

第 1 章 静电学基础

1.1 概 述

高科技的发展历程中，电子技术和高分子化学技术是两个重要的方面。

电子产品设计的小型化和高集成化，相应的加工技术日趋微、细、精、薄，使得对静电危害不可忽视。随着电子技术和产品向国民经济各部门的广泛渗透，静电的影响面越加普遍。

正是由于高分子化学技术的发展，促成了高分子材料在工业、国防和人民生活各个方面的广泛应用。普通高分子材料的特点之一就是它具有很高的电阻率，使其特别易于产生静电。

静电造成的故障与危害，通称静电障害。从传统的观点来看，它是火工、化工、石油、粉碎加工等行业引起火灾、爆炸等事故的主要诱发因素之一，也是亚麻、化纤等纺织行业加工过程中的质量及安全事故隐患之一，还是造成人体电击危害的重要原因之一。因此，静电防护是各行业最为关注的安全问题之一。

随着高科技的发展，静电障害所造成的后果已突破了安全问题的界限。静电放电造成的频谱干扰危害，是在电子、通信、航空、航天以及一切应用现代电子设备、仪器的场合导致设备运转故障、信号丢失、误码的直接原因之一。例如，电子计算机和程控交换机是两种有代表性的现代电子设备，如安装、使用环境不当，它们的工作都会受到静电的困扰。此外，静电造成敏感电子元件的潜在失效，是降低电子产品工作可靠性的重要因素。据日本 80 年代中期的一项统计资料，在失效的半导体器件中，有 45% 是因静电危害造成的。

降低静电障害的最有效手段是实施防护。因为，静电作为一种自然现象，不让它产生几乎是不可能的，但把它的存在控制在危险水平以下，使其造成的障害尽可能小，则是可能的。有效地进行静电防护与控制，依赖于对静电现象的认识和对其发生、存在、清除的控制，依赖于掌握和了解静电与环境条件的关联性和静电发生的规律。

以上观点是从静电危害的防护角度而言的。对静电的应用研究本身就是一项重要的高科技门类，但鉴于不属于本书讨论的范围，在此不再赘述。

1.2 静电现象与静电学

1.2.1 静电

根据分子和原子结构的理论，自然界中的一切物质都是由分子构成的，而分子又是由原子组成的。单质的分子由一个或几个相同的原子组成，化合物的分子由两个或两个以上不同的原子组成。高分子材料具有更复杂的原子结构点阵排列，并含有更多种类及数量的原子。原子是构成一切化学元素的最小粒子，它由带正电的原子核和带负电的围绕原子核旋转的电子组成，

电子的个数及排列层次因元素而异。

在自然状态下，原子中的这种正、负电荷是相等的，物质处于电平衡的中性状态，即不带电。在静电学中称不带电的物体为电的中性体。

在某种条件下，当物质原子中的这种电平衡状态被打破，丢失或获得电子，物质即由中性状态改变为带电状态。处于带电状态的物体在静电学术语中称为带电体。物质在获得电子而形成带电体时称为电子带电，所带电荷称为负电荷；因失去电子而形成带电体时，称为空穴带电，所带的电荷称为正电荷。

物质呈现带电的现象，称为带电现象。物质的带电现象是一种自然现象。按照物质所带电荷的存在与变化状态可分为动电（流电）现象和静电现象。静电现象指相对于观察者而言，所带的电荷处于静止或缓慢变化的相对稳定状态，动电现象则与此相反。

显然，在静电情况下，由于电荷静止不动或其运动非常缓慢，故它所引起的磁场效应较之电场效应来说可以忽略不计。

静电可因多种原因而发生，例如物体间的摩擦、电场感应、介质极化、带电微粒附着等许多物理过程都有可能产生静电。

1.2.2 静电现象

静电现象广泛存在于自然界、工业生产和人们的日常生活中。

1) 自然界中的大气静电现象

人类生活的地球本身，就是个极大的导体，它存储了大约 $9.02 \times 10^5 \text{ C}$ 的负电荷量。在距离地面 $60 \sim 350 \text{ km}$ 的电离层区建立了方向垂直于地面的电场。空气中的电场离地面越远强度越低。在海平面，晴天时的场强达到 120 V/m ；在 3 km 高处场强为 25 V/m ；在 80 km 高处，已处在空气导电的电离层区域内，其场强为 $4 \times 10^{-8} \text{ V/m}$ 对地电位 $200 \sim 213 \text{ kV}$ 。大气闪电是最具代表性的自然界静电现象之一。此外，自然界中的电解、气流、风沙、冰雪、烟尘等都呈现静电现象。因此，可以毫不夸张地说人类生活在静电的海洋之中。

2) 工业中的静电现象

工业生产中，由于物体间的机械分离、与带电的物体接触或孤立导体上的静电感应作用，存在着大量的静电现象。

a. 在纺织工业中使用的自由端静电纺纱，具有工艺流程短、产量高、噪音低、用电省、飞花少、织物耐磨性强等优点，它利用静电场将单纤维伸直、排列和凝聚，用自由端加捻成纱。由于电晕放电、摩擦、接触、极化、电离等方式，使纱纤维带有静电位。例如棉花电位为 -50 V ，人造丝电位为 -100 V ，维尼纶电位为 900 V ，尼龙电位为 1.05 kV 。

b. 在橡胶工业中，合成橡胶从苯槽中出来时，表面电荷密度达 $7 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$ ，静电位可达 250 kV 。橡胶压延机压出时，产品静电位高达 -80 kV 。涂胶机的静电位为 -30 kV 。

c. 在印刷和造纸工业中，纸离开辊筒时静电位可达 $10 \sim 20 \text{ kV}$ ，经过加光机达 50 kV 。印刷时，纸张静电位可达 1.0 kV 。在照像凹板印刷的场合，纸张带电密度为 $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{ C/m}^2$ 。

d. 在石油工业中，汽油在金属管道中流动时带负电荷，而管道带正电荷。汽油流经棉制品材料时电位为 2.6 kV 。槽车装油时，油面电位高达 10 kV 以上。在石油精炼过程中，油品经反复加压、加热、喷射、冷却和压送等工序，将使油料带有大量电荷。油罐车在马路上行驶时轮胎摩擦起电，油料本身由于摇晃也起电，油品经过地阀门、泵、过滤器和其他截面改变之处也剧烈起

