

静电起电问题

北京工业学院静电科研组 编著

中国物理学会

1980.7

前 言

人类对电磁规律的认识是从研究静电（和静磁）现象开始的。古希腊时代和我国春秋战国时代的历史上都有所记载。直到十八世纪中叶，人类才通过科学实验的方法，发现了静电规律。发现电荷分为正电（玻璃电）和负电（琥珀电）两种；发现了库仑定律（1785年）；证明了雷电也是电现象（Franklin 1748年）；研制了各种静电仪器。到了1786年伽伐尼发现了电流，1800年伏打制造出了电池，从此人们的兴趣便开始转向于研究电流现象。在十九世纪，安培和奥斯特（1820年）发现了电流磁效应，法拉第发现了电磁感应定律（1831年），最后于1865年麦克斯威全面地揭示了宏观电磁现象的基本规律。至今一百多年来，人类研究和应用电磁规律（和其它科学规律）发展了规模空前宏大的现代工业。而静电这个古老的课题却被长期地搁置下来，处于落后和无人过问的状态。静电现象在技术上的应用也是不多的。

但是在二十世纪头三十年，静电这个不速之客闯进了高速发展中的各个工业部门。它在大型工业设施中引起的种种危害告诉人们，工业技术不能随意地越过静电所加给的种种限制，从而迫使人们去研究它，以便避免造成静电危害。

石油工业的发展中，出现了年处理原油量达数百万吨的炼油厂。大的装置里容纳数十至数百吨高绝缘的油品。当油品处于跟空气相接触的状态，能量只有0.2mJ的微弱静电火花，就可能造成燃爆事故。油品在生产、输送和使用中的静电事故，即使说几乎年年都要发生也是毫不夸张的。Klinkenberg根据荷兰壳牌石油公司二十多年的生产实际和对石油起电机理研究证明，许多无端的起火事故，起源于静电，并于1958年，在试验装置上复现了油品本身的静电引起的火灾的现象。他研制的石油抗静电剂为解决石油静电危害问题提供了根本性措施。Klinkenberg的工作是工业防静电危害研究的重大突破。

火炸药等活性介质的生产以及许多可燃粉体的生产中，静电危害问题非常尖锐。起爆药和电火工品的静电起爆事故，在世界各国的文献报导中是屡见不鲜的。至于大量活性介质爆燃的恶性事故被推测是源于静电的例子，也可常常听到。然而用实验来复现大量粉体介质的静电事故是比较困难的。直到1975年Hughes等人才首先成功地复现了二十吨巧克力粉渣储缶的静电起火事故。关于粉体工艺过程的静电测试和起电成害规律，各国都报导过一些工作，但还没有重大突破。

航空工业发展中，自从出现无线电导航以来，航空静电危害问题也尖锐地提出来了。自从三十年代至今，航空静电问题的研究一直是全天候飞行技术研究的一个不可缺少的方面。

防静电危害问题的研究也遍及于纺织、橡胶、造纸、印刷、电子和建筑工业等各个领域，这里不一一枚举。

总之，防静电危害问题的研究是当代工业产生中安全技术研究项目之一。它是基础科学（物理、化学）和各类技术科学的边缘上生长起来的一个古老而又年轻的学科。

因此，各国从第二次世界大战以后，相继成立了静电问题的研究机构。1953年在伦敦

召开了第一次国际静电起电会议。至今国际性静电起电会议已举行过九次，含有静电起电议题的国际学术会议就更多了。

在我国，随着社会主义现代化建设事业的发展，静电安全技术的研究也已开始着手进行，并且在测试技术和防护措施方面都取得了一些成绩。

为了在各行业从事安全技术工作的技术人员中，普及工业防静电危害问题的知识，集思广益，交流经验，以便进一步推动静电研究工作的开展，全国科协中国物理学会科普工作委员会主办了这次工业静电问题讲习班，并委托北京工业学院物理教研室担任教材编写、实验准备和教学等工作。

我们静电教研组在担任基础课教学的同时，从事这项研究工作，历时不长，水平有限，对于办讲习班也没有经验，因此，在工作中一定会有许多缺点和问题。望同志们及时指正，以期共同为办好此次讲习班，作出贡献。

北京工业学院物理教研室

静电教研组

80年4月

目 录

第一篇 静电起电基础

第一章 静电学的基础知识

§ 1-1	库仑定律	1
§ 1-2	电场强度 电力线 高斯定理	3
§ 1-3	应用高斯定理计算电场强度	7
§ 1-4	介质的极化、漏电和击穿	11
§ 1-5	静电场的电位差和电位	18
§ 1-6	计算静电场的电位或电压	21
§ 1-7	静电场中的导体	23
§ 1-8	导体的电容	26
§ 1-9	静电场的能量和导体间的静电力	29
§ 1-10	静电场的基本方程	32

