

孙可平 宋广成 主编

工业



热 电

中国石化出版社

工业静电

孙可平 宋广成 主编

中国石化出版社

(京)新登字048号

内 容 提 要

静电作为一种自然现象,既能造福于人类,有时又会引起事故甚至灾难。本书系统论述工业生产中静电对人员生命安全、物资财产和生产技术的重大影响。详细介绍了工业静电基础理论、静电放电和引燃、静电测量等基本知识;对石油、船舶、高压气体和含尘气流、电子、航空航天、纺织和化工等行业的静电现象、起电原因、所造成的危害及预防措施作了深入叙述;同时对与工业生产密切相关的人体静电和大气静电作了细致分析;书中还介绍了静电防尘、涂敷、复印、摄影和分选等应用技术;书后附有与静电领域有关的标准、规定和参考数据。本书内容系统、充实,与工业生产紧密结合,具有很大的实用价值。

本书可供各行业从事安全生产与管理的技术人员和管理人员,从事静电技术研究和应用的技术人员使用。

工 业 静 电

孙可平 宋广成 主编

中国石化出版社出版发行

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码:100029)

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

850×1168毫米大32开本 16¹/₂印张 442千字 印1-3000

1994年8月北京第1版 1994年8月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-501-6/TM·001 定价:16.30元

前 言

一千多年前人们就已发现静电现象，随着岁月的流逝，人们逐渐把它当成一个古老的学科，并未予以特别重视。但是，随着现代工业的发展和科技的进步，静电又逐渐闯入了几乎每一个工业领域，并对人类的生活施加越来越大的影响。它们在人类的生活和生产中发挥着越来越重要的作用，例如：静电复印技术、静电成像技术、静电除尘技术、静电涂敷技术、静电生物效应等。使静电应用技术的开发和利用逐渐成为一门前途无量的应用学科。但是，静电有时也显露出难于驾驭的特性，给人类带来各种灾害、障碍和困难。正因为如此，静电学科已成为国内外非常活跃的学科之一，成了许多专家学者的研究对象。

本书想从静电灾害的防治与静电应用技术的开发两个方面，结合有关工业的实际情况，把国内外静电学科的最新研究成果介绍给读者，从而加深对各种静电现象的理解、控制和应用，使之更好地为人类服务，尽量减少静电危害。

本书第一、三章由中国石油化工总公司洛阳石油化工工程公司于长一高级工程师编写，第二、六、九章由北京市劳动保护科学研究所赵录臻研究员编写，第四、八章及附录由中国石油化工总公司石油化工科学研究院宋广成高级工程师编写，第五、七、十、十一、十二章由上海海运学院孙可平副教授编写。最后由宋广成、孙可平对全书进行统纂，并对部分章节进行了调整、扩充和修改。全书经上海交通大学李静一教授审阅，提出了不少宝贵意见，编者谨致诚挚的谢意。

目 录

第一章 工业静电基础理论	1
第一节 静电现象及其基础理论.....	1
第二节 静电场中的导体和电介质.....	8
第三节 静电场的能量.....	11
第四节 静电的产生、流散和积累.....	13
第二章 静电放电和引燃	18
第一节 静电放电的有关因素.....	18
第二节 静电放电类型和特点.....	25
第三节 静电引燃.....	28
第四节 静电引燃安全界限.....	31
第五节 确认静电引燃的方法和实例.....	33
第三章 静电测量	37
第一节 静电测试的主要参数及特点.....	37
第二节 静电电位的测量.....	39
第三节 静电电量的测量.....	46
第四节 材料带电性能参数的测量.....	53
第五节 液体静电的测量.....	57
第四章 石油工业静电	65
第一节 石油静电现象及其规律.....	65
第二节 石油静电性能的评定.....	75
第三节 石油贮运和使用中的静电.....	98
第四节 石油静电安全标准值.....	127
第五节 石油静电危害及防护措施.....	148
第五章 船舶工业静电	176