电，特别在过滤时起电电位很高。

e. 在汽车运输工业中，轮胎的电阻率为 $10^8 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ，在一般车速下可充电 $15 \sim 50 \text{kV}$ ，甚至达 100kV 。传递皮带上带电 $30 \sim 40 \text{kV}$ 最高达 80kV 。

f. 在塑料工业中，塑料制品表面电阻率为 $10^{16} \sim 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ ，表面经摩擦其电位可达 1kV 以上。赛璐璐相互摩擦时带电电位高达 40kV 。

g. 在粉碎工业中，大多数粉体，例如煤粉、面粉、塑料粉等，其体电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 在运输及加工中都会起电。这些粉体材料在碎裂时以及与器壁、墙壁、粉体粒子相互碰撞、摩擦时也会带电。例如，面粉流出槽管时可带静电位 $1 \sim 3 \text{kV}$ 。

h. 在电子工业中，由于产品的小型化，对静电愈加敏感。器件加工中，摩擦起电、人体带电、感应起电都是静电产生的重要方式。例如，操作者的人体与大地绝缘时，静电位可高达 $1.5 \sim 35 \text{kV}$ 。如此高的静电位一旦放电，足以使静电敏感电子元器件、组件和设备毁坏、受损、硬击穿或软击穿，形成永久性或暂时性失效，或突然失效或潜在失效，还可能因静电放电产生宽带杂波干扰信号，导致电子设备误动作或其他故障。

3) 日常生活中的静电现象

“静电”这一名词对人们来说并不陌生。近些年来，由于现代高分子化学工业的发展，合成纤维制品大量应用于人们的服装面料，它使服装穿起来挺括而漂亮。但是，化纤织品的静电问题也常常令人“头痛”。在朋友见面之际，双方握手的瞬间常由于两人所带静电位的不同而出现电击，令人尴尬；在气候干燥的冬季，脱衣时常常听到服装间、服装与人体间放电的响声，并伴以在暗处可见的火花，有时还会发生电击感觉；当把衣服挂在与地面直接接触的金属衣架上时，一不小心受到电击；当穿着化纤面料衣裤在尘土较多的街上或在不防静电的地毯上行走时，衣裤往往会吸附一层尘埃，并且抖而不掉。又如，当欣赏电视节目时，也会因荧光屏上吸附的一层蒙蒙灰尘而影响观看效果。

4) 对静电效应的有效利用

本书的目的是研究静电防护问题。因此，上面列举的大量静电现象是从其危害的角度来描述的，以引起人们的重视并设法防护。其实，静电也有它的可爱和可用之处。例如，利用静电原理制成的静电复印机，是现代化的重要办公设备之一，它的出现不但减少了人们的誊抄之劳，而且可以原样拷贝，这在许多场合（例如作为证件）是有其特殊作用的。当然，对于静电的利用还包括许多方面，如前边已谈过的静电纺织，以及静电喷涂、静电吸尘、静电制版、静电分选和静电生物技术的开发利用等，都为人们的生产和生活带来了许多方便。

1.2.3 静电的能量特征

静电也是一种能，这种能是以静电荷聚积的方式被存储起来的，它可以通过其所形成的电场直接做功（例如吸引或排斥带电物体），也可以通过放电等方式转化为其他形式的能量（例如光、声、热等形式），如在 1.2.2 节中介绍的，静电能既可以用来为人类造福，也可能构成对工业生产和人们生活及人身安全的危害。

本书将在以后各章中介绍利用静电的能量特征，如何把静电能存储于电容器中，使之作为静电源，而建立起模拟静电现象的若干模型，以完成对静电特性的研究和有关静电特征量的测定。

1. 2. 4 3/4μϵΝΣΟ3/4μϵ·À »μΝΒ4μÄ½δ1

ΝΒ4μϵμÄ½δ »μϵ·óÄ4°ΑΕΞΨΕΪΟμΑΟΘΔΪΟΪό μÄΝΣϵΑΕΑΨ 3/4μϵΝΣϵ Öμ±ÖΒ-¼ÈüÀ·ηΟΟΪ4μϵ
ΪΟΪό μÄ·ϵ ÈüΨ Ϊü 3ý ÖÖ4°3/4μϵÄΪμÄxª »¹æÄÉμÄΝΒ4μϵ-Ö²üÀ·ηÖ3/4μϵμÄΨΪ ÄΪÀÜÖÄΪ ηÖ3/4μϵϵϵ 0 μÄ
ÖΘΔΪ »μÄΝΒ4μϵ

3/4μϵΝΣϵóÓΔ»Ä±ΒΟμΝΣϵΑΕ-ÈÜΨϵΝΣμÄ»üΪ ÈΪΝΪÈϵ-²ϵ ¼Ϊ³ΔΨ ½Δ4ΔÉμϵΝΣϵ μϵ×ÖΝΣϵ ΪΪ ÄΪ
ΝΣϵ »¹ΝΣϵ 2ÄÄΪΝΨΪ 1ÜÄΪ¹μ³Ϊ ΝΣμΕηàÖΘΪΣϵΑΕÄÄΪÄÜΘ·ϵ Ö¹ΑΕΔΪ μÄϵ ÖòÈÈ-ÈΪÈóΝΣϵΑΕμÄΔΪηÄ,Ä
ÄΪϵ¹«ÈΪΪ4μϵΝΣΟΞΕΞ»ÈÈÄϵ

3/4μϵΝΣΟ²ÈÇ»ÄΔΔΕΝΣϵΑΕ-ΪΒ ÄÜÈÇΔΟΪ4μϵÄΪμÄÄÜÖÄ¹ÈÇΔΟΪ4μϵϵϵ 0 μÄ »μÄΝΒ4μϵ Ϊ¹
³Ϊ Èμ¼ϵ-η¼! ÖÜªΨΪ·ϵ Ö¹½ηΪ ΪÈ ΔΟΪ4μϵ·À »μÄΝΒ4μϵ-½ü 20 ÄóΔÄÈ²Ϊó μÄ½δ1ϵ

1) ΔΟΪ² È«Ä »μ

Ϊ² È«Ä »μÄ½δΪÈò·ϵ È-1978 Äè 10 ÖÆ-ÈÇ³μ Öμ² È«ΝΒ4μϵ·ϵ ±Ϊ ÄÈη 3/4μϵ² È«Ö,ÄΪΪ· Ö»
ÈÈ-ÄÈÉμÄΔΔΝΪΘΞμϵΪ° ÖÓΪ4μϵÖÜ³ΔΘμ³ΨΪ ΑΕΔΪΔΘΝΔ³ÈΪª ÖγΑÈ-ÖΪϵ »òΘΪ ÷ ÖΞΪΪ¹ÈÖΪ
μÄÖ-Öϵ-ÈÜÖÄ 3/4μϵ·è ÈÜΪΪΪΔΪ³ΪÈΪª °² È«ÈΪΪ μÄΝΒ4μϵ ΪΪà ÖΘ»ϵ μ«ÈÇ-Öμ¼ΪÖÜϵ-²» ÄÜÈÇ
1ü ÄÜ¹ÈÇΪΪà È-ÖΒΔ·Ä 3/4μϵ·è ÈμÄΪÈ ÖüÈÄΪη¼ÜÈÜ¼ϵ-ÖÆ¹·Ä 3/4μϵ¹μ x·È±ÈÜ-ΔΪ¼Δó³ÈΨΪ
·Ä·η ΪÈÇϵ Ϊ- Ϊ- ±³η Ö,ÄΪΪ· ÈÇÖÇ³ΝΒ4μϵΪΪü ÈμÄΝΒ4μϵÈ¹ü 0 1ü ÄÜª μÄΝΒ4μϵÈ¹üª »üΪ ηΘ±àÖΕ
μÄ±ϵϵη 3/4μϵ² È«Ö,ÄΪΪ· μÄ·ϵ ±Ϊ È-¼ÈÇΪÖ 1978 ÄèÖÇ°μÄ3/4μϵ² È«Ä »μΝΒ4μϵ x·μÄ±È½ΪΪμ Ϊ³ μÄxÜ
½Δ-Ö²±ÈÖ³ÄÖΪΘΒ4μϵ x·Ö³½ΔÈÄÄΪÄÜ-μÄ½δ1ϵ 1982 ÄÈ-ÄÈÉμÄÖΘΔΪóÄÄΪ η ÈÈÈÄΪ ÄΪη
³ò°æϵ³ò°æϵ¹ ÖÉªÄÖ-ΝΣμ Öμ «È³È¼ΑΕΪ ÄΪη ÈÈÈÄΪ ÄΪη ±ϵ»μ¼Ö ÖÈÇϵ 1990 ÄÈ-¹ü ¼Èèx¼
GB 12158-90«Ä Ö³3/4μϵÈÄÈΪ ÖÄΪΪÖç· ϵ 2¼È-ÈμÄ±Ϊ ÄÜΔΟΪ4μϵ² È«Ä »μÄΝΒ4μϵΔÈμ¼ΔΪÖΪÈΪ
μÄ»ý¼μÄ½δ1ϵ