第二章 静电的产生、流散、和积累

§ 2-1	固体材料的接触起电	39
§ 2-2	电荷的流散和积累	52
§ 2-3	流体介质的静电起电	56

第三章 静电测试方法与仪器

§ 3-1	放电时间常数的测量	66
§ 3-2	静电电位的测量	68
§ 3-3	电阻及电阻率的测量	73
§ 3-4	电容、电感、介电常数、电量，电量密度、放电电流的测量	86
§ 3-5	放电火花电量的测量	94

第四章 测量原理的若干问题

§ 4-1	电位探极法原理	97
§ 4-2	放电火花探极原理	105
§ 4-3	电位系数和电容系数 法拉第筒和面电荷测量原理	108
§ 4-4	模拟试验装置的尺寸因子	117

第五章 最小静电点火能

- § 5-1 勃罗西登(Bruceton)法122
- § 5-2 影响发火能的主要因素127

第二篇 工业静电起电问题

第六章 粉体的静电问题

- § 6-1 粉体静电带来的危害159
- § 6-2 空间电荷云的分散运动169
- § 6-3 粉体工业中静电危险的判别173
- § 6-4 单个粉体粒子电荷的测量181
- § 6-5 气流输送固态粉末介质的起电190
- § 6-6 火炸药生产中的静电202
- § 6-7 散状炸药压气输送和装填中的静电221

第七章 石油静电问题

- § 7-1 液体带电的偶电层理论234
- § 7-2 非导电性液体在管路内流动起电的规律243
- § 7-3 沉降电势和液雾起电现象254
- § 7-4 容器内电荷的积累和流散260
- § 7-5 电场强度计算举例267
- § 7-6 电导率和抗静电剂299
- § 7-7 放电和起爆309
- § 7-8 石油静电的一些试验及结果324
- § 7-9 油轮静电问题344
- § 7-10 静电事故例及其防止措施359

第八章 火工品生产的静电问题

- § 8-1 起爆药和火工品的最小静电点火能367
- § 8-2 人体活动的静电起及防静电危害措施392

第九章 航空静电问题

§ 9-1	飞机静电和大气场强的测量原理	408
§ 9-2	云的静电特征和飞机的带电	412
§ 9-3	飞机在云中和降水中飞行时, 流向飞机的电流	418
§ 9-4	飞机起电的机理	426
§ 9-5	飞机的静电危害和防范措施	427

第一篇 静电起电基础

第一章 静电学的基础知识

§ 1—1 库仑定律

在真空中，两个点电荷（电量分别为 q_1 和 q_2 ）间的相互作用力 f 的方向沿着这两个点电荷的连线，同性电荷相斥，异性电荷相吸；作用力大小与 q_1 和 q_2 成正比，与其间距离 r 的平方成反比，即

$$f \propto \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \text{或} \quad f = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

比例常数 K 的大小和单位跟单位制有关。在有理化公斤米秒安培制（MKSA 制）中，质量（公斤）、长度（米）、时间（秒）和电流强度（安培）为基本单位。按 MKSA 制，电量 q 的单位是库仑（即安培·秒）、 r 单位为米、力 f 的单位为牛顿（公斤·米/秒²），这时，比例常数 K 为

$$K = 9 \times 10^9 \text{ (牛顿) (米}^2\text{) / (库仑)}^2$$

$$\text{或} \quad K = 9 \times 10^9 \text{ (米) / (法拉)}$$

常数 K 通常表为

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$$\text{这时,} \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi K} = 8.845 \times 10^{-12} \text{ (法拉) / (米)} \quad (1-1)$$

$$\text{或} \quad \epsilon_0 = 8.845 \times 10^{-12} \text{ (库仑)}^2\text{ / (牛顿) (米)}^2$$

$$\text{或} \quad \epsilon_0 = 8.845 \times 10^{-12} \text{ (库仑) / (伏) (米)}$$

所以，真空条件下的库仑定律为

$$f = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1-2)$$

〔例题〕真空中两带电小球，电量分别为 $q_1 = 5 \times 10^{-9}$ 库仑和 $q_2 = -3 \times 10^{-8}$ 库仑，距离为 10 厘米，求相互作用力 f 。

$$r = 10 \text{ 厘米} = 0.1 \text{ 米;}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ (牛顿) (米)}^2 / \text{(库仑)}^2$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } f &= 9 \times 10^9 \frac{\text{(牛顿)} \cdot \text{(米)}^2}{\text{(库仑)}^2} \cdot \frac{5 \times 10^{-9} \text{(库仑)} \times (-3 \times 10^{-9}) \text{(库仑)}}{(0.1)^2 \text{(米)}^2} \\ &= -1.35 \times 10^{-4} \text{(牛顿) (吸力)} \end{aligned}$$

