

# 高电压绝缘基础

沈其工



江苏科学技术出版社

## 高电压绝缘基础

沈其工

---

出版发行：江苏科学技术出版社

经 销：江苏省新华书店

印 刷：江苏无锡春远印刷厂

---

开本787×1092毫米 1/32 印张 12.25 字数 266,000

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数 1—2,500册

---

ISBN 7-5345-0941-6

---

TM·11 定价：4.30元

## 内 容 提 要

本书系统地论述发生在高电压绝缘中的各种物理过程，着重阐明各种绝缘物质在各种不同性质电压作用下击穿放电的物理过程，深入讨论了影响击穿电压的各种因素及提高击穿电压的各种方法，也较详细地讨论了绝缘物质的老化规律及改善措施。

本书对SF<sub>6</sub>气体各方面特性作了详细的论述；对长气隙放电和雷电放电的物理过程作了较全面的综述；扼要地探讨了长气隙中的预放电过程及其预防措施；对组合绝缘中的某些共性问题，结合实例进行了探讨。

本书系统性强，基本概念阐述清楚，密切结合实际应用，文句简明扼要，广泛适用于大专院校电力类、高压电气设备制造类专业的师生及电力部门、高压电气设备制造部门、工矿企业动力部门的有关技术人员阅读。

## 常用物理符号

$A$	面积	$S$	距离
$b$	厚度、宽度	$T$	绝对温度
$C$	电容	$t, T$	时间
$c$	深度	$U, u$	电压
$D, d$	直径	$V$	体积
$E$	场强	$v$	速度
$H, h$	高度	$W$	能量, 功
$I, i$	电流	$X$	电抗
$J, j$	电流密度	$x$	行程
$K, k$	常数, 系数	$Y$	导纳
$L$	电感	$Z$	阻抗
$l$	长度	$\alpha$	角度
$m$	质量	$\gamma$	电导率
$n$	个数	$\delta$	相对密度
$p$	压强, 有功功率	$\Delta$	增量, 差额
$Q, q$	电荷量	$\epsilon_r, \epsilon$	相对介电常数
$R, r$	半径, 电阻	$\theta$	摄氏温度

## 常用下标符号

$a$	外圈的	$b$	击穿的
$a$	局部放电的	$C$	电容的
$av$	平均的	$cr$	临界的

<i>e</i>	电子的	<i>w</i>	耐受的
<i>e</i>	有效值 (方均根值)	<i>y</i>	游离的
<i>eq</i>	等效的	<i>y</i>	电晕的
<i>ex</i>	外部的	$\equiv$	直流的
<i>f</i>	闪络的	$\sim$	交流的
<i>h</i>	湿度的	$+$	正的
<i>i</i>	离子的	$-$	负的
<i>i</i>	截断的	$\sim$	雷电冲击 (+)
<b>max</b>	最大的	$\surd$	雷电冲击 (-)
<b>min</b>	最小的	$\sim$	操作冲击 (+)
<i>n</i>	标称的	$\surd$	操作冲击 (-)
<i>o</i>	起始的	$\lambda$	平均自由程
<i>p</i>	极化的	$\rho$	电阻率, 密度
<i>p</i>	峰值	$\sigma$	相对标准偏差
<i>r</i>	径向的	$\tau$	时间
<i>r</i>	电阻性的	$\varphi$	电位
<i>sp</i>	空间的	$\psi$	几率

