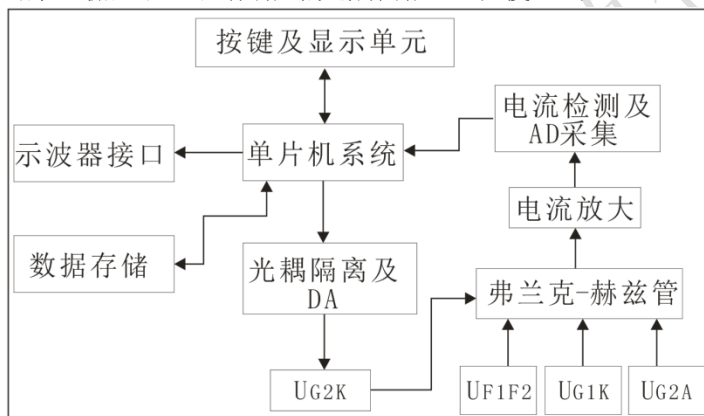


图 1-5 自动测量及数据采集原理框图

四、实验内容与步骤

说明：“THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（电源一）”以下简称“电源一”；“THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（电源二）”以下简称“电源二”；“THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（微电流测量仪）”以下简称“微电流测量仪”；“THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（弗兰克-赫兹管）”以下简称“弗兰克-赫兹管”。

1. 实验连线

参考图 1-6 实验连线示意图一（前面板）和图 1-7 实验连线示意图二（后面板）进行连线（注意：在连线完毕之后，仔细检查，避免接错损坏弗兰克-赫兹管）。

（1）用 3 号导线（红色、黑色）各一根分别连接“电源一”的“ U_{FIF2} 输出”与“弗兰克-赫兹管”的“ U_{FIF2} ”的两端（注：“弗兰克-赫兹管”前面板的“ U_{FIF2} ”两端黑色座子没有正负极）。

（2）用 3 号导线（红色）连接“电源一”的“ U_{G1K} 输出”的“+”端与“弗兰克-赫兹管”的“G1”端（红色接线座），用 3 号导线（蓝色）连接“电源一”的“ U_{G1K} 输出”的“-”端与“弗兰克-赫兹管”的“K”端（蓝色接线座）。

(3) 用 3 号导线（红色）连接“电源二”的“ U_{G2A} 输出”的“+”端与“弗兰克-赫兹管”的“G2”端（红色接线座），用 3 号导线（蓝色）连接“电源二”的“ U_{G2A} 输出”的“-”端与“弗兰克-赫兹管”的“A”端（蓝色接线座）。

(4) 用 3 号导线（红色）连接“电源二”的“ U_{G2K} 输出”的“+”端与“弗兰克-赫兹管”的“G2”端（红色接线座），用 3 号导线（黑色）连接“电源二”的“ U_{G2K} 输出”的“-”端与“弗兰克-赫兹管”的“K”端（蓝色接线座）。

(5) 用“双 Q9 头连接线（1m 长）”连接“弗兰克-赫兹管”的“Q9”座（电流输出接口）与“微电流测量仪”的“输入”端。用“双 Q9 头连接线（1m 长）”连接“微电流测量仪”的“输出”端与“电源一”的“电流采集输入”端。

(6) 用“双 Q9 头连接线（1m 长）”连接“电源一”的“信号输出”与示波器的“CH1”输入通道。用“双 Q9 头连接线（1m 长）”连接“电源一”的“同步输出”与示波器的“EXT TRIG”或者“CH2”输入通道（作为示波器的外部触发输入功能）。