若两个点电荷 q_1 和 q_2 周围的空间，充满着均匀的介质，则在 q_1 和 q_2 的作用下，介质分子的负电被吸向正的带电体，分子的正电被吸向负的带电体如图 1-1(a)，使分子发生有秩序的排列。这叫做介质的极化。这里，分子上的正、负电荷并没有从分子上跑掉，但是在与带电体相接触的介质表面上，却显出与带电体极性相反的电荷图 1-1(b)。这就减弱了点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力 f 。实验证明

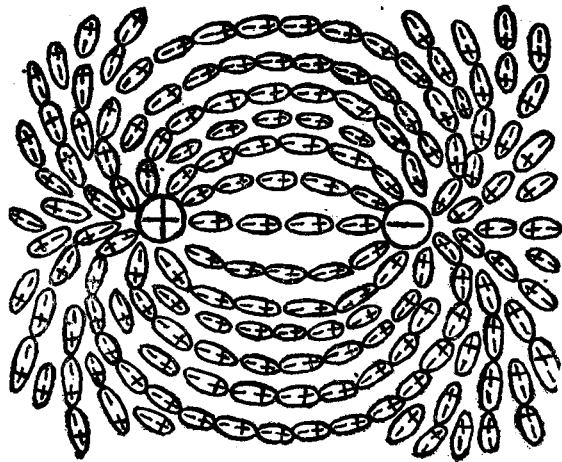
$$f = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 r^2} \quad (1-3)$$

这里介质与带电体接触的表面上所带的极性相反的电荷是束缚在介质表面上的，不能移动，所以叫束缚电荷。与此相反，带电体上的电荷则是可以流动的，叫自由电荷。

公式(1-3)中出现的常数 ϵ_r 与带电体周围介质的性质有关，它叫做该介质的相对介电常数。令 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 叫做介质的介电常数。

几种常见介质的相对介电常数 ϵ_r ，列在下表中：

介质名称	云 母	玻 璃	橡 胶	汽 油	聚 苯 乙 烯
ϵ_r	7	5-16.5	2.5-2.8	2	2.3
介质名称	聚氯乙烯	钛酸钡	冰	水	空气(1大气压 0℃)
ϵ_r	3.1-3.5	1000-4000	3.1	80	1.0006



(a)



(b)

图 1-1 介质分子极化，减弱点电荷之间的作用力

真空的相对介电常数为 1。

当有两个以上的点电荷出现时，其中某一个点电荷所受的静电力等于其它各点电荷对它作用力的矢量和。

〔例题〕 如图 1-2 所示，在真空中有三个点电荷： $q_1 = 12 \times 10^{-9}$ 库仑， $q_2 = -12 \times 10^{-9}$ 库仑， $q_3 = 10^{-9}$ 库仑。它们分别位于等边三角形的顶点上。等边三角形的边长 $r = 10$ 厘米。求点电荷 q_3 所受的力。

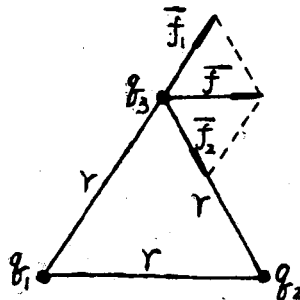


图 1-2

$$q_1 \text{ 对 } q_3 \text{ 的作用力 } f_1 = \frac{q_1 q_3}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ (真空 } \epsilon_r = 1),$$

方向为 $q_1 q_3$ 方向。

$$f_1 = 9 \times 18^9 \frac{12 \times 10^{-9} \times 10^{-9}}{(0.1)^2} = 1.08 \times 10^{-5} \text{ 牛顿}$$

$$q_2 \text{ 对 } q_3 \text{ 的作用力 } f_2 = \frac{q_2 q_3}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ 方向为 } q_3 q_2 \text{ 方向。}$$

$$f_2 = 9 \times 10^9 \frac{(-12 \times 10^{-9}) \times 10^{-9}}{(0.1)^2} = -1.08 \times 10^{-5} \text{ 牛顿}$$

f_1 与 f_2 的合力为 f 。由力的合成的平行四边形法则可求出 $f = 1.08 \times 10^{-5}$ 牛顿，方向为平行于 $q_1 q_2$ 联线的方向。

