

质量测量
——第53届国际物理奥林匹克竞赛实验第1题

钱　钧　宋　峰

（南开大学物理科学学院 300071）

第53届国际物理奥林匹克竞赛的实验分为两题，第一题是“质量测量”，题目借鉴基布尔秤的基本思想，涉及胡克定律、安培力、电磁感应定律和弹簧振子共振等方面的内容，要求利用谐振子的共振特性测量物体的质量。第二题是“利用双折射测量厚度”，主要为搭建光学系统，测量双折射材料的厚度。每题满分10分，共计20分，实验考试总时间为5小时。本文将对第一题进行详细介绍。

1 实验装置介绍

A 元件清单

图1列出了组装实验装置的元件清单。

元件1为安装底座，红色箭头所指为磁铁，在磁铁的中心位置附近，高度在±3毫米范围内，可产生与高度无关的均匀径向磁场；

元件2是振荡器的支架；

元件3是拇指螺母，共2个；

元件4是垫片，共6个；

元件5是圆柱形振荡器，振荡器中部和下部缠有两个线圈，上面的为控制线圈，下面的为主线圈(见图2(c))；

元件6是橡皮筋，共6个；

元件7是标记物，共2个；

元件8是重物，共5个；

元件9是镊子；

元件10是镜子；

元件11是垫块；

元件12是供电板，可在直流(DC)和交流(AC)模式间切换，在直流模式下，以恒流源方式工作，转动标有“DC Vol”的旋钮来调节电流大小，电流值由在“DCmon”和“DC GND”之间的电压值通过乘以转换系数1.00 A/V获得；在交流模式下，以稳定振幅的电压源方式工作，转动标有“AC Vol”的旋钮来调节电压大小，交流电流有效值是由在“ACmon”和“AC GND”之间的电压值乘以转换系数0.106 A/V获得，频率(Freq.)可通过“粗调”(Coarse)和“细调”(Fine)旋钮进行调节；

元件13是电池盒，共2个；

元件14是电池，共8个；

元件15是带有U形端子的电线，共2个；

元件16是带有鳄鱼夹的电线，共2个；

元件17是数字万用表，转动旋钮，可在“DCV”，“ACV”，“Hz”(即直流电压、交流电压、频率)之中选择合适的测量模式。注意，交流电压的显示值是均方根值，即有效值。

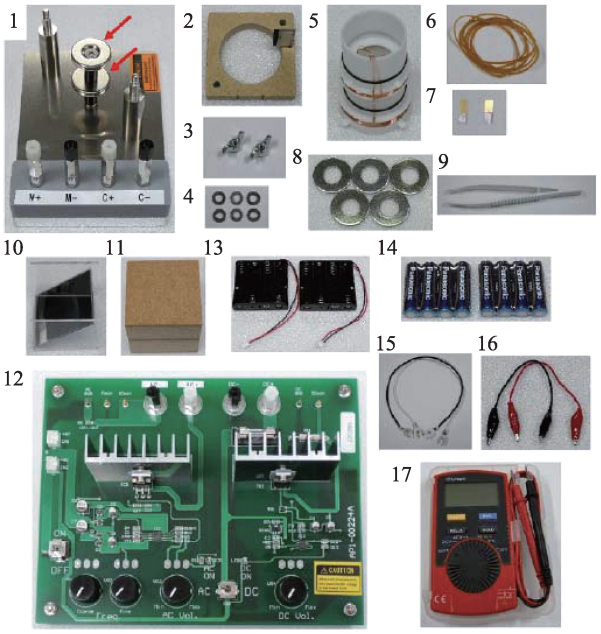


图1　实验装置元件图

B 振荡器安装过程

振荡器的安装过程见图2。首先把橡皮筋以网格状缠绕在振荡器支架上(见图2(a)),然后将圆柱形振荡器从刻度尺一侧插入交叉的橡皮筋的方形开口中,将导线放在刻度尺的另一侧(见图2(b))。根据设计,振荡器应被四个橡皮筋和八个小钩子(在图2(c)中红色圈出)挂在支架上。注意:在这个实验中,我们可以假设橡皮筋的有效作用力服从胡克定律。用两颗拇指螺母将支架固定在安装底座上。刻度尺必须竖直向上,并且与支撑柱不在同一侧(见图2(d))。将振荡器竖立起来,其轴线必须沿竖直方向,并与磁铁对共轴。静止时主线圈应位于两块磁铁的中间附近,这时下方磁铁的上表面和振荡器的下表面之间的距离应在3至5毫米之间(见图2(e)红色箭头)。如果主线圈位置太低,可在支撑柱和支架之间放上垫片(见图2(f)红色箭头)。如果主线圈位置太高,可转动磁铁的柱子,将其取出,在柱子下面加上垫片(见图2(f)黄色箭头)。