(7) 用“双 5 芯航空插头连接线（1m 长）”连接“微电流测量仪”背面的“电流量程接口”与“电源一”背面的“电流量程接口”。

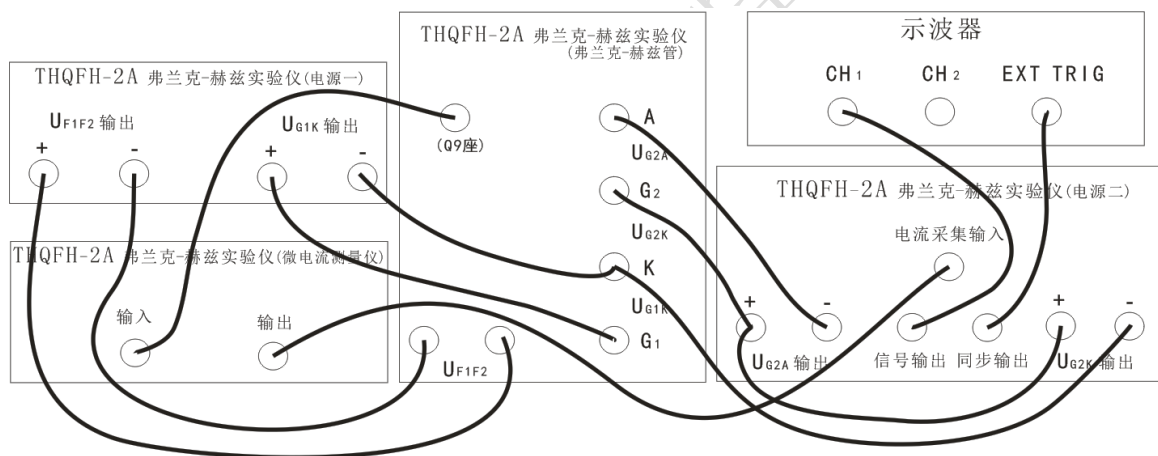


图 1-6 实验连线示意图一（前面板）

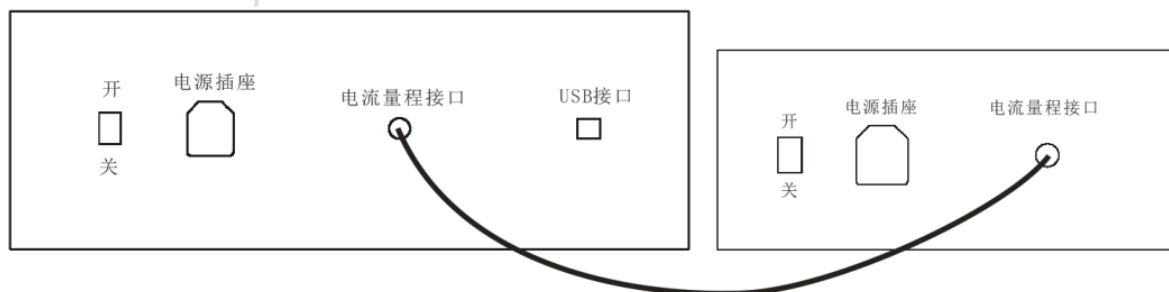


图 1-7 实验连线示意图二（后面板）

2. 预热、调零

(1) 确认“电源一”的“ U_{F1F2} 调节”、“ U_{G1K} 调节”电位器是否逆时针旋到底, 如果不是, 将电位器逆时针旋到底, 使得灯丝电压 U_{F1F2} 、第一栅压 U_{G1K} 输出最小。确认“电源二”的“ U_{G2A} 调节”、“ U_{G2K} 调节”电位器是否逆时针旋到底, 如果不是, 将电位器逆时针旋到底, 使得拒斥电压 U_{G2A} 、第二栅压 U_{G2K} 输出最小。

(2) 用电源线连接实验仪与电源, 打开实验仪电源开关, 预热约 15 分钟。

(3) 将“微电流测量仪”的“微电流量程选择”开关拨到 $\times 10^{-9}A$ 档, 然后调节“调零”电位器, 使得电流输出显示为 0 (具体根据 I_A 大小, 一般建议用 $\times 10^{-9}A$ 档量程)。

(4) 参照“弗兰克-赫兹管”给出的仪器参数: U_{F1F2} 、 U_{G1K} 、 U_{G2A} , 调节实验仪前面板上对应的电位器, 将三路电源调到相应大小, 待电源稳定再进行下面实验(注意: 灯丝电压 U_{F1F2} 不要超过“仪器参数”参考值的 0.5V, 连续工作不要超过 2 小时, 否则会加快电子管的老化。不同的弗兰克-赫兹管, 设置的最佳参数会不一样, 出厂时给出的“仪器参数”贴在“弗兰克-赫兹管”实验仪的顶面左下角处, 为参考值。为了得到更好的爬波曲线, 可以自行反复调整参数)。

3. 自动测量 (必作)

(1) 将示波器的 CH1 通道设置: 200mV/格, 500 μs /格, 外触发通道设置: 触发类型为边沿触发。触发源为外触发输入通道, 下降沿触发。触发方式为自动。

(2) 确认“电源二”实验仪处于自动测量方式状态, 如果不是, 按一下“手动/自动”测量按键, 将测量方式切换到自动测量方式, 这时“自动”指示灯亮。然后按下“确认”按键, 启动自动测量。在示波器上观测波浪式爬坡曲线的形成过程。

(3) 约 4 分钟之后, 自动测量过程结束, 观测示波器上 I_A-U_{G2K} 曲线。

(4) 数据记录与处理

自动测量结束后, “电源二”前面板的“峰值”指示灯亮, 通过向上查询按键“▲”或向下查询按键“▼”查询 U_{G2K} 和 I_A 的“峰值”。将峰值序号 n、第二栅压 U_{G2K} 值记录在表 1-2 中。用逐差法计算氩原子的第一激发电势 U_0 。自动测量做 5 次实验, 分别得到第一激发电势 U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , U_5 , 然后取 5 次测量的平均值作为氩原子的第一激发电势 U_0 。

