

# 第 6 篇

## 电力电容器

---

## 第 6 篇

# 电力电容器

---

**主编单位** 西安电力电容器研究所

**编写单位** 西安电力电容器研究所  
南京电力电容器厂

**主 编** 沈文琪

**编 写 人** 沈文琪 房金兰 江正平 周光辉

**主 审** 房金兰

---

# 常用符号表

|                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| $A_t$ ——熔丝熔化能量        | $L$ ——电容器极板长度        |
| $B$ ——电容器心子宽度         | $N$ ——元件数            |
| $b$ ——电容器极板宽度         | $n$ ——谐波次数, 介质层数     |
| $C$ ——电容, 实测电容        | $P_q$ ——电容器容量        |
| $C_N$ ——额定电容          | $P$ ——损耗功率           |
| $D$ ——极间距离            | $R$ ——实测电阻, 放电电阻     |
| $d$ ——极间介质厚度          | $R_s$ ——方阻           |
| $E$ ——电场强度            | $SF$ ——元件占空系数        |
| $E_{av}$ ——元件平均工作电场强度 | $\tan\delta$ ——损耗角正切 |
| $f$ ——频率              | $U_B$ ——击穿电压         |
| $H$ ——电容器心子高度         | $U_N$ ——额定电压         |
| $I_c$ ——电容电流          | $X_L$ ——串联电抗器电抗      |
| $I_m$ ——工频稳态电流峰值      | $X_C$ ——并联电容器电抗      |
| $K$ ——元件压紧系数          |                      |



# 第 1 章 概 论

电力电容器是一种用于电力网络的电容器，在电力系统、高电压试验、激光技术、高能物理、工农业生产和日常生活中都有着广泛的应用。目前，随着电力工业的不断发展，电力电容器与电力电容器装置已形成了多种类型和品种。

## 1 分类和用途

电力电容器及其装置按用途的分类见表 6·1-1 和表 6·1-2。

表 6·1-1 电力电容器的分类和用途

| 系列代号 | 名 称         | 额 定 值①                                                      | 标 准 号                     | 主 要 用 途                                                                               |
|------|-------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| B    | 高电压并联电容器    | 电压：1.05~35kV<br>容量：30~334kvar 和 1000~5000kvar               | GB3983—2<br>IEC871—1      | 并联连接于 50Hz 或 60Hz 交流电力系统中，用于补偿感性无功功率，改善功率因数，改善电压质量，降低线路损耗，提高系统或变压器的有功输出               |
|      | 低电压并联电容器    | 电压：0.23~1.00kV<br>容量：5~50kvar                               | GB3983—1<br>IEC831—1      |                                                                                       |
|      | 自愈式低电压并联电容器 | 电压：0.23~1.00kV<br>容量：1~150kvar                              | GB12747<br>IEC831—1       |                                                                                       |
|      | 集合式并联电容器    | 电压：3.15~38.5kV<br>容量：单相 1667~10000kvar<br>三相 1000~20000kvar | JB7112                    |                                                                                       |
| C    | 串联电容器       | 电压：0.6~2.0kV<br>容量：20~100kvar                               | GB6115<br>IEC143          | 串联连接于 50Hz 或 60Hz 的交流电力系统中，用来补偿电力线路的感抗，减少线路电压降落，增大传输容量，提高线路的稳定性                       |
| A    | 高电压交流滤波电容器  | 电压：4.2~15.6kV<br>容量：30~334kvar                              | ZB K48 004—99<br>IEC871—1 | 与别的器件连接在一起组成交流滤波器，并联连接于 50Hz 或 60Hz 的高压交流电力系统中，用来对一种或多种谐波电流提供低阻抗通道，降低网络谐波水平，改善系统的功率因数 |
| E    | 交流电动机电容器    | 电压：0.11~0.66kV<br>电容：1.0~10.0μF                             | GB3667<br>IEC358          | 向电动机辅助绕组提供超前电流，帮助电动机启动                                                                |
| O    | 耦合电容器及电容分压器 | 电压：10/√3 ~500/√3 kV<br>电容：3500~20000pF                      | GB4705<br>IEC358          | 在电力线路载波 (PLC) 系统中使高频载波装置在低电压下与高压线路耦合，实现载波通信以及测量、保护和控制                                 |
| R    | 电热电容器       | 电压：0.375~3.00kV<br>容量：90~3200kvar                           | GB3984<br>IEC110          | 在频率 40~24000Hz 范围内的感应加热电气系统中，用于提高功率因数或改善回路特性                                          |
| J    | 断路器电容器      | 电压：40~180kV<br>电容：1000~3900pF                               | GB4784                    | 并联连接在交流高压断路器的断口上，用以改善电压分布                                                             |

(续)

| 系列代号 | 名 称       | 额 定 值①                                                                                  | 标 准 号  | 主 要 用 途                                      |
|------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------------------|
| M    | 脉冲电容器     | 电压：1~500kV<br>电容：0.002~400μF                                                            | GB4704 | 主要用于冲击电压、冲击电流发生器，冲击分压器、振荡回路和连续脉冲装置           |
| Y    | 压缩气体标准电容器 | 电压：10~1200kV<br>电容：20~100pF                                                             | JB1811 | 与高压电桥相配合，用于测量绝缘介质的和高压电气设备的损耗角正切和电容，也可作分压电容器用 |
| F    | 防护电容器     | 电压： $10.5/\sqrt{3} \sim 20/\sqrt{3}$ kV<br>电容： $1.0 \times 10^{-2} \sim 6.8\mu\text{F}$ |        | 用于降低过电压的峰值，配合避雷器保护发电机和电动机                    |
| D    | 直流滤波电容器   | 电压：12~100kV<br>电容：0.01~680μF                                                            |        | 用于高压整流滤波装置及高压直流输电（HVDC）中                     |

注：表中为常用额定值的范围，根据需要也可制造其他额定值的电容器。

① 参见基础卷（一）第 5 篇第 7 章 2 节。

表 6-1-2 电力电容器装置的分类和用途

| 系列代号 | 名 称      | 额定值、主接线、保护和控制                                                                                                            | 组 成 和 用 途                                                                                                |
|------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BB   | 并联电容器装置  | 电压：0.4~66kV<br>容量：90~60000kvar<br>接线：1kV 以上为单Y或双Y<br>1kV 及以下为单Y或单Δ<br>保护：过流、过压、失压、中性线电流不平衡保护、单台熔断器保护和内部熔丝保护等<br>控制：手动或自动 | 由并联电容器组、开关、串联电抗器、放电线圈、氧化锌、避雷器、接地装置、投切、保护控制屏、组架及框体等组成，主要用来与 50Hz 或 60Hz 交流电力系统并联连接，补偿感性无功功率，改善电压质量、降低线路损耗 |
| YD   | 电容式电压互感器 | 电压： $66/\sqrt{3} \sim 500/\sqrt{3}$ kV<br>二次绕组额定电压： $100/\sqrt{3}$ kV<br>准确等级：0.2~1 级<br>二次线圈额定容量：50~300VA<br>频率：50Hz    | 由耦合电容器、电容分压器、中压变压器、电抗器和阻尼器等组成<br>主要接在线与地之间，用来获得准确的二次电压，作高电压输配电系统的电压测量、保护和控制之用，并可兼作电力线载波耦合装置中的耦合电容器之用     |
| CY   | 冲击电压发生器① | 电压：400~6000kV<br>电容：0.01~0.1μF                                                                                           | 由高压脉冲电容器、球隙、电阻器、高压直流电源和控制、计算设备等组成<br>可由较低电压、较小功率的电源产生短时高电压、大功率的具有规定波形的冲击电压                               |
| CL   | 冲击电流发生器① | 电压：20~30kV<br>电流：5~500kA                                                                                                 | 由脉冲电容器、球隙、电阻器、直流充电电源等组成，可产生 $10^5 \sim 10^6$ A 的冲击电流                                                     |