# 目 录

<b>第一章 电介质的极化、电导和损耗</b> .....	( 1 )
§1-1 电介质的极化 .....	( 1 )
1-1-1 电子位移极化.....	( 2 )
1-1-2 离子位移极化.....	( 2 )
1-1-3 转向极化.....	( 3 )
1-1-4 空间电荷极化.....	( 4 )
§1-2 电介质的介电常数 .....	( 6 )
1-2-1 气体介质的介电常数.....	( 6 )
1-2-2 液体介质的介电常数.....	( 6 )
1-2-3 固体介质的介电常数.....	( 8 )
§1-3 电介质的电导 .....	( 9 )
1-3-1 气体介质的电导.....	( 9 )
1-3-2 液体介质的电导.....	( 10 )
1-3-3 固体介质的电导.....	( 13 )
§1-4 电介质中的损耗 .....	( 15 )
1-4-1 介质损耗的基本概念.....	( 15 )
1-4-2 气体介质中的损耗.....	( 17 )
1-4-3 液体和固体介质中的损耗.....	( 17 )
<b>第二章 气体放电的物理过程</b> .....	( 21 )
§2-1 气体中带电质点的产生和消失 .....	( 21 )
2-1-1 气体中带电质点的产生.....	( 21 )
2-1-2 气体中带电质点的消失.....	( 31 )
§2-2 气体放电机理 .....	( 34 )
2-2-1 气体放电形式的一般描述.....	( 34 )

2-2-2	汤逊德气体放电理论.....	( 36 )
2-2-3	流注放电理论.....	( 52 )
§2-3	电晕放电 .....	( 63 )
2-3-1	电晕放电现象的一般描述.....	( 63 )
2-3-2	电晕放电的物理过程和效应.....	( 64 )
2-3-3	直流输电线上的电晕.....	( 71 )
2-3-4	交流输电线上的电晕.....	( 74 )
§2-4	不均匀电场气隙的击穿 .....	( 82 )
2-4-1	短间隙的击穿.....	( 82 )
2-4-2	长间隙的击穿.....	( 84 )
§2-5	雷电放电 .....	( 95 )
2-5-1	概述.....	( 95 )
2-5-2	雷电先导过程.....	( 101 )
2-5-3	雷电主放电过程.....	( 106 )
2-5-4	雷电的后续分量.....	( 112 )
<b>第三章 气隙的击穿特性.....</b>		<b>( 115 )</b>
§3-1	气隙的击穿时间.....	( 115 )
§3-2	气隙的伏秒特性和击穿电压的几率分布.....	( 118 )
3-2-1	电压波形.....	( 118 )
3-2-2	伏秒特性.....	( 123 )
3-2-3	气隙击穿电压的几率分布.....	( 128 )
§3-3	大气条件对气隙击穿电压的影响 .....	( 129 )
§3-4	均匀电场下气隙的击穿电压 .....	( 136 )
§3-5	稍不均匀电场下气隙的击穿电压 .....	( 136 )
§3-6	不均匀电场下气隙的击穿电压 .....	( 140 )
3-6-1	直流电压情况.....	( 141 )
3-6-2	工频电压情况.....	( 144 )
3-6-3	雷电冲击电压情况.....	( 145 )
3-6-4	操作冲击电压情况.....	( 150 )
§3-7	提高气隙击穿电压的方法 .....	( 157 )
3-7-1	改进电极形状以改善电场分布.....	( 157 )

3-7-2	覆盖固体绝缘层.....	( 161 )
3-7-3	屏障.....	( 162 )
3-7-4	利用空间电荷以改善电场分布.....	( 162 )
3-7-5	增高气压.....	( 164 )
3-7-6	采用高度真空.....	( 189 )
3-7-7	采用高耐电强度气体.....	( 191 )
§3-8	气隙中的预放电及其防止.....	( 206 )
3-8-1	气隙中的预放电过程及其规律.....	( 206 )
3-8-2	气隙中预放电的防止.....	( 210 )
<b>第四章 气体间隙的沿面放电.....</b>		<b>( 218 )</b>
§4-1	气体间隙沿面放电的物理过程.....	( 218 )
4-1-1	均匀电场中的沿面放电.....	( 218 )
4-1-2	不均匀电场中的沿面放电.....	( 220 )
§4-2	影响沿面闪络电压的因素.....	( 225 )
4-2-1	电场状况和电压波形的影响.....	( 225 )
4-2-2	介质材料的影响.....	( 229 )
4-2-3	气体条件的影响.....	( 230 )
4-2-4	电极接触面不密合的影响.....	( 233 )
4-2-5	介质表面状态的影响.....	( 234 )
§4-3	提高沿面闪络电压的方法.....	( 246 )
4-3-1	屏障.....	( 246 )
4-3-2	屏蔽.....	( 247 )
4-3-3	绝缘表面处理.....	( 248 )
4-3-4	消除绝缘体与电极接触面处的缝隙.....	( 249 )
4-3-5	减小比表面电容.....	( 249 )
4-3-6	使电极附近的电位移线只穿过单一介质.....	( 250 )
4-3-7	加电容极板.....	( 253 )
4-3-8	改变绝缘体表面电阻率.....	( 254 )
4-3-9	强制固定介质表面各点的电位.....	( 257 )
4-3-10	附加金具.....	( 257 )
4-3-11	阻抗调节.....	( 280 )