表 1-2 计算氩原子第一激发电势实验数据记录表

第 1 次自动测量							
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	7
U_{G2K} (V)							
第 2 次自动测量							
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	7
U_{G2K} (V)							
第 3 次自动测量							
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	7

U_{G2K} (V)							
第 4 次自动测量							
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	7
U_{G2K} (V)							
第 5 次自动测量							
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	7
U_{G2K} (V)							

4. 手动测量（选作）

(1) 确认“电源二”实验仪处于手动测量方式状态，如果不是，按一下“手动/自动”测量按键，将测量方式切换到手动测量方式，这时“手动”指示灯亮。

(2) 缓慢调节第二栅压“ U_{G2K} 调节”电位器，电压 U_{G2K} 每隔 0.5V 读一次数，待电流稳定大约 4 秒钟，读出相应微电流显示值 I_A 。

(3) 数据记录与处理

1) 为把峰值和谷值测准，在峰谷值附近可多测几组 U_{G2K} 和 I_A 值，将实验所得 U_{G2K} 、 I_A 值记录在表 1-3 中。

表 1-3 手动测量实验数据记录表

$U_{F1F2} =$ V, $U_{G1K} =$ V, $U_{G2A} =$ V

U_{G2K} (V)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0
I_A (nA)										

U_{G2K} (V)	40.5	41.0	41.5	42.0	42.5	43.0	43.5	44.0	44.5	45.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	45.5	46.0	46.5	47.0	47.5	48.0	48.5	49.0	49.5	50.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	50.5	51.0	51.5	52.0	52.5	53.0	53.5	54.0	54.5	55.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	55.5	56.0	56.5	57.0	57.5	58.0	58.5	59.0	59.5	60.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	60.5	61.0	61.5	62.0	62.5	63.0	63.5	64.0	64.5	65.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	65.5	66.0	66.5	67.0	67.5	68.0	68.5	69.0	69.5	70.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	70.5	71.0	71.5	72.0	72.5	73.0	73.5	74.0	74.5	75.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	75.5	76.0	76.5	77.0	77.5	78.0	78.5	79.0	79.5	80.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	80.5	81.0	81.5	82.0	82.5	83.0	83.5	84.0	84.5	85.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	85.5	86.0	86.5	87.0	87.5	88.0	88.5	89.0	89.5	90.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	90.5	91.0	91.5	92.0	92.5	93.0	93.5	94.0	94.5	95.0
I_A (nA)										
U_{G2K} (V)	95.5	96.0	96.5	97.0	97.5	98.0	98.5	99.0	99.5	100.0
I_A (nA)										

2) 测绘 I_A-U_{G2K} 曲线

根据表 1-3 手动测量记录的实验数据，在坐标纸上用作图法测绘 I_A-U_{G2K} 曲线，并对所得曲线进行分析，得出结论。分析改变灯丝电压 U_{F1F2} 、第一栅压 U_{G1K} 、拒斥电压 U_{G2A} 对实验结果的影响。

3) 计算氩原子第一激发电势 U_0

根据 I_A-U_{G2K} 曲线，找出各峰值电流对应的第二栅压 U_{G2K} 值，将峰值序号 n、第二栅压 U_{G2K} 值记录在表 1-4 中。用逐差法计算氩原子的第一激发电势 U_0 。

表 1-4 计算氩原子第一激发电势实验数据记录表

峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	7
U_{G2K} (V)							

附录 实验数据范例

本实验数据范例仅供参考，不作验收依据

一. 自动测量方式测得的实验数据

仪器参数： $U_{F1F2} = 4.50 \text{ V}$ ， $U_{G1K} = 1.25 \text{ V}$ ， $U_{G2A} = 3.00 \text{ V}$ ；