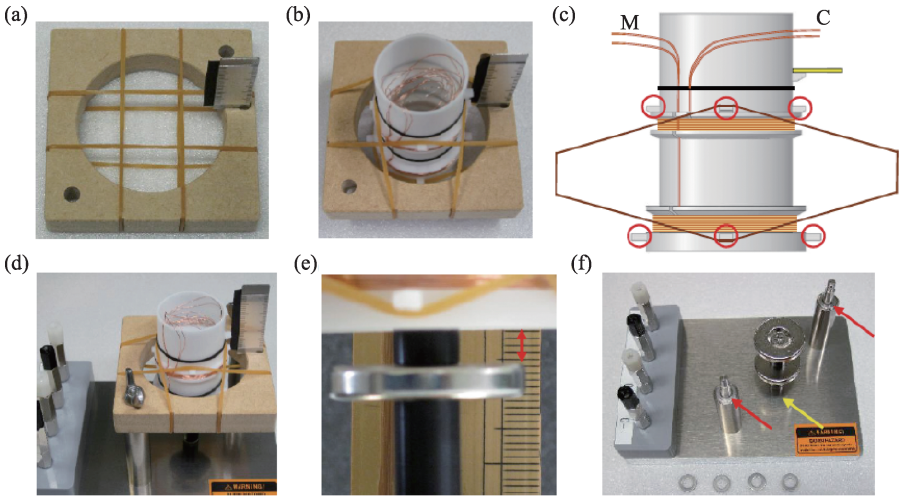


图2 振荡器的安装

C 标记物和镜子安装过程

标记物和镜子的安装过程如图3所示。将标记物上的双面胶带的粘性表面露出(见图3(a))。将标记物粘在振荡器上的微小支架上,以测量高度(见图3(b))。将镜子放在垫块上(见图3(c))。确保可以从上方通过镜子清楚地看到标记物(见图4(d)红圈)。

D 装置的接线

装置的接线如图4所示。从振荡器内部找到并轻轻拉出连到主线圈(M)和控制线圈(C)(图2(c))正确的一对电线(图2(b))。松开接线柱M+和M−上的螺母,使上下部分间出现空隙。利用下方的空隙进行接线(如图4(a),(b)),稍后进行极性检查。用同样方式给标有C+和C−的接线柱接线(正负极性都可以)。将电池放入电池盒中,并将电池盒稳固地连接到供电板上(CN1,CN2)(图4(c))。使用带有U型端子的电线将接线柱M+和M−连接到供电板的直流输出端口(DC+和DC−)。切换到直流电,给供电板加电,转动“DC Vol”旋钮来调整电流。检查振荡器是否向上移动2 mm或更多。如果向下移动,则需要在前面步骤中调换电线的极性,并再试一次。

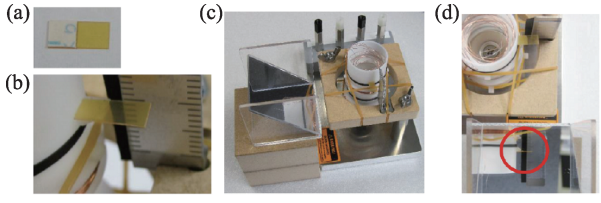


图3 标记物和镜子的安装

2 实验系统模型

图5是实验装置的简化模型,它本质上是一个受迫的弹簧振子。系统的运动方程为:

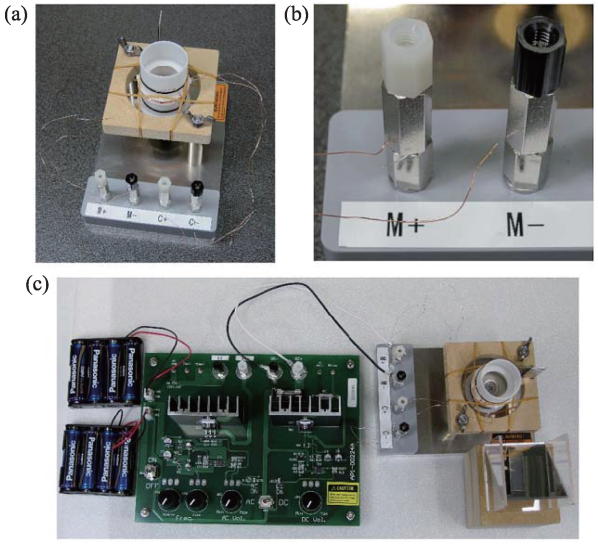


图4 (a),(b)接线柱已接线,(c)整个装置已接线,包括供电板和电池

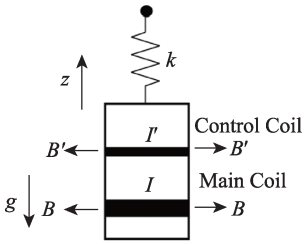


图5 谐振子模型,主线圈(main coil),控制线圈(control coil)

$$(M+Nm)\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}=-(M+Nm)g-k(z-z_e)+BLI+B'L'I'-\alpha\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \quad (1)$$

