DOI:10.19789/j.1004-9398.2018.01.008

范氏起电机: 静电理论知识综合应用的范例

张 立 新
(南通师范高等专科学校如皋校区,江苏 如皋　226500)

摘　　要

阐述了演示实验用范氏起电机的整机工作原理: 包括摩擦起电、尖端放电、电荷自激、起电机金属球壳的电场与电势分布等基本理论; 讨论了科研用范氏起电机加速带电粒子的基本原理; 介绍了演示实验用范氏起电机常见故障的排除方法.

关键词: 范氏起电机,摩擦起电,尖端放电,电荷自激系统.
中图分类号: O4-4

范氏起电机的全称为范德格喇夫起电机,该装置于 1931 年由美国物理学家罗伯特•杰米森•范德格喇夫(Robert Jemison Van de Graaff,1901—1967) 发明[1]. 范氏起电机是产生静电高压的仪器设备,一般物理实验室购置的是演示用范氏起电机,配合其他仪器可演示静电教学方面的相关实验. 高能物理实验研究使用的是大型范氏起电机,又称为范氏静电加速器,其产生的静电高压达到 10^6 伏特以上,为加速带电粒子提供了足够高的静电电压. 范氏起电机使稍纵即逝的静电变得易于控制,为教学演示与高能物理实验研究提供了可靠的静电源,范氏起电机将众多静电学原理精彩地链接起来而构成了自身的工作原理,不愧为静电学理论知识综合应用的很好范例.

1　演示实验用范氏起电机

演示实验用范氏起电机的内部结构如图 1 所示. 主要部件有金属球壳、绝缘支架、上滚轮、下滚轮、传送带、自激梳、集电梳、单相交流电动机等等. 范氏起电机的工作过程涉及到以下静电学基础理论.

1.1　摩擦起电原理

范氏起电机静电荷来源是基于两种不同材料摩擦起电的原理(包括紧密接触起电) . 一般说来两种不同的材料发生摩擦时都会发生电荷的转移,获得电子的材料带负电; 失去电子的材料带正电. 由于金属材料的自由电子很容易转移,保存这些电荷特别困难,所以实际应用中都采取绝缘材料摩擦来获得静电荷. 绝缘体摩擦产生的电荷称为束缚电荷,其涵义为: 这些电荷在哪里产生就停留在哪里而不能在绝缘材料上移动. 范氏起电机的两个摩擦对象是下滚轮与传送带. 适当地选择两种材料的组合可以使

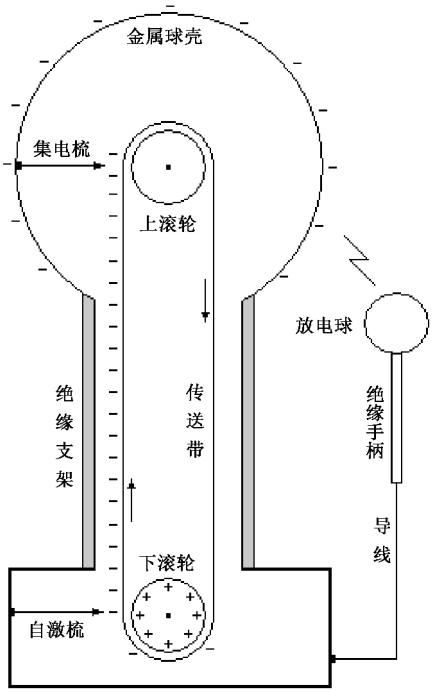


图 1　演示实验用范氏起电机

收稿日期: 2017-02-22

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下滚轮带正电、传送带带负电,调换材料的组合也可使带电情况相反. 交流电动机与下滚轮共轴,接通220 伏交流电源,电动机随即带动下滚轮转动. 下滚轮与传送带之间的摩擦和紧密接触作用,致使两介质带上异种电荷. 这里不妨假设下滚轮带正电,传送带带负电.

