

# 第 1 篇 电介质的基本理论

本篇系统阐述电介质的极化、损耗、电导和击穿等性能,及其与物质微观结构关系的基本规律和基本概念,从而揭示电介质的基本电学特性和物理特性,完整地体现其在强电场方面的理论体系。

### 1.1 电介质的定义

电介质是指在电场作用下能产生极化的一切物质。从广义上说,电介质不仅包括绝缘材料,而且包括各种功能材料,如压电、热释电、光电、铁电等材料。电介质中起主要作用的是束缚电荷,而金属的介电性能与束缚电荷无关,故金属不属于电介质的范畴。电介质材料分布很广,就存在形式来讲,可以是气态、液态或固态。随着科学技术的发展,新的功能材料还会不断出现,电介质涉及的范围将会更广。虽然电介质不一定是绝缘体,但绝缘体都是典型的电介质。绝缘体的电击穿过程及其原理关系到束缚电荷在场强作用下的极化限度。

### 1.2 电介质的分类

任何电介质的分子均由原子或离子组成,而每个原子或离子均由带正电的原子核和绕核运动的带负电的电子所组成,所以电介质的每个分子都是由正、负电荷组成的系统,根据这些电荷在分子中的分布特性,可以把电介质分为三类:非极性电介质、极性电介质和离子型电介质。当然这样的分类都属极端的情况,中间还有过渡状态。

#### 1. 非极性电介质

在无外电场作用时,分子的正电荷和负电荷中心相重合,故分子的电偶极矩等于零,这种分子称为非极性分子。由非极性分子组成的电介质称为非极性电介质或中性电介质。应用于绝缘的有机材料,如聚乙烯、聚四氟乙烯、石蜡、地蜡等均为非极性电介质材料。

#### 2. 极性电介质

在无外电场作用时,分子的正电荷和负电荷中心不相重合,即分子具有电偶极矩(称为分子的固有偶极矩)。这种分子称为偶极分子或极性分子,由极性分子组成的电介质称为极性电介质,如聚氯乙烯、纤维、某些树脂等。

#### 3. 离子型电介质

与上述非极性电介质和极性电介质不同,离子型晶体电介质通常由正、负离子组成,此时已没有个别的分子,存在于介质中的是离子。属于这一类的有离子型晶体介质(如

碱卤晶体、金红石型离子晶体)、石英、玻璃、云母、陶瓷及其他一些无机电介质。这类电介质的介电常数较大,且变化范围很大( $\epsilon_r=4.5\sim 100$ ),具有较高的机械强度。

一般情况下为便于理解与实际应用,可将电介质按照存在的形态分成几种基本类型:固体电介质、液体电介质、气体电介质和真空。

### 1.2.1 固体电介质

从形态上划分,固体绝缘材料可分成三种类型:①不发生形变的固体绝缘材料;②通过添加和堆叠制成的片状固体绝缘材料;③最终形态是固体,而在生产过程中以液体形式进行填充或粘合的绝缘材料。

从应用上划分,根据国际电工委员会标准 IEC15,固体绝缘材料分类为:无机(陶瓷和玻璃)材料;塑料膜;柔软绝缘套管;刚性纤维增强型层压板;树脂和漆;压敏胶黏带;纤维材料;混合柔性材料;云母制品;织物绝缘;人造橡胶和热塑性塑料。每种材料分类具体介绍如下。

#### 1. 无机(陶瓷和玻璃)材料

这类材料主要应用在高压输电线路悬式绝缘子及高压变压器和开关设备的套管上,通过法兰盘状串联相接的形式增大沿整个绝缘子表面的爬电距离。其优点是具有易塑性、高介电强度,且表面受到破坏时仍能保持其绝缘特性。

#### 2. 塑料膜

聚酯、聚碳酸酯、聚酰亚胺和聚乙烯萘烷(PEN)等膜材料被广泛应用于多种绝缘结构,如电容器中铝箔间,旋转电机的槽绝缘及作为云母制品的垫板应用在高压设备绝缘上。塑料膜适用于要求尺寸稳定性好、介质强度高、防潮和坚硬的绝缘部位。

