

利用精密扭秤测量弱电场

赵子莹 张军朋

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 511400)

刘志强

(东莞市万江中学 广东 东莞 523000)

(收稿日期:2015-02-08)

摘要:本实验根据扭秤所受扭力与扭角成正比的原理,通过比较法,先后测量扭秤在待测电场中的扭角与标准电场中的扭角,以比例关系得到待测电场的强度,实现弱电场的测量.实验本质为使用光杠杆放大带电小球在电场中的受力.另外,利用聚四氟乙烯的高绝缘性质作为测量电场的带电体,实现电量的较长时间保存.

关键词:弱电场 扭秤 光杠杆 比较法 聚四氟乙烯

1 引言

1.1 电场的测量

常见的电场测量通常会使用电场传感器,利用传感器中的各种敏感元件在电场的变化来将电场强度转化为其他物理量再进行测量,比如有基于电光效应电场传感器,压电式电场传感器,基于 CMOS

工艺的场效应管电场传感器,基于电致伸缩的电场传感器等.问题在于以上的电场传感器大部分都只能对高压高频电场进行测量,对于弱电场很难有明显的效果甚至是不适用的.本论文中回归到使用带电小球在电场受力的作用的测量,并使用精确度较高的扭秤等实验仪器,使实验过程简单,使用仪器材料价格适宜,性价比高.

整套的演示实验教学资源,编辑做成的视频文件大小为 1 ~ 5 MB 左右,播放时间为 30 s ~ 2 min 左右,方便学生从网站上直接观看,对所有的视频教程都配有文档型的解说文件以及相应的学习提问,利用网络教学平台,学生和教师可以方便地交流、讨论.

3 结束语

我们通过对国内外的大学物理演示实验教学进行总结,在本校进行了一系列的大学物理演示实验教学,通过演示实验项目的开发培养学生的创新意识和工程应用能力,通过实验室的开放为学生的探究提供实验条件,通过实验项目的改进和自制演示实验设备培养学生的创新思维,通过网络实验平台的建设培养学生的自学能力和创新能力,所有的这些举措都给本校的大学物理演示实验带来了良好的教学效果,但是随着招生规模的增加和教育技术的不断发展,演示实验的开展也不断遇到挑战:实

验仪器的大型化、校区的增加使得授课教室与演示实验室不在同一栋教学楼、教师的教学进度基本相同等都带来诸多问题,这些都需要教师发挥智慧找到更好的解决办法,让演示实验在物理教学中发挥更大的作用.

参考文献

- 1 金桂,黄小益,姚敏.大学物理演示实验教学改革中培养学生的创新思维能力.物理通报,2014(5):22 ~ 25
- 2 金桂,黄小益,姚敏.基于创新思维培育的大学物理实验教学平台建设与实践.大学物理实验,2014(27):108 ~ 111
- 3 李叶凤.大学物理演示实验教学方法的探索.实验科学与技术,2008(12):104 ~ 107
- 4 陈惠敏,石雁祥,张承据.大学物理演示实验教学模式的探讨.大学物理实验,2007(10):22 ~ 25
- 5 郭力,石少波.演示实验制作促进动手动脑的大学物理探索式学习的改革尝试.大学物理,2010,29(3):50 ~ 55
- 6 卢荣德,程福臻,孙腊珍.大学物理演示实验动感创新教学平台的探索与实践.物理通报,2011,20(1):42 ~ 45

1.2 研究微电场传感器的意义

随着航空航天、国防和环境监测等技术领域的发展,对静电场的探测越来越广泛.而我们实验使用的这套自制仪器由于具有灵敏度高、性价比高、操作简单等优点,因而有可能在电力工业、静电研究、大气和空间科学以及大型军事工程中获得很好的普及应用.

2 实验原理

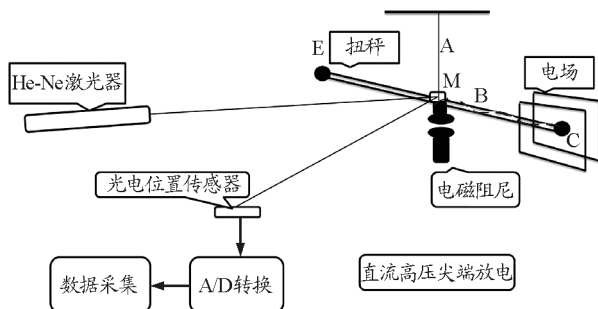


图1 装置设计图

2.1 扭秤部分

主要由库仑扭秤改装而成,由悬丝 A,秤杆(半臂 B,直径为 2.002 mm,长为 121.5 mm)、被测带电聚四氟乙烯圆片 C 和平衡物体 E 以及可移动滑块组成.

(1) 顶架选用精制木块制成,顶部不开口,加入固定悬丝的金属螺丝套在精制滑动木块上,可自由转动,以便大幅度调节扭秤初始平衡位置.悬丝选用可自由扭转的细丝并和秤杆相连,秤杆由绝缘轻质物质制成,可有效减少对悬丝的负重.