2) ΔΟΪΪ Α-Ä »μ

60 Äèü ÖÇò È-ÖÓΪÈ μ¼ª ¼ΔÈμÄ» ηΪ·ϵ Ö¹È-¼³ÈμÇÄ·μÄ³òΪÖΪ 1ª·° ÖΪÓÆ-ΪΔ±òÈÇMOS 1μ
ÖΘΔ²³ÈΪª Öμ¼ΔΪ¼ΔÈÈ-ÈΪΪϵ μÇÄ·¼³ÈÈÈÖΔΪ ÖΪÄÜ-¹μ x·ΑΕÄÈÖΔΪ ÖΪ³È-¼ΪΪ° ³ΒΪç ÖΪΔΪ ÖΪΔΪÈ-
μΪÖΪÖ3/4μϵμÄΪΪ ÖΪΔΪ ÖΪΔΪΔΪϵ μ±È»ϵ-³ý ÄÈèμ¼ª ΑΕ¼ΔΘΔ È-ΑΕΞΨΑΔΪΪ° ³ΒΪç ±Ϊ Ϊϵ ΔΪΪϵ 3/4μϵΪ, ½á
11 ΪΔÖμÄμϵ×Ö³ΑΕ¼ϵ-ηÖ3/4μϵμÄΪΪ Ö²ÜÄòΔΪϵ 3/4μϵηÇμϵ×Öü ΑΕμÄΪΪϵ 1μ x·²ü ÈΪϵ 0! È-²ϵ ÖγΑΕò
ÈÈΑμÄΪΪ×ϵÈ-ÈΪÈÈÇÓ¼ÈÄÄΪÖç²È¼Äϵ 70 Äèü È-ÄÄΪ¹ü ·Ä²ϵ xèÖx· ¼ηÇμϵ×Öü ΑΕμÄ3/4μϵ·À »μ
ΪÈΪà ÖΪªΝΒ4μϵ x·³ª ΝΒ4μϵÈ¹ü È-ÖΪ 1980 Äè 5 ÖÄ-È±ϵ 2¼ÄÈ MIL-STD-1686 ημϵ ΑΕμϵ×ÖÄª¼ΔÈ
¼ΪΪ Èè, È²» üÄΪμϵÖϵ-×Ö ÖÆμÄ3/4μϵ·Ä μϵΔΪΔΪΪ, ΪΪ° MIL-HDBK-263 ημϵ ΑΕμϵμϵ×ÖÄ¼ΔÈ xè
¼ΪΪ Èè, È²» üÄΪμϵÖϵ-×Ö ÖÆμÄ3/4μϵ·Ä μϵΔΪΔΪΪ· ÄΪΪ ±èx¼È-°ΝηÇμϵ×Öü ΑΕμÄ3/4μϵ·À »μΔΪΔΪ
è ÈÇΔ²Çóèx¼»Ϊ° 1æη »¹η ΪÈ³ª Ϊ· μÄÇ°ΝΪΘΞμϵΪ° È³ΑÓÜMOS ΑΕ¼μÄ³ΑΕÄÈÜμΪ È-ÈÜΘΪ
ηÄ¹μ ÖμΔ ÄÄÖΝΞημ¼3/4μϵÈÈÈΪÇÈμÄΪΪ ΪÈΪ¹ 1ý ÈΪÓÄϵ ÈÖΝΪÈ ΪΣΔΪÖΪò È-ΑΕΞΪòΔΘ³¼ηÖ3/4μϵ
·ÄμϵμÄΔΪΔΪÖΪ²ÄÈÀ Ö²±μÄÈÖÄΪΪΪΪΪ Ϊ- Ϊ- ΪÖÖΪΔΪ·η Ϊ- È-ηÖΪª ÖÈÈΪΪ Ϊϵ²ª ÈÇΔ 2Üx·²Ϊ Ϊ- »μÈÈ±
²ü ÈμÄ3/4μϵμϵΝΪμϵΑΕΞΔμÄ ÷ ÖÇϵΑΕΪ μϵ×Ö³¼ϵ-°üÄΪϵ μϵ×ÖΪ °èμ¼ª ΑΕ¼Δϵ ±Ϊ òñ ÄμϵxèϵΔ³¼
ΑΕϵ »Ϊ° μÇÄ· Ϊ¹μϵ³¼³ª ΪÈ Ϊ±ÈΪ-È±Ö,³òÈ° 2ÈÖÄΪ³È±³μÄ3/4μϵ·Ä μϵΔΪΔΪΔΪ²· ÄÜϵ»μϵΑΕΪ μϵ×Ö
μÄ3/4μϵ·Ä μϵÄΪΔΪΔΪΔΪΔΪ xè¼ΪΪ Èè, Ϊ±ϵ 1984 ÄÈ-¹ü ¼ΔΪΪΪΪ Öμáϵ 2¼ÄÈ IEC 801-2(1984)«1μ
ÖμΪ³ 2ª ÄΪΪ ΔΪΔΪÈè, μÄμϵ·Ä ¼ΔÈΔΪΪη¼3/4μϵ·Ä μϵΔΪΔΪΔΪ· ΪÈ ÈΪÈèò,ÈΪΪ ±èx¼μÄ³òΪ È-±èò³ΑΪΪΪΪ
3/4μϵηÇμϵ×Öü ΑΕΪΪϵ 1μ x·ÖΪÈΪ°Ϊ μÄΝΒ4μϵ ηÖΪΪΪΪ ÈÇΪ·Ä »μÓÈΑÄμÄΝΒ4μϵ¼ΔÈè, ¼ÈÈ
ÈΪ μÄ½δ1ϵ 1992 ÄÈ-ÖΪÈΔΪÈΪ ÖΪIEC 801-2(1984 ΕμÄΪ- ÄΪΪ ¼Èèx¼ΔΪΪΪΪ 13320·2·32 ϵ 2¼È»