§ 1-2 电场强度 电力线 高斯定理

当空间存在一个电荷 q 时，任一其它电荷 q_0 （称做试验电荷）被引入 q 周围的空间， q_0 就要受到静电力的作用。这说明在 q 周围存在一个电场。

实验证明，任何带电体周围都存在着电场，试验电荷 q_0 在此电场中所受的静电力 f 与 q_0 成正比。我们称

$$E = \frac{f}{q_0}$$

为电场中 q_0 所在地点的电场强度。它在数值和方向上都等同于单位正电荷在该点所受的静电力。

〔例题〕 真空中有一点电荷 $q = 5 \times 10^{-9}$ 库仑。试计算在距离它为 $r = 20$ 厘米的地方（图 1-3 的 A 点）的电场强度 E 。

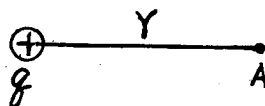


图 1-3

由库仑定律(1-3)式，单位正电荷在 A 点所受的力 E 为

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2}$$

代入数字，对于真空， $\epsilon_r=1$ ，

$$\begin{aligned} E &= 9 \times 10^9 \frac{(\text{牛顿})(\text{米})^2}{(\text{库仑})^2} \cdot \frac{5 \times 10^{-9}(\text{库仑})}{(0.2)^2(\text{米})^2} \\ &= 1.125 \times 10^8 (\text{牛顿})/(\text{库仑}) \\ &= 1.125 \times 10^8 \text{ 伏/米} \\ &= 1.125 \text{ 千伏/米} \end{aligned}$$

如果空间有许多个电荷，则某点 A 的电场强度 E 等于各点电荷分别在 A 点产生的电场强度 E_1 、 E_2 ……的矢量和。 $E = E_1 + E_2 + \dots$

〔例题〕如图 1-4，真空中有两个点电荷， $q_1 = 12 \times 10^{-9}$ 库仑； $q_2 = -12 \times 10^{-9}$ 库仑。求在 A 点的电场强度 E。其中 Aq_1q_2 组成等边三角形，边长 $r = 10\text{cm}$ 。

q_1 在 A 点产生的场强 E_1 为

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} (\text{真空 } \epsilon_r=1) \\ &= 9 \times 10^9 \frac{12 \times 10^{-9}}{(0.1)^2} \\ &= 1.08 \text{ 千伏/米。} \end{aligned}$$

方向沿 q_1A 。

q_2 在 A 点产生的场强 E_2 为

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2} \\ &= -1.08 \text{ kv/m} \end{aligned}$$

方向沿 Aq_2 。

E_1 与 E_2 的矢量和为 E。E 的大小为 1.08 千伏/米，方向与 q_1q_2 连线平行。

若许多电荷存在于无限大的均匀电介质中，由于这些电荷对引入电场中任一点的试验电荷 q_0 的静电力只有真空中的 $\frac{1}{\epsilon_r}$ 倍，所以，这些电荷在该点产生的电场强度 E 也只有真空

条件下的 $\frac{1}{\epsilon_r}$ 倍。

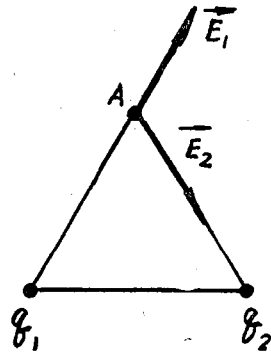


图 1-4

电力线 可以用画力线的方法形象地描绘电场中各处场强的大小和方向。我们规定：在电力线描过的每一点，切线方向都与该点的场强的方向一致（图1-5），在画电力线的疏密方面保持：在任一点，通过垂直于 E 的单位面积的电力线数等于该点 E 的量值。