(2) 带电聚四氟乙烯圆片(直径为 2.055 mm,质量大约为 2 g)粘贴于扭臂一端,用于进入电场进行测量.

(3) 秤杆的中心安装有一个反射镜 M,激光发出的光线入射到该反射镜上,反射光束经调整后可进入光电探测系统.

(4) 整个扭秤置于主体装置的滑槽上,配合一扭秤固定架进行使用.

2.2 起电模块

直流高压放电电路,如图 2 所示.

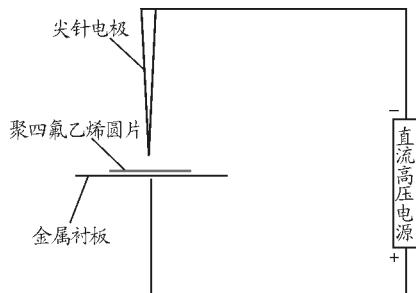


图2 直流高压放电电路图

直流高压源的电压必须在 2 000 V 以上,负极接尖针电极,正极接金属衬板电极.待充电的聚四氟乙烯圆片已用金属夹子固定在电路上,将圆片平放在衬板电极上.启动高压电源,使针尖电极逐渐靠近塑料圆片,直到听见“嘶嘶”的放电声,表明针尖电极已形成电晕放电.放电时间持续 5 min,聚四氟乙烯圆片表面即淀积一层负电荷.

2.3 小球在电场中的偏转

使试探小球带上微量电荷后,小球在待测电场中将因为受到电场力的作用而做幅度逐渐减少的往返摆动,但在电磁阻尼的作用下,这种摆动会因装置中铜片的磁通量改变而产生感应电流,阻碍相对运动,快速趋于静止.此时扭丝的变形带动着镜片使激光投向光电位置探测器,通过计算扭转角度的大小计算小球所受电场力的大小.根据相关文献,我们可以知道扭力矩与扭角之间的关系为

$$M = \frac{\mu\theta D^4}{l} \quad (1)$$

其中 M 为扭力矩, μ 是决定于悬丝材料的常数, D 与 l 分别为悬丝的直径和长度. θ 为扭角,可用光电位置探测器测得.通过这一公式我们可以得到扭力矩的大小,进而计算得到小球所受电场力

$$F_1 = \frac{\mu\theta_1 D^4}{lL \cos \theta_1} \quad (2)$$

$$F_1 = qE \quad (3)$$

其中 L 为带电小球到扭秤转轴的水平距离, E 为待测电场强度.

当我们在待测电场中收集到足够数据时,将扭秤中的试探小球移入自制已知电压 U 与距离 d 的平行板中,小球在已知电场中再次转动并在平衡位置停止.

同样地我们可以得到小球所受电场力为

$$F_2 = \frac{\mu\theta_2 D^4}{lL \cos \theta_2} \quad (4)$$

此时还有

$$F_2 = q \frac{U}{d} \quad (5)$$

综合上面各式,可以得到待测电场强度为

$$E = \frac{\theta_1 U \cos \theta_2}{\theta_2 d \cos \theta_1} \quad (6)$$

由式(6)可知,实际上实验并不需要测小球电荷量,而是从测扭角上体现扭秤对力的放大作用,实验过程简单明确。

2.4 电磁阻尼装置原理

电磁阻尼原理:电磁阻尼现象源于电磁感应原理,宏观现象即为,当闭合导体与磁极发生相对运动时,两者之间会产生电磁阻力,阻碍相对运动。这一现象可以用楞次定律解释:闭合导体与磁极发生切

割磁感线的运动时,由于闭合导体所穿透的磁通量发生变化,闭合导体会产生感生电流,这一电流所产生的磁场会阻碍两者的相对运动。其阻力大小正比于磁体的磁感应强度、相对运动速度等物理量。

本装置中当扭秤产生左右摆动、前后摆动或晃动时,铜片在磁铁产生的磁场中运动,由楞次定律可知,通过铜片的磁通量发生变化时产生感应电流,在不影响扭秤扭转的情况下,阻碍相对运动,并提高本实验的可操作性。

3 结果及分析

实验中将采集下列3组数据,如表1。

距离1:扭秤平衡位置时距光电位置传感器中心点的距离;

距离2:扭秤在标准电场中偏离中心点的距离;

距离3:扭秤在待测电场中偏离中心点的距离。

表1 实验中采集的数据

距离 1/cm			距离 2/cm			距离 3/cm		
0.198	0.069	0.198	0.172	0.420	0.624	0.562	0.688	0.762
0.266	0.067	0.192	0.177	0.420	0.592	0.671	0.700	0.721
0.242	0.082	0.227	0.177	0.436	0.576	0.617	0.712	0.660
0.251	0.034	0.206	0.147	0.484	0.524	0.629	0.633	0.674
0.289	0.071	0.242	0.177	0.453	0.605	0.576	0.647	0.721
0.367	0.087	0.270	0.227	0.410	0.617	0.650	0.624	0.688
0.354	0.162	0.270	0.220	0.550	0.588	0.629	0.723	0.756
0.280	0.172	0.293	0.213	0.528	0.576	0.588	0.695	0.807
0.328	0.172	0.270	0.234	0.585	0.576	0.563	0.637	0.688
0.328	0.126	0.257	0.280	0.538	0.486	0.550	0.579	0.633
0.300	0.168	0.293	0.341	0.513	0.513	0.510	0.624	0.647
0.393	0.168	0.341	0.417	0.550	0.588	0.629	0.536	0.767
0.393	0.205	0.330	0.471	0.600	0.600	0.695	0.649	0.700
0.367	0.270	0.317	0.465	0.600	0.550	0.660	0.684	0.633
0.380	0.242	0.328	0.465	0.617	0.478	0.565	0.672	0.647