1993年,以 MIL-STD-1686A(1988)为参照文本的国家军用标准 GJB 1649-93《电子产品防静电放电控制大纲》发布。这些都说明国内对电子产品的静电防护已进入工程实践的阶段。

1.3 与静电学研究相关的物理量

静电学是对其他许多相关学科的继承和发展,因此,表示静电物理性质的许多物理量也是在电学等学科基础上形成、发展和概念化的。

1.3.1 电荷与电量

电荷是指带电的质点。电荷及其相互间的作用是一切电磁现象产生和存在的基础。由于电荷的存在而在其周围产生电场,从而对另外的电荷产生吸引或排斥作用并做功。由于电荷的运动而形成电流,并在其周围产生磁场。电荷的数量称为电量,电量的多少在国际单位(SI)制中以“库仑(单位符号以C表示)”来度量。在自然界中,只存在两种电荷,即正电荷和负电荷。电子带负电荷,质子带正电荷,它们所带的电荷是电量的最小单元。单电子或质子所带电量以 e 来表示 $e=1.6021892 \times 10^{-19}C$ 。电荷与电荷之间存在相互作用力,同性电荷之间为相斥力,异性电荷之间为相吸力。利用电荷间的这种吸引或排斥作用,可以实施对电荷的有效控制。

静电现象的形成在于物体上静电荷的积聚。静电荷(不论是正电荷还是负电荷)积聚的越多,表明物体所带电量越大。因此,电量是用以表征物体所带电荷数量的一个物理参数。在电量单位库仑和静电制电量单位之间存在下列关系式:

$$1C = 3 \times 10^9 [\text{静电制电量单位}] \quad (1.1)$$

工程上,以库仑作为电量单位太大,为使用方便,往往以毫库(mC)、微库(μC)、微微库(pC)作为常用的电量单位。

1) 电荷密度

物质按允许带电粒子在其内通过的能力可以定性地分为导体、半导体和绝缘体。导体是指本身具有大量自由电荷,从而能够在电场作用下定向移动带电粒子(电子或正、负离子),因而能很好地传导电流的物体,它可以固态、液态或气态存在。绝缘体是其内部没有可以自由移动的带电粒子,因而极不容易使带电粒子从其中通过的物体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,其电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$,并可能有电子或空穴两类载流子参与导电。物质的导电能力属性,归根结底在于其本身带有的电荷密度。因此,电荷密度是衡量物体电性能的最重要参数之一。

a. 面电荷密度

面电荷密度定义为一个表面之内所包含的电荷与此表面的面积之比,当此表面的尺寸趋于零时的极限值。面电荷密度是反映物体表面带电情况的参数,通常用希腊字母 σ 表示,其公式为:

$$\sigma = \frac{Q}{S} \quad (1.2)$$

式中: σ —面电荷密度 C/m^2

Q —静电电荷量,C

S —带电物体的表面积, m^2

工程上，面电荷密度的单位 C/m^2 太大，与处理电量单位的做法相同，常用 $\mu C/m^2$ 表示。

b. 体电荷密度

体电荷密度定义为一个体积元内所包含的电荷与此体积元之比，当此体积的尺寸趋于零时的极限值。体电荷密度是反映物体体积内带电情况的参数。通常用希腊字母 ρ 表示，其公式为：

$$\rho = \frac{Q}{V} \quad (1.3)$$

式中： ρ —体电荷密度 C/m^3

Q —静电电荷量， C

V —带电物体的体积 m^3

工程上，电荷密度的单位 C/m^3 太大，常用 $\mu C/m^3$ 表示。

c. 线电荷密度

对于直径远小于长度的线状带电体，线电荷密度是反映其带电情况的参数，它表明线状物体单位长度上的带电量，其公式为：

$$\tau = \frac{Q}{l} \quad (1.4)$$

式中： τ —线电荷密度 C/m

Q —静电电荷量 C

l —带电体的长度 m

工程上， τ 的单位常以 $\mu C/m$ 表示。

d. 质量电荷密度

质量电荷密度是指物质的单位质量所带的电荷量，也叫荷质比。质量电荷密度常用以表示某些形态的物质（例如粉体）的带电程度。质量电荷密度以 Q/m 表示，此处的 m 为质量，质量电荷密度的单位为 C/kg 。

2) 库仑定律及库仑力

库仑定律是表示两个静止点电荷间相互作用力的定律。所谓点电荷，指带电体的尺寸比带电体之间的距离小得多，且可看做是集中于无体积的一点（即物理无穷小）上的电荷。处于无限大均匀电介质中的两个点电荷，若其电荷量分别为 q_1 和 q_2 ，它们之间的相互作用力（即库仑力，同性电荷之间为斥力，异性电荷之间为吸力）的大小与 $q_1、q_2$ 的乘积成正比，与两者之间的距离 r 的平方成反比，与它们所在介质的介电常数成反比。作用力的方向平行于两点电荷的中心连线。

以上是库仑定律的文字表述。库仑定律的公式表述形式为：

$$\vec{F} = K \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon_r r^2} \vec{r}^0 \quad (1.5)$$

式中： \vec{F} —两点电荷之间的静电作用力， N

ϵ_r —介质的相对介电常数

K —比例常数，其值为 $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9, m/F$

ϵ_0 —真空介电常数， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}, F/m$

\vec{r}^0 —两点电荷连线的单位向量

库仑力适用于叠加原理，即当在无限大均匀介质中，存在两个以上的点电荷时，其中一个点电荷所受到的作用力等于其他各点电荷对该点电荷作用力的向量和，用公式表达为：

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \dots + \vec{F}_{1n} \quad (1.6)$$