① 参见基础卷（一）第 5 篇第 7 章 3 节。

## 2 基本概念

### 2.1 电容器的电容

电容器的电容是表征电容器储存电荷能力的参量。

#### 1. 平板电容器的电容

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 S / D \quad (\text{F}) \quad (6.1-1)$$

式中  $\epsilon_0$ ——真空介电常数<sup>①</sup> ( $\epsilon_0 \approx 8.86 \times 10^{-12} \text{F/m}$ );

$S$ ——极板面积 ( $\text{m}^2$ );

$D$ ——极间距离 ( $\text{m}$ );

$\epsilon_r$ ——相对介电常数 (相对电容率)。

2. 卷绕式电容器的电容 由于极板两面起作用, 其电容值约等于展开成平面长条时的两倍, 即

$$C \approx 2 \times 8.86 \times 10^{-12} \frac{\epsilon_r b l}{d} \quad (\text{F}) \quad (6.1-2)$$

式中  $b$ ——极板宽度 ( $\text{m}$ );

$l$ ——极板长度 ( $\text{m}$ );

$d$ ——极间介质厚度 ( $\text{m}$ )。

### 2.2 电容器的储能

电容器的储能是指在充了电的电容器极板间所储存的静电能量, 即

$$W = \frac{1}{2} C U^2 \quad (\text{J}) \quad (6.1-3)$$

式中  $C$ ——电容器的电容 ( $\text{F}$ );

$U$ ——电容器极板间的电压 ( $\text{V}$ )。

### 2.3 电容器的容量

在交流电压作用下, 电容器的容量或无功功率为

$$P_q = I_c U = 2\pi f C U^2 \times 10^{-3} \quad (\text{kvar}) \quad (6.1-4)$$

式中  $I_c$ ——电容器的电容电流 ( $\text{A}$ );

$U$ ——外施电压 ( $\text{kV}$ );

$f$ ——频率 ( $\text{Hz}$ );

$C$ ——电容器的电容 ( $\mu\text{F}$ )。

### 2.4 比能、比特性和储能因数

比能是指直流电容器在直流电压作用下单位体积的介质所储存的能量, 即

$$\frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad (\text{kJ/L}) \quad (6.1-5)$$

式中  $W$ ——能量 ( $\text{kJ}$ );

$V$ ——体积 ( $\text{L}$ );

$E$ ——电场强度 ( $\text{MV/m}$ )。

比特性是指交流电容器单位容量 ( $\text{kvar}$ ) 所用介质的数量, 即

#### 1. 体积比特性 $V/P_q$

$$V/P_q = 1/2\pi f \epsilon_0 E^2 \epsilon_r \quad (\text{L/kvar}) \quad (6.1-6)$$

式中  $V$ ——电介质的体积 ( $\text{L}$ );

$P_q$ ——电容器的容量 ( $\text{kvar}$ )。

#### 2. 质量比特性 $m/P_q$

$$m/P_q = \rho/2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad (\text{kg/kvar}) \quad (6.1-7)$$

式中  $m$ ——电介质的质量 ( $\text{kg}$ );

$\rho$ ——电介质的密度 ( $\text{kg/L}$ )。

比能和比特性是评价电力电容器技术经济性能的综合指标, 均决定于  $\epsilon_r E^2$ 。这个  $\epsilon_r E^2$  即电容器介质的储能因数。

### 2.5 电容器的损耗和损耗角正切

电容器在交流电压作用下, 在产生无功功率的同时, 其内部介质、内部熔丝、内部放电器件、内部连接导线等都会产生一定的有功损耗, 这些有功损耗的总和就构成了电容器的损耗, 通常用  $P$  ( $\text{W}$ ) 来表示。

电容器单位无功功率的损耗, 即损耗与无功功率的比值是衡量电容器效率和质量的重要参数, 称为电容器的损耗角正切, 用  $\tan\delta$  表示, 即

$$\tan\delta = P/P_q \quad (6.1-8)$$

电容器的损耗要消耗电能, 使电容器发热, 因此, 电容器的损耗和  $\tan\delta$  应越低越好。

### 2.6 自放电时间常数 $RC^{[1]}$

电力电容器的绝缘电阻  $R$  与电容  $C$  的乘积  $RC$  是一个与电容器的极板面积、极间介质厚度无关, 仅取决于介质的体积电阻率  $\rho_v$  和电容率  $\epsilon$  的值, 可用式 (6.1-9) 表示

$$RC = \frac{\epsilon \rho_v}{3.6\pi} \times 10^{-12} \quad (\Omega \cdot \text{F}) \quad (6.1-9)$$

由同一种介质制造的电容器其  $\epsilon$  基本相同, 所以电容器的  $RC$  值主要决定于介质的  $\rho_v$ , 它是一个表征电容器, 特别是直流电容器性能优劣和制造工艺是否良好的重要参数。

### 2.7 电力电容器的无功补偿

1. 并联无功补偿 电力负载通常由电阻和电抗两部分组成, 图 6.1-1 为负载的等效电路与相量图。

① IEC 和 ISO 称此量为“电常数”。

如图 6·1-1 所示, 闭合开关 S 将并联电容器投入电网后, 由于电容器的容性电流  $I_C$  的相位角正好与电抗  $L$  的感性电流  $I_L$  的相位角相差  $180^\circ$ , 线路电流从  $I_0$

减少到  $I$ , 从而使电力负载侧的功率因数从  $\cos\varphi_0$  提高到  $\cos\varphi_1$ , 线路损耗和电压降落随之减小, 设备的有效容量和裕度相应增大。并联电容器的上述作用就称为