1.2 尖端放电原理

从图 1 看到: 传送带左边做上行运动,右边做下行运动. 负电荷随着传送带的上行而上移,当负电荷到达上滚轮附近时,在上滚轮附近设置有集电梳,所谓集电梳就是一排整齐的金属尖针,它的外形正像日常生活用品——梳头的梳子. 静电学理论和实验表明: 带电导体的电荷分布与表面的曲率有关. 表面较平坦的地方,电荷分布比较稀疏,电场较弱; 表面突出的地方电荷分布比较密集,电场较强. 如果导体表面存在尖端,尖端处电荷就特别密集,电场也特别强,可以导致周围空气分子电离. 在尖端强电场的作用下,与尖端电荷极性相反的离子飞向尖端跟尖端电荷中和; 与尖端电荷极性相同的离子受到斥力背离尖端而飞走,这就是所谓尖端放电. 若带电体不是尖端本身而是尖端对面的物体,此时尖端上出现感应电荷同样发生尖端放电. 尖端放电的电荷运动不存在方向性限制,就电子而言它可以是从尖端放出,也可以是飞向尖端. 据尖端放电原理,传送带上的负电荷(束缚电荷) 经过集电梳时必然发生尖端放电,负电荷飞奔尖端并迅速转移分布到金属球外表面.

1.3 电荷自激原理

摩擦生电的电量太小,不能使金属球带上足够多的静电荷,大球与小球之间不能产生强烈的火花放电. 因此仪器还需要电荷的自激机制. 下滚轮、传送带、自激梳三者构成了电荷自激系统. 在摩擦起电的过程中,负电荷被传送带源源不断地运走,但正电荷只能聚集在下滚轮,而且越聚越多. 这样下滚轮正电荷的面密度就大大高于传送带的负电荷的面密度,因此正电荷是矛盾的主要方面: 下滚轮周围空间的电场就是正电荷形成的强大电场.

在下滚轮电场作用下导致自激梳发生尖端放电,由于传送带的中介隔离,尖端放电放出的负电荷不能与下滚轮的正电荷相遇中和,于是这些负电荷吸附于传送带且被上行的传送带带走. 运转一定时间后,下滚轮的电荷增加量与泄漏量达到动态平衡,下滚轮的带电量基本保持稳定. 从理论分析可知: 一定量的正电荷通过自激梳的尖端放电可产生无限量的负电荷,这就是范氏起电机的电荷自激原理. 实验表明: 取下自激梳装置仅仅依靠摩擦电荷对金属球充电它只能带有微弱电荷.

1.4 金属球壳内外空间的场强分布

范氏起电机金属球壳内外空间的电场分布满足什么规律呢? 设金属球半径为 R,带电量为 Q.

① 先讨论金属球壳内空间的电场分布($r<R$). 对均匀带电的金属球壳而言,若所考察的空间位置在球壳内,且忽略传送带上少量束缚电荷影响,根据高斯定律容易求出球壳内空间的场强

$$E_{内}=0$$

② 再讨论金属球壳外空间的电场分布($r>R$). 当所考察的点在金属球壳外时,根据高斯定律也容易求出任一点的场强

$$E_{外}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

以上结论即是金属球壳内部与外部空间的电场强度分布的数学规律[2].

1.5 金属球壳内外空间的电势分布

起电机金属球壳内外空间的电势分布满足什么规律呢? 根据金属球壳周围空间的电场强度分布可求出电势分布.

①先讨论金属球壳的内空间电势分布($r<R$). 由于球壳内外场强函数不同,定积分需要分段进行. 这里取无穷远作为零电势参考点,根据静电场的电势计算公式

$$U=\int_r^{\infty}E\cdot\mathrm{d}r$$

结合范氏起电机的具体情况,并考虑到 0 的定积分结果还是等于 0,于是得到

$$U_{内}=\int_0^R 0\cdot\mathrm{d}r+\int_R^{\infty}\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\mathrm{d}r$$

$$=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}$$

结果表明,球壳内部任意一点的电势与球面上的电势相等且等于一常数. 即带电的金属球面及其内部是一个等电势空间区域,而且金属球带电量愈大,球内区域的电势相对于“外界”愈高. 这里不说相对于“大地”是因为理论计算取无穷远为零电势的缘故.

②再讨论金属球壳的外空间电势($r>R$). 仍取无穷远为零电势参考位置,将场强函数沿球半径方向积分得到

$$U_{外}=\int_r^{\infty}\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\mathrm{d}r=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可见考察点离金属球越远则考察点的电势越低. 至此金属球内、外空间的电势分布规律全部给出[2].

1.6　火花放电原理

起电机金属球相当于一个电容器,这个电容器可视为两个同心球壳构成,一个球壳半径是 R; 另一个球壳半径为无穷大,两个球壳组成的电容器容量是

$$C = 4\pi\varepsilon_0 R$$

集电梳作用就是给这个电容器不断充电. 大球带上足够的负电荷后,将接地小球(放电球) 靠近大球即发生“火花放电”,我们可看到明亮的电火花同时听到爆鸣声. 火花放电时碰撞电离并不是发生在两个球之间的整个区域,而是发生在狭窄曲折的闪光通道中. 空气击穿后突然由绝缘体变为导体,大球电荷很快中和、电压迅速降低、火花放电即刻停止. 随着起电机继续起电,大球电压又升高到一定数值后方能再次看到火花放电,所以火花放电是间断发生的.