按这些规定，图1-6 绘出了几种电荷或电荷系统的电场的电力线图。

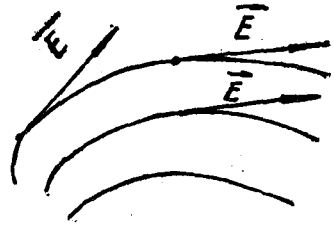


图 1-5 电力线上各点的切向与该点 E 方向一致

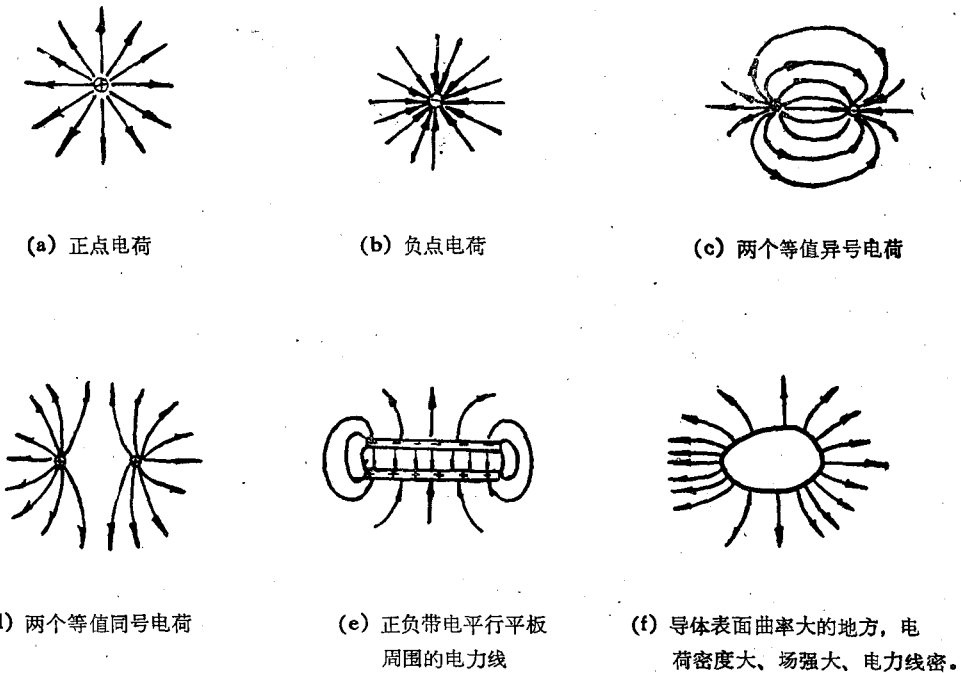


图 1-6 各种电荷或电荷系统的电场的电力线图

电通量 通过电场中任意给定面的电通量就是通过该面的电力线总数。用 Φ 表示。怎样计算电通量 Φ ？首先研究图 1-7 所示的三种情况。

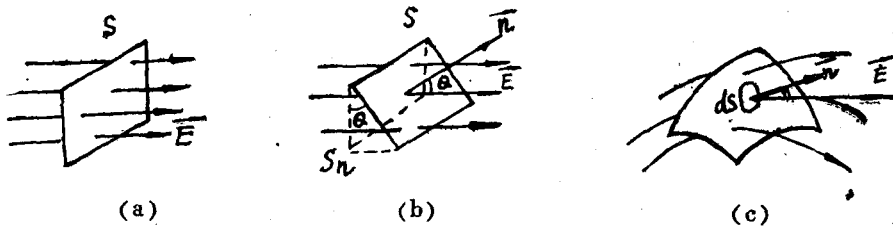


图 1-7 通过面 S 的电通量 Φ

(a) 均强电场, 方向一定, 平面 S 与 \mathbf{E} 垂直。

由于面积 S 上各处场强都等于 E , 也就是说, 通过 (垂直于 \mathbf{E}) 每单位面积的电力线数为 E , 所以,

$$\phi = ES$$

(b) 匀强电场, 方向一定。平面 S 的法线方向 \mathbf{n} 与 \mathbf{E} 夹角为 θ 。

作平面 S 在 \mathbf{E} 垂直方向的投影 S_n 。因为 $\mathbf{E} \perp S_n$, 又 $\mathbf{n} \perp S$, 所以 S_n 与 S 的夹角也是 θ 。故 $S_n = S \cos \theta$ 。通过 S 的电力线数就等于通过 S_n 的电力线数, 而根据(a), S_n 上的电通量为 ES_n , 所以 S 上的电通量 ϕ 为

$$\phi = ES \cos \theta$$

(c) 场强不均匀, S 为任意曲面

这时将 S 分解成无穷多块无限小的面积 ds , 每块 ds 近似为平面。设某一 ds 法向 \mathbf{n} 与其上的场强 \mathbf{E} 夹角为 θ , 则在这块 ds 上的电通量为 $d\phi = E \cos \theta ds$ 。将这无限多块小平面的电通量求代数和 (叫做求面积分, 用 $\int d\phi = \int E \cos \theta ds$ 表示), 即得 S 上的总电量 ϕ , 即

$$\phi = \int E \cos \theta ds$$

若曲面 S 为封闭曲面, 则在其上的面积分用 \oint 符号表示。

高斯定理 在静电场中充满着相对介电常数为 ϵ_r 的均匀介质。通过任一闭合曲面的电通量等于这闭合曲面所包围的自由电荷的代数和, 除以 $\epsilon_r \epsilon_0$, 即

$$\phi = \oint E \cos \theta ds = \frac{q_1 + q_2 + \dots}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1-4)$$

例如点电荷 q 周围的场强

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

如图 1-8, 以 q 为中心, 以 r 为半径, 作一球面 S , 则在 S 上各点场强 E 大小相同, 且在球面各点上, \mathbf{E} 与曲面 S 垂直。即在 S 上, $\theta = 0$ 所以,

$$\begin{aligned} \phi &= \oint E \cos \theta ds \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 \\ &= \frac{q}{\epsilon_r\epsilon_0} \end{aligned}$$

