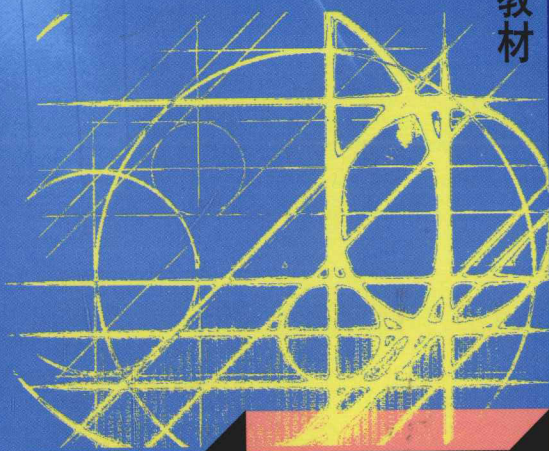


高等院校物理学教材



基础静电学

吴宗汉 编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

基础静电学

吴宗汉 编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

基础静电学/吴宗汉编. —北京:北京大学出版社, 2010. 9
ISBN 978-7-301-17735-8

I. ①基… II. ①吴… III. ①静电学-高等学校-教材
IV. ①O441.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 172120 号

书 名: 基础静电学

著作责任者: 吴宗汉 编

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-17735-8/O·0827

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子邮箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 理科编辑部 62752021
出版部 62754962

印 刷 者: 北京汇林印务有限公司

经 销 者: 新华书店

880 mm×1230 mm A5 10.75 印张 310 千字

2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

近年来由于科学技术的发展,许多交叉学科不断应运而生,而其中有些不乏是过去未被人们发现或过去尚未被人们重视的领域,本书所讨论的基础静电学就是其中明显的一例.约在20年前,东南大学物理系为适应工程实际的需求,开设了“应用静电基础”的选修课,并由朱桐华教授首次主讲,但苦于无合适的教材可用,遂由本人根据法国 Poitiers 大学的 G. Touchard 教授和日本爱知工业大学的大桥朝夫教授送给我的资料,以及国内各大学间的学术交流资料等综合译编成一本教材,其中更值得一提的是大桥朝夫教授听说我要编写教材,他把自己在日本爱知工业大学为研究生和本科生开设静电课程的 OHP 透明片讲稿、讲课笔记本、给学生用的习题等都送来供我选用.当时的教材是由柯景风教授亲自刻蜡纸再油印成讲义供学生使用的.因此,这里凝聚了众多同事、朋友们的心血.该教材使用几年后,我又补充了不少内容,其中也包括本人的科研工作和学术论文,编成本书的初稿.其后又逐步修订、润色,力臻丰满、完善而成书.

本书编写的初衷:其一是将一些基础静电知识量化后讲述,因为国内尚无一本配有较多计算和练习的基础静电教科书,这本书也算是一个补充.我常常对学生说:“没有量化,就不能深化.”对科学现象认识的深入,一定要使之量化才行;其二是尽可能使静电现象系统化、科学化,并能引导学生用基础理论去思考科技前沿问题.当然,本书能否达到这个要求,就请专家、学者和读者们评价并指正了.

最后,我还要再次感谢 G. Touchard 教授、大桥朝夫教授、渡边茂男教授和东南大学教务处、物理系的相关领导和同事,是他们的鼓励和支持才使本书得以顺利面世.东南大学的恽瑛教授,热能所的王式民教授逐字逐句审阅本书,并提出了不少宝贵意见.深圳豪

恩声学股份有限公司的王丽董事长、李军总经理等在我整理文稿中,给予了大力协助,南京雷神应用静电研究所的喻利军总经理对编者的支持、帮助以及北京大学出版社的顾卫宇编辑在出版、编辑过程中的兢兢业业、一丝不苟的敬业精神,使编者深受感动,这里一并致以谢意.

编者

2008年9月

Durate, Los Angeles.

目 录

引 言	(1)
第一章 静电的性质	(2)
1.1 电荷 场 场方程	(2)
1.2 静电容量与静电能量	(6)
1.3 常见静电力的表现形式	(9)
1.4 状态变化和静电弛豫	(15)
1.5 静电放电现象	(17)
第二章 带电粒子力学现象的分析	(20)
2.1 静力学现象	(20)
2.2 动力学现象	(24)
第三章 静电带电机构	(30)
3.1 固体带电	(30)
3.2 电荷的移动机理	(68)
3.3 液体带电	(70)
3.4 粉体带电与粉体输送带电	(87)
3.5 人工带电	(90)
第四章 电晕带电和粒子在电场中的运动及控制	(96)
4.1 电晕荷电	(96)
4.2 直流电场中带电粒子的动力学特征	(99)
4.3 交流电场中带电粒子的运动	(105)
4.4 椭球体粒子在电场的运动	(108)
4.5 电除尘	(111)
4.6 控制带电体运动的其他静电处理技术	(122)