第一节	船舶静电起电机理	176
第二节	舱内静电场的计算	185
第三节	静电点燃的估价	190
第四节	船舶静电事故	195
第五节	船舶静电综合防治对策	197
第六章	高压气体和含尘气流静电	205
第一节	高压气体静电	205
第二节	气流输送系统的静电问题	213
第三节	粉尘静电问题简介	218
第七章	电子工业静电	222
第一节	集成电路生产中的静电危害及消除	222
第二节	静电噪声	232
第三节	电子计算机的静电危害及防治	239
第四节	家用电器的静电	247
第八章	航空航天工业静电	255
第一节	飞机起电机理	256
第二节	飞机的起电电流	259
第三节	飞机燃油系统的静电	262
第四节	飞机静电失火爆炸原因分析	276
第五节	飞机静电的危害及预防	288
第六节	航天工业中的静电问题	295
第九章	人体静电	304
第一节	人体的充电与放电	304
第二节	人体静电的测量	308
第三节	人体静电危害	313
第四节	人体静电防治措施	316
第十章	其他行业的特殊静电问题	322
第一节	纺织工业中的静电	322
第二节	塑料、橡胶工业中的静电	331

第三节	印刷、造纸工业中的静电	337
第四节	黑色火药工业中的静电	339
第十一章	大气静电、雷电与防雷技术	345
第一节	大气中的静电场及其电极效应	345
第二节	大气的传导和传导电流	347
第三节	雷暴起电机理	349
第四节	雷电的预防	353
第十二章	静电应用技术	375
第一节	静电除尘技术	375
第二节	静电涂敷技术	394
第三节	静电复印与电摄影技术	413
第四节	静电分选技术	429
第五节	其他应用	438
附录		
附录一	轻质油品安全静止电导率(GB6950—86)	454
附录二	轻质油品装油安全油面电位值(GB6951—86)	454
附录三	轻质石油产品电导率测定法(GB6539—86)	458
附录四	防静电胶底鞋、导电胶底鞋安全技术条件 (GB4385—84)	461
附录五	防静电胶底鞋、导电胶底鞋电阻值测量方法 (GB4386—84)	463
附录六	中国石油化工总公司《石油化工企业易燃、可燃液体静电安全规定》(试行)	466
附录七	典型静电序列	477
附录八	工频条件下的人体电阻	479
附录九	输送管直径与推荐流速	479
附录十	一些材料的半衰时间	480
附录十一	一些材料的电气性能参数	480
附录十二	一些材料的相对介电常数和电阻率	484

附录十三	各种物质的特性参数.....	491
附录十四	粉体的引燃危险性.....	512
附录十五	各种物质与空气的混合物的最小着火能量.....	515
附录十六	某些气体和蒸气的爆炸压力及其增长速度.....	518
附录十七	气体、液体蒸气与氧混合时的引燃危险性.....	519
主要参考文献	520

第一章 工业静电基础理论

第一节 静电现象及其基础理论

一、静电现象及物质带电

大约在二千六百年前，希腊人塔利斯就发现了琥珀被毛皮摩擦后具有能够吸引羽毛、头发等轻小物体的能力。后来发现，摩擦后能吸引轻小物体的现象并不是琥珀所特有的，象玻璃棒、火漆棒、硬橡胶棒、硫磺块或水晶块等，用毛皮或丝绸摩擦后，也都能吸引轻小物体。这种物理现象是静电基本现象之一。物体有了这种吸引轻小物体的性质，就说它带了电或说带有了电荷。对带电的物体叫做带电体。把这个使物体带电的过程叫起电。上述的用摩擦方法使物体带电称做摩擦起电。使物体带电的方式可以说是多种多样的，而就摩擦起电来说也不局限于固体之间。细致地观察摩擦过程，实质上是使两个物体发生接触位置的移动和电荷的分离。一些液体例如汽油在金属管道中的流动也会发生带电现象。液体的流动可以看成它与金属管壁的接触、分离又接触的接触位置的移动。当液体类物质与固体类物质接触时，在其接触的界面上形成一个整体为中性的偶电层。当液体流动时，广义说就是这两相物质作相对运动时，偶电层被分离，电中性受到破坏而出现了带电现象。对固体与液体之间的这种摩擦起电，在工业静电中称做冲流起电或流动起电。其它起电方式还可举出很多，在以后各章中将结合不同工业过程分别加以叙述。