#### 3. 柔软绝缘套管

这类绝缘主要应用于绕线部分的主绝缘或次绝缘、电缆保护及捆扎,还可应用于电机、变压器、民用或加热设备、照明装置、电缆连接、开关设备及车辆的动力连线。其优点是便于应用、柔软且介质强度高。适用高、低电压绝缘及各种温度条件( $-70^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$ )下的绝缘。

#### 4. 刚性纤维增强型层压板

电气设备的生产,有时需要固体板材或固体管型和棒型板材。其形式表现为高密层压木板或纸层压板、棉纺线、玻璃或聚酯等。这种刚性纤维增强型层压板易于加工成形,且在使用年限内可保持其固有的形状和性能。

#### 5. 树脂和漆

树脂和漆除用于层压产品外,还广泛用于电气设备的浸渍和涂层,以改善设备对于工作环境的抵御能力,提高其电气特性并延长工作寿命。传统树脂和漆类材料提炼于天然物质,如沥青、虫胶漆和植物油,现在已发展成热塑、热固树脂和人造橡胶形式的合成产品。典型的有酚、聚酯、环氧、硅树脂和聚酰亚胺等。漆和树脂由于具有填充、涂敷基本绝缘材料的性能,因而可显著延长设备的工作寿命,提高抗灰尘和抵御潮气的能力。

## 6. 压敏胶黏带

压敏胶黏带(PSA)的作用是黏着、密封或固定设备,它是基于纸、膜或玻璃布织品,并涂上适当的黏合剂,如橡胶、硅树脂或丙烯酸之类黏带的绝缘材料。

## 7. 纤维材料

由纸、纸板和压制纸制成的材料仍旧在油浸式电力变压器绝缘中扮演着重要的角色,这个领域还包括由纸制造技术生产的芳香尼龙纤维等其他材料。这些材料在高温绝缘、干式变压器或其他类型的电力设备上有很大应用。纤维材料主要与油联合使用,它的多孔特性使其成功地应用于变压器和电缆。

## 8. 混合柔性材料

为了生产适宜的绝缘材料以满足某些性能指标,如撕裂强度、电气强度和热阻抗,一系列的层压或混合性柔软薄片产品得以发展。与其他材料一样,将纤维质、芳香聚酰胺和玻璃织物与某些塑料膜混合,以新形式来满足应用的需求。混合柔性材料大量用在低压电机中。

## 9. 云母制品

云母材料在高压旋转电机的设计和制造中发挥了重要的作用。早期工业生产使用裂解云母,目前主要采用云母纸,它是通过化学和机械的方法把云母分成小块,做成浆状再输入传统的造纸机器中制造出来的。云母纸涂上一定的玻璃纸或防光晕层,并在环氧树脂中浸渍,可用定子线棒绝缘。在图 1-1 中可以看到用云母纸构成线圈的对地绝缘。

实际应用的云母纸一般为多树脂的形式,槽周围用于加固的树脂绝缘就包含这种材料。这种加固通常需把线圈或线棒放入大气罐,并采用电加热方法,因此热和压力可以充分愈合多树脂云母片绝缘。如选用真空压力浸渍(VPI)法,进行这种浸渍需在捆绑机器之后注入树脂。VPI 的应用避免了用压力加固绝缘的要求。加固既可用流体静力,也可通过将完全做好的线棒或线圈放入槽内来完成。如图 1-2 所示为将大电机定子放入 VPI 箱中。

由于云母制品独特的多样化特性,它在高电压绝缘系统中占主导地位,它的主要特点有:高绝缘强度、高频情况下低介质损耗、高表面电阻和体积电阻、良好的防晕能力和耐电弧腐蚀能力、耐高温能力可达 $-273^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 、耐火性好、良好的耐化学阻抗性和耐压力性。