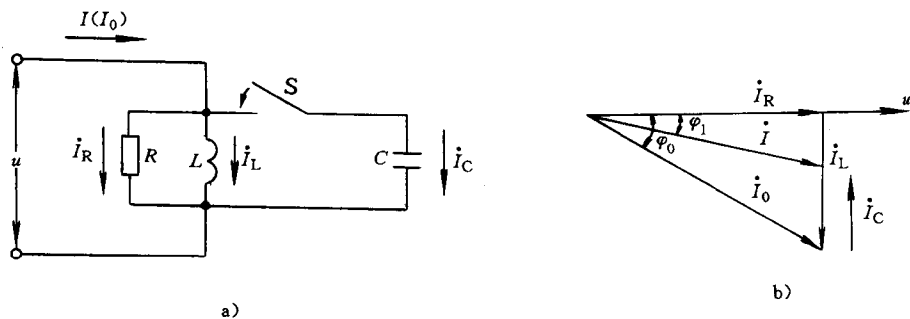


图 6·1-1 电力负载的等效电路和相量图  
a) 等效电路 b) 相量图

并联无功补偿。

2. 串联无功补偿 图 6·1-2 是串接有电容器的输电线路原理图。

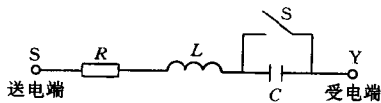


图 6·1-2 串接有电容器的输电线路原理图

打开开关 S, 电容器 C 串联接入输电线路, 电容器的容抗  $X_C$  抵消输电线路的部分感抗, 使输电线路的压降减小, 等效输电距离缩短。电容器在输电线路中的上述作用就称为串联无功补偿。在长距离输电线路中, 串联无功补偿可大幅度地提高线路的输电能力, 提高末端电压, 改善电压质量和系统的稳定度。

2.8 额定值

电力电容器的额定值主要是指额定电压、额定电流、额定电容、额定频率和额定容量, 其定义见相应的产品标准。

2.9 使用环境条件

电力电容器的环境条件主要是指户内、户外、安装地点的海拔高度、环境温度、湿度、污秽程度、风速和地震烈度等。

3 介质和介质材料<sup>[2][3]</sup>

电容器介质主要起储能作用, 通常由两种或多种介质材料组成。电容器的性能与所用介质材料、介质结构、制造工艺有关。对电容器用介质材料的主要要求

是: 电容率大、耐电强度高、损耗角正切 ( $\tan\delta$ ) 小、体积电阻率 ( $\rho_v$ ) 高、耐老化性能好、工艺性好、与其他材料的相容性好、价格低、来源广、不污染环境, 并对人体无害或基本无害等。

3.1 固体介质<sup>[4]</sup>

电力电容器中常用的固体介质主要是塑料薄膜和电容器纸, 它们都具有优良的电气性能, 易于加工成均匀薄层, 便于绕卷, 有一定的抗张强度, 与液体介质的相容性优良。尤其是双轴定向聚丙烯薄膜 (PP 膜) 具有很高的耐电强度和很低的介质损耗, 在电力电容器中正在逐步取代传统的油浸纸介质。

3.1.1 塑料薄膜<sup>[5]</sup>

电力电容器常用的塑料薄膜有聚丙烯薄膜和聚酯薄膜, 其基本性能见表 6·1-3。聚丙烯薄膜常用于交流电容器, 聚酯薄膜常用于直流电容器和高压脉冲电容器。

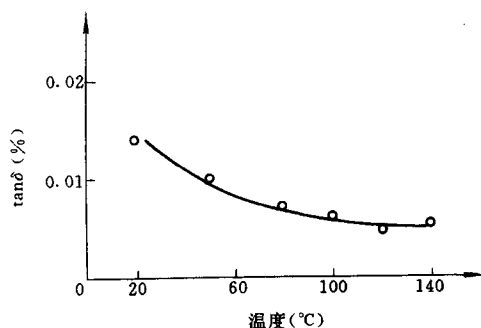
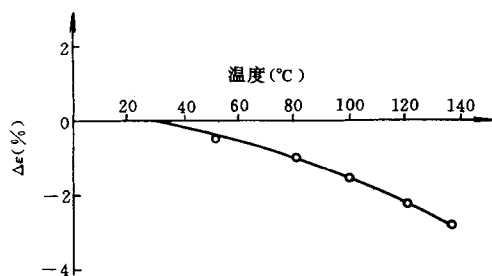
表 6·1-3 电容器常用塑料薄膜的性能

| 性 能                           | 聚丙烯薄膜         | 聚酯薄膜         |
|-------------------------------|---------------|--------------|
| 密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 0.91          | 1.39         |
| 吸水率 (24h 内) (%)               | <0.01         | 0.3~0.4      |
| 工作温度 ( $^\circ\text{C}$ )     | -50~105       | -60~130      |
| 抗张强度 (MPa) 纵向                 | $\geq 118$    | 147~206      |
| 抗张强度 (MPa) 横向                 | $\geq 137$    | 147~196      |
| 电容率 (50Hz)                    | 2.2           | 3.2          |
| 介质损耗角正切 (50Hz)                | $\leq 0.0002$ | $\leq 0.003$ |

(续)

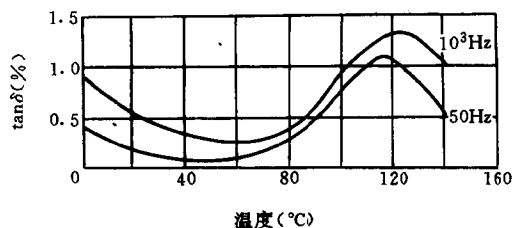
| 性能                                            | 聚丙烯薄膜                  | 聚酯薄膜                   |
|-----------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 体积电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )            | $10^{15} \sim 10^{17}$ | $10^{16} \sim 10^{17}$ |
| 耐电强度 (MV/m) D.C.                              | 200~600                | >160                   |
| 热导率 [ $\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ ] | $2.2 \times 10^{-3}$   | $15 \times 10^{-3}$    |

在电力电容器中, 作介质用的薄膜均为电工专用薄膜。各种因素对薄膜性能的影响见图 6-1-3~图 6-1-8。

图 6-1-3 聚丙烯薄膜的  $\tan\delta$  与温度的关系图 6-1-4 聚丙烯薄膜的  $\Delta\epsilon$  (%) 与温度的关系

$$\Delta\epsilon (\%) = \frac{\epsilon_t - \epsilon_{20}}{\epsilon_{20}} \times 100\%$$

$\epsilon_t$ — $t$  (°C) 时的电容率  $\epsilon_{20}$ —20°C 时的电容率

图 6-1-5 聚酯薄膜的  $\tan\delta$  与温度的关系

聚丙烯薄膜的常用厚度为 6~20 $\mu\text{m}$ 。根据聚丙烯薄膜的表面状态, 又有光膜、单面粗化膜、双面粗化膜和电晕处理膜之分。光膜适于作膜纸复合介质, 单面粗