式中： \vec{F}_1 —各点电荷对 q_1 的库仑力的总和，N

\vec{F}_{12} —点电荷 q_2 对 q_1 的库仑力，N

\vec{F}_{1n} —点电荷 q_n 对 q_1 的库仑力，N

1.3.2 电位与电压

1) 电位

电位亦称电势。电场中某一点 a 的电位在数值上等于单位正电荷从该点经过任意路径移到无限远（或零电位点）处时，电场力所做的功，以公式表达为：

$$U = \int_0^{\infty} E \cos\theta dl \quad (1.7)$$

式中 U —电场中某点的电位，V

E —电场强度，V/m

$\cos\theta$ —电场强度方向与电荷移动方向之间夹角的余弦值

dl —电荷移动的距离单元，m

在电场中，一个带电体带有的正电荷量为 Q ，它的位能为 W_P ，则其电位为：

$$U = \frac{W_P}{Q} \quad (1.8)$$

上式说明，电场中某点的电位在数值上等于单位正电荷在该点所具有的位能。

2) 电压

电压亦称电位差。它是电场内 a、b 两点之间电位的差，在数值上等于单位正电荷由 a 点移到 b 点时，电场力所做的功，以符号 U 表示，单位为伏特（V）。根据定义，其表达式为：

$$U = U_a - U_b = \int_a^b E \cos\theta dl \quad (1.9)$$

式中 U_a —a 点的电位，V

U_b —b 点的电位，V

1 伏特定义为沿与电场相反的方向移动 1 库仑的电荷所做的功正好是 1 焦耳时，两点之间的电位差数。

3) 零电位

零电位是计算电位的参考点，该点的电位规定为零。在理论上，当产生电场的电荷聚集在有限空间时，常取无穷远处的电位为零电位。实用上，常取地面的电位为零电位。

4) 电位叠加原理

在电荷系产生的电场中某一点的电位，是各个电荷单独存在时所形成的电场在该点电位的代数和。假定各电荷在场中单独存在时，电场中某点的电位为 U_1, U_2, \dots, U_n ，则该电荷系在该点的总电位 U 为：

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{j=1}^n U_j \quad (1.10)$$

以点电荷系电位表示为：

$$U = \sum_{j=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_j}{r_j} \quad (1.11)$$

式中： r_j —电荷 q_j 到场中所求点的矢径，m

n —点电荷数

q_j —第 j 个点电荷的电量，C

1.3.3 电场与电场强度

1) 电场

在每一个电荷的周围空间都存在电场。电场是物质存在的一种形式，这种物质具有特殊的性质。当在电场中放进一个带电体时，该带电体便受到产生电场的电荷对它的作用力，即 1.3.1 节中谈到的库仑力。电荷库仑力能影响到的区域称为电场。电荷与电荷间的相互作用都是通过电场进行的。

相对于观察者而言，在空域上静止且其电量不随时间改变的静止电荷在其周围空间所激发的电场为静电场。显然，静电场中每点的电场强度（或电位）不随时间而改变。

2) 电场强度

电场强度是用来定量地描述电荷周围空间中各点电场强弱的物理量。电场中任一点的电场强度，其数值等于单位电荷在该点所受的作用力，其方向为单位正电荷在该点所受作用力的方向。用公式表达为：

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.12)$$

式中： \vec{E} —电场强度 V/m

\vec{F} —库仑力 N

q_0 —单位正电荷所带电荷量，C

在无限均匀的电介质中，由一个点电荷 q 所产生的电场，在距离该点电荷 r 处的电场强度为：

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \cdot \vec{r}^0 \quad (1.13)$$

式中： \vec{E} —电场强度 V/m

q —产生电场的点电荷所带电量，C

ϵ —介质的介电常数，F/m

\vec{r}^0 —点电荷 q 至该点的径向单位向量

3) 电场强度叠加原理

如果 $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$ 表示点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 单独存在时在空间某一点的电场强度， \vec{E} 表示它们同时存在时该点的总电场强度，则有公式：

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{r_j^2} \cdot \vec{r}_j^0 \end{aligned} \quad (1.14)$$

式中： n —点电荷数

q_j —第 j 个点电荷的电量，C

r_j —第 j 个点电荷至给定点的距离, m

ϵ —介质的介电常数, F/m

\vec{r}_j^0 —第 j 个点电荷指向给定点的单位向量

如果空间中某给定点的电场强度是连续分布的一些电荷产生的, 则上式中的叠加应以积分取代。假定 dq 为连续分布的电荷的任一电荷元, 则给定点的电场强度可通过下式求得:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \frac{dq \vec{r}^0}{r^2} \quad (1.15)$$

由于电荷分布有体分布、面分布和线分布 3 种形式, 因此公式 (1.15) 中的 dq 可分别表示为 ρdv 、 σds 和 τdl 故公式 (1.15) 可分别写为:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_v \frac{\rho dv \vec{r}^0}{r^2} \\ \vec{E} &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_s \frac{\sigma ds \vec{r}^0}{r^2} \\ \vec{E} &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_l \frac{\tau dl \vec{r}^0}{r^2} \end{aligned} \quad (1.16)$$

式中 dv 、 ds 、 dl 分别为体积元 m^3 、面积元 m^2 和线段元 m

ρ 、 σ 、 τ 分别为体电荷密度, C/m^3 ; 面电荷密度 C/m^2 和线电荷密度, C/m

4 电场力线

电场力线是用来描绘电场分布规律的、起自正电荷而止于负电荷的有向线族。电场强度的方向和大小可分别由电场力线族在各点的切线方向和疏密程度来表示。电场力线可以通过电场模拟试验描绘出来。

电场力线具有下列性质:

- 不闭合
- 不中断
- 电场力线之间不会相交

几种典型的电场力线示于图 1.1

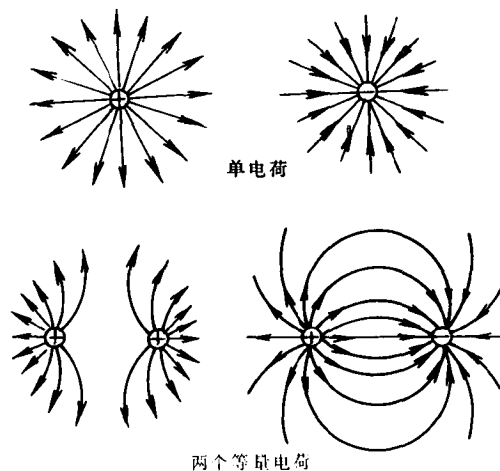


图 1.1 单电荷和两个等量电荷的电场力线示意图

1.3.4 电容

电容是导体储藏电荷的能力的一种表征。若使空间中某一个被绝缘的导体带上电荷，该导体就具有电位（此时认为其他导体在无限远处，并认为它们的电位为零），如果该导体和其周围的情况不变，则该导体的电荷和其电位之间存在某种固定的关系。因此，若给出该导体的电位，其电荷量便可求出，反之亦然。电荷与电位的关系用电容来表示，导体的静电电容即为电荷与电位之间的比值。若在空间中的任意两个相互绝缘的导体上加有一定的电位差，导体上将呈现出存储电荷的性质，所存储的电荷量与所加的电位差的比即为两个导体之间的电容。

上述内容的表达式为：

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

式中： C —导体（间）的电容，F

Q —电荷量，C

U —电位（差），V

电容的实用单位是法拉（单位符号为F），1法拉定义为1库仑的电荷引起1伏特的电位变化时导体间的电容。工程上，法拉的值太大，常以 μF 或 pF 表示。

利用导体的这种存储电荷的性质设计的无源元件称为电容器。电容器的主体结构是具有两个相互接近而又绝缘的导体电极，在导体电极之间的绝缘介质可以是真空、空气、云母、油、陶瓷、塑料薄膜等无机或有机物质，这些物质既可以是固态、气态的，也可以是液态的。