微电流测量量程选择： $\times 10^{-9} \text{ A}$ 。

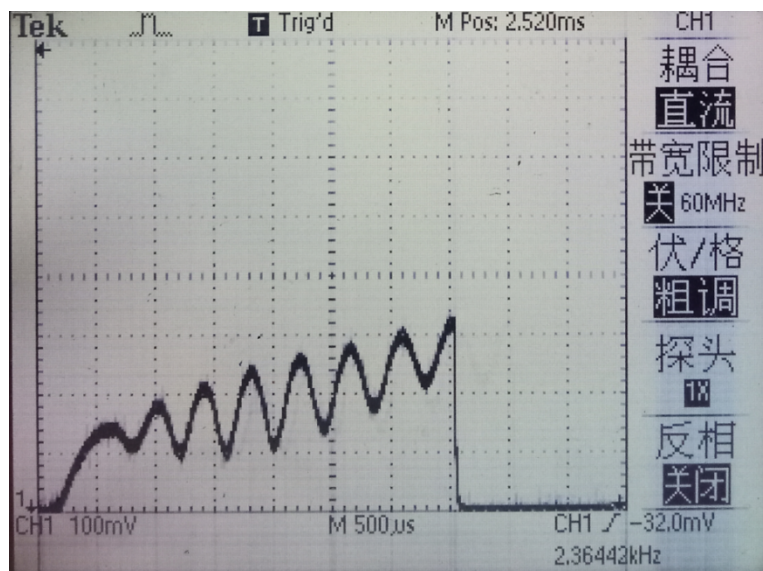


图 2-1 自动测量方式示波器显示的 $I_A - U_{G2K}$ 曲线图

表 2-1 计算氩原子第一激发电势实验数据记录表

第 1 次自动测量							
峰值序数 n	1	2	3	4	5	6	7
$U_{G2K} \text{ (V)}$	17.8	29.7	41.1	52.4	64.0	76.6	88.7
第 2 次自动测量							
峰值序数 n	1	2	3	4	5	6	7
$U_{G2K} \text{ (V)}$	17.9	29.3	40.9	52.3	64.2	76.4	88.5
第 3 次自动测量							
峰值序数 n	1	2	3	4	5	6	7
$U_{G2K} \text{ (V)}$	18.1	29.6	40.6	52.2	64.1	76.4	88.9
第 4 次自动测量							

峰值序数 n	1	2	3	4	5	6	7
U_{G2K} (V)	17.8	29.7	40.9	52.2	64.4	76.4	89.0
第 5 次自动测量							
峰值序数 n	1	2	3	4	5	6	7
U_{G2K} (V)	18.6	29.4	40.6	52.4	64.3	76.7	88.8

计算氩原子的第一激发电势：用逐差法计算表 2-1 的实验数据，得到氩原子的第一激发电势 U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 分别为：11.7V, 11.8V, 11.8V, 11.8V, 11.8V。

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5}{5} = 11.8$$

$$\text{相对误差: } |11.8 - 11.61| / 11.61 \times 100\% = 1.6\%$$

二. 手动测量方式测得的实验数据

仪器参数: $U_{F1F2}=4.50\text{ V}$, $U_{G1K}=1.25\text{ V}$, $U_{G2A}=3.00\text{ V}$

微电流测量量程: $\times 10^{-9}\text{ A}$ 档

表 2-2 手动测量实验数据记录表

$U_{G2K}\text{ (V)}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$I_A\text{ (nA)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4
$U_{G2K}\text{ (V)}$	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
$I_A\text{ (nA)}$	6	9	15	18	25	33	40	48	54	60
$U_{G2K}\text{ (V)}$	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
$I_A\text{ (nA)}$	63	66	72	76	80	83	86	89	90	93
$U_{G2K}\text{ (V)}$	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0
$I_A\text{ (nA)}$	95	98	100	102	104	107	109	109	110	111
$U_{G2K}\text{ (V)}$	20.5	20.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0
$I_A\text{ (nA)}$	110	108	105	105	102	102	104	106	113	120
$U_{G2K}\text{ (V)}$	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0
$I_A\text{ (nA)}$	130	140	148	154	160	165	168	171	173	173
$U_{G2K}\text{ (V)}$	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0
$I_A\text{ (nA)}$	170	165	159	151	139	128	118	113	113	117
$U_{G2K}\text{ (V)}$	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0
$I_A\text{ (nA)}$	125	134	146	160	168	178	188	196	200	205
$U_{G2K}\text{ (V)}$	40.5	41.0	41.5	42.0	42.5	43.0	43.5	44.0	44.5	45.0
$I_A\text{ (nA)}$	208	206	203	200	190	177	162	146	133	124
$U_{G2K}\text{ (V)}$	45.5	46.0	46.5	47.0	47.5	48.0	48.5	49.0	49.5	50.0
$I_A\text{ (nA)}$	120	118	124	133	148	164	177	191	200	203
$U_{G2K}\text{ (V)}$	50.5	51.0	51.5	52.0	52.5	53.0	53.5	54.0	54.5	55.0