化膜和双面粗化膜适于作全膜电容器的介质, 电晕处理膜经金属蒸镀后用来制造自愈式电容器。

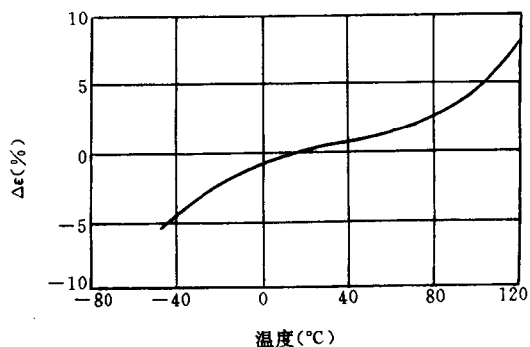
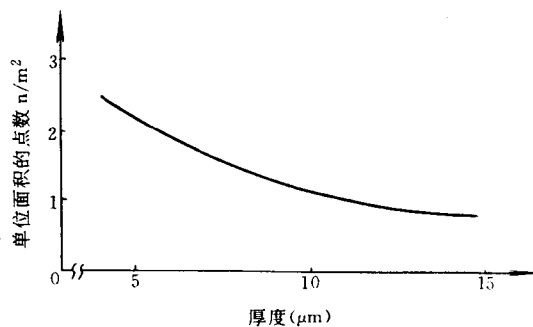
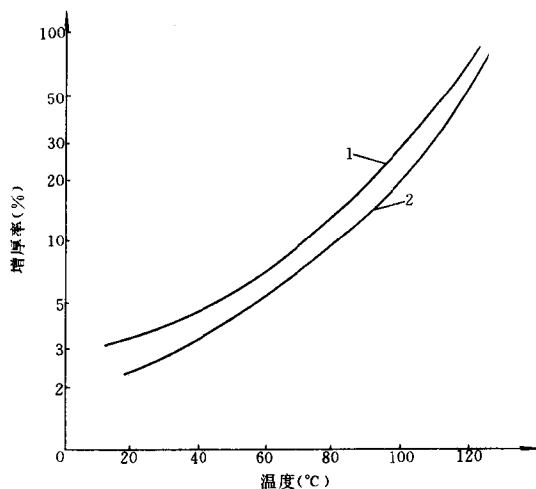
图 6-1-6 聚酯薄膜的  $\Delta\epsilon$  (%) 与温度的关系图 6-1-7 聚丙烯薄膜在 200MV/m (DC) 的电场强度  $F$ , 每  $\text{m}^2$  的导电点数  $n$  与厚度的关系

图 6-1-8 R 型聚丙烯薄膜在烷基苯和二芳基乙烷中的增厚率与温度的关系

1—在烷基苯 (AB) 中 2—在二芳基乙烷 (PXE) 中

3.1.2 电容器纸<sup>[4][6]</sup>

电容器纸是电容器的传统介质材料，由优质的纸浆经过脱水、碾压后制成。在电容器纸中含有大量相互重叠的扁平状纤维和空隙，此外，还含有一定量的半纤维素和木质素。纸的紧度大，纸中纤维素的含量就多，其电容率和介质损耗角正切就高，见图 6.1-9~图 6.1-11。电容器纸的性能很大程度上决定于所用纸浆

的质量和造纸工艺。造纸时所用水的质量对纸的电气性能影响也很大，通常应采用高纯水或去离子水。

电力电容器用的电容器纸在电容器纸的国家标准 GB12913—91 中属 B 类纸，其主要性能规格见表 6.1-4。与塑料薄膜相比，电容器纸的电容率较高，浸渍性能和耐电弧能力较优，但其耐电强度较低，每平方米的导电点数  $n$  较多，介质损耗角正切较大，在生产过程中要消耗大量优质木材，有被塑料薄膜逐步取代的趋势。

表 6.1-4 电力电容器用电容器纸的性能

| 型 号   | 厚 度<br>( $\mu\text{m}$ ) | 紧 度<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 透 气 度<br>( $\text{mL}/\text{min}$ ) | 导 电 点<br>( $\text{n}/\text{m}^2$ ) | 交流击穿电压<br>(V) | $\tan\delta \times 10^{-3}$<br>( $60^\circ\text{C}$ ) |
|-------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------|
| B-1 型 | 10                       | 1.0                               | 0.5~7                               | 30~300                             | 300~450       | 1.5~1.7                                               |
|       | 12                       |                                   | 0.1~5                               | 10~150                             | 325~470       | $\leq 1.7$                                            |
|       | 15                       |                                   | 0.3~5                               | $\leq 80$                          | 350~500       | $\leq 1.7$                                            |
| B-1 型 | 8                        | 1.2                               | 0.9~3                               | 40~800                             | 310~430       | 1.6~2                                                 |
|       | 10                       |                                   | 0.5~3                               | 50~400                             | 350~450       | $\leq 2$                                              |
|       | 12                       |                                   | 0.7~3                               | 30~200                             | 380~670       | $\leq 2$                                              |
|       | 15                       |                                   | 0.2~2                               | 10~100                             | 430~600       | 1.8~2                                                 |

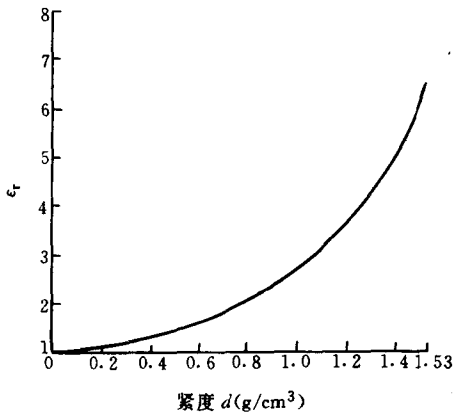


图 6.1-9 干纸的电容率与紧度的关系 (100℃)

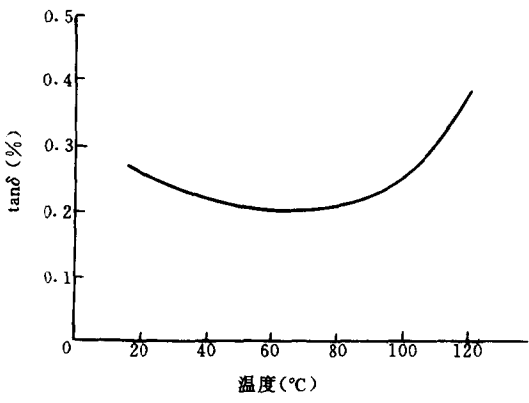


图 6.1-11 干纸的  $\tan\delta$  与温度的关系

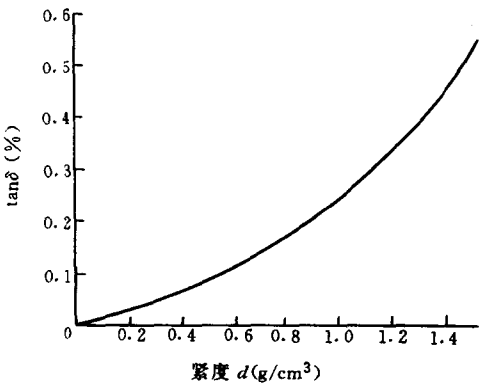


图 6.1-10 干纸的  $\tan\delta$  与紧度的关系 (100℃)

塑料薄膜和电容器纸的其他性能，参见基础卷 (一) 第 6 篇第 8 章 4 节和 9 节。

3.2 液体介质<sup>[7][8][9]</sup>

液体介质在电力电容器中用以浸渍固体介质和填充电容器内部的空隙，液体介质的开发和性能的提高在电力电容器产品的发展中起着十分重要的作用。

在电力电容器中常用的液体介质有：苄基甲苯 (代号为 M/DBT，法国商品名为 C101 或 C111)、二芳基乙烷 (PXE，日本商品名为日石 S 油)、异丙基联苯 (IPB、美国商品名为 Wencol)，十二烷基苯 (代号为 DDB 或 AB) 和 SAS-40 绝缘油。矿物质绝缘油在电容器中已很少采用。在表 6.1-5 中列出了电力电容器用