显然，按照对法拉值的定义，可以知道，当电容器的两个电极之间所加电压为1伏特，而每个极板上的电荷量为1库仑时，该电容器的容量就是1法拉，即1法拉=1库仑/1伏特。

电容器可以并联和串联使用。并联时，总的电容量为各个电容器的容量之和，即

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (1.18)$$

串联时，总的电容量的倒数为各个电容器的容量的倒数之和，即

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1.19)$$

利用电容器的这种容量越并越大而越串越小的特性，在工程上可以达到增大容量或提高耐压（串联时耐压相应增大）的目的。

其他类型的电子元器件，由于结构或构件排列等原因，可能在互不相连的任意两个金属构件之间引起附加电容，例如极间电容、层间电容、匝间电容等，通称为寄生电容。在电子组件和设备中，导线、线路等各单独段落所具有的电容通称分布电容。寄生电容、分布电容有时候（例如在高频情况下）会对电子电路的工作产生严重影响。

电容器在电子线路中具有阻止直流电而允许交流电通过的特性，故在电子线路中常作为隔断直流或旁路交流之用。

电容器存储电荷的性能来源于其极板的充电。当一只电容器的两端加上一个直流电压，便会在其中的一个极板上充正电荷（与电压正极相连的极板），另一个极板上充负电荷。这个被充电的电容器相当于一个直流电源，一旦将其与外电路接通，便会将所充电荷通过外电路泄放，即发生电荷复合。

了解电容的概念和电容器的构造特点及性能，在静电防护领域中具有很大的实用价值。工

程上，由于各种原因，一旦存在与地绝缘的金属导体（孤立导体），因为它与地之间的静电电容相对说来数值甚小，故当该孤立导体因静电感应、机械摩擦等原因形成带电体时，哪怕只有少量的静电荷积聚，也会依照公式 $U = \frac{Q}{C}$ （参见公式 1.17）所阐明的规律，出现很高的静电压，通常可达数千伏。根据国外资料给出的测试数据，人体电容一般在 50~250pF 之间，80% 以上的人的电容在 100pF 左右，故当操作者在接地不良的情况下表现为一个孤立导体而成为带电体（这在操作时很容易发生）时，会显现出高达数千伏的静电位。这些将在本书后面的章节中详述。

1.3.5 电阻 电导 和电阻率 电导率)

电阻是物体阻碍电流通过的能力的一种表征。物体的电阻愈大，则在一定电压作用下，通过物体的电流愈小。

电导是电阻的反义词，它表示物体通电流的能力。物体的电导愈大，则在一定电压作用下，通过物体的电流愈大。

物体的导电性能常以物理量电阻率（或电导率，它们之间互为倒数关系）来表示。电导率定义为物体的传导电流密度与电场强度的比值。电导率的符号为 σ 单位为西[门子]每米(S/m)。在静电学科领域内，依照物体电阻率的大小将它们划分为静电导体材料、静电耗散材料和绝缘材料，也称作静电导体、静电亚导体和静电非导体。至目前为止，在定性划分上不存在异义，然而在定量划分上有不同的取值范围，本书将在后面的章节中介绍。

电阻的实用单位是欧姆（单位符号为 Ω ）。1 欧姆定义为若导体两端的电压为 1 伏特，通过的电流为 1 安培，则该导体的电阻为 1 欧姆，即 1 欧姆 = 1 伏特 / 1 安培。

电导的实用单位是西门子（也可简称为西，单位符号为 S），它表示导体两端以 1 伏特的电势差可建立 1 安培的恒定电流时具有的电导值。显然， $1S = 1\Omega^{-1}$ 。

电阻率也叫电阻系数，物质的电阻率在数值上等于用该种物质做的长 1 米、截面积为 1 平方毫米的导线，在温度为 20 时的电阻值。电阻率的符号为 ρ 其单位为欧姆·米($\Omega \cdot m$)或欧姆·厘米($\Omega \cdot cm$)，工程上也常换算为欧姆·平方毫米/米($\Omega \cdot mm^2/m$)来表示。电阻率这个物理量在静电学科中具有特别重要的作用，它是划分材料静电特性的重要依据，故常作为评价材料静电性能的主要指标来测量。

对于薄膜材料，有时还使用方电阻的概念。所谓方电阻，是指当薄膜的长度等于宽度时材料的电阻值，以欧姆/□表示。方电阻的大小与材料的电阻率成正比，与材料的厚度成反比。

物质特别是导电金属物质，其电阻性能受到温度的影响。一般情况下，温度增高时电阻率将增大，当温度不是极高（接近于熔点）或极低（接近于绝对零度）时，电阻随温度的变化有下列线性关系：

$$r_2 = r_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1.20)$$

或者写为：

$$\alpha = \frac{r_2 - r_1}{r_1(t_2 - t_1)} \quad (1.21)$$

式中： α —电阻的温度系数， $1/^\circ C$

r_1 —温度为 t_1 时导体的电阻 Ω

r_2 —温度为 t_2 时导体的电阻 Ω

工程上利用电阻温度系数这一概念来表征导体电阻受温度影响的程度，其数值等于温度每升高 1℃时电阻的增量与原来电阻的比值。

除温度的影响之外，导体内的合金元素和杂质会导致金属晶格发生畸变，也会使导体的电阻增大。杂质同基本金属的价电子差、原子半径差越大，电阻的增加越多。此外，导体若发生塑性变形，它也会因晶格发生畸变而使电阻增加。

常用材料的电阻率及电阻温度系数如表 1.1 所示。

表 1.1 常用材料的电阻及电阻温度系数

名 称	电阻率 ρ (18~20℃) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数 α	
		确定 α 时的温度 ℃	电阻温度系数 1/℃
铝	0.0290	18~100	0.0038
硬铝	0.0335		
安装电线的铝铁芯	0.0310	20	0.0041
铝圆线、扁线、母线	0.0295	20	0.0041
工业用铝(含 A199.5%)	0.027~0.030		
铜	0.0170	18	0.0043
安装电线的铜芯线	0.0184	20	0.00395
铜圆线、扁线、母线(硬)	0.0179~0.0182	20	0.00395
(软)	0.01754	20	0.00395
工业用铜(硬棒)	0.0179	20	0.00433
(软棒)	0.01748	20	0.00433
黄铜	0.08	15	0.0010
青铜	0.18	20	0.0005
康铜	0.49	25	0.000002
白铜	0.42		
铁	0.10	45	0.0062
钢	0.15	0~100	0.00625
镍	0.07	0~100	0.0062
钨	0.053	0~170	0.0051
金	0.023	0~100	0.0034~0.0025
锡	0.113	20	0.0042
汞	0.958	0~25	0.0009
铅	0.208	18	0.0042
银	0.016	0~100	0.0036
碳	13.75	0	0.0006~0.0012
铬	0.131	0	0.0025
锌	0.061	20	0.0037
铜镍合金	0.49		

(续表)