二、物质的电结构与其导电、带电机理

起电现象，归根结底是与物质的分子结构有关。

物质是由分子、原子组成的，而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成。原子核中有质子和中子，中子不带电，质子带正电。一个电子所带的负电量与一个质子所带的正电量相等。正是物质内部固有地存在着的电子和质子这两类基本电荷才是物质带电过程的内在依据。由于在正常情况下，物体中任何一部分所包含的电子的总数和质子的总数是相等的，所以对外界不表现出电性。但是，如果在一定的外因作用下（例如摩擦），物体或物体中的某一部分得到或失去一定数量的电子，使得电子总数与质子总数不再相等，物体便显示了电性。以两个固体为例，通过摩擦，一个物体中有一些电子脱离原子核的束缚而跑到另一物体上去，由于物体材料不同，一个物体失去了电子而显正电，另一个物体得到了电子而显负电。从而表明，物体带电的基础在于电子的转移。

根据物体得失电子的难易程度，可将物体分为导体和绝缘体。例如金属就是良好的导体。金属原子的最外层电子容易脱离原子核的束缚，而可以在整个体内自由运动，称为自由电子。电解液也是导体。在其中发生电荷传导的不是电子，而是溶解在溶液中的酸、碱、盐等溶质分子分解成的正、负离子。这种正负离子称为自由电荷。电离的气体也是导体，起传导作用的自由电荷也是正、负离子，但负离子往往是电子。对于几乎不能传导电荷的物体称为绝缘体，电荷几乎只能停留在产生的地方。例如玻璃、橡胶、琥珀、瓷器、油类、未电离的气体等。在绝缘体中，绝大部分电荷都只能在一个原子或分子的范围内作微小的位移，这种电荷称做束缚电荷。

这里要着重说明的是绝缘液体或气体，也包括粉尘，它们在各种不同条件的作用下带电以后，虽然电荷在其内部不能移动，但液体、气体本身可以流动、扩散，粉尘也可以在管道内输送或在空间扩散。因此电荷也可以随之转移到其它地方，有时也可能带到危险场所，如带电荷的汽油被输送到油罐车，那么电荷也就

带进油罐，成为一个可能造成灾害的危险源。这是工业静电中研究的重要课题之一。因为绝缘体带电后难于泄漏，即使与大地用导体连接，电荷也不会象导体那样瞬间转移到大地。这也是静电防灾问题中需要研究的问题之一。

三、静电场及其主要物理量

(一) 静电荷及其电场

相对于观察者为静止的电荷即是静电荷。这种静电荷在其周围空间形成激发的、不随时间变化的电场称为静电场。静电场是电磁场的一种特殊情况。场是物质的一种形态。凡是有电荷的地方都在其周围空间激发电场。电场的基本性质是，对于处在其中的任何其它电荷都有作用力——电场力。电荷之间是通过各自的场相互作用的。静电场的对外表现主要有两点：

①引入电场的任何带电体，都受到电场的作用力。

②当带电体在电场中移动时，电场作用力对带电体做功，这表明电场具有能量。

(二) 电场强度及高斯定理

为了定量描述静电场的性质，可以引入一个电量足够小、几何尺寸足够小的点电荷，它本身的电场对原来电场不至发生明显的影响。试验表明，这个点电荷 q_0 所受的力 F 与 q_0 成正比，即：

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

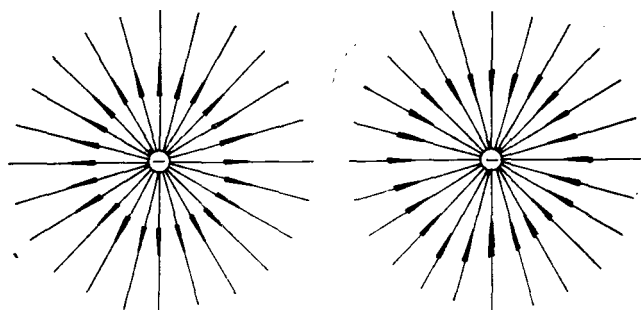
我们就把二者的比值 E 定义为该电场在 q_0 位置处的电场强度，简称场强。把 q_0 放入电场不同地点时， q_0 所受力的大小和方向逐点不同。因此可以用场强描述电场的性质。