第五章 电流体动力学现象	(130)
5.1 作用于液体上的力	(130)
5.2 各种电流体动力学现象	(134)
5.3 电黏性效果	(139)
5.4 电流变液	(141)
5.5 离子传导与电紊流	(147)
5.6 电流体的热输运现象	(150)
第六章 静电场能量转换的应用	(153)
6.1 机械能转换成电能的装置：静电发电机	(153)
6.2 电能转换成机械能的装置：静电马达	(160)
6.3 其他换能器	(165)
第七章 静电测量	(168)
7.1 静电测量	(168)
7.2 静电测量方法及测量原理	(174)
7.3 几种典型的静电电位计	(181)
第八章 静电图像技术	(184)
8.1 全幅电子一次成像法	(184)
8.2 扫描控制点矩阵成像法	(189)
8.3 其他打印显示技术	(192)
第九章 驻极体、压电体与压电驻极体的静电现象	(195)
9.1 驻极体	(195)
9.2 驻极体材料	(202)
9.3 驻极体表面电荷密度和寿命的测量	(210)
9.4 生物驻极体、生物驻极态及相关问题.....	(230)
9.5 压电体	(238)
9.6 压电驻极体	(250)
第十章 生物静电	(254)
10.1 静电场对植物的影响.....	(254)
10.2 静电场对动物的影响.....	(258)

10.3	在高压静电场中的人体安全问题·····	(263)
10.4	负离子的生物效应和医疗作用·····	(264)
10.5	其他静电疗法·····	(273)
10.6	静电场诱导细胞融合·····	(279)
第十一章	静电灾害及防静电对策·····	(280)
11.1	由静电引起的障碍和灾害·····	(280)
11.2	由静电引起的着火、爆炸·····	(283)
11.3	静电灾害的预防·····	(287)
习 题	·····	(293)
习题解答	·····	(307)
参考文献	·····	(331)

引 言

随着科学技术的迅速发展,材料绝缘特性的不断提高,静电现象和静电事故的不断发生,人们开始注意到静电现象.何谓“静电”?静电学与静电工程学有什么区别?如此等等的问题已经提到研究日程上来了.所谓“静电”,其定义方式也众说不一.有人说所谓静电就是相对于观察者不运动电荷的电现象;也有人说:静电就是不动的电;还有人说:所谓静电,就是在过程中忽略磁、热等作用只剩留不运动的电荷,所引申而来的物理现象……这些说法都各有其道理,至今也无一个定说.

应该说,静电学是一门既古老又年青的学科.讲到古老,可以追溯到公元前数百年,古希腊人和古代中国人发现被摩擦了的琥珀能够吸引小而轻的物体.从此开始,人们就注意到静电现象了,但由于其产生的随机性,未能应用于工程实际中,较长时间内停滞不前,而未能得以发展.近几十年来,由于高分子材料的发达,材料绝缘性能提高,静电产生、保持特性较以前都有很大的提高,这就带来静电灾害的频繁发生,从日常生活中的穿脱衣服,到火箭发射中的静电事故致使发射失败等,静电的灾害现象到处都有存在.而利用静电现象造福人类的事例也不断增加,静电又已从单纯的“静电学”发展成为一门有工程应用背景的“静电工学”了.

从原理上说,静电带电的原过程,就是一个中性物体(或两个中性物体相互接触)在分离或分开过程中,电荷重新分布的过程;重新分布后的电荷相对于观察者静止时,就会出现静电的现象.静电是由物体带电后的力学现象、放电现象而被人们所发现和研究的.本书从基础静电现象研究的一些物理学基本知识及与其他学科相关的一些知识开始,一一给予介绍.

第一章 静电的性质

人们认识静电现象是从静电的力学现象和放电现象开始的. 为此, 本章先从基本静电性质开始来进行讨论.

1.1 电荷 场 场方程

带电体的相互作用力的现象证实了电荷有两种. 富兰克林(B. Franklin)首先提出了正电荷和负电荷的命名. 正、负电荷相互作用的规律是: 同号相斥, 异号相吸. 经过大量的研究又确定了最小的电荷量是电子(负)、质子(正)所带的电荷, 即

$$e = |\pm 1.60 \times 10^{-19}| \text{ C},$$

而且, 电荷是量子化的, 它只能是最小电荷量的整数倍.