<b>第五章</b>	<b>固体介质的击穿</b> .....	( 283 )
§5-1	固体介质击穿的机理 .....	( 283 )
§5-2	固体介质的热击穿理论 .....	( 285 )
§5-3	固体介质的电击穿理论 .....	( 292 )
§5-4	影响固体介质击穿电压的因素 .....	( 294 )
§5-5	提高固体介质击穿电压的方法 .....	( 301 )
§5-6	固体介质的老化 .....	( 301 )
5-6-1	固体介质的环境老化 .....	( 302 )
5-6-2	固体介质的电老化 .....	( 303 )
5-6-3	固体介质的热老化 .....	( 310 )
<b>第六章</b>	<b>液体介质的击穿</b> .....	( 318 )
§6-1	液体介质击穿的机理 .....	( 319 )
§6-2	影响液体介质击穿电压的因素 .....	( 321 )
§6-3	提高液体介质击穿电压的方法 .....	( 330 )
§6-4	液体介质中的沿面放电 .....	( 338 )
§6-5	液体介质的老化 .....	( 341 )
6-5-1	变压器油的老化过程 .....	( 341 )
6-5-2	影响变压器油老化的因素 .....	( 342 )
6-5-3	延缓变压器油老化的方法 .....	( 345 )
6-5-4	变压器油的再生 .....	( 346 )
<b>第七章</b>	<b>组合绝缘</b> .....	( 347 )
§7-1	组合绝缘各组分间的相互渗透 .....	( 347 )
7-1-1	介质之间的相互渗透 .....	( 347 )
7-1-2	介质之间的相容性 .....	( 348 )
7-1-3	水分在组合绝缘中的分布 .....	( 350 )
§7-2	高压电气设备应有的绝缘水平和试验要求 .....	( 352 )
§7-3	绝缘结构中的电压分布 .....	( 355 )
§7-4	击穿场强、耐受场强、许用场强 .....	( 356 )
§7-5	主体绝缘强度的配合 .....	( 361 )
§7-6	局部强场的处理 .....	( 363 )

§7-7	对电介质性能的全面要求 .....	( 369 )
7-7-1	电性能 .....	( 369 )
7-7-2	热性能 .....	( 370 )
7-7-3	机械性能 .....	( 371 )
7-7-4	物理、化学性能 .....	( 373 )
附录	.....	( 375 )
主要参考文献	.....	( 378 )