I_A (nA)	215	222	229	232	232	230	225	215	203	189
U_{G2K} (V)	55.5	56.0	56.5	57.0	57.5	58.0	58.5	59.0	59.5	60.0
I_A (nA)	170	155	140	132	131	136	147	159	174	185
U_{G2K} (V)	60.5	61.0	61.5	62.0	62.5	63.0	63.5	64.0	64.5	65.0
I_A (nA)	197	209	220	230	237	245	250	253	252	250
U_{G2K} (V)	65.5	66.0	66.5	67.0	67.5	68.0	68.5	69.0	69.5	70.0
I_A (nA)	242	234	221	203	188	175	163	156	155	161
U_{G2K} (V)	70.5	71.0	71.5	72.0	72.5	73.0	73.5	74.0	74.5	75.0
I_A (nA)	170	182	193	203	215	226	238	247	256	260
U_{G2K} (V)	75.5	76.0	76.5	77.0	77.5	78.0	78.5	79.0	79.5	80.0
I_A (nA)	267	270	272	270	265	259	251	237	221	205
U_{G2K} (V)	80.5	81.0	81.5	82.0	82.5	83.0	83.5	84.0	84.5	85.0
I_A (nA)	198	193	190	189	192	199	208	222	231	240
U_{G2K} (V)	85.5	86.0	86.5	87.0	87.5	88.0	88.5	89.0	89.5	90.0
I_A (nA)	249	262	271	279	286	290	293	294	293	289
U_{G2K} (V)	90.5	91.0	91.5	92.0	92.5	93.0	93.5	94.0	94.5	95.0
I_A (nA)	283	276	267	258	249	241	236	233	232	237
U_{G2K} (V)	95.5	96.0	96.5	97.0	97.5	98.0	98.5	99.0	99.5	100.0
I_A (nA)	243	247	254	260	270	280	293	300	307	312

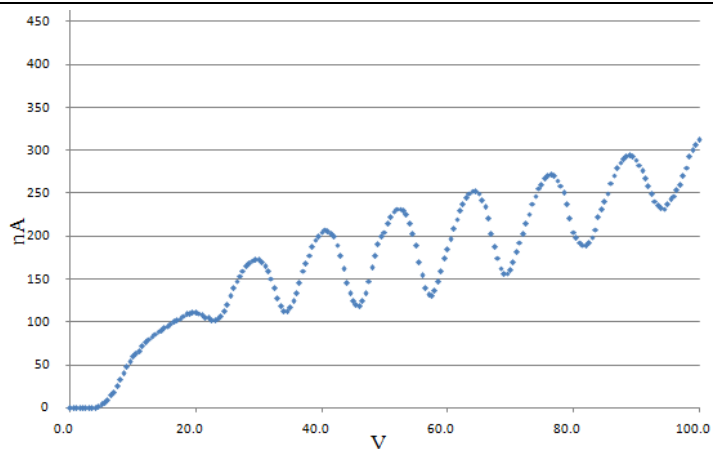


图 2-2 手动测量的实验数据拟合曲线图

表 2-3 计算氩原子第一激发电势实验数据记录表

峰值序数 n	1	2	3	4	5	6	7
U_{G2K} (V)	19.5	29.5	40.5	52.0	64.0	76.5	89.0

计算氩原子的第一激发电势：用逐差法计算表 2-3 的数据，得到氩原子的第一激发电势 U_0 为 11.7V；

相对误差： $|11.7 - 11.61| / 11.61 \times 100\% = 0.8\%$ 。

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪使用说明书

弗兰克-赫兹实验是近代物理的一个重要的著名实验，它直接证明了原子能级的存在，为近代物理的学习增加感性认识。以往多数的弗兰克-赫兹实验仪，使用充汞弗兰克-赫兹管，加热炉难以调节，又对环境有污染，实验时间长，数据处理繁琐，为克服上述缺点，采用充氩气的弗兰克-赫兹管，避免了汞对人体及环境的污染，有利于环保，同时又免除了使用汞管时加热炉的调温与控温的麻烦，既便于操作，节约了实验时间，又避免了由于温度控制不精确而对实验产生的误差。

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪采用慢电子与氩原子碰撞进行能量交换的方法，使氩原子从低能级跃迁到高能级，通过观测原子内部能量变化，测定氩原子的第一激发电势，间接证实原子能级的存在。

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪由四部分组成，包括 THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(电源一)，THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(电源二)，THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(微电流测量仪)，THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(弗兰克-赫兹管)。四个部分采用分体式结构，可自行组装连接电路。实验对象为充氩四极结构的弗兰克-赫兹管。

实验方式分手动和自动两种测量方式。手动测量方式：逐点测量记录 U_{G2K} 和 I_A 值，测绘 I_A-U_{G2K} 曲线，用逐差法求出氩原子的第一激发电势。自动测量方式：启动自动测量之后，实验仪自动扫描输出 U_{G2K} 电压和自动采集 I_A 电流，同时将采集的电压和电流输出到示波器接口：“信号输出”和“同步输出”，动态显示曲线形成过程，通过示波器可以观测波浪式爬坡曲线，可以观测到至少 6 个谱峰。自动测量方式可以存储测量的峰值和数据，可以查询峰值和数据。