场强是矢量，它的方向定义为当试验电荷为正电荷时所受力的方向。

由若干个电荷所产生的电场、在某一点的总场强，等于各个点电荷在这点各自产生的场强的矢量和。这就是场强迭加原理。利用该原理，可以计算任意带电体所产生的场强，因为任何

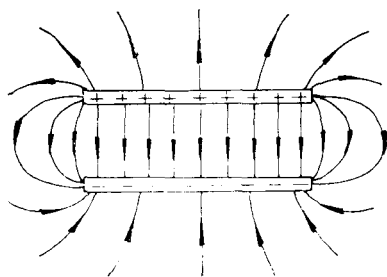
带电体都可以看做许多点电荷的集合。

通常可以利用假定的电力线形象地描绘电场中各点电场强的大小和方向，并规定电力线切线方向与该点的场强方向一致，以电力线的疏密程度表示场强的大小，即规定在任一点通过垂直于 E 的单位面积的电力线数目等于该点 E 的量值。图1-1给出了几种常见的电场电力线图。



(a) 正电荷

(b) 负电荷



(c) 正负带电板

图 1-1 几种常见电场的电力线图

电场中通过某一给定面积的电力线总数称电通量，用 ϕ 表示。

根据上述对电力线画法的规定可以找出场强与电通量的关

系。

①均匀电场且平面 S 与场强垂直时:

由于平面 S 上各处场强均等于 E , 所以,

$$\phi = E \cdot S$$

②均匀电场但平面 S 的法线 与 E 有夹角 θ 时:

按规定作出与 E 相垂直的投影平面 S_n , 即 $S_n = S \cos \theta$ 。则

$$\phi = S_n E = E S \cos \theta$$

③不均匀电场且 S 为任意曲面时:

将 S 分解成无穷多个无限小的面积 ds , 它可看做为平面, 且其法线 n 与其上的场强 E 夹角为 θ , 则

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

那么通过曲面 S 的电通量 ϕ 为

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

若 S 为封闭曲面则表示为:

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

这里需要指出, 电通量 ϕ 可正可负。若 θ 是锐角, 则 ϕ 为正; 若 ϕ 为钝角, 则 ϕ 为负。

下面讨论通过任一封闭曲面的电通量与这封闭曲面内所包围电荷量的关系。经过推导和验证得出: 在真空中的静电场中, 通过任一封闭曲面的电通量等于该封闭曲面所包围的电荷的代数和的 E_0 (真空介电常数) 分之一。这个结论称为真空中静电场的高斯定理。用公式表示即为:

$$\phi = \oint_S E \cos \theta ds = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0} \quad (1-1)$$

通过高斯定理可对静电场有进一步的了解。当 q 为正电荷时, $\phi > 0$, 表示有电力线从 q 发出, 穿出封闭曲面。所以正电荷 q 称为静电场的源头。当 q 为负电荷时, $\phi < 0$, 表示电力线穿进封闭曲

面而终止于 q 。所以负电荷 q 称为场的尾闾。这说明静电场是有源场。

如果用带电体的体电荷密度 ρ 来表示电量 q ，则高斯定理可表示为：

$$\oint_s E \cos\theta ds = \frac{\int_v \rho dv}{E_0} \quad (1-2)$$

它的微分形式是：

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{E_0} \quad (1-3)$$

应用高斯定理可以方便地计算几何形状对称的带电体周围或内部的电场强度。

(三) 电位及静电场基本方程

在静电场中，电荷在静电力推动下移动，电场就对电荷做功。这与重力场中重力对重物做功相类似。为描述静电场这方面的性质，可以类比重力场引入静电位能及电位的概念。位能是一个相对量。为了说明电荷在电场中某一点位能的大小，必须有一个零位的参考点，通常在电荷分布于有限区域内时，规定电荷 q_0 在无限远处的静电位能为零，即令 $W_\infty = 0$ ，从而可以明确电荷 q_0 在电场中某一点 A 处的静电位能，在量值上等于 q_0 从 A 点移至无限远处电场力所做的功 $A_{a\infty}$ 。依据功与力的关系， $A_{a\infty}$ 可表示为：

$$W_a = A_{a\infty} = q_0 \int_a^\infty \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-4)$$

从此可知，若电荷 q_0 从 A 点移动到 B 点，电场力所做的功 A_{ab} 为：

$$A_{ab} = W_a - W_b = q_0 \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-5)$$

(1-5) 式表明，电荷在任何静电场中移动时，电场力所做的功，只与电荷 q_0 的大小以及路径的起点和终点位置有关，而与路径无关。若电荷经闭合路径又回到原位置，则电场力做功为零。