液体介质的性能。其中苄基甲苯、二芳基乙烷、异丙基联苯和 SAS-40 绝缘油均具有优良的电气物理性能,与聚丙烯薄膜、聚酯薄膜及其他电容器中的材料均具有良好的相容性,毒性低,适于在全膜电容器中作浸渍剂。尤其是苄基甲苯和 SAS-40 绝缘油,除了具有优良的电气性能之外,还具有优良的低温性能,适于用来浸渍在寒冷地区运行的电容器。

硅油具有优良的耐燃性,基本无毒,但价格较贵,适于用来浸渍在机车、轮船、矿井等特殊场合用的电容器。

蓖麻油是从蓖麻籽中提炼出来的植物油,耐电弧能力强,击穿时无碳粒,在高温高场强下会在极板表面生成一层聚合物保护膜,使电容器具有较长的寿命。由于其  $\tan\delta$  高、粘度大,所以不适于用来作交流箔式电容器的浸渍剂,较适于用来浸渍纸介质或膜纸复合介质直流电容器和长寿命、高比能脉冲电容器。这种油在某些自愈式低压并联电容器中也有应用。

电容器用电气绝缘油的性能与温度有关,见图 6-1-12~图 6-1-17 和图 6-1-19。在图 6-1-18 中列出了 PXE 对聚丙烯薄膜的浸润性。

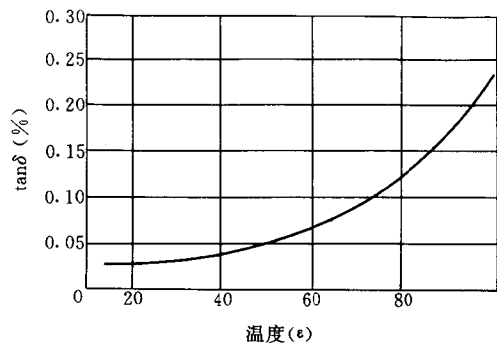
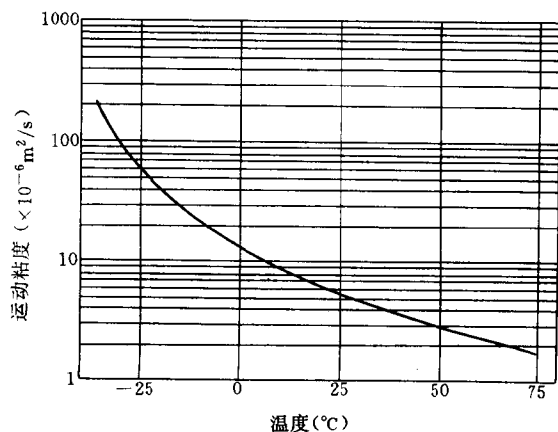
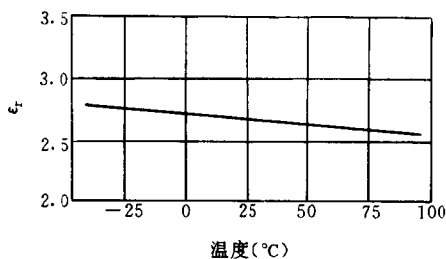
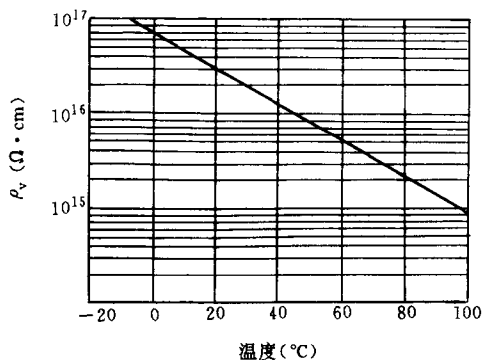
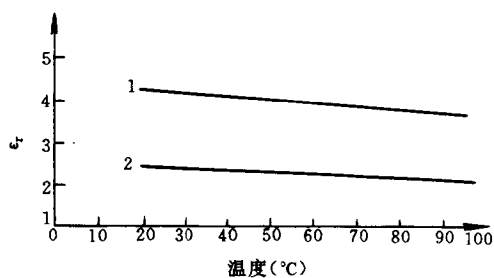
图 6-1-12 苄基甲苯的  $\tan\delta$  与温度的关系

图 6-1-13 苄基甲苯的运动粘度与温度的关系

图 6-1-14 苄基甲苯的  $\epsilon_r$  与温度的关系图 6-1-15 苄基甲苯的  $\rho_v$  与温度的关系图 6-1-16 蓖麻油和十二烷基苯的  $\epsilon_r$  与温度的关系

1—蓖麻油 2—十二烷基苯

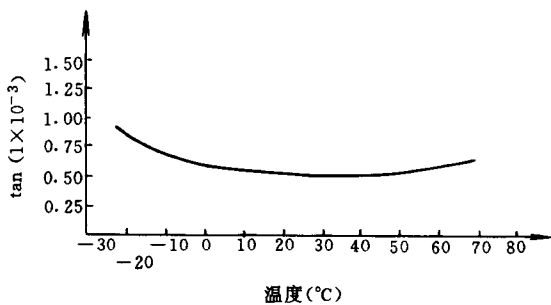
图 6-1-17 二芳基乙烷的  $\tan\delta$  与温度的关系

表 6-1-5 电力电容器用液体介质的性能<sup>[9]</sup>

| 性 能                                           |      | 十二烷基苯<br>(AB)      | 二芳基乙烷<br>(PXE)       | 异丙基联苯<br>(IPB)       | 苄基甲苯<br>(M/DBT)    | 枯基苯基乙<br>烷 (CPE)   | 苯甲基硅油              | 蓖 麻 油                | SAS-40             |
|-----------------------------------------------|------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> )<br>20℃                |      | 0.87               | 0.99                 | 0.99                 | 1.00               | 0.96               | 1.01               | 0.96                 | 0.95~1.00          |
| 运动粘度<br>(×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s) | 20℃  | 9                  | 9.6                  | 8.5                  | 6.5                | 7.0                | 20~300             | 13.7 (60℃)           | 2.4~2.7            |
|                                               | -30℃ |                    | 800                  | 650                  | 100                | 250                |                    |                      | 51.1<br>(-40℃)     |
| 凝固点 (℃)                                       |      | -60                | -45                  | -50                  | <-60               | -60                | -65                | -17                  | <-60               |
| 闪点 (℃)                                        |      | 135                | 148                  | 155                  | 140                | 152                | 280                | 250                  | 130                |
| 芳香度 (%)                                       |      | 17                 | 44                   | 56                   | 65                 | 45                 |                    |                      |                    |
| ε 25℃                                         |      | 2.17               | 2.51                 | 2.83                 | 2.65               | 2.44<br>(80℃)      | 2.63~2.8           | 4.2                  | 2.46~2.54          |
| tanδ (%) 80℃                                  |      | 0.02               | 0.03                 | 0.04                 | 0.02               | 0.03               | 0.04               | 2.00                 | 0.01               |
| ρ <sub>v</sub> (Ω·cm)                         | 20℃  | 5×10 <sup>14</sup> |                      |                      |                    |                    | 1×10 <sup>14</sup> | 5×10 <sup>12</sup>   |                    |
|                                               | 90℃  | 2×10 <sup>14</sup> | 2.6×10 <sup>14</sup> | 5.3×10 <sup>13</sup> | 8×10 <sup>14</sup> | 3×10 <sup>14</sup> |                    | 3.6×10 <sup>12</sup> | 8×10 <sup>14</sup> |
| 比色散                                           |      | 128                | 190                  |                      | 207                | 180                | 118                | 103                  |                    |
| 击穿电压<br>(kV/2.5mm)                            |      | 70                 | 65                   | 70                   | >70                | 60                 | 45                 | 45                   | 60                 |
| 与 PP 膜的相容性                                    |      | 较差                 | 较好                   | 好                    | 好                  | 好                  | 好                  | 好                    | 好                  |
| 放气性<br>(μL/min)                               | 30℃  |                    | -120                 | -120                 | -140               | -120               |                    |                      | -160               |
|                                               | -40℃ |                    | -66                  | -64                  | -66                | -68                |                    |                      |                    |