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪的介绍：

一. THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪(电源一)

1. 电源一前面板



图 3-1 电源一前面板图

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（电源一）前面板如图 3-1，包括“灯丝电压” U_{F1F2} 的调节、输出以及显示，“第一栅压” U_{G1K} 的调节、输出以及显示。

“灯丝电压” U_{F1F2} 输出：0~6.3V，精度：±1%，三位半显示。“ U_{F1F2} 输出”为 U_{F1F2} 电压输出接口，直流电压输出，“+”为输出电压的正极，“-”为输出电压的负极。“ U_{F1F2} 调节”旋钮用于调节灯丝电压 U_{F1F2} 输出幅度，顺时针调节，输出幅度增大，逆时针调节，输出幅度减小。

“第一栅压” U_{G1K} 输出：0~6V，精度：±1%，三位半显示。“ U_{G1K} 输出”为 U_{G1K} 电压输出接口，直流电压输出，“+”为输出电压的正极，“-”为输出电压的负极。“ U_{G1K} 调节”旋钮用于调节第一栅压 U_{G1K} 输出幅度，顺时针调节，输出幅度增大，逆时针调节，输出幅度减小。

2. 电源一背面板

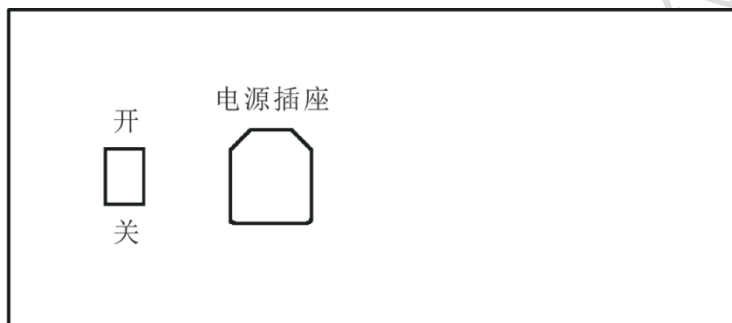


图 3-2 电源一背面板图

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（电源一）背面板如图 3-2，包括电源开关、电源插座。电源开关打向“开”端接通电源，打向“关”端关闭电源。电源插座：实验仪工作电源接入接口，接入外部 220V/50HZ 交流电源，带 1A 的保险丝。

二. THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（电源 二）

1. 电源二前面板

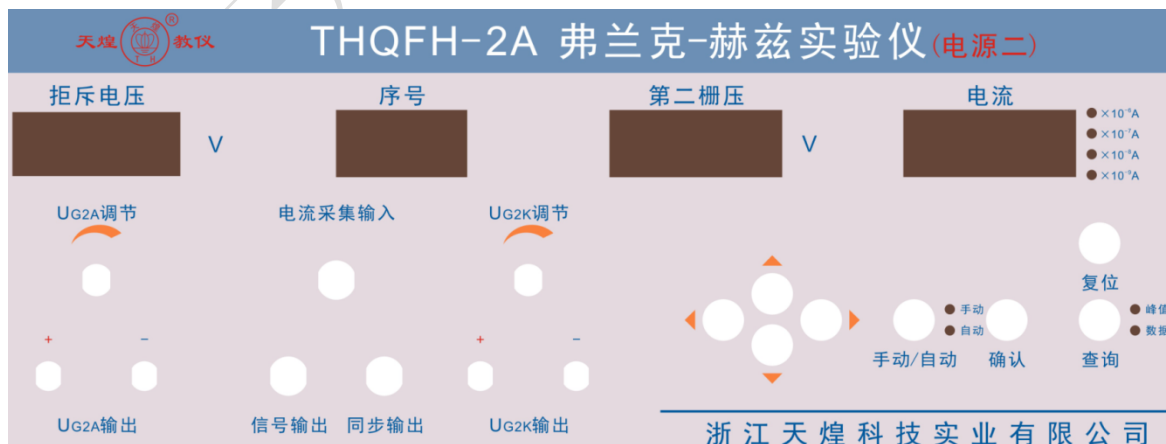


图 3-3 电源二前面板图

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（电源二）前面板如图 3-3，包括“拒斥电压” U_{G2A} 的调节、输出以及显示，“第二栅压” U_{G2K} 的调节、输出以及显示，序号显示，电流显示，人机接口，示波器输出接口，电流采集输入接口。

“拒斥电压” U_{G2A} 输出：0~12V，精度：±1%，三位半显示。“ U_{G2K} 输出”为 U_{G2A} 电压输出接口，直流电压输出，“+”为输出电压的正极，“-”为输出电压的负极。“ U_{G2A} 调节”旋钮用于调节拒斥电压 U_{G2A} 输出幅度，顺时针调节，输出幅度增大，逆时针调节，输出幅度减小。