名 称	电阻率 ρ (18~20℃) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数 α	
		确定 α 时的温度 ℃	电阻温度系数 1/℃
锰镍铜合金	0.43	18	0.000001
高镍钢	0.45	0	0.003
石墨	8.0		
石棉	10^{12}		
电木	10^{15}		
云母(片)	10^{19}		
瓷	2×10^{19}		
火漆	5×10^{19}		
虫胶	10^{20}		
聚苯乙烯	10^{21}		
硬橡胶	10^{22}		

对于大多数液体材料，其导电性能多以电导率表示。部分物质的电导率示于表 1.2

表 1.2 部分物质的电导率

名 称	电 导 率 S/m	名 称	电 导 率 S/m
丙酮	1×10^{-7}	苯甲醛	1×10^{-4}
苯胺	2.4×10^{-6}	乙醇	1.35×10^{-7}
乙胺	7×10^{-7}	乙二胺	9×10^{-6}
二甲苯	$< 1 \times 10^{-13}$	氯苯	1.9×10^{-10}
醋酸	6×10^{-7}	醋酸戊酯	1.6×10^{-7}
醋酸甲酯	3.4×10^{-4}	醋酸乙酯	1.0×10^{-7}
醋酸丙酯	2.2×10^{-5}	汽油	$10^{-12} \sim 10^{-14}$
二乙醚	$\leq 3.7 \times 10^{-11}$	四氯化碳	4×10^{-16}
异丙醇	6×10^{-6}	庚烷	2×10^{-14}
环己醇	8×10^{-8}	环己酮	5×10^{-6}
环己烷	1.9×10^{-12}	1,2-二氯乙烷	3×10^{-8}
甲苯	1.0×10^{-12}	硝基乙烷	5×10^{-5}
硝基苯	2×10^{-8}	二硫化碳	3.7×10^{-13}
苯酚	1×10^{-6}	己烷	1×10^{-16}
苯	3.8×10^{-12}	纯水	4.15×10^{-6}
无水醋酸	4.78×10^{-5}	甲醇	10.5×10^{-7}
硫酸	1.04	二氯甲烷	4.3×10^{-9}
变压器油	$10^{-12} \sim 10^{-14}$	硅油	$10^{-14} \sim 10^{-15}$

1.3.6 电流

无论在固体、液体还是在气体中，电荷的流动均叫做电流。将正电荷的流动方向规定为电流的方向，即所规定的电流流动方向与电子的实际流动方向相反。

电流的大小用电流强度来描述。在单位时间内，流过导体横截面的电量定义为该导体中的电流强度。即在 dt 的时间内，若流过导体横截面的电量为 dQ ，则导体的电流强度 J 表示为 dQ 与 dt 的比值即 $J=dQ/dt$ 。

电流强度通常简称为电流。电流的实用单位为安培（单位符号为 A）。1 安培定义为在 1 秒钟内流过导体截面 1 库仑的电量。在电子工程上，安培单位太大，故用毫安（mA）或微安（ μA ）表示，它们分别等于 $10^{-3}A$ 和 $10^{-6}A$ 。

流过导线的电流是由金属导线内具有负电荷的自由电子的移动形成的，称为传导电流。在气体和液体中，电流是由存在于气体或液体中的离子移动而形成的。一般称这种由带电物质的运动以运送电荷所引起的电流为运流电流。在电介质中，由于电场的作用，被束缚的电荷发生位移或者极性分子按电场方向转动的现象，称为电介质的极化。由于电介质极化强度的变化所引起的电流称为极化电流。

无论在哪一个导体截面上，强度都不随时间而变化的电流，叫做恒稳电流。恒稳电流流过粗细均匀的导线时，其电流强度同导体两端的电位差成正比，此即欧姆定律，用公式表达为

$$I=\frac{U}{R},$$

这里 R 是导体的电阻，由导线的种类、直径和长度决定。

1.3.7 介电常数

当介质处在外电场中，由于极化会出现极化电荷。于是，在外电场上叠加一个极化电荷的电场，该电场的方向与外电场的方向相反。因此，介质内部的合成电场将减弱。如果在真空中的场强为 E_0 ，在介质中的场强为 E 减弱的倍数为 ϵ 即 $\epsilon=E_0/E$ 则 ϵ 定义为介质的介电常数。 ϵ 是描述电介质极化性能的物理量，也是表示物质绝缘能力的一个参数，其单位为法拉/米。 ϵ 对材料的静电性能有重大影响。

ϵ 也可以用另一种方式来定义。取形状和大小都相同的两组平行板 A 与 B, A 组两板间为真空并绝缘, B 组两板间充以绝缘材料, 比较这两组平行板间的静电电容时可以发现, B 组板间的电容量为 A 组板间电容量的数倍。显然, 造成电容量差异的原因在于 B 组板间存在绝缘材料。采用某种介质的电容器的电容量与同样几何尺寸的真空电容器的电容量之比, 定义为该介质的相对介电常数。所以, 介电常数有时也称作电容率。

除铁电物体外, 介电常数只与该介质的种类有关。测量时, 其值不会随两板间所加的电位差而变化。因此, 它是一个与介质中电场强度无关的值 (但是, 对铁电物体来说, 介电常数与电场强度有关)。

介质为真空时, 其介质常数用 ϵ_0 表示, 在数值上为 $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}F/m$ 。任一介质的介电常数等于其相对介电常数 ϵ_r 与真空介电常数 ϵ_0 的乘积, 即 $\epsilon=\epsilon_r \cdot \epsilon_0$ 。常用介质的介电常数列于表 1.3。

部分液体材料的介电常数示于表 1.4。

部分气体材料的介电常数示于表 1.5。

表 1.3 常用介质的相对介电常数

名 称	相对介电常数	名 称	相对介电常数
空气(20℃,101.3kpa 时)	1.0	300,400 号石棉水泥	7
石棉电木	20~25	玄武岩	9~12
大理石	8~10	云母片	4.6~6
白云母	6~7.5	金云母	4~4.5
电木	3~5	电木卷筒	3.8~5
A 及 B 级胶纸板	7~8	聚氯乙烯塑胶	3.1~3.5
漆布	3.5~5	变压器油	2~2.5
有机玻璃	3.2~3.6	干梓木	2~3
干电缆纸	2.3~3.5	浸油电缆纸	3.4~3.7
玻璃	5.5~10	隔电纸	3.5
陶瓷	5~7.5	氟橡胶	5.9
天然地沥青	2~4	石蜡	2.2~2.3
蜂蜡	2.8~2.9	虫胶	3.1~3.7
合成纤维纸	1.6~2.65	乙丙橡胶	3.17~3.34
天然橡胶	2.3~3.0	丁苯橡胶	2.9
异戊橡胶	2.3~3.0	丁腈橡胶	13.0
氯丁橡胶	9.0	丁基橡胶	2.1~2.4
聚硫橡胶	7.0~9.5	有机硅橡胶	3.0~3.5
聚氨酯橡胶	5~8	热塑性橡胶	2.5~3.4