普通的物体是中性的, 所谓“带电”, 就是由于该物体的电子数不足或过多而表现出来的.

库仑(C. A. Coulomb)对电的引力和斥力进行了定量的测定, 并总结出了它们所遵从的规律. 这就是有名的库仑定律. 其内容是:

距离为 r [m] 的两个点电荷 q_1, q_2 [C] 间相互作用的静电力 F [N] 为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0. \quad (1.1)$$

上式中 \mathbf{r}_0 为单位矢量, 代表了力 \mathbf{F} 的方向. 如果以 q_1 为主, 则 \mathbf{r}_0 从 q_1 向 q_2 , 反过来若以 q_2 为主, 则从 q_2 向 q_1 . 这里, ϵ 是介质的介电常数, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$. ϵ_0 为真空的介电常数,

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}.$$

且有

$$4\pi\epsilon_0 \approx \frac{1}{9} \times 10^{-9} \text{ F/m.}$$

ϵ_r 为介质的相对介电常数,对于气体而言 $\epsilon_r \approx 1$ (原则上都使用国际单位制(SI)).

若有两个以上电荷存在,则(1.1)式对每两个电荷都成立.假定有 $q_1, q_2, q_3, q_4, \dots$, 则我们可用下列的矢量式表示电荷 q_1 受到的其他电荷对它的作用力:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \dots.$$

在法拉第(M. Farady)之前,人们设想带电质点之间的力是直接的、即时的超距作用(这种超距作用也适用于磁力、万有引力).

而法拉第在研究电磁现象的过程中,凭借他高超的实验技巧和丰富的想象力,提出了非常深刻的“力线”和“场”的物理思想.他设想在带电体、磁体、电流的周围都存在着某种连续介质,起着传递电力和磁力的媒介作用,他把它们称为“电场”和“磁场”.这样一来,在电荷的相互作用中,电场居间起着作用.也就是说,超距作用的观点是“电荷 \rightleftharpoons 电荷”相互作用,而“场”的观点是由“电荷 \rightleftharpoons 电场 \rightleftharpoons 电荷”而传递相互作用的.空间中电场的分布是以电场强度来表示的,场中某点的电场强度 E [V/m], 是放置于该点的单位点电荷所受的作用力 \mathbf{F} , 即

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_0. \quad (1.2)$$

法拉第总是用力线来思考问题的.尽管当年法拉第本人对电场是个矢量的概念并不重视,但他用“电力线”来描述电场方法至今仍是一个便利的方法.

用矢量来描绘电场的状貌时,以电力线来作图表示是方便的,电力线是这样定义的:

- (1) 由正电荷出发终止于负电荷.
- (2) 从带电量 q [C] 的电荷发出的电力线数为 q/ϵ [根].
- (3) 电力线在某点的密度表示该点场强的大小.
- (4) 电力线上各点的切线方向即为该点场强的方向.

图 1.1 为正、负电荷构成的电场,用电力线图示出.

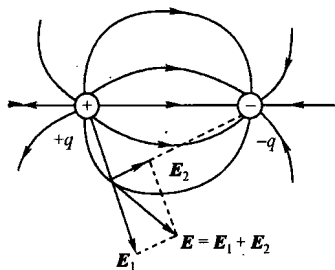


图 1.1 电力线图

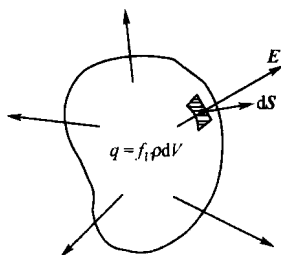


图 1.2 高斯定理

类比于均匀的流体流场,法拉第确定了“通量”的概念,从而在电场中就有了“电通量”的概念.图 1.2 中,标积 $\mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{S}$ 就是面元上的微电通量,对整个表面而言就应是: $\sum \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{S}$;若是连续的面积,则为 $\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$ (封闭面为 $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$).

高斯(Gauss)定理给出了通过假想面的电通量 ϕ_E 与该假想面所包围的净电荷之间的关系,表述如下:

包含在任意闭合曲面中的电荷 q 发出的电力线的根数为 q/ϵ ,参照图 1.2,可用以下数学式来表示:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon} \quad \text{或} \quad \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q, \quad (1.3)$$

这里, $d\mathbf{S}$ 是以封闭曲面法线方向为正方向的微小面积元矢量; \mathbf{D} 为电通量密度,

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad [\text{C}/\text{m}^2]. \quad (1.4)$$

设电荷以体密度 $\rho [\text{C}/\text{m}^3]$ 分布,从而

$$q = \oint_V \rho dV \quad (dV \text{ 为微体积元});$$

(1.3)式左端又可表示为

$$\oint_V (\nabla \cdot \mathbf{E}) dV \quad \text{或} \quad \oint_V (\nabla \cdot \mathbf{D}) dV,$$

因此高斯定理(1.3)式也可写成下列形式:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon \quad \text{或} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho. \quad (1.5)$$

在电场中移动电荷要作功,已是熟知的了.如何定义呢?