其中,M是振荡器(圆柱形)的质量,m是每片重物的质量,N是重物的数量,g是重力加速度,k是与垂直运动有关的弹簧有效弹性系数,z是振荡器的高度(或位移),z_e是在没有重力和磁力作用的条件下,平衡时振荡器的高度,$B(B')$是施加于主线圈(控制线圈)的磁场,$L(L')$是主线圈(控制线圈)的导线的长度,$I(I')$是流过主线圈(控制线圈)的电流,α是正阻尼系数。

3 实验

A部分:胡克定律和电磁力(2.4分)

A1 在答题纸上画出两个相同的圆盘形磁铁N极相向时产生的磁力线。(0.4分)

A2 将接线柱M+和M−连接到直流电源的输出端。使用鳄鱼夹导线将数字万用表与电路板上的直流电流读出端连接起来(如图6)。在不加重物(N=0)的情况下,读取直流电流为零时的振荡器的高度z。将读数记录在表1中。将一个重物(N=1)放到挂在圆柱体内壁的圆形支架上,并记录振荡器静止时的高度z。要使振荡器恢复到未挂重物时的高度,流过主线圈的直流电流强度I是多少?将N逐步增加到5,并重复以上测量,并把数据填入表1。(0.6分)

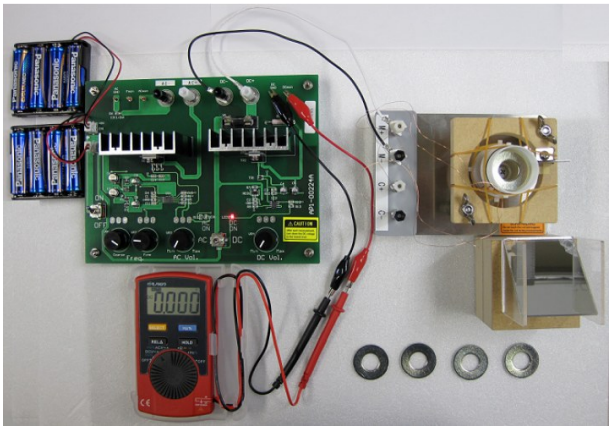


图6 数字万用表的导线已连接。右侧带有重物的振荡器

表1 A2数据记录表

N	z/mm	I/A
0		
1		
2		
3		
4		
5		

A3 画出反映重物数量N和高度z之间关系的曲线图。从图中获得斜率$a=\frac{\Delta z}{\Delta N}$及其不确定度。(0.7分)

A4 画出反映重物数量N和电流强度I之间关系的曲线图。从图中求出参数b的值及其不确定度,参数b定义为$b=\frac{I}{N}$。(0.7分)

提示:

此部分需要画出两个圆盘形磁铁的磁力线分

布，需要注意磁力线需要指向正确，不能存在交叉或分岔等错误情况。连线时需要使用U型端子导线将接线柱M+和M−连接到直流电源的输出端口(DC+和DC−)，同时使用鳄鱼夹导线将数字万用表与电路板上的直流电流读出端(DCmon和DC GND)连接起来，注意万用表读出的是电压值，需要乘以转换系数1.00 A/V才能得到直流电流值。悬挂不同数量重物时，要同时记录振荡器高度和使振荡器恢复原位时主线圈中的电流值。振荡器高度可以从小镜子中观察振荡器标记物对应刻度尺上的读数直接读出。

B部分：感生电动势(3.0分)

B1 假设在控制线圈中施加一个频率为f的交变电流，且控制线圈没有悬挂任何重物。已知振荡器高度随时间呈正弦变化：

$$z - z_0 = A\sin(2\pi ft) \tag{2}$$

其中z_0是力平衡时的高度，A是振幅，写出主线圈中感生电动势振幅V的表达式。(0.2分)