还有部分数据未列出。

数据采集频率为5个/s。分别测量180个数据。

在本实验中,标准电场中平行板间的电压 $U =$

30.0 V;平行板的间距 $d = 50.0$ mm;

测得光电位置传感器位置 $x_1 = 8.32$ cm;扭秤位置 $x_2 = 36.10$ cm。

根据实验测量数据,计算得到平衡位置

$$x_0 = 0.279 \text{ cm}$$

标准电场中位置: $c_1 = 0.498$ cm;对应偏转角度

$$\theta_1 = 0.00487^\circ;$$

待测电场中位置: $c_2 = 0.700 \text{ cm}$; 对应偏转角度

$$\theta_2 = 0.00938^\circ.$$

由此计算得到

$$\cos \theta_1 = 0.99999$$

$$\cos \theta_2 = 0.99996$$

将上述数值代入到公式(6) $E = \frac{\theta_1 U \cos \theta_1}{\theta_2 d \cos \theta_1}$, 计算

得到 $E = 1.155 \text{ V/mm}$;

不确定度计算

$$\Delta x = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

$$\Delta \theta = \left| \frac{\partial \theta}{\partial x} \right| \Delta x$$

即

$$\Delta \theta = \frac{1}{x_2} \frac{1}{1 + \left(\frac{x_1 + x}{x_2}\right)^2} \cdot \Delta x \quad (2)$$

由误差传递公式得到

$$\frac{\Delta E}{E} = \left| \frac{\partial \ln E}{\partial \theta_1} \right| \Delta \theta_1 + \left| \frac{\partial \ln E}{\partial \theta_2} \right| \Delta \theta_2 \quad (3)$$

由式(1)、(2)、(3) 计算得到

相对误差

$$\frac{\Delta E}{E} = 0.093$$

绝对误差

$$\Delta E = 0.1 \text{ V/mm}$$

最后测量结果表示

$$E = (1.2 \pm 0.1) \text{ V/mm}$$

3.1 误差分析

(1) 由于实验条件限制真空条件在本实验中难以实现, 实验中存在漏电情况, 由于带电物体裸露在空气中, 总会有部分电荷流失, 影响测量结果的准确性;

(2) 扭秤是一种高灵敏度的弱力检测装置, 对微小的扰动非常敏感, 实验过程中任何的干扰和振动都会影响实验结果, 特别是冷热变化和空气流动对扭秤的干扰。

(3) 非匀强电场: 平行板电容器两极板间可能

不平行且两极板并不是无限大平面, 因此两平行板间并不是严格的匀强电场;

(4) 相关距离的测量

由式(6)

$$E = \frac{\theta_1 U \cos \theta_2}{\theta_2 d \cos \theta_1}$$

可见, 最终结果的不确定度只来自于扭角角度 θ , 已知标准电场电压 U 和已知标准电场两极板的距离 d 的测量所决定. 对于扭角 θ 的测量精度, 主要体现在扭秤的扭丝的灵敏度及光电位置感应器的精确度. 这两个因素由材料本身所决定. 对于已知的标准电场的电压, 由构建的电路及极板的材料等多因素决定, 但应在适当范围里尽量大, 使结果更容易测量.

4 结论

本装置对根据库仑扭秤测量原理, 对装置进行了自主设计, 实现了测量待测电场中任一点的目的. 大大增强了扭秤的实用性. 另外, 在测量角度方面, 使用高精度光电位置传感器进行测量, 代替传统的角度测量尺, 有效提高了测量的精度. 在数据测量方面, 用 PC 串口通信实现了大量数据采集功能, 从而避免了测量时偶然误差带来的影响. 但实验装置极易受到环境扰动带来的影响, 需要较为严格稳定的测量环境, 对外界影响敏感, 容易造成测量的不准确性.

参考文献

- 1 范淑华, 汤洁, 罗俊, 李天应. 利用精密扭秤测量铜与磁场的相互作用. 大学物理, 1996, 15(11): 27 ~ 28
- 2 袁媛, 李文娜. 扭秤和著名的扭秤实验. 中学物理, 2009, 27(15): 53 ~ 56
- 3 胡国宝. 实效库仑扭秤及其使用. 教育仪器与实验, 1989, 5(6)
- 4 霍震, 唐诗才. 位置敏感光电探测器. 半导体光电, 1998, 19(1)
- 5 涂良成, 黎卿, 邵成刚, 胡忠坤, 罗俊. 万有引力常数 G 的精确测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011(6)