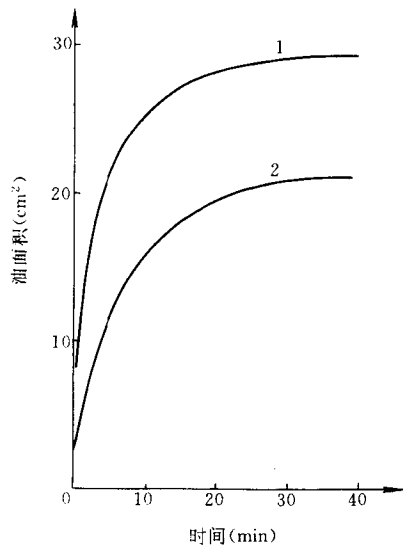


图 6-1-18 二芳基乙烷在聚丙烯薄膜表面上的扩散面积与时间的关系  
1—  
在粗化膜上 2—  
在光膜上

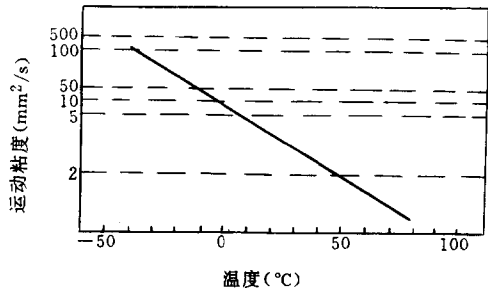


图 6-1-19 SAS40 的运动粘度与温度关系

3.3 气体介质

在电力电容器中常用的气体介质有六氟化硫(SF<sub>6</sub>)、氮气(N<sub>2</sub>)和干燥空气等,其主要性能见表 6-1-6。

气体介质的特点是 tanδ 小,ε<sub>r</sub> 值稳定,适于用来作压缩气体标准电容器的介质。气体介质的耐电强度与气压有关,随气压的升高,气体介质的耐电强度开始时增强较快,到一定气压后,耐电强度的增强变慢。例如,在同心圆柱形电极间的近似均匀电场中,当氮的气

表 6-1-6 电力电容器常用气体介质的性能

| 名 称  | 密 度<br>(g/dm <sup>3</sup> )25℃ | 凝 聚 点<br>(℃) | 沸 点<br>(℃) |
|------|--------------------------------|--------------|------------|
| 六氟化硫 | 6.10                           | -51          | -63.8      |
| 氮气   | 1.25                           | -210         | -195       |
| 空气   | 1.18                           | -213         | -192       |

| 名 称  | $\epsilon_r$ |                | 与空气耐<br>电强度之比 |
|------|--------------|----------------|---------------|
|      | 压力为<br>98kPa | 压力为<br>1960kPa |               |
| 六氟化硫 | 1.00910      | 1.0109         | 2.3~2.5       |
| 氮气   | 1.00059      | 1.0210         | 1.0           |
| 空气   | 1.00058      | 1.0109         | 1.0           |

体压力达到 $(15\sim 20)\times 10^5\text{Pa}$ ,六氟化硫气体压力达到 $(6\sim 8)\times 10^5\text{Pa}$ 时,再增高气压,上述气体的耐电强度随气压升高的比率显著变小。因此,充 $\text{SF}_6$ 气体的压缩气体标准电容器,其内部气压通常为 $(4\sim 6)\times 10^5\text{Pa}$ ,充 $\text{N}_2$ 的压缩气体标准电容器的内部气压在 $(13\sim 15)\times 10^5\text{Pa}$ 的范围内。这时,上述气体的耐电强度可达到 $10\sim 12\text{V}/\mu\text{m}$ 。

使用 $\text{SF}_6$ 时应注意以下事项:

(1)电容器内部所有零部件必须经过充分干燥,要严格防止外界水分的浸入,尽量不要在电容器内部采用含硅的材料,如硅橡胶密封件等。

(2)要采用符合标准的高纯度的 $\text{SF}_6$ ,充气时应通过干燥器缓缓充入。

(3)在长期使用中有可能产生有毒物质,因此在换气或重新充气时要注意通风并采取一定的防范措施。

#### 4 关键技术和产品的发展方向<sup>[3][9][10]</sup>

##### 4.1 关键技术

(1)研究和改进铝箔折边、铝箔压花、铝箔端部焊

接工艺,它是发展高性能全膜介质电力电容器的关键技术。

(2)研究全膜电容器的真空干燥、浸渍工艺,大幅度缩短处理周期,提高处理的质量和效率。

(3)进一步研究、开发和应用新一代性能更为优良的介质材料,特别是液体介质材料。

(4)研究和开发电容器箱壳气体保护焊技术和自动焊接设备,大幅度提高电容器箱壳的焊接质量和密封性。

##### 4.2 产品的发展方向

(1)全膜介质电力电容器的有功损耗小、温升低、材料消耗少、使用寿命长、可靠性高,是国内外电力电容器产品的发展方向。

(2)电力电容器产品从单台向成套装置发展,是国内外电力电容器发展的另一发展方向。今后,电容式电压互感器(CVT)、高电压并联成套装置、交流滤波成套装置、静止无功补偿装置、电气化铁道专用无功补偿装置等,在我国必将有一个很大的发展。

(3)发展不燃或阻燃型电容器,以满足城市电网,特别是大楼中变电设备无油化、阻燃、不燃的要求。

(4)电容式电压互感器向高精度大容量方向发展,逐步向0.2级300VA、0.5级600VA的国际水平看齐,提高产品的密封性和外在质量。

(5)自愈式电容器在使用寿命、可靠性、电压等级等方面将得到进一步的发展,使用范围也将扩大。

(6)进一步研制高比能、长寿命、低电感脉冲电容器,以满足高能物理、高电压技术、激光技术等领域的需要。

## 第2章 高电压并联电容器<sup>[11][12]</sup>

### 1 结构<sup>[13]</sup>

高电压并联电容器,通常为油浸式,主要由元件、绝缘件、连接件、出线套管和箱壳等组成,在有的电容器内部还设有放电电阻和熔丝,在1000kvar以上的电容器中常设有油补偿装置和放电线圈。高电压并联电容器的外形及内部结构如图6-2-1。