即球面 S 的电通量等于 S 所包围的自由电荷量, 除以 $\epsilon_r \epsilon_0$ 。

可以证明, 如果作任意一个封闭曲面包围着 q , 其电通量 ϕ 也等于 $\frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0}$ 。

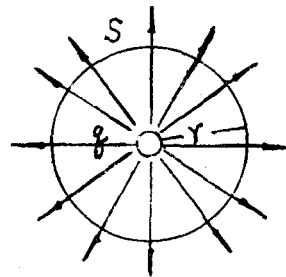


图 1-8

我们通过这个特例验证了高斯定理。

如果封闭曲面内没有电荷，电荷都在曲面外边，则虽然曲面上各处电通量一般不等于零，但有的是从面外穿入面内，电通量是负的，另有一些地方，电通量是正的，代数和为零。

在真空条件下， $\epsilon_r = 1$ ，高斯定理表为

$$\oint E \cos \theta ds = \frac{q_1 + q_2 + \dots}{\epsilon_0} \quad (1-4')$$

现在讨论空间连续分布的自由电荷与其电场强度的关系。设空间自由电荷的体密度为 $\rho(x, y, z)$ ，则任一封闭曲面内的自由电荷电量 q 为 $\int \rho d\tau$ ，即函数 $\rho(x, y, z)$ 对封闭曲面内的体积求积分。而穿过封闭曲面的电通量仍为 $\oint E \cos \theta ds$ ，所以高斯定理表为：

$$\oint E \cos \theta ds = \frac{\int \rho d\tau}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1-5)$$

其中 ϵ_r 为介质的相对介电常数。

但是，根据数学上的高斯定理 $\oint E \cos \theta ds = \int \nabla \cdot \mathbf{E} d\tau$ ， $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$ 。

代入(1-5)得

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1-5')$$

(1-5)和(1-5')是任意空间分布的自由电荷与产生的静电场之间满足的方程，前者为积分形式，后者为微分形式。

§ 1-3 应用高斯定理计算电场强度

可以应用高斯定理计算某几种形状对称的带电体周围的电场强度。

1. 均匀带电球面内、外的场强

如图 1-9 所示。设带电球面 S_0 的半径为 r_0 ，带电总量为 Q 。我们以 $r (> r_0)$ 为半径，与 S_0 同心，作一球面 S ，计算 S 上的电通量。由于 S_0 上电荷分布是均匀的，所以电场强度 \mathbf{E} 和电力线也是中心对称的。因此，在 S 上各点， \mathbf{E} 大小相等，且垂直于 S 面。由此得

$$\phi = \oint E \cos \theta ds = E \cdot 4\pi r^2$$

根据高斯定理(1-4)式求得 E 为

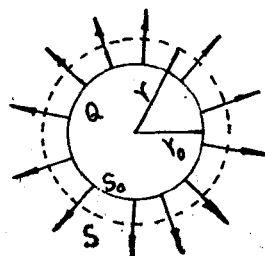


图 1-9

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2} \quad (r > r_0) \quad (1-6)$$

如果带电体周围是真空, 则 $\epsilon_r = 1$,

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1-6')$$

当 $r < r_0$ 时, S 在 S_0 内, 包围的电荷为零, 故按上述道理求得 $E = 0$ 。即在均匀带电球面内的电场强度为零。

2. 均匀带电的介质球体内、外的电场强度

设带电球半径为 r_0 , 电量密度(单位体积的电量)为 ρ (常数), 则球体的总电量

$$Q = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \cdot \rho,$$

与上例相同, 可以求出带电球外一点的电场强度 E 为

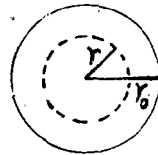
$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2} \quad (r > r_0) \quad (1-7)$$

(1-7)式中, r 为球外任一点到球心的距离, ϵ_r 为球外介质的相对介电常数。

如图 1-10 所示, 在带电球内, 作一半径为 $r (< r_0)$ 的同心球, 则它包围的电量为 $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ 。应用高斯定理得

$$E \cdot 4\pi r^2 = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho}{\epsilon_r' \epsilon_0}$$

$$E = \frac{\rho r}{3\epsilon_r' \epsilon_0} \quad (r < r_0) \quad (1-7')$$



题1-10

式中 ϵ_r' 为球内介质的相对介电常数。

由(1-7)式看出, 在球外, 电场强度在球面上最大, 再由(1-7'), 在球内 $E \propto r$, 所以, 也是在球面上场强最大。

3. 无限大均匀带电平面

设无限大均匀带电平面上的面电荷密度(单位面积所带电量)为 σ (库仑/米²)。由于平面是无限大的, 且是均匀带电的, 所以, 电力线必是两侧对称, 且垂直于平面(图 1-11a)。若 σ 为正, 则电力线垂直于平面向外, 若 $\sigma < 0$, 则电力线指向平面并与之垂直。