# 第一章 电介质的极化、电导和损耗

## § 1-1 电介质的极化

根据电介质的物质结构，电介质极化可归结为以下四种基本类型：

电子位移极化；

离子位移极化；

转向极化；

空间电荷极化。

现分别加以说明。

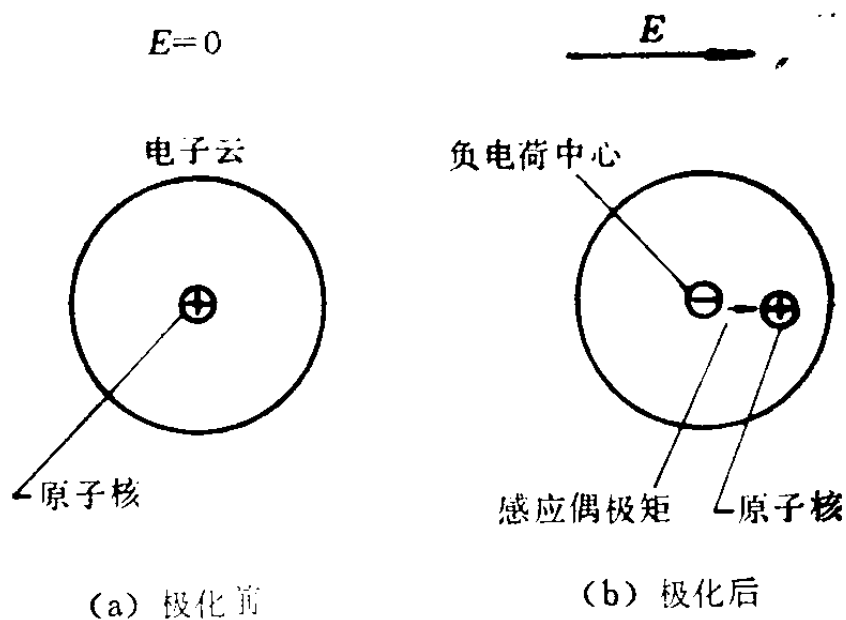


图1-1-1 电子位移极化

### 1-1-1 电子位移极化

组成一切电介质的粒子不外是原子、分子或离子，而它们又都是由带正电的原子核和围绕核的电子云构成。当不存在外电场时，原子中电子云的中心与原子核重合，如图 1-1-1(a)所示，此时，电矩为零。当外加一电场，电场力将使荷正电的原子核向电场方向位移，荷负电的电子云中心向电场反方向位移，但原子核对电子云的引力又使两者倾向于重合，当它们的相互作用达到平衡时，原子中出现了感应电矩。这个过程称为电子位移极化。当外电场消失时，原子核对电子云的引力又使两者重合，感应电矩也随之消失。

电场中的所有电介质内都存在电子位移极化。它完全是弹性的，并不引起能量损耗。极化完成时间极快，约为  $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{s}$ ，该时间已与可见光的周期相近。这就是说，即使所加外电场的交变频率达到光频，电子位移极化也来得及完成。

单元粒子的电子位移极化电矩与温度无关，因为温度只影响粒子热运动的动能，而不会改变粒子的半径。温度的变化，只是通过介质密度的变化（即介质单位体积中粒子数的变化）才使介质的电子位移极化率发生变化。

### 1-1-2 离子位移极化

在由离子结合成的介质内，外电场的作用除了促使各个离子内部产生电子位移极化外，还产生正、负离子相对位移而形成的极化，称为离子位移极化。图 1-1-2 所示为氯化钠晶体的离子位移极化。