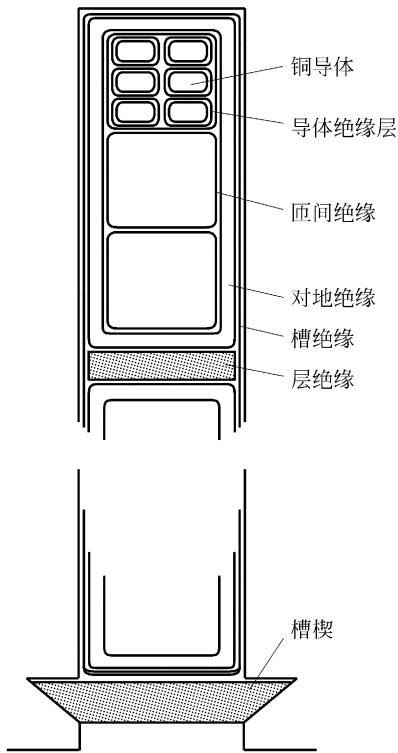


图 1-1 高压电机的定子线圈截面

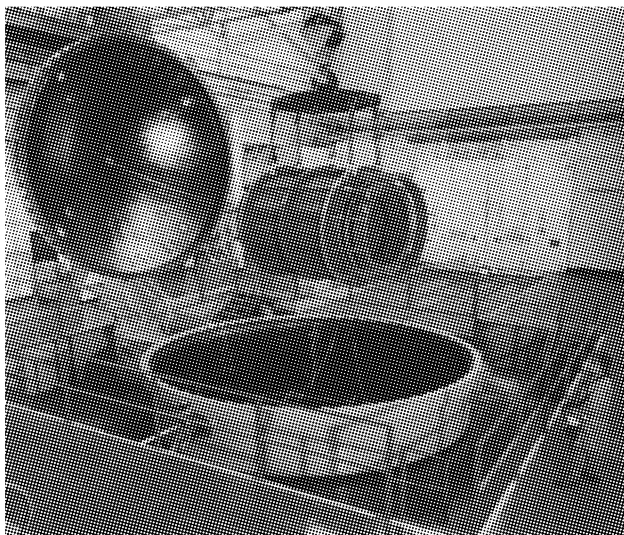


图 1-2 能放入 100MV·A 定子的大型真空压浸式设备

## 10. 织物绝缘

虽然全漆织品的应用已不再普遍,但用玻璃和聚酯纱线的产品,或较少的棉花和人造纤维制成的绝缘产品,仍然在使用。

多数未浸漆的少纤维产品,即所谓的编织带存在并且还用来制作各种玻璃和聚酯纱线的混合物以适应特殊应用。这种带主要用于装置绝缘顶部如云母纸,以方便在其坚硬的外表面涂上末道漆或油漆。

编织带的使用是因为它们易于应用,有好的一致性和铺垫性,比如它们能用于包裹。如图 1-3 所示,高压电机端部线圈的绝缘就是用编织带缠绕起来的。

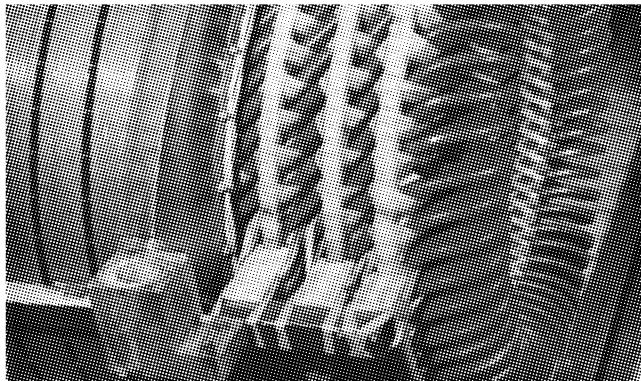


图 1-3 11kV,8MW 感应电机的 4 极定子端部支柱系统

## 11. 人造橡胶和热塑性塑料

聚合物和橡胶类绝缘材料有很大的应用范围。传统上主要用在电力电缆的连接,一些人造橡胶如硅树脂已经用于套管、牵引系统,更多的用在架空线的绝缘,但它们大多数

应用仍与电缆相关。主要的材料如聚氯乙烯(PVC),中密度聚乙烯(MDPE),交联聚乙烯(XLPE)和二元乙丙橡胶(EPR)等。

### 1.2.2 液体电介质

液体电介质又称绝缘油,在常温下为液态,在电气设备中起绝缘、传热、浸渍及填充作用,主要用在变压器、油断路器、电容器和电缆等电气设备中。在断路器和电容器中的绝缘油还分别有灭弧和储能作用。

液体电介质与气体电介质一样有流动性,击穿后有自愈性,但电气强度比气体的高。因此用液体电介质代替气体电介质制造的高压电气设备体积小,节省材料;但液体电介质大多可燃,易氧化变质,产生水分、气体、酸、油泥等,导致电气性能变坏。