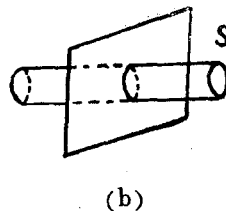
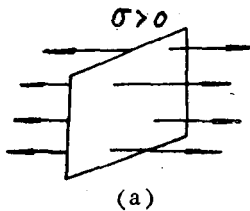


图 1-11

如图 1-11b 所示，作一截面为单位面积的柱面 S ，垂直于无限大平面，且与平面两侧对称，则通过两端面的电通量都等于端面处的场强 E （由于两侧对称，两端面上的场强大小相等），而侧面上的电通量为零。 S 内的自由电荷为 σ ，故

$$\phi = \oint E \cos \theta ds = 2E = \frac{\sigma}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1-8)$$

若平面周围是真空，则 $\epsilon_r = 1$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (1-8')$$

(1-8) 和 (1-8') 表明，无限大均匀带电平面两侧的电场是均匀的。

4. 无限大均匀偶电平板

如图 1-12a 所示。两个无限大平行带电平板，均匀带电，一个面电荷密度为 σ ，另一个为 $-\sigma$ 。正电平面的电力线，从平面垂直向外，负电平面的电力线，垂直指向平面。所以两平行平面产生的合成电场是：在两板之外，互相抵消为零，在两板之间，互相加强而加倍，如图 1-12b 所示。由(1-8)，无限大平行偶电平面之间的电场强度 E 为

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1-9)$$

若两板之间为真空，则 $\epsilon_r = 1$ ，

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (1-9')$$

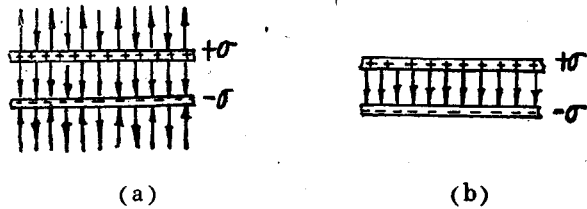


图 1-12

5. 无限大匀厚度、匀带电介质层

无限大匀厚介质层内，均匀带电，体电荷密度为 ρ （库仑/米³），介质层厚度为 d ，

通过介质层正中间，作一平行平面 P ，（图 1-13 为横剖面图），对称于 P 两侧，取一柱面 S' ， S' 端面面积为 1，端面在介质表面外。介质层两侧电力线必然垂直于介质表面，而且，由于对称性，在 S' 两端面上的场强 E 大小相等。另外 S' 内的自由电荷为 $\rho \cdot d \cdot 1 = \rho d$ ，故应用高斯定理，

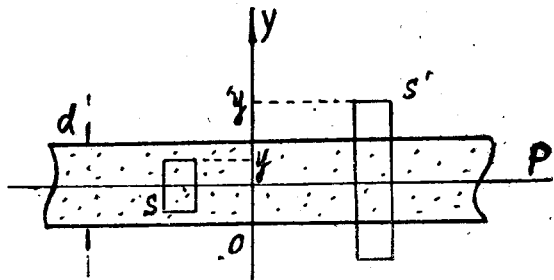


图 1-13

$$\phi = 2E = \frac{\rho d}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$$

$$\therefore E = \frac{\rho d}{2\varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (1-10)$$

ε_r 为带电介质层外面的介质的相对介电常数。若带电介质层外是真空，则 $\varepsilon_r = 1$

$$E = \frac{\rho d}{2\varepsilon_0} \quad (1-10')$$

下面计算介质层内某点的场强。对称于平面 P，取一柱面 S（图 1-13），S 的上下端面都在介质层内，且与 P 对称，面积为 1。设上端面的座标为 y，则下端面的座标为 d-y。由于对称性，在这两面上的场强大小相等，设为 E。S 的高度等于两端面纵座标之差，即 2y-d，所以，S 内的自由电荷量为 $\rho(2y-d) \cdot 1 = \rho(2y-d)$ 。应用高斯定理得

$$\phi = 2E = \frac{\rho(2y-d)}{\varepsilon'_r \varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\rho(2y-d)}{2\varepsilon'_r \varepsilon_0} \quad (1-11)$$