电容器元件、绝缘件等的制造和装配均应在高度洁净的环境中进行,然后按工艺要求对电容器进行严格的真空干燥浸渍处理,除去水分、空气等,并用经过预处理的洁净绝缘油进行充分的浸渍。最后进行封口,使其内部介质不与大气相通,防止介质受大气作用发生早期老化,影响电容器的使用寿命和可靠性。因而保持电容器的密封性是十分重要的。参见基础卷(一)第

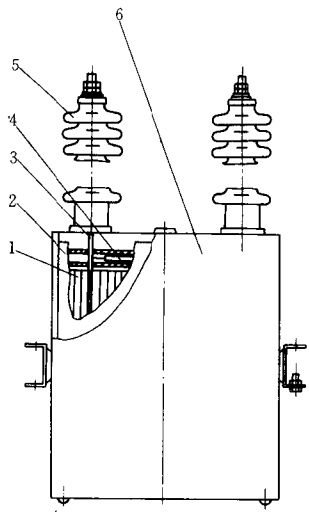


图 6·2-1 高电压并联电容器的外形及内部结构  
1—元件 2—绝缘件 3—连接件  
4—内放电电阻 5—出线套管 6—箱壳

7 篇第 4 章 4 节。

### 1·1 元件

元件是电容器的基本电容单元。高压并联电容器中的元件通常由 4~10 张薄层介质与 2 张铝箔如图 6·2-2 所示相互重叠配置后绕卷、压扁而成。

缩箱插引线片结构是电容器元件的传统结构，其极板利用率高，生产工艺简单，但由于在铝箔边缘常具有肉眼看不见的毛刺和尖角，使元件边缘的电场集中，在过电压的作用下，电场集中的地方首先发生局部放电。为了防止早期损坏，电容器只能在较低的电场强度下工作，从而限制了电容器储能因数  $\epsilon_r E^2$  的提高。

铝箔凸出折边结构是针对缩箱插引线片结构的缺点而提出的一种新型结构，其特点如图 6·2-2 a、c 所示，上、下两张铝箔分别向一边凸出于固体介质之外，铝箔的另一边则向内折边，并处于固体介质层之内。这样就消除铝箔边缘的毛刺和尖角对边缘电场分布的不

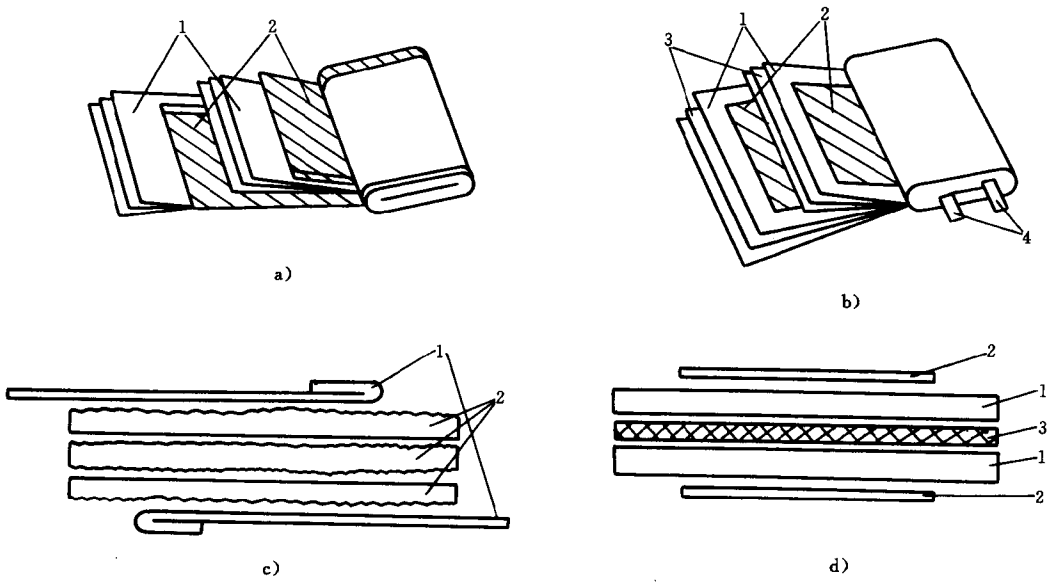


图 6·2-2 元件结构  
a)、c) — 铝箔凸出折边结构 b)、d) — 缩箱插引线片结构  
1—薄膜 2—铝箔 3—电容器纸 4—引线片

良影响，使电容器元件的起始局部放电场强和熄灭局部放电场强大幅度提高， $\epsilon_r E^2$  得以增大。在表 6·2-1 中列出了由两层  $12\mu\text{m}$  厚的粗化聚丙烯薄膜浸 M/DBT 和 IPB 绝缘油为介质的电容器元件，在不同温度下测得的起始局部放电场强值。由表可以看出，铝箔凸出折

边结构的元件，其起始局部放电场强比不折边的元件高 (23~43)%。在图 6·2-3 中列出了折边铝箔电极元件与不折边铝箔电极元件，在  $-40^\circ\text{C}$  下以每梯级停留 30min 的梯级升压法测得的  $U_B/U_N \times 100\%$  与电容器元件占空系数 SF 的关系。由图得出，由 IPB 浸渍的全

膜介质元件,其在-40℃下测得的交流击穿电压中,用 50)%,元件的占空系数以较大为好。为此,应严格控制元件在卷绕时的张力和心子压装时的松紧度。

表 6·2-1 全膜介质元件的起始局部放电电场强度

| 温 度<br>(℃) | 元件介质<br>结 构                       | 起始局部放电电场强度 (MV/m) |              | $E_2/E_1 \times 100$<br>(%) |
|------------|-----------------------------------|-------------------|--------------|-----------------------------|
|            |                                   | 铝箔不折边元件 $E_1$     | 铝箔折边元件 $E_2$ |                             |
| 25         | 2×12μm 粗化<br>聚丙烯薄膜<br>浸 M/DBT 绝缘油 | 112               | 154          | 138                         |
| 40         |                                   | 117               | 156          | 133                         |
| 60         |                                   | 120               | 159          | 133                         |
| 80         |                                   | 123               | 151          | 123                         |
| 25         | 2×12μm 粗化<br>聚丙烯薄膜<br>浸 IPB 绝缘油   | 107               | 150          | 140                         |
| 40         |                                   | 105               | 151          | 143                         |
| 60         |                                   | 108               | 154          | 143                         |
| 80         |                                   | 115               | 150          | 131                         |