B2 将接线柱C+和C−连接到交流输出端。将数字万用表连接到“Fmon”和“AC GND”上以读取交流电的频率。同时调整交流频率和输出电压，以产生适当幅度的稳定振荡。测量频率f_B并将其数值记录在答题纸上。将数字万用表连接到接线柱M+和M−上。在频率固定的情况下，改变输出电压，并测量主线圈的振幅A以及感生交流电压V'。将数据填写到表2中。(0.5分)

表2 B2数据记录表

A/mm	V'/V

B3 画出反映振幅A和电压V'关系的曲线图。从图中获得参数c的值及其不确定度。参数c的定义为$c = \dfrac{V'}{A}$。(0.7分)

B4 利用B3的结果计算BL的值及其不确定度。(0.4分)

B5 利用A3、A4和B4的结果，计算m和k的值，并计算其不确定度。重力加速度的值可取：g = 9.80 m/s^2。(1.2分)

提示：

此部分研究控制线圈接交流电产生稳定振荡后，主线圈的振幅以及其中产生的感生交流电压。连线时需要使用U型端子导线将接线柱C+和C−连接到交流电源的输出端口(AC+和AC−)。使用鳄鱼夹导线将数字万用表与电路板上的交流频率读出端(Fmon和ACGND)连接起来，读取交流电的频率。形成稳定振荡后，读取并记录频率f_B。然后将数字万用表直接连接到接线柱M+和M−上，读取主线圈产生的感应交流电压(有效值)。主线圈的振幅可以从小镜子中观察振荡器标记物对应刻度尺上的读数来读取。

C部分：共振频率与质量的关系(2.3分)

在下面的实验中，请使用主线圈驱动振荡器，相应地，需要改变连线。

C1 写出带有N个重物的振荡器的共振频率F的表达式。请使用运动过程中的弹簧弹性系数k'，k'与k是不同的。(0.2分)

C2 将交流电源连接到主线圈来驱动振荡器。测量不同数量重物(N = 0~5)的振荡器的共振频率f，将测量结果记录到表3中。过程中避免重物跳动。(0.5分)

C3 利用C2的结果画出曲线图，以求得$\dfrac{M}{k'}$和$\dfrac{m}{k'}$。把得到的数值写在答题纸上。如果需要计算任何其他物理量，请将这些量写在表3的空白处。(1.0分)

C4 $\dfrac{M}{m}$的值是多少？利用B5的结果计算M和k'。(0.6分)

提示：

此部分要测量主线圈驱动下的带有不同数量重物振荡器的共振频率。连线时需要使用U型端

表3 C2数据记录表

N	f/Hz
0	
1	
2	
3	
4	
5	

子导线将接线柱M+和M−连接到交流电源的输出端口(AC+和AC−),以驱动振荡器振荡。使用鳄鱼夹导线将数字万用表与电路板上的交流频率读出端(Fmon和AC GND)连接起来,形成稳定振荡后,读取交流电的频率。测量不同重物下的振荡器稳定振荡时的交流电频率(即共振频率)。

D部分:共振特征(2.3分)

当振幅为F_{AC}、频率为f的周期性作用力施加在不带重物的振荡器上时,振幅A可以用以下具有共振特性的表达式很好地描述:

$$A(f)=\frac{F_{AC}}{8\pi^2 Mf_0}\cdot\frac{1}{\sqrt{(f-f_0)^2+(\Delta f)^2}} \tag{3}$$

其中半峰宽$\Delta f=\frac{\alpha}{4\pi M}$,而且在频率范围$|f-f_0|\ll f_0$内有意义。在这一部分中,我们假设公式(3)始终有效。这样就可以利用共振特性来求得振荡器的质量M。

D1 把交流电加到主线圈以驱动振荡器。调整频率和输出电压,以产生具有适当振幅的共振。在答题纸上记录“ACmon”和“AC GND”之间的交流电压V'_{AC}。利用B4的结果,计算作用于振荡器的周期性电磁力的振幅F_{AC}。

D2 在表4中记录不同频率f下的振幅A。在整个测量过程中,必须保持所施加的力的振幅F_{AC}保持不变。画出反映频率f和振幅A之间的关系曲线图。

表4 D2数据记录表

f/Hz	A/mm	f/Hz	A/mm

D3 利用D1和D2的结果,求出M。

提示:

此部分主要测量主线圈驱动的不同频率下的振荡器振幅。连线时需要使用U型端子导线将接线柱M+和M−连接到交流电源的输出端口(AC+和AC−),以驱动振荡器产生稳定振荡。使用鳄鱼夹导线将数字万用表与电路板上的交流电流读出端(ACmon和AC GND)连接起来,读出的交流电压V'_{AC}需要乘以电流电压转换系数0.106 A/V,才得到主线圈中交流电流的有效值,从而求出电磁力的大小。在此后测量过程中,保持交流电流大小不变,用鳄鱼夹导线将数字万用表与电路板上的交流频率读出端(Fmon和AC GND)连接起来,读取交流电的频率,测量不同频率下振荡器的振幅,为了得到最终结果,测量点应不少于10个点,振幅峰值两侧均要有数据点高度小于峰值的半高度。振荡器振幅可以从小镜子中观察振荡器标记物对应刻度尺上直接读出。

背景知识

本题的题目背景与质量单位kg的重新定义有关。在2018年第26届国际计量大会上,对千克(kg)、安培(A)、开尔文(K)和摩尔(mol)等4个基本单位进行了重新定义,使其完全基于自然常数。其中,kg从国际千克原器的实物计量基准改为通过普朗克常数来定义,该新定义是利用一种高精度质量测量装置—基布尔称(Kibble balance)来实现的。本题目的设定借鉴了基布尔称利用电磁力测量质量的基本思想。

基布尔称的示意图如图7所示。基布尔称有两种工作模式,分别为称量模式和速度模式。通过这两个模式相结合,可以不必测量精度较低的磁场B和线圈的长度l,从而得到测定质量的表达式。在称量模式下,将待测物品放到线圈上方的托盘中,产生竖直向下的重力Mg。给长度为L的线圈通入电流I,则线圈在永久磁铁产生的磁场B中,将受到竖直向上的安培力$F=BLI$。当基布尔称到达平衡

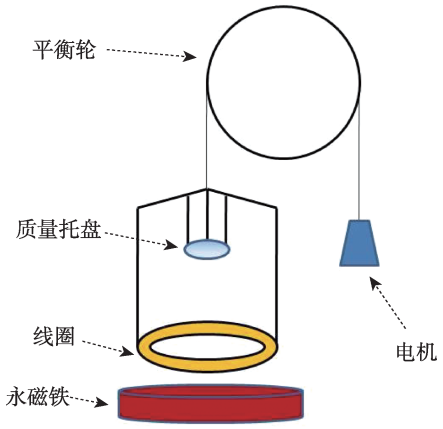


图7　基布尔称示意图

状态时，有 $mg = BLI$。在速度模式下，从托盘拿掉待测物品，开启右侧电机，使得左侧线圈在竖直方向上以速度 v 匀速运动，由法拉第电磁感应定律，整个线圈产生感应电动势 $U = vBL$。结合称量模式下的关系式 $mg = BLI$ 和速度模式下的关系式 $U = vBL$，即可消掉 B 和 L，得到 $UI = mgv$。等式左边代表电功率，等式右边代表机械功率，单位都是瓦特。因此，基布尔称又称为瓦特天平(watt balance)。由此可以推导出质量为 $m = UI/gv$，等式右边的四个物理量都可以达到很高精度的测量，故而利用基布尔称原理可以精确地测出质量。

* * * * * * * * *

欢迎读者朋友参与“物理奥赛”系列专题的有奖竞答活动，并在答案公布前将您的解答发送至 aosai@ihep.ac.cn 邮箱。对于参与并答对每期题目的前20名读者，编辑部将赠阅1年《现代物理知识》杂志。

科苑快讯

科学家终于揭开了黄金永不褪色的原因



黄金之所以能保持光泽，是因为它的一些表面原子重组为阻止氧反应的结构。

在一项发表在《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)上的研究中，美国杜兰大学的研究人员发现，一些金表面的原子可以转变成保护性排列，从而大大减少与氧的反应。

研究人员利用计算机模拟研究了，当氧分子遇到两种常见的金表面结构时，原子和电子的行为。他们的研究结果表明，如果氧分子表面的原子没有重组，氧分子就会分裂，更容易与金发生反应。有了重新排列的表面，与氧的反应减少了十亿到万亿倍。实际上，移动的原子在原子尺度上形成了一个保护屏障，帮助黄金在极长时间内保持光泽。

这一结果为黄金著名的抗褪色性提供了新的解释，同时也指出了在催化方面可能的改进。金基催化剂有助于加快化学反应的发生，已经在一些工业氧化反应中得到应用。但是，黄金在珠宝和电子产品中有用的抗腐蚀能力，也会使它在化学制造和能源应用中不那么有效，因为它不容易分裂氧分子。

过去改进金催化剂的努力通常集中在将金与其他金属混合或在氧化物表面放置微小的金纳米颗粒上。这项新研究表明，改变金表面本身的几何形状，可以提供另一种使金更具反应性的方法。

（高凌云编译自2026年6月30日 SciTechDaily 网站）