上述静电位能 W_a 不能直接描述电场中某一点 A 处的性质，因

为 W_a 与 q_0 有关。因此，引入 W_a/q_0 的比值来表征静电场中给定点 A 的电场性质，显然它只决定于电场的性质和给定点 A 的位置。
令：

$$V_a = \frac{W_a}{q_0} = \int_a^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-6)$$

称 V_a 为 A 点的电位（又称电势）。当 q_0 为单位正电荷时， $V_a = W_a$ 。即电场中某点的电位在量值上等于单位正电荷放在该处时的电位能，也就是它从该点经过任一路径到达无限远处电场力所做的功。

从以上定义很容易写出 A 点 V_A 与 B 点 V_B 的电位差 $V_A - V_B$ 的公式：

$$V_A - V_B = \int_A^B E \cos\theta dl \quad (1-7)$$

如果 A 、 B 两点很近，其距离为 Δl ，并认为电位 A 到 B 的增量为 ΔV ； $V_A - V_B = -\Delta V$ ；同时用 E_l 表示 E 在 Δl 方向上的分量 $E \cos\theta$ ，则

$$-\Delta V = E_l \Delta l$$

当 $\Delta l \rightarrow 0$ 时，写成偏导数的形成，

$$-\frac{\partial V}{\partial l} = E_l$$

或
$$E_l = -\frac{\partial V}{\partial l} \quad (1-8)$$

如果 l 分别表示直角坐标系中的 x 、 y 、 z 三个轴的方向，就可以得到场强 E 沿着三个方向的分量分别为：

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (1-9)$$

场强 E 可写成

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}$$

$$= -\left(\frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k}\right)$$

方程右端可用算符表示为

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} \quad (1-10)$$

则
$$E = -\nabla V \quad (1-11)$$

由(1-3)式已知 $\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ ，代入(1-11)式得：

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1-12)$$

如果电场是在电介质中，则式中再引入电介质的相对介电常数 ϵ_r ，

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (1-13)$$

这就是所谓泊淞方程。

当研究的空间不存在自由电荷时即 $\rho=0$ ，上述方程变为：

$$\nabla^2 V = 0$$

这即为拉普拉斯方程。

上述两方程是求解静电场的基本方程。

第二节 静电场中的导体和电介质

一、静电场中的导体

(一) 静电平衡时带电导体的特征

导体内充满着可以自由运动的电子，在外电场的作用下，可在导体内流动。当达到静电平衡时，导体内的自由电子就停止了宏观流动。此时表现出如下特征：

① 导体内部任何一点的电场强度等于零。否则自由电荷在电

场作用下继续宏观流动。

②导体表面上任何一点的电场强度必须垂直于该点表面。否则场强分解出一个平行导体表面的分量而使自由电荷流动不止。

③导体内部和表面各点电位相等。若存在电位差，则电场力推动电荷做功，即场强不为零，则自由电荷不能静止。

④导体内部电荷为零，电荷只分布在外表面上。因导体内部场强为零，则内部已不存在任何净电荷。

⑤导体外表面的电荷分布为：曲率大的地方表面电荷密度大，场强也强；反之曲率小的地方密度小，场强也弱。

(二) 静电感应和感应起电

将一个对地绝缘的中性导体，例如金属导体，置入电场中。在电场作用下，该金属导体的自由电子受到电场力的作用会逆着外电场方向而运动，移向导体的一端，显负电，而另一端则显正电。这种现象叫静电感应。

利用静电感应的方法使物体带电叫做感应起电。如上例将导体正端与大地相连，正电荷就与大地负电荷中和。导体上只剩下负电荷。然后切断对地联线，再撤去外电场，导体便成为一个带负电的孤立导体。

(三) 静电屏蔽

前述静电平衡条件下的特征也适用于空腔导体，其电荷分布于外表面，腔内场强为零，导体内各点电位相等。如果用导线将导体接地，则整个导体包括空腔内部都成为地电位。这样，若在导体外面出现电场，在空腔内也不会产生静电作用了。这就是静电屏蔽。

二、静电场中的电介质

(一) 电介质及其极化

电介质是电阻率很大、导电能力很差的物质。电介质的特点在于它的分子中正负电荷束缚得很紧，在一般条件下不能相分离，因而电介质内部能做宏观运动的电荷极少，导电能力也就极