“第二栅压” U_{G2K} 输出：0~100V，精度：±1%，三位半显示。“ U_{G2K} 输出”为 U_{G2K} 电压输出接口，直流电压输出，“+”为输出电压的正极，“-”为输出电压的负极。“ U_{G2K} 调节”旋钮用于调节第二栅压 U_{G2K} 输出幅度，顺时针调节，输出幅度增大，逆时针调节，输出幅度减小。

序号显示：自动测量完毕之后，查询过程中，显示“峰值”的序号或“数据”的序号。

人机接口，包括显示和按键：

“第二栅压”的显示：在手动测量或自动测量过程状态，显示当前“第二栅压”输出的幅度；在查询状态，显示查询的“第二栅压”数值。

“电流”的显示：在手动测量或自动测量过程状态，显示当前弗兰克-赫兹管输出电流的大小；在查询状态，显示查询的“电流”数值。 $\times 10^{-6}\text{A}$ 、 $\times 10^{-7}\text{A}$ 、 $\times 10^{-8}\text{A}$ 、 $\times 10^{-9}\text{A}$ 处的四个指示灯指示电流当前的单位：比如：当 $\times 10^{-9}\text{A}$ 的指示灯亮，表示电流的单位为 $\times 10^{-9}\text{A}$ 。

按键包括 8 个按键：向上查询按键“▲”、向下查询按键“▼”、左移按键“◀”（预留）、右移按键“▶”（预留）。“手动/自动”按键选择“手动测量方式”或者“自动测量方式”，“手动”、“自动”指示灯指示当前选择的测量方式。“确认”按键用于确认并启动自动测量过程，当实验仪处于“自动”测量方式时，按下该按键就启动自动测量。“查询”按键用于查询状态中，“峰值”查询与“数据”查询之间的切换。“复位”按键用于系统复位。

示波器输出接口：包括“信号输出”和“同步输出”接口。“信号输出”接口：模拟信号输出端，用于实验仪自动测量方式时， I_A-U_{G2K} 曲线的输出。一般接示波器的信号输入通道（CH1 或 CH2）。“同步输出”信号输出：数字信号输出端，脉冲输出信号，TTL 电平，为曲线输出的同步信号，一般接示波器的外部触发输入通道（EXT TRIG）或者 CH2。

“电流采集输入”接口：采集电流经过放大的信号，用于连接“微电流测量仪”的“输出”。

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（电源二）具有数据存储，查询功能。存储的数据掉电不丢失。按下“确认”按键并启动自动测量之后，之前存储的数据自动清除，待自动测量完毕，最近一次自动测量的数据被保存。“自动测量方式”存储测得的“峰值”数据，存储 510 组“数据”。

3. 电源二背面板

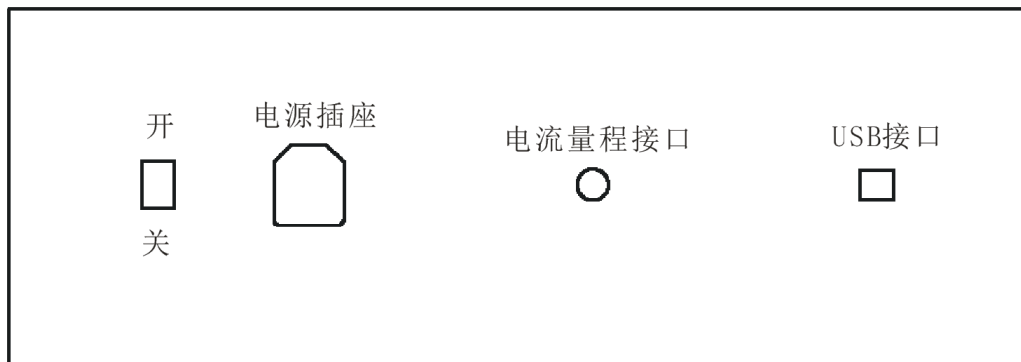


图 3-4 电源二背面板图

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（电源二）背面板如图 3-4，包括电源开关，电源插座，电流量程接口以及 USB 接口。电源开关打向“开”端接通电源，打向“关”端关闭电源。电源插座：实验仪工作电源接入接口，接入外部 220V/50Hz 交流电源，带 1A 的保险丝。“电流量程接口”用于连接“微电流测量仪”背面板的“电流量程接口”，用于系统检测电流量程档位。“USB 接口”为预留数据通讯接口。

三. THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（微电流测量仪）

1. 微电流测量仪前面板



图 3-5 微电流测量仪前面板图

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（微电流测量仪）前面板如图 3-5，包括：微电流量程选择，电流显示、电流“输入”、电流放大“输出”，调零。