电气设备对液体电介质的要求首先是电气性能好,例如绝缘强度高、电阻率高、介质损耗及介电常数小(电容器则要求介电常数高);其次还要求散热及流动性能好,即黏度低、导热好、化学性质稳定、不易燃、无毒及其他一些特殊要求。

液体电介质有矿物绝缘油、合成绝缘油和植物油三大类。

#### 1. 矿物绝缘油

矿物绝缘油由石油精制而成,主要成分是饱和烃,例如环烷烃(环己烷系及环戊烷系)、烷烃等,此外有少量芳香烃。饱和烃化学稳定性好,介电性能稳定,其中环烷烃凝固点低,性能更优异。芳烃在电场作用下的抗析气性,对延长电力设备使用寿命有益;但具有一定的吸水性,且凝固点较高,故其应用受到一定限制。从石油分馏得到的矿物油原油中,还含有少量具有化学活性的不饱和烃,它在使用过程中易发生氧化、聚合、分解等反应,使绝缘油变质;另外还含有一些含硫、氧、氮的化合物,给绝缘油的性能带来不良影响。绝缘原油只有经过适当精制后才能除去有害物质,常用的精制方法有酸碱精制和白土精制,此外,还有溶剂精制和加氢精制等。为了改善绝缘油的性能常适量地加入一些添加剂,例如抗氧化剂、降凝剂、抗析气剂及阻燃剂。矿物绝缘油的质量和性能取决于石油来源及精制技术。常用矿物绝缘油的性能见表 1-1。

#### 2. 合成绝缘油

合成油种类较多,性能优异,常用的有二芳基乙烷  $\left[ \text{CH}_3 - \text{CH} \left( \begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5 \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_4 \end{array} \right) - \text{CH}_3 \right]$ 、异丙基联

苯  $\left[ \begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5 \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]$ 、新酸苯酯  $\left[ (\text{CH}_3)_3\text{C} - \text{CH}_2 - \text{C} \begin{array}{l} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{COOCH}_2 - \text{C}_6\text{H}_5 \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \end{array} \right]$ 、十二烷基苯

$\left( \text{C}_6\text{H}_5 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right)_n - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$  ( $n=4$ )、聚异丁烯  $\left( -\text{CH}_2 - \text{C}(\text{CH}_3)_2 - \right)_n$ 、二甲基硅油和苯甲基硅油等。一些常用合成油的性能见表 1-2。

表 1-1 常用矿物绝缘油的性能

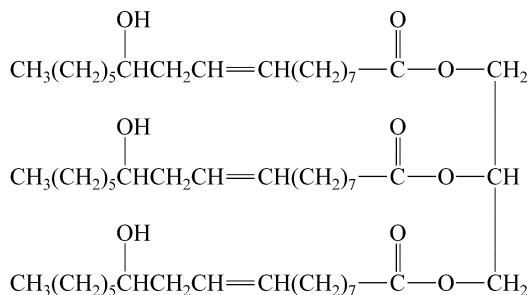
性能	变压器油	电容器油	110kV~330kV 高压电缆油	开关油 (45号变压器油)
凝固点/°C	-35~-45	-45	-60	-45
酸值(KOH)/(mg/g)	<0.05	<0.02	<0.01	<0.05
闪点/°C	>135	>135	>125	>135
$\epsilon_r(60^\circ\text{C})$	—	2.2	—	—
$\rho_V(20^\circ\text{C})/(\Omega \cdot \text{m})$	$4 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{13}$	$\geq 5 \times 10^{12}$	$10^{12} \sim 10^{14}(25^\circ\text{C})$	—
$U_B(2.5\text{mm间距})/\text{kV}$	25~40	$\geq 60$	$\geq 50$	—
$\tan\delta(100^\circ\text{C})/\%$	$\leq 0.5(20^\circ\text{C})$	$\leq 0.4$	$\leq 0.15$	—
运动黏度(20°C)/(m <sup>2</sup> /s)	$< 30 \times 10^{-6}$	$(37 \sim 45) \times 10^{-6}$	$(8 \sim 18) \times 10^{-6}$	$< 30 \times 10^{-6}$