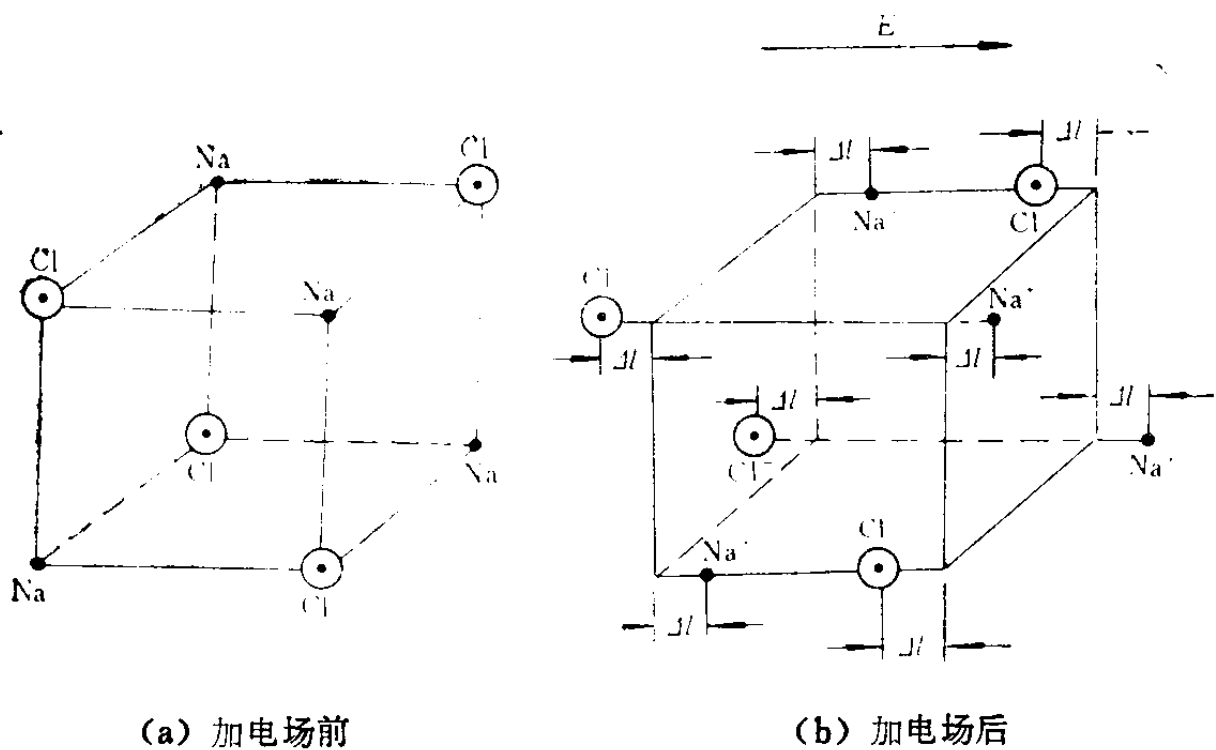


图1-1-2 氯化钠晶体的离子位移极化

当没有外电场时，各正负离子对构成的偶极矩彼此相消，极化强度为零；加上外电场后，所有的钠离子沿电场方向移动，而氯离子则沿电场反方向移动。结果，正负离子对构成的偶极矩不再完全相消，形成一定的极化强度。

离子位移极化完成的时间约为 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ s}$ 。因此，只要交变电场的频率低于红外光频率，离子位移极化便可完成。

在大多数情况下，离子位移极化有极微量的能量损耗。

电介质的离子位移极化率随温度的升高而略有增大。这是由于温度升高时，电介质体积膨胀，离子间的距离增大，离子间相互作用的弹性力减弱的结果。

### 1-1-3 转向极化

在极性电介质中，即使没有外加电场，由于分子中正、

负电荷的作用中心不重合，就单个分子而言，就已具有偶极矩，称为固有偶极矩。但由于分子的不规则热运动，使各分子偶极矩方向的排列无序，因此，宏观上对外并不呈现电矩。当有外电场时，每个分子的固有偶极矩就有转向与外电场平行的趋势，其排列呈现出一定的秩序。但是由于受分子热运动的干扰，这种转向有序的排列，只能达到某种程度，而不能完全。随场强和温度的不同，这种转向排列在不同的程度上达到平衡，对外呈现出宏观电矩，这就是极性分子的转向极化。外电场愈强，极性分子的转向排列就愈整齐，转向极化就愈强。外电场消失后，分子的不规则热运动重又使分子回复到无序状态，宏观的转向极化也就随之消失。

转向极化的建立需要较长的时间，约为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ s，甚至更长。所以，在频率不高、甚至是工频的交变电场中，转向极化的建立就可能跟不上电场的变化，从而使极化率减小。

转向极化伴有能量损耗。

#### 1-1-4 空间电荷极化

上述的三种极化都是由带电质点的弹性位移或转向形成的，而空间电荷极化的机理则与上述三种完全不同，它是由带电质点（电子或正、负离子）的移动形成的。

在大多数绝缘结构中，电介质往往呈层式结构（宏观或微观的）；另外，电介质中也可能存在某些晶格缺陷。在电场的作用下，带电质点在电介质中移动时，可能被晶格缺陷捕获，或在两层介质的界面上堆积，造成电荷在介质空间中新的分布，从而产生电矩。这种极化称为空间电荷极化。