其中 ε'_r 为带电介质层本身的相对介电常数。

由(1-11)可见，当 $y = \frac{d}{2}$ 时，即在平面 P 上， $E = 0$ 。当 $y = d$ 或 $y = 0$ 时，E 分别等于

$$\frac{\rho d}{2\varepsilon'_r \varepsilon_0} \text{ 和 } -\frac{\rho d}{2\varepsilon'_r \varepsilon_0}$$
，数值为最大，而方向相反。

如果上述带电介质层是平放在无限大接地金属板上，则在金属板上感应出符号相反的电荷。如果考虑带电介质层上表面的电位达到极大，则金属板单位面积的电量，等于带电介质单位面积的电量，即 $-\rho d$ 。由(1-8)，该金属板电荷产生场强，在介质层上部空间内，为

$$\frac{-\rho d}{2\varepsilon_r \varepsilon_0}$$
，其中 ε_r 为介质层上部空间内介质的相对介电常数（在真空条件下， $\varepsilon_r = 1$ ），在介

质层内部为 $\frac{-\rho d}{2\varepsilon'_r \varepsilon_0}$ ，其中 ε'_r 为介质层本身的相对介电常数。因此，求得带电介质层内、外

的合电场强度分别为： (1-12)

$$E = 0 \quad (\text{介质层外})$$

$$E = \frac{\rho(y-d)}{\varepsilon'_r \varepsilon_0} \quad (\text{介质层内}) \quad (1-12')$$

在带电介质层与金属板相接触的地方， $y = 0$ ， $E = \frac{-\rho d}{\varepsilon'_r \varepsilon_0}$ 场强为最大。

〔例题〕 固态粒状带电介质， $\rho = 10^{-4}$ 库仑/米³，均匀铺在接地金属平板上，由于介质与金属板的间隙内是空气，所以 $\epsilon'_r = 1$ 。如果要求这个间隙内的电场强度不得超过 20kv/cm，试计算最大铺放厚度 d 。

由(1-12')式，在 $y=0$ 处，场强为最大，其绝对值为 $\frac{\rho d}{\epsilon'_r \epsilon_0}$ ，当它等于 20kv/cm = 2×10^6 伏/米时， d 就是最大厚度。即

$$\frac{\rho d}{\epsilon'_r \epsilon_0} = 2 \times 10^6 \text{ 伏/米}$$

代入 $\epsilon'_r = 1$ ， $\rho = 10^{-4}$ (库仑)/(米)³， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (库仑)/(伏)·(米)，求得 $d = 0.177$ 米 = 17.7 厘米。

6. 无限长均匀带电介质圆柱

设介质圆柱体内均匀带电，电荷体密度为 ρ 如图 1-14 所示，由于带电体是轴对称的，电力线必然垂直于圆柱的轴线 OO' ，且在离 OO' 等距离的地方， E 大小相同。

首先计算带电介质圆柱内一点的场强 E 。计算距离轴线 OO' 为 r ($r < r_0$) 一点的场强。以 r 为半径，以 OO' 为轴，作一圆柱面 S ， S 的高度为 1。通过 S 端面的电通量为零，侧面的电通量为 $2\pi r \cdot 1 \cdot E$ ， S 内的自由电荷量为 $\pi r^2 \cdot 1 \cdot \rho$ 。应用高斯定理得

$$E = \frac{\rho r}{2\epsilon'_r \epsilon_0} \quad (r < r_0) \quad (1-13)$$

其中 ϵ'_r 为带电介质圆柱本身的相对介电常数。

当 $r = r_0$ (介质圆柱的半径) 时，场强值最大。可见在用金属管路输送带电介质时，管路内表面的场强最大。若带电密度 ρ 足够高，管路半径 r_0 又很大，则在管路内表面就会因场强过大而发生静电击穿。

下面假设带电介质圆柱外不是管壁，而是其它介质或真空，我们计算圆柱外一点的场强。以 OO' 为轴，以 r ($r > r_0$) 为半径，作圆柱面 S' (图 1-14)。应用高斯定理，求得介质圆柱外一点的场强 E 为

$$E = \frac{r_0^2 \rho}{2\epsilon_r \epsilon_0 r} \quad (r > r_0) \quad (1-14)$$

其中 ϵ_r 为介质圆柱外面的介质的相对介电常数。若外面是真空，则 $\epsilon_r = 1$ 。由(1-14)式可见，当 $r = r_0$ 时， E 值也为最大。

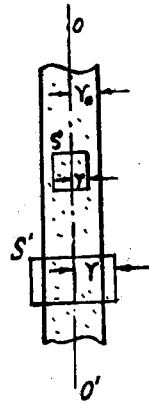


图 14

§ 1-4 介质的极化、漏电和击穿

介质的分子分为两类。一类为极性分子，其正电中心与负电中心分别集中在分子的两