表 1-2 常用合成油的性能

合成油名称	$\epsilon_r$ (80°C)	$\tan\delta$ (80°C, 50Hz)	$U_B$ (2.5mm 间距) /kV	凝固点 /°C	闪点 /°C	可燃性	运动黏度 (20°C)/ (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)	毒性	吸气性	$\rho_V(80^\circ\text{C})$ /( $\Omega \cdot \text{m}$ )
二芳基乙烷 (PXE)	2.51	$1 \times 10^{-4}$	60	-47.5	148	可燃	6.3	比三氯 联苯低, 可生物 降解	优	$10^{13}$
异丙基联苯 (MIPB)	2.56	$6 \times 10^{-4}$	>60	<55	120	可燃	—			
新癸酸苄酯 (BNC)	3.8	$4 \times 10^{-3}$	>60	-60	155	可燃	5.76			
苯甲基硅油	2.8 (60°C)	$5 \times 10^{-4}$ (60°C)	45	-45	280	不燃	100~200	低毒,可 生物降解	优	$10^{12}$
甲基硅油	2.5 (60°C)	$3 \times 10^{-4}$ (60°C)	40	-55	266	不燃	9~1050		差	$10^{13}$
蓖麻油	4.2 (20°C)	$2 \times 10^{-2}$ (60°C)	50	-17	250	不易燃	2.2		优	$10^{12}$
十二烷基苯 (DDB)	2.17	$2 \times 10^{-4}$ (60°C)	60	-60	135	可燃	7	无毒	优	$10^{13}$
聚乙丁烯 (PB)	2.2 (60°C)	$1 \times 10^{-4}$	50	-60	252	可燃	13820			

### 3. 植物油

电工用植物油中,蓖麻油使用较多,它的主要成分是蓖麻酸甘油酯,其结构式如下:



蓖麻油的主要性能:  $\epsilon_r$  (1kHz, 25℃) 为 4.68~4.71,  $\tan\delta$  (1kHz, 25℃) 为 0.003~0.006,  $\rho_V$  (25℃) 为  $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $E_B=20\text{MV/m}$ , 凝固点为  $-17^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$ , 闪点为  $250^\circ\text{C}$ , 燃点为  $281^\circ\text{C}$ , 热导率为  $0.171\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

实际应用中,也常使用混合油,即用两种或两种以上的绝缘油混合成新的绝缘油,以改善某些特性,例如耐燃性、析气性、自熄性、局部放电特性等。

#### 1.2.3 气体电介质

在电气设备中,气体是重要的电介质。在一些设备中,气体作为主绝缘,其他固体电介质只起支撑作用,例如架空线、空气电容器、断路器、充气电力电缆及通信电缆等;气体也可与承担主绝缘的固体或液体电介质以串联或并联的形式存在;气体电介质除了起绝缘作用外,有时还起灭弧、冷却和保护作用;另外,在固体或液体绝缘中,都或多或少地存在一定量的气体空隙。因此,对气体的研究在绝缘技术中十分重要。本节主要讨论起主绝缘作用的气体电介质。

理想的气体电介质应具有绝缘强度高、化学及热稳定性好、对结构材料的腐蚀作用很小、不燃、不爆、液化温度低、热导率高、在电弧条件下耐分解、不产生有毒及腐蚀性分子等特性。此外,还要求成本低,净化及维护方便。

##### 1. 普通气体

目前常用的气体介质有空气、氮气、氢气和二氧化碳及六氟化硫等气体。气体由于密度小,因此具有与液体及固体电介质不同的特征。例如相对介电常数、介质损耗和电导率很小,击穿后自愈能力强,不存在老化问题,过载能力强,并且可通过提高气压来提高绝缘强度。表 1-3 为一些气体电介质的物理性质。

表 1-3 一些气体电介质的物理性质

气体种类	分子式	密度 /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	沸点/ $^\circ\text{C}$	临界温度 / $^\circ\text{C}$	热导率 /( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )	黏度( $0^\circ\text{C}$ , 0.1MPa) / $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	相对介电 常数( $20^\circ\text{C}$ )
空气	主要为 $\text{N}_2$ 和 $\text{O}_2$	1.18	-196	-140.7	0.0317( $100^\circ\text{C}$ )	0.017	1.00059