最明显的空间电荷极化是夹层极化。在实际的电气设备

中，有不少多层介质的例子，如电缆、电容器、旋转电机、变压器、互感器、电抗器的绕组绝缘等，都是由多层介质组成的。现以最简单的双层介质模型来分析其中的物理过程。

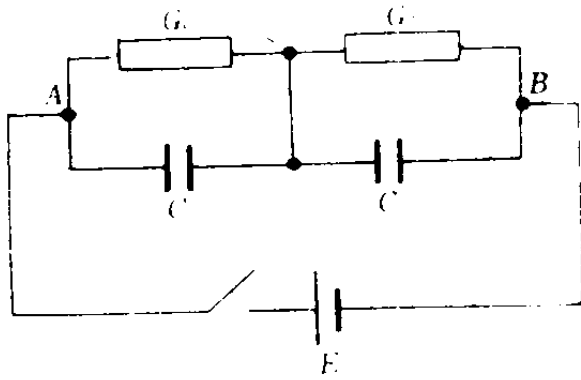
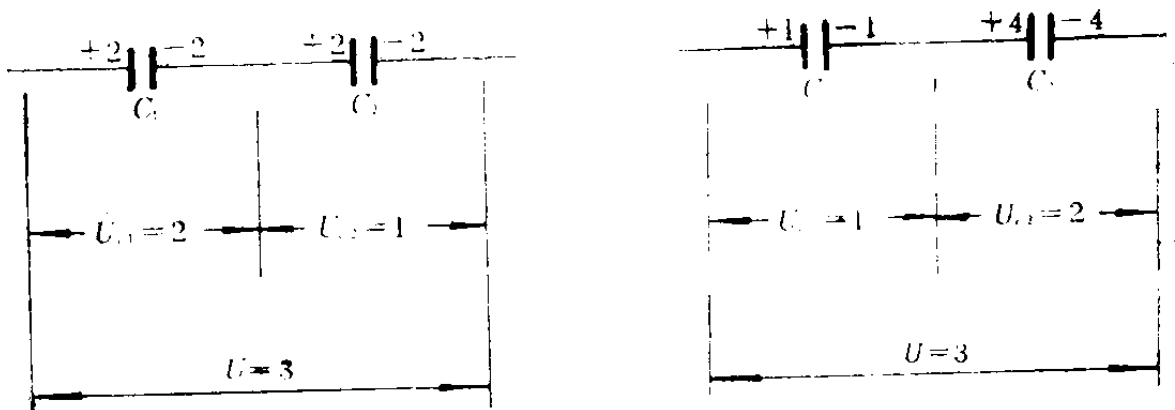


图1-1-3 双层介质极化

如图 1-1-3 所示，各层介质的电容分别为  $C_1$  和  $C_2$ ；各层介质的电导分别为  $G_1$  和  $G_2$ ；直流电源电压为  $U$ 。为了说明的简便，全部参数均只标数值，略去单位。

设  $C_1 = 1$ ， $C_2 = 2$ ， $G_1 = 2$ ， $G_2 = 1$ ， $U = 3$ 。当  $U$  作用在 AB 两端极板上时，其初瞬时电容上的电荷和电位分布如图 1-1-4 (a) 所示。整个介质的等值电容为  $C'_{0a} = \frac{Q'}{U} = \frac{2}{3}$ 。到达稳态时，电容上的电荷和电位分布如图 1-1-4 (b) 所示。整个介质的等值电容为  $C''_{0a} = \frac{Q''}{U} = \frac{4}{3}$ 。 $C_1$  和  $C_2$  分界面上堆积的电荷量为  $+4 - 1 = +3$ 。