在电场内把电量为 e [C]的电荷从无限远处,移到电场中某一点时,移动过程中电场力所作之功与 e 之比的负值,称为该点的电位.即电场内某点 A 的电位为

$$\phi_A = - \int_{\infty}^A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad [\text{V}], \quad (1.6)$$

这里, $d\mathbf{l}$ 是电荷移动路径上的微小线元. 两点电位之差称为电位差或电压,用 V 来表示之. 即

$$V = \phi_B - \phi_A = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad [\text{V}]. \quad (1.7)$$

更深入一步从数学上来定量描述,就要引进泊松方程和拉普拉斯方程了.

(1.6)式写成微分形式为

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi. \quad (1.8)$$

把(1.8)式代入(1.5)式,即有

$$\nabla \cdot \nabla \phi = -\rho/\epsilon, \quad \text{可写作} \quad \nabla^2 \phi = -\rho/\epsilon. \quad (1.9)$$

特别是在无电荷存在处, $\rho=0$, 则有

$$\nabla \cdot \nabla \phi = 0, \quad \text{可写作} \quad \nabla^2 \phi = 0. \quad (1.10)$$

(1.9), (1.10)式分别被称为泊松方程和拉普拉斯方程.

设在线电荷密度为 ρ_L [C/m]的带电无限长导线附近有一带电为 q 的微粒浮游,下面用两种方法来求作用在该小粒上的作用力. 导线和小粒间的垂直距离为 r .

(1) 若用库仑定律,则先定出图 1.3(a)那样的坐标,求出线元 dx 带电量 $\rho_L dx$ 与微粒电荷 q 间的库仑作用力 $d\mathbf{F}$ 的水平分量 dF_1 , 然后积分之,即可求出. 垂直 r 方向的分力 dF_2 因在原点上下是对称的,在 x 方向上相互抵消,所以就不考虑了.

由库仑定律

$$dF = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q\rho_L dx}{(r\sec\theta)^2}. \quad (1.11)$$

这里, x 和 θ 间有如下关系, $x = r \tan\theta$, 即 $dx = r \sec^2\theta d\theta$, 另外,

$$dF_1 = dF \cos\theta,$$



图 1.3 库仑定律与高斯定理关系图

所以可得

$$dF_1 = dF \cos \theta = \frac{q \rho_L}{4\pi \epsilon_0 r} \cos \theta d\theta, \quad (1.12)$$

积分后可得

$$F = \frac{\rho_L q}{2\pi \epsilon_0 r} \quad [\text{N}]. \quad (1.13)$$

(2) 若用高斯定理, 则如图 1.3(b) 以线为中心轴, 作一半径为 r , 长为 L 的圆筒面, 可由高斯定理得

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 2\pi r L E = \frac{\rho_L L}{\epsilon_0}, \quad (1.14)$$

所以

$$E = \frac{\rho_L}{2\pi \epsilon_0 r} \quad [\text{V/m}]. \quad (1.15)$$

由此, 再用(1.2)式可得

$$F = qE = \frac{\rho_L q}{2\pi \epsilon_0 r}. \quad (1.16)$$

作为电荷对外界的作用, 这里还应介绍一下电偶极子的概念, 所谓电偶极子就是相距 l , 电荷大小都等于 q 的一个正电荷和一个负电荷形成的一个系统. 它们一起对外作用. lq 叫做电偶极矩 m .

1.2 静电容量与静电能量

有关静电学的基础, 本书着重强调静电场的研究, 也就是强调场对自然现象理解的重要性, 强调场的特性对场参量的影响; 其次强调

静电场能量的研究,也就是强调能量的储藏和释放的问题及释放的表现;还有一点就是如何利用、如何消除静电的问题。

与这些基础知识相关,本节介绍几个概念。

a. 静电容量

静电容量的讨论,往往都是从电容器开始的,电容器可以用来建立为各种目的所需要的不同分布的电场。

若两导体分别带有 $\pm Q$ 的电荷,导体间的电位差为 V , Q 与 V 之比即为两导体间的静电容量 C [F]:

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (1.17)$$

电容 C 是与 V, Q 无关的物理量,它是由系统的几何特性而确定的。

特别是,当一导体处于无限远处时, V 即为另一导体的电位.此时 C 为孤立导体的静电容量。

b. 静电能量

从功、能的原理出发可知,带电荷 Q 的导体的静电能量 U [J]为把导体的电荷从零增加到 Q 时外界所作之功.可由下式得到:

$$U = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{q^2}{2C} = \frac{CV^2}{2} = \frac{VQ}{2}. \quad (1.18)$$

c. 电场能量

通过分析一个带电容器,我们能证明:静电能量可以认为储藏在两极板的电场中,而且可以说,不论怎样产生的电场,其中都储藏着能量。

在介电常数为 ϵ 的电介质内,单位体积储存的电场能量 u [J/m³]为:

$$u = \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}}{2} = \frac{\epsilon E^2}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon}. \quad (1.19)$$

d. 作用在带电导体上的静电力

有一具有静电能量为 U 的带电导体, 若其静电能随着空间某方向(例如 x 方向)有变化时, 则在该方向上就会受到静电力的作用, 其关系为:

$$\begin{aligned} F_x &= \pm \frac{\partial U}{\partial x} = \pm \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{2C} \right) \\ &= \pm \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{CV^2}{2} \right) = \pm \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{VQ}{2} \right). \end{aligned} \quad (1.20)$$

其符号为: 当 $Q = \text{常数}$ 时, 微分时为负; 当 $V = \text{常数}$ 时, 微分时则为正.

若电极面积为 S 、电极间间距为 l 的平行板电容器的极板上储有 Q 的电荷(忽略边缘效应), 则可求:

- (1) 电极间电场 E 和两板间的电位差 $V(l)$;
- (2) 静电容量;
- (3) 全部的静电能量 $U(l)$ 和单位体积中的静电能量 u ;
- (4) 作用于电极上的静电力 F .

具体计算如下:

- (1) 电极的面电荷密度为 Q/S , 由(1.3)式可得

$$E = Q/\epsilon_0 S. \quad (1.21)$$

电位差由(1.7)式可得:

$$V(l) = El = \frac{Q}{\epsilon_0 S} l. \quad (1.22)$$

- (2) 由(1.17)式可得

$$C(l) = \frac{Q}{V(l)} = \frac{\epsilon_0 S}{l}. \quad (1.23)$$

- (3) 由(1.18)式得

$$U(l) = \frac{VQ}{2} = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 S} l, \quad (1.24)$$

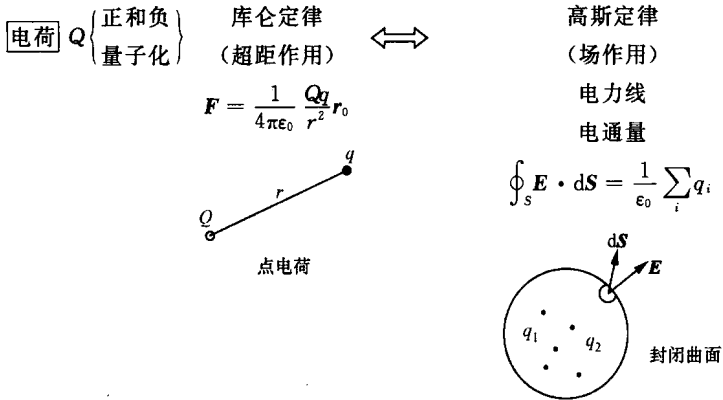
$u(l)$ 为 $U(l)$ 除以体积 lS (或从(1.19)式得出)

$$u = \frac{U(l)}{Sl} = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 S^2}. \quad (1.25)$$

(4) 由(1.20)式, Q 一定时对 l 取微分, 得

$$F = -\frac{\partial U(l)}{\partial l} = -\frac{Q^2}{2\epsilon_0 \epsilon}. \quad (1.26)$$

有关静电场可总结如下:



电场强度 $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$

电通量 $\phi_E = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \left(\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \right)$

电位能 $U(r) = \int_{0(\text{力为零的点})}^r \mathbf{F}(r') \cdot d\mathbf{r}'$

电位 $V(r) = \frac{U(r)}{q}$

电偶极矩 $m = ql$

电容 $C = \frac{Q}{V} \left\{ \begin{array}{l} \text{串联} \quad \frac{1}{C} = \sum_n \frac{1}{C_n} \\ \text{并联} \quad C = \sum_n C_n \end{array} \right.$

电场能量密度 $u = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} = \frac{\epsilon E^2}{2}$

1.3 常见静电力的表现形式

前面我们讲过, 人们认识静电是从静电的力学现象和放电现象开始的, 尤其是静电的力学现象更是人们所常见, 为此, 这里着重介