1.7　感应起电原理

摩擦起电与感应起电是两种基本的静电起电方法,范氏起电机可演示感应起电现象. 当起电机的金属球带上一定电荷时,教师手持验电器慢慢靠近金属球,学生看到验电器的两箔片逐渐张开,靠得越近张开的角度越大; 再将验电器逐渐远离金属球时张角变小,验电器离开金属球足够远时两箔片合拢,这就是感应起电现象,参见图 2. 在感应起电过程中验电器所带的净电荷等于 0. 然而验电器与金属球靠得足够近时会发生火花放电,此时验电器带上了净电荷,再将验电器远离金属球时两箔片不再合拢.

2　科学研究用范氏起电机

高能物理实验研究需要使用高速运动的带电粒子去轰击原子核,这些高速粒子一般采用大型科研用范氏起电机加速获得,此时起电机又称为范氏静电加速器.

2.1　范氏静电加速器的结构

与演示实验范氏起电机比较,范氏静电加速器在结构上增加了一些组件. 第一: 为更有效地产生静电荷增加了直流高压电源; 第二: 为了对带电粒子加速增加了离子源、真空加速管、轰击靶等,参见图 3. 紧靠传送带安装着放电梳,其尖端正对传送带但不触及它,放电梳连接着直流高压电源的正极,电源的负极接地,传送带介于放电梳与接地金属板之间. 显



图 2　验电器发生感应起电现象

然科研用起电机的静电荷不是靠摩擦起电产生而是靠直流高压电源的尖端放电产生. 在数百万伏特的直流高压电源作用下,放电梳与接地板之间发生尖端放电,放电梳向传送带喷射正电荷,这些电荷附着于传送带并随之上行. 调换电源的极性也可使传送带带上负电荷.

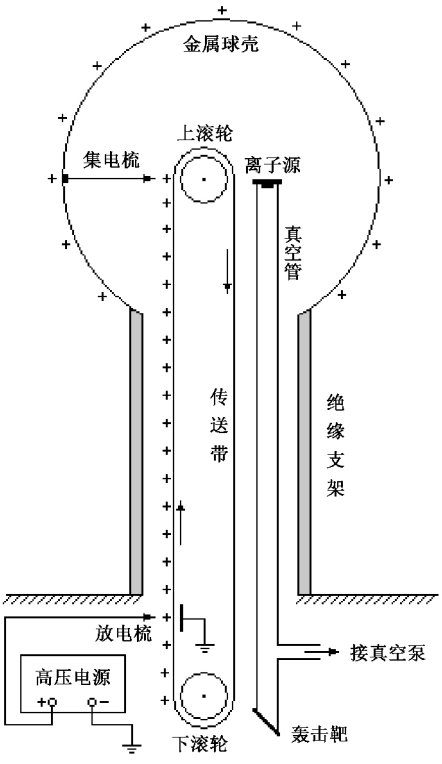


图 3　科学研究用范氏起电机

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 范氏静电加速器的基本原理

由前讨论可知: 金属球内部相对于外界不仅是一个等电位空间而且是一个高电位空间. 加速离子源置于真空管的上端,从离子源出来的带电粒子受到很强的电场力作用,由上而下沿着真空管方向得到加速. 设带电粒子的质量为 m,所带电量为 q,真空管顶端到底部的电势差为 U,粒子的初速度忽略不计,则电场力对粒子所做的功等于粒子的动能的增量[3]

$$\frac{1}{2}mV^2 = qU$$

带电粒子到达底端靶子的速度是

$$V = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

可见粒子的末速度决定于金属球内部相对于外界的电势差. 经加速获得的高速粒子不仅可用于核物理研究,且在医学生物学半导体掺杂等方面都有广泛的应用.

3 范氏起电机常见故障排除

掌握了范氏起电机的结构和工作原理后不难排除起电机的常见故障. 结合我们在教学实验中遇到的故障及排除方法做出概括性的陈述.