(a) 初瞬时

(b) 稳态时

图1-1-4 双层介质中电荷和电位分布

由此可见，夹层的存在将会造成电荷在夹层界面上的堆积和等值电容的增大，这就是夹层极化效应。

还应注意，夹层界面上电荷的堆积是通过介质电导 $G$ 完成的。高压绝缘介质的电导通常都是很小的，所以，这种极化过程将是很缓慢的，它是形成时间从几十分之一秒到几分钟，甚至有长达几小时的。因此，这种性质的极化只有在低频时才有意义。

显然，这种极化也伴随着能量损耗。

## §1-2 电介质的介电常数

### 1-2-1 气体介质的介电常数

由于气体物质分子间的距离很大，即密度很小，因此，气体的极化率很小，故一切气体的介电常数都接近于1。表1-2-1列出了某些气体的介电常数。

任何气体的介电常数均随温度的升高而减小，随压力的增大而增大，但影响都很小。

表 1-2-1 某些气体的介电常数

气体种类	氦	氢	氧	氮	甲烷	二氧化碳	乙烯	空气
介电常数 $\epsilon$ (20°C, 1atm)	1.000072	1.00027	1.00055	1.00060	1.00095	1.00096	1.00138	1.00059

### 1-2-2 液体介质的介电常数

1. 中性液体介质 中性液体介质的介电常数不大，其



值在1.8~2.8范围内。介电常数与温度的关系是和单位体积中分子数与温度的关系接近一致。

石油、苯、四氯化碳、硅油等均为中性液体介质。

2. 极性液体介质 这类介质通常都具有较大的介电常数，如果作为电容器的浸渍剂，可使电容器的比电容增大。这类介质的缺点是在交变电场中的介质损较大，故高压绝缘中很少应用，只有蓖麻油和几种合成液体介质在某些场合时有应用。

下面讨论影响极性液体介质介电常数的主要因素。

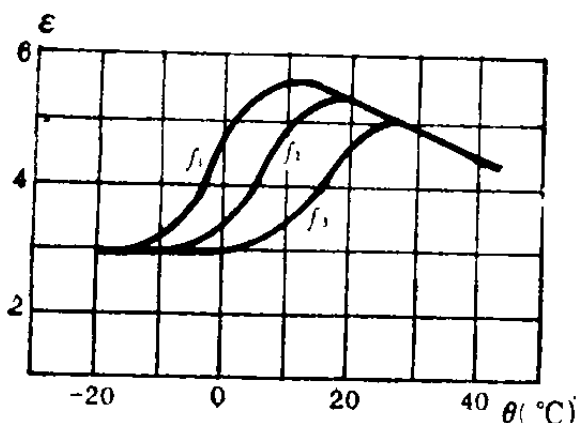


图1-2-1 氯化联苯的介电常数与温度的关系

频率  $f_3 > f_2 > f_1$

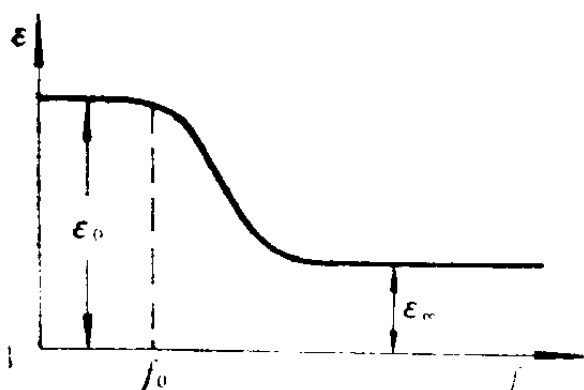


图1-2-2 极性液体介质的介电常数与频率的关系

(1) 介电常数与温度的关系。举例如图1-2-1所示。低温时分子间的束缚力强，转向较难，转向极化对介电常数的贡献较小；当温度升高后，分子间的束缚力减弱，转向较易，转向极化对介电常数的贡献就较大；另一方面，温度升高时，分子的热运动又使极性分子趋于无序的排列，阻碍了转向极化，所以当温度进一步升高时，介电常数趋向减小。

(2) 介电常数与电场频率的关系。电场频率对极性液体的介电常数影响很大，图1-2-2示出了其间的关系。当频率相当低时，