（1）微电流量程选择：

微电流测量范围：0nA~±1999 μA，分四档：×10⁻⁶A、×10⁻⁷A、×10⁻⁸A、×10⁻⁹A 档，三位半显示，用波段开关切换。

电流显示：显示电流大小值，单位为选择的微电流量程。比如：显示数据为 500，微电流量程选择 ×10⁻⁹A 档，表示当前测得的电流为 500×10⁻⁹A。

“输入”为电流输入接口，“输出”为电流放大信号输出接口。

面板上“调零”旋钮，用于微电流放大器调零。实验连线后，将 U_{F1F2} , U_{G1K} , U_{G2A} , U_{G2K} 四路电压输出调到最小，然后调节调零电位器，使得电流显示为 0。

2. 微电流测量仪背面板

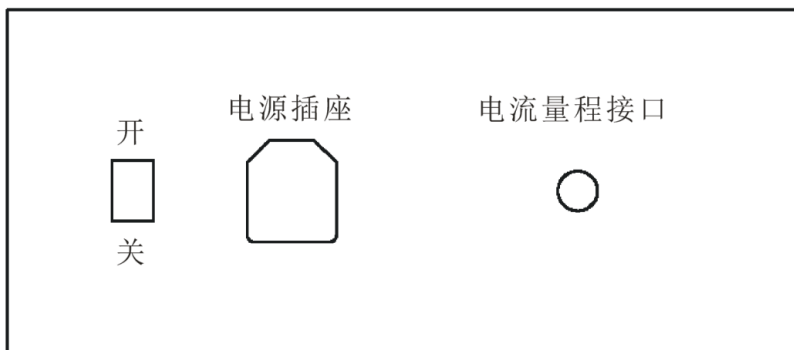


图 3-6 微电流测量仪背面板图

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（微电流测量仪）背面板如图 3-2，包括电源开关，电源插座，电流量程接口。电源开关打向“开”，接通电源，打向“关”，关闭电源。电源插座：实验仪工作电源接入接口，接入外部 220v/50HZ 交流电源，带 0.5A 的保险丝。“电流量程接口”用于连接“电源二”背面板的“电流量程接口”，用于系统检测电流量程档位。

四. THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（弗兰克-赫兹管）

1. 弗兰克-赫兹管前面板

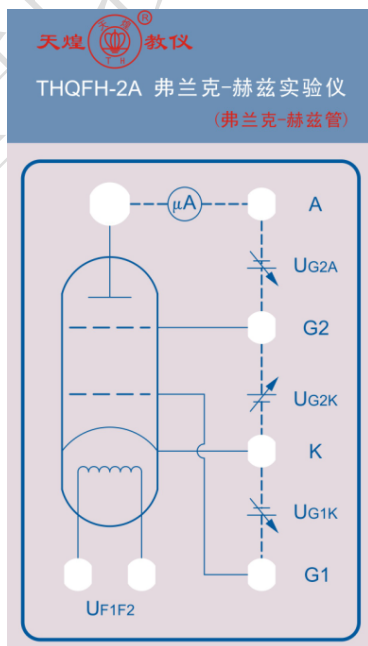


图 3-7 弗兰克-赫兹管前面板图

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（弗兰克-赫兹管）前面板如图 3-7，包括： U_{F1F2} 、 U_{G1K} 、 U_{G2K} 、 U_{G2A} 四路电源的输入接口，其中“红色”接线座为电源的正极输入端，实验时，与电源的“+”端相连接，“蓝色”接线座为电源的负极输入端，实验时，与电源的“-”端相连接，“黑色”接线座为 U_{F1F2} 电源输入端，没有正负极。Q9 座为“弗兰克-赫兹管”电流输出接口，实验时，与“微电流测量仪”前面板的“输入”相连接。

2. 弗兰克-赫兹管背面板

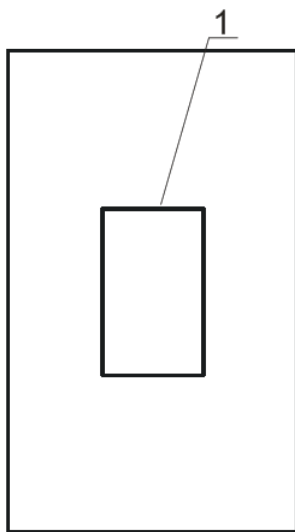


图 3-8 弗兰克-赫兹管背面板图

THQFH-2A 弗兰克-赫兹实验仪（弗兰克-赫兹管）背面板如图 3-8，其中 1 为可视窗口，用于观察弗兰克-赫兹管。

从弗兰克-赫兹管观察窗，可以看到实验仪内含弗兰克-赫兹管，用固定架固定，起到保护作用。