注：外施电压的升压速度为 265V/s。

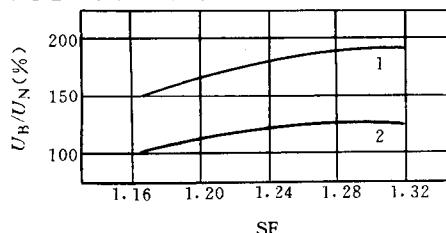


图 6·2-3 全膜浸 IPB 电容器元件的

$U_B/U_N \times 100\%$  与 SF 的关系

1—铝箔折边元件 2—铝箔不折边元件

$U_B$ —元件的交流击穿电压  $U_N$ —元件额定电压

SF—元件占空系数  $\left( SF = \frac{D}{d} = \frac{\text{极间距离}}{\text{极间介质厚度}} \right)$

## 1.2 箱壳

高电压并联电容器通常采用由 1~2mm 的薄钢板制成的矩形箱壳,其机械强度高,易于焊接、密封和散热,箱壳内部的填充系数高,也便于安装。电容器中的绝缘油因温度改变引起的体积变化可由箱壳大面的弹性变形来进行补偿。在箱壳的顶部开有供装配出线瓷套的孔和注油孔,箱壳两侧焊有供安装和起吊用的吊攀,为了防止箱壳底部焊缝在搬运中磨损,影响箱壳的密封性和机械强度,有的产品在箱壳底部焊有垫铁或槽钢。在 1000kvar 及以上的特大容量高压并联电容器的箱壳上常设有散热器。为了安全,在所有电容器的金属箱壳上均装有供接地或固定箱壳电位用的接地片或接地螺栓。

## 1.3 内部绝缘和电气连接

在电容器内部的各个元件之间、串联段之间和心

子与箱壳之间通常都设有由电缆纸、绝缘纸板或塑料薄板制成的绝缘件,使相互间的绝缘达到要求的绝缘水平,并使元件间的相互位置得到固定及元件具有预定的占空系数。

为了使电容器具有预定的额定容量和额定电压,元件之间必须按设计要求进行电气连接。图 6·2-4 是电气连接示意图的一个例子。

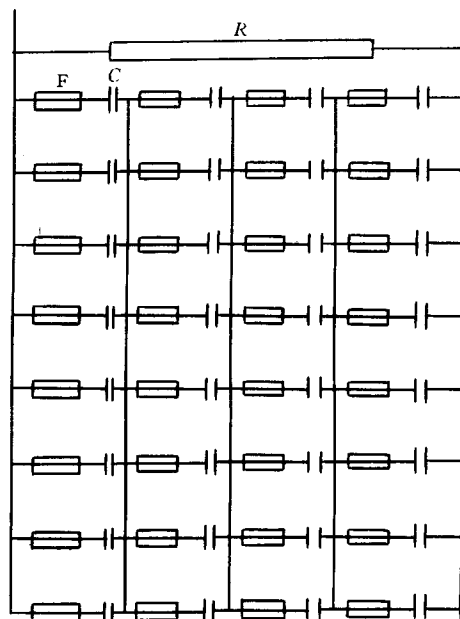


图 6·2-4 高电压并联电容器内部

电气连接示意图例

R—放电电阻 F—熔丝 C—元件电容

在电容器内部的引出端间接有内放电电阻，当电容器从电网上切除时，可在规定的时间（10min）内将电容器上的剩余电压降到 75V 安全电压以下，以保证操作人员的安全，防止再投入时产生高倍数的涌流和过电压，并由此而引发人身、设备事故。电容器的内放电电阻通常设置在电容器箱壳的上部，应有足够的耐电压能力和功率，通常由多个电阻串并联后组成，电阻之间和电阻与出线端的连接必须可靠。

1.4 出线结构

高电压并联电容器的出线结构分单套管出线和双套管出线两类。双套管出线结构的两个出线端均对壳绝缘，具有相同的绝缘水平。单套管出线结构的两个出线端中只有一个经套管引出与外壳相绝缘，另一个与箱壳连接后引出。出线套管的电气性能应满足表 6·2-3 的要求。在海拔 1000m 以上的高原地区、湿热带地区、重污秽地区运行的电容器，应根据具体情况采用相应结构和等级的套管。

2 额定值和主要性能

2.1 额定电压

我国高电压并联电容器的额定电压有：1.05，3.15，6.6/√3，6.3，10.5，11/√3，11，12/√3，12，19kV。其中 6.3kV 和 11/√3 kV 两者额定电压值基本相同，但前者的绝缘等级为 6kV 级，后者的绝缘等级则为 10kV 级，见表 6·2-3。在设计和选用电容器时，对此应予以充分注意。

2.2 额定容量 (Q<sub>N</sub>)

1. 单相高电压并联电容器的额定容量 在我国主要有：30，50，100，200，334kvar 等，根据用户需要可生产，1000，1200，1667，3334kvar 等特大容量的单相高电压并联电容器，其特点是安装维护方便，占地面积小、可靠性高，但价格较高。

2. 三相高电压并联电容器的额定容量 主要有 100，200kvar 两种，根据用户需要也可生产单台额定容量为：1200，1500，1800，3600，5000kvar 的特大容量三相高电压并联电容器。

2.3 电容偏差

在 GB3983.2《高电压并联电容器》中规定，电容

器的电容偏差应在 -5%~+10% 以内。对于三相电容器，还要求在任意两个线路端子间测得的最大电容与最小电容之比不大于 1.06，以保证三相回路的平衡。在满足上述平衡条件的前提下，三相电容器的总电容 C<sub>0</sub> 可用式 (6·2-1) 进行计算。

$$C_0 = \frac{2}{3} (C_1 + C_2 + C_3) \quad (6\cdot2-1)$$

式中 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>——依次在两个不同端子间测得的电容 (μF)。

电容器的电容偏差可用下式进行计算：

$$\Delta C = \frac{C - C_N}{C_N} \times 100\% \quad (6\cdot2-2)$$

式中 C——实际测得的电容 (μF)；

C<sub>N</sub>——电容器的额定电容 (μF)。

2.4 损耗角正切

不带内部熔丝的高电压并联电容器在 20℃ 时的损耗角正切 tanδ 见表 6·2-2。

表 6·2-2 高电压并联电容器的 tanδ 值

| 介 质 结 构         | tanδ (%)   |
|-----------------|------------|
| 油浸聚丙烯薄膜         | 0.008~0.05 |
| 油浸两层聚丙烯膜和一层电容器纸 | 0.04~0.08  |
| 油浸两层聚丙烯膜和三层电容器纸 | 0.08~0.12  |
| 油浸电容器纸          | 0.15~0.30  |

如图 6·2-5 所示，电容器的 tanδ 与介质结构和温度有关，在设计 and 使用时应予以注意。

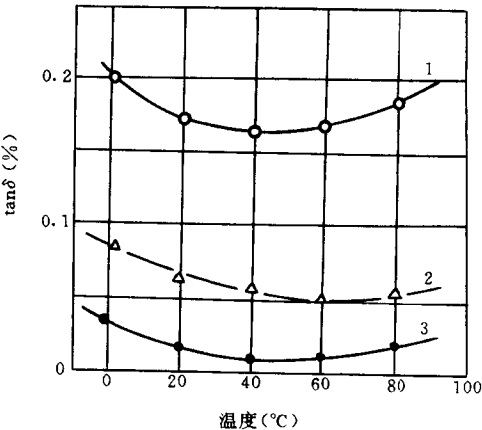


图 6·2-5 电容器的 tanδ 值与温度的关系

1—油浸纸介质 2—油浸聚丙烯膜和纸复合介质  
3—油浸全聚丙烯薄膜介质