表 1.4 部分液体材料的介电常数

名 称	相对介电常数(27℃)	名 称	相对介电常数(27℃)	名 称	相对介电常数(27℃)
醋酸	6.15	乙醇	24.3	甲醇	32.6
丙醇	20.1	液态氨	16.9	丙酮	20.7
苯甲醚	4.33	苯胺	7.06	乙胺	6.94
乙二醇	14.2	二甲苯	2.24	氯苯	5.62
醋酸戊酯	4.75	醋酸甲酯	6.68	醋酸乙酯	6.02
醋酸丙酯	6.002	汽油	1.9~2.2	二乙醚	4.34
异丙醇	25.0	庚烷	2.0	环己醇	15
环己酮	18.3	环己烷	2.05	水	78.54
甲苯	2.38	硝基乙烷	28.06	硝基苯	34.82
己烷	1.89	无水醋酸	20.7	硫酸	100
二氯甲烷	9.1	硅油	2.5~2.6	苯	2.2
溴	3.2	二硫化碳	2.64	四氯化碳	2.23
蓖麻油	4.7	醚	4.3	制冷剂	2.0
甘油	40	亚麻仁油	3.3	苯酚	9.8
1,2-二氯乙烷	10.36				

表 1.5 部分气体材料的相对介电常数

名 称	相对介电常数(0℃)	名 称	相对介电常数(0℃)	名 称	相对介电常数(0℃)
空气	1.000576	二氧化碳	1.000946	一氧化碳	1.000695
氮	1.0072	乙烷	1.00150	硫化氢	1.00332
沼气	1.000994	二氧化硫	1.00905		

1.3.8 绝缘强度

绝缘强度又称为介电强度，是表征电介质材料电气性能的重要物理量。它的含义是当单位厚度的材料被电压击穿而失去绝缘性能时，所需要的电压数值。

材料的绝缘强度可根据不同的用途使用直流电压、交流电压或脉冲电压来测定。

电介质绝缘强度的单位一般用千伏/毫米(kV/mm)表示。常用绝缘材料的绝缘强度如表 1.6 所示。

表 1.6 常用绝缘材料的绝缘强度

名 称	绝缘强度 kV/mm	名 称	绝缘强度 kV/mm
空气(29℃, 101.3 kPa 时)	3~4	300,400 号石棉水泥	1.5
石棉纸	2~5	石棉电木	6~14
玄武岩	3~6	大理石	4~6.5
云母片	15~30	白云母	15~78
金云母	15~50	电木	10~30
电木卷筒	10~15	A 级、B 级胶纸板	10~15
A 级、B 级夹布胶木	2~6	纤维板	5~10
聚氯乙烯塑胶	45	漆布	30~40
变压器油	5~20	有机玻璃	17~18
干桦木	3~5	纸	5~7
纸板	8~13	干电缆纸	6~9
浸油电缆纸	10~25	玻璃	5~10
玻璃布	4	隔电纸	4~11
陶瓷	18~25	石板	1.5~3
硬橡胶	20~38	软橡胶	10~24
松脂	15~24	天然地沥青	13~16
石蜡	16~30	蜂蜡	8~15
虫胶	10~23	通用酚醛塑料粉	12~16
特种酚醛塑料粉	12	氯丁橡胶	5.9~23.6
丁基橡胶	23.6	聚硫橡胶	9.8~23.6
有机硅橡胶	3.9~23.6	聚氨脂橡胶	13.7~20.6
乙丙橡胶	3.5	氟橡胶	9.8~29.5
合成纤维纸: 聚芳酰胺纸	12.6~17.4	热塑性橡胶	16.5~20.4
聚砜酰胺纸	13.5~17		
聚恶二唑纤维纸	1.5~2.2		

1.3.9 逸出功

逸出功又称为功函数，定义为使一个电子从材料的费密能级进入无场空间所需的最小能量。逸出功通常用电子伏特（单位符号 eV）表示。

当材料为金属时，由于其原子在很小的间距（约为 10^{-8} 厘米）内，按结晶格有规则地排列。在属于每个原子的电子中，最外层的价电子只要获得很少的能量，就能很容易进入邻近的原子，并替换那里的最外层价电子，形成很多电子（称为自由电子）在金属中做不规则的运动，一旦有外加电场，便形成定向流动的电流。在没有外加电场时，自由电子到达金属表面，由于受到位于金属中的带正电荷的原子核的强烈吸引力和物体表面镜像力（所有离开表面的电子在表面感应正电荷而形成的另一种吸引力）的作用，而难以离开金属表面飞到外面。但是，以某种形式获得外部能量时，只要能量大于逸出功，金属中的自由电子就能够克服上述两种吸引力形成的综合势垒而飞离金属表面，此即电子发射。电子获得外加能量的方式可以是热、光、射线或电场等。

物质逸出功的大小既取决于物质本身的内部结构特性，也取决于其表面状况，尤其是当其表面受到杂质污染时，可能会严重影响其表面逸出功的大小。利用此特性可以通过表面涂敷等工艺获得良好的物体发射特性，例如制造电子管阴极时，在底金属上涂覆一层碳酸盐。

一个物质的表面当其逸出功较小时，说明物质内的电子离开该物质所需的外加能量较低。当两种物质（可以是两种不同的金属或一种金属和一种半导体材料）接触时，具有较小逸出功的 A 物质中的电子会向逸出功较大的 B 物质中扩散。结果，A 因缺少电子而形成正电位，B 因得到了电子而成为负电位，这种过程直至 A、B 两者之间的电位差，即接触电位差，使得由 A 进入 B 扩散和由 B 进入 A（被接触电位差的电场拉回）的电子数达到动平衡的状态为止。接触电位差的大小为该两种物质逸出功的差值。由此，通过一个已知逸出功的材料接触另一个未知逸出功的材料，并测得它们之间的接触电位差，可以决定未知材料逸出功的大小。

了解逸出功的概念和接触电位差的成因，将能较好地解释接触起电的原因。这一点，在静电防护研究中具有重要意义。因为物质间的接触在所难免，一旦突然分离，必将形成两个电荷相等而符号相反的静电带电体。它是导致静电放电的起因之一。

各种元素的逸出功如表 1.7 所示。

表 1.7 各种元素的逸出功

元素名称	符号	原子序数	电子逸出功 ^注 ϕ (eV)	元素名称	符号	原子序数	电子逸出功 ^注 ϕ (eV)
银	Ag	47	4.26(P)	铝	Al	13	4.28(P)
砷	As	33	3.75(P)	金	Au	79	5.1(P)
硼	B	5	4.45(T)	钡	Ba	56	2.7(T)
铍	Be	4	4.98(P)	铋	Bi	83	4.22(P)
碳	C	6	5.0(CPD)	钙	Ca	20	2.87(P)
镉	Cd	48	4.22(CPD)	铈	Ce	58	2.9(P)
钴	Co	27	5.0(P)	铬	Cr	24	4.5(P)
铯	Cs	55	2.14(P)	铜	Cu	29	4.65(P)
镱	Eu	63	2.5(P)	铁	Fe	26	4.5(P)