续表

气体种类	分子式	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	沸点/°C	临界温度 /°C	热导率 /(W/(m·K))	黏度(0°C, 0.1MPa) /μPa·s	相对介电 常数(20°C)
氮	N <sub>2</sub>	1.2506	-195.8	-147.1	0.0258(30°C)	0.0163	1.00058
氢	H <sub>2</sub>	0.0825	-252.8	-240	0.0429(100°C)	0.0086	1.00027
六氟 化硫	SF <sub>6</sub>	6.10	-63.8	45.64	0.0168(100°C)	0.0161	1.00191

## 2. SF<sub>6</sub> 气体

由于 SF<sub>6</sub> 的综合性能优异,因而它的应用正日益广泛。SF<sub>6</sub> 一般由硫和氟直接燃烧合成。SF<sub>6</sub> 在正常状态下是无色、无臭、不燃、不爆、无毒和化学性质稳定的气体。SF<sub>6</sub> 分子呈八面体结构,S 原子处于八面体中心,6 个 F 原子处于六个顶端,S 和 F 以共价键相连。分子中含有电负性很强的氟原子,且相对分子质量大,呈现很强的吸附电子的性质,故具有很高的绝缘强度,其击穿强度为空气的 2.3~3 倍,在 0.3MPa~0.4MPa 气压下击穿电压优于变压器油,SF<sub>6</sub> 的灭弧性能也很好,故广泛用于高压断路器、电容器、电缆、变压器及气体绝缘变电站(GIS)。充 SF<sub>6</sub> 电器的缺点是对密封的要求高,SF<sub>6</sub> 临界温度高,易液化,放电后分解气体对含 SiO<sub>2</sub> 的陶瓷和玻璃等无机材料有强的腐蚀性;又由于 SF<sub>6</sub> 密度大,在检修充 SF<sub>6</sub> 电气设备时易引起工作人员窒息,此外价格较贵。为此,科技工作者正研究用 SF<sub>6</sub> 混合气体代替 SF<sub>6</sub>,目前已得到应用的是 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 混合气体。

### 1.2.4 真空绝缘

真空绝缘主要应用于中压开关设备上,具有优良的绝缘性能和灭弧性能。采用真空作为开关灭弧介质的优点是成本低、维修费用低、无爆炸危险。另外,由于灭弧室具有高真空度,空气十分稀薄,真空间隙的绝缘强度比常温下的空气和 SF<sub>6</sub> 高得多。

## 习题和思考题

- 1-1 电介质与绝缘的区别与联系是什么?
- 1-2 非极性电介质、极性电介质和离子电介质的特点分别是什么?
- 1-3 电气设备用液态电介质应具有哪些性能?
- 1-4 气体电介质与其他电介质相比具有哪些优越性?
- 1-5 固态电介质主要有哪些类型? 它们分别应用在哪些领域?

### 2.1 电介质的介电常数

#### 2.1.1 介电常数的定义

电介质的介电常数也称为电容率,是描述电介质极化的宏观参数。根据静电场中关于均匀各向同性的电介质相对介电常数的定义,电介质的相对介电常数为

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

式中  $D$ ——电介质中电通量密度;

$E$ ——宏观电场强度;

$\epsilon_0$ ——真空介电常数。

下面以平板电容器为例来进一步说明介电常数的物理意义。设一真空平板电容器的极板面积为  $S$ ,极板的间距为  $d$ ,且  $d$  远小于极板的尺寸,因此极板的边缘效应可以忽略,极板上的电荷分布和极板间的电场分布可认为是均匀的。如图 2-1(a)所示,在外施恒定电压  $U$  的作用下,设极板上所充的电荷面密度为  $\sigma_0$ ,根据静电场的高斯(Gauss)定理,极板间真空中的电场强度为

$$E = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (2-2)$$

而真空电容器的电容量为

$$C_0 = \frac{\sigma_0 S}{U} \quad (2-3)$$

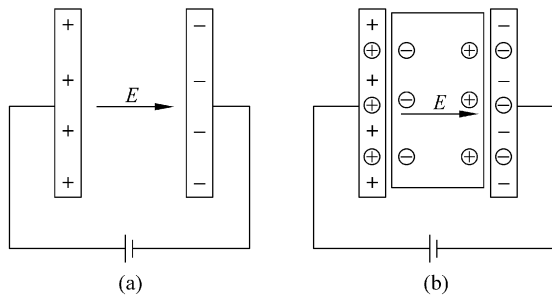


图 2-1 平板电容器中的电荷与电场分布  
(a) 真空; (b) 充以电介质