3.1 电动机不转或旋转无力

范氏起电机一般使用电容启动式单相交流电动机驱动滚轮转动,使用日久后启动电容器容易漏电变质甚至完全损坏,此时出现电动机旋转无力或者只有交流声而不旋转的现象. 可按照原电容器的容量和耐压数值购买新的电容器并且更换.

3.2 起电机几乎不起电

最有可能的原因就是机器潮湿或灰尘多致使各部件绝缘性能变差. 如果绝缘支架、下滚轮、上滚轮、橡胶带、金属球表面等有纤维物、汗渍或灰尘等,都会造成许多微小的尖端,使产生的电荷直接从尖端放电流散到空气中. 因此需要用清洁抹布将各个组件表面擦干净,且不要用手直接触摸仪器. 环境湿度太大也会导致起电机不起电,含杂质的水分子附着在绝缘体表面会使仪器绝缘性能大大降低. 起电机内部安装有一盏白炽灯可用来烘干除湿. 如果白炽灯不亮,可以检查电路故障或者更换新灯泡. 若白炽灯烘干效果不理想可考虑另加红外线烘干热源,总之要保证演示实验环境的清洁通风干燥.

3.3 起电机工作但起电量较小

这是经常发生的故障,造成故障的原因可能来自几个方面. 一是自激梳的位置发生偏移. 自激梳就是一排整齐的金属针,其紧密连续的排列相当于金属刀片. 我校实验室起电机即采用金属刀片做自激梳. 自激梳可以实现下滚轮有限量的正电荷通过尖端放电产生无限量的负电荷,且附着于上行的传送带被运走. 如果自激梳出现偏移就不能很好地发挥电荷自激的作用. 实验教师可仔细地调整自激梳到“合适位置”——使得自激梳尽量靠近传送带但不要碰触传送带. 二是集电梳的位置发生偏移. 集电梳如果与传送带距离过大就不能很好地收集静电荷,集电梳如果与传送带的距离过小则容易划伤传送带,也不能正常地收集静电荷. 可以通过反复调节集电梳的左右两侧螺母使其到达合适位置. 三是前面说到的仪器潮湿及不清洁也是造成起电机电量小的原因.

3.4 传送带偏离上下滚轮的中线

当传送带偏离上下滚轮的中线较多时,传送带会与绝缘支架内壁摩擦,造成传送带与支架内壁受伤. 此时需要松开电动机安装支架,重新调整电动机位置且固定之; 或者调试上滚轮两端的螺母,使橡胶带到达较理想的中线位置. 若传送带出现裂纹老化现象直接影响起电效果,须更换新的传送带.

参 考 文 献

[1] 夏征农主编. 辞海[M]. 上海: 上海辞书出版社,1999: 917.

[2] 张三慧. 大学物理学——电磁学(第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社,2002.

[3] 程守洙,江之永. 普通物理学 2(第五版) [M]. 北京: 高等教育出版社,2001.

(下转第 51 页)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Particle Size Distribution and Source Analysis of Inorganic Elements in Atmospheric Aerosol in Xinglong Base Station

Li Xingru　Wang Guoan　Li Dong

(Department of Chemistry, Capital Normal University, Beijing　100048)

Abstract

The concentrations of 25 elements such as Ca, Na, Mg, Fe, Al and K were determined by ICP-MS, and the concentration characteristics, particle size distribution and source of these elements were discussed. The results show that Ca, Na, Mg, Fe, Al and K in inorganic elements in the aerated aerosol are 96% of the total concentration of the measured elements, and all the elements show a high concentration level in the autumn. The particle size distribution shows that the 25 kinds of elements detected in this study show almost double-mode distribution, peaks apeared in the 4.7 ~ 5.8 μm grain size and small peak in the 0.43 ~ 0.65 μm particle size. The results of enrichment factor analysis show that Xinglong is mainly affected by crustal source and combustion source.

Key words: atmospheric aerosol, water-soluble ion, metal element, particle size distribution, source analysis.

(上接第 44 页)

Van de Graaff Static Generator: An Example of the Application of Electrostatic Theory Knowledge

Zhang Lixin

(Nantong Normal College Rugao Campus, Rugao Jiangsu　226500)

Abstract

This paper expounds the working principle of the Van de Graaff generator for demonstration experiments. It includes friction electrification, tip discharge, charge self-excitation, the electric field and electric potential distribution of the metal shell. It discusses the basic principle of accelerating charged particles in Van de Graaff generator and introduces the method of eliminating the common faults of Van de Graaff generator.

Key words: Van de Graaff generator, friction electrification, tip discharge, charge self-excitation system.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net