

高等学校试用教材

# 电气绝缘结构设计原理

下 册

电力电容器 绝缘子和套管  
电力变压器绝缘 电机绝缘

西安交通大学 刘其昶 编



机械工业出版社

**电气绝缘结构设计原理**

下 册

**电力电容器 绝缘子和套管 电力变压器绝缘 电机绝缘**

西安交通大学 刘其昶 编

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> · 印张17 · 字数 396千字

1981年9月北京第一版·1988年6月北京第五次印刷

印数 13,401—13,770 定价: 2.85元

ISBN 7-111-00316-0/TM · 55(课)

# 目 录

第一章 电力电容器..... 1	§ 3-3 变压器绝缘的设计要求..... 153
§ 1-1 概论..... 1	§ 3-4 油浸式变压器常用的几种 绝缘材料..... 156
§ 1-2 电力电容器的分类和基本结构..... 2	§ 3-5 变压器油的耐电强度..... 160
§ 1-3 电力电容器的介质..... 8	§ 3-6 油间隙中使用固体绝缘材 料的作用..... 168
§ 1-4 组合绝缘的电气性能..... 21	§ 3-7 变压器油中沿固体介质的 表面放电..... 170
§ 1-5 电容器的局部放电..... 28	§ 3-8 变压器绝缘的耐电强度与 时间的关系..... 171
§ 1-6 电力电容器制造工艺和试验简介..... 34	§ 3-9 变压器主绝缘的设计..... 173
§ 1-7 工作场强与其他设计参数的选择..... 39	§ 3-10 变压器主绝缘的结构..... 178
§ 1-8 电力容器的设计计算..... 42	§ 3-11 变压器绕组中的波过程..... 182
§ 1-9 电力容器的热计算..... 49	§ 3-12 改善瞬变过程中绕组电压 分布的方法..... 187
§ 1-10 电力容器的热平衡图解法..... 54	§ 3-13 变压器绕组纵绝缘的选定..... 192
第二章 绝缘子和套管..... 57	§ 3-14 引线绝缘和套管下端的绝缘..... 193
§ 2-1 概论..... 57	§ 3-15 变压器绝缘结构的初步计算..... 195
§ 2-2 高压绝缘子的分类..... 58	§ 3-16 变压器绝缘工艺简述..... 198
§ 2-3 高压绝缘子的电极布置和 基本型式..... 59	§ 3-17 变压器绝缘的耐热性问题..... 201
§ 2-4 绝缘子的基本性能和试验..... 61	§ 3-18 变压器绝缘试验..... 204
§ 2-5 绝缘子用材料..... 67	§ 3-19 变压器的模拟试验理论..... 212
§ 2-6 高压电瓷制造工艺简介..... 70	第四章 电机绝缘..... 219
§ 2-7 绝缘子和绝缘子串的放电特性..... 77	§ 4-1 概论..... 219
§ 2-8 绝缘子的机械性能..... 91	§ 4-2 电机绝缘中的主要材料..... 220
§ 2-9 绝缘子机械试验的统计分析..... 99	§ 4-3 低压电机绕组的绝缘结构及工艺..... 226
§ 2-10 污秽绝缘子..... 106	§ 4-4 高压电机绝缘概述..... 233
§ 2-11 玻璃绝缘子..... 112	§ 4-5 高压电机绕组绝缘结构设计的 基本原则..... 235
§ 2-12 高压套管概论..... 115	§ 4-6 高压电机绝缘工艺..... 246
§ 2-13 纯瓷套管..... 117	§ 4-7 高压电机线圈半导体防晕层 的计算..... 248
§ 2-14 高压电容套管概述..... 121	§ 4-8 电机线圈的匝间绝缘..... 259
§ 2-15 高压电容套管的绝缘强度..... 127	§ 4-9 电机绝缘的电气性能和试验..... 261
§ 2-16 电容套管的设计原理..... 131	
§ 2-17 电容套管的电气计算..... 138	
§ 2-18 电容套管的热计算..... 145	
§ 2-19 电容套管的试验..... 146	
第三章 电力变压器绝缘..... 148	
§ 3-1 概论..... 148	
§ 3-2 变压器绝缘结构的分类..... 152	

# 第一章 电力电容器

## § 1-1 概 论

电容器在现代科学技术及工业各部门中应用十分广泛，种类也很多。总的说来，根据其工作时通过电流的强弱和施加电压的高低，可分为用于低压弱电流工程和高压强电流工程两种。本章着重讲述强电流和高电压工程中用的电容器，即电力电容器，它主要用于输变电设备和科学技术研究试验等方面。

电容器和其他绝缘结构不同。在其他绝缘结构中，绝缘介质所起的作用是对不同电位的导体起电气绝缘作用以及机械固定作用；而在电容器中，介质的任务是储藏能量。因此，对电容器首先考虑的要求是单位体积或单位重量的储藏能量作用大，然后是损耗小、寿命长、工艺性好，成本低等一般的问题。

平板电容器的电容量为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \epsilon_0 V \frac{\epsilon_r}{d^2} (\text{F}) \quad (1-1)$$

式中  $\epsilon_0$ ——真空的电容率， $8.854 \times 10^{-12} (\text{F}/\text{m})$ ；

$\epsilon_r$ ——介质的相对介电常数；

$S$ ——极板面积( $\text{m}^2$ )；

$d$ ——介质厚度( $\text{m}$ )；

$V$ ——介质有效体积， $V = Sd (\text{m}^3)$ 。

在直流电压下，电容器所储能量为

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} (Ed)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 V \epsilon_r E^2 (\text{J}) \quad (1-2)$$

式中  $E$ ——在外施电压为 $U$ 时介质中的电场强度，在工作情况下，不能超过介质的长时期耐电强度( $\text{V}/\text{m}$ )。

在交流电压下，常以无功功率 $Q$ 来表示电容器的容量，如角频率为 $\omega$ ，则

$$Q = U^2 \omega C = \epsilon_0 \omega V \epsilon_r E^2 (\text{Var}) \quad (1-3)$$

通常可用电容器的主要特性之一与体积或重量之比对整台电容器进行评价。这种比值称为电容器的比特性。低压电容器通常用比电容（电容器的电容与体积之比），高压脉冲电容器用比能（电容器储藏的能量与体积之比），交流用的电力电容器用比无功功率（电容器的容量与体积或重量之比）作为技术经济指标。电容器的比特性，介质起决定性作用。由式(1-2)和(1-3)可见，电容器的比特性与介质的 $\epsilon_r E^2$ 成正比。 $\epsilon_r E^2$ 称为电容器介质的储能因数，是电容器介质的一项主要特性。因此，要提高电容器的比特性就要求介质的相对介电常数大且耐电强度高，其中提高耐电强度更为重要。最早采用且至今仍广泛应用

的电容器介质油浸纸绝缘,  $\epsilon, E^2$  乘积比较高。为了提高  $\epsilon$ , 有以氯化联苯等绝缘液体来浸渍纸, 也有用高介电瓷作电容器介质; 为了提高工作场强, 有用金属化纸, 有用塑料薄膜或塑料薄膜和纸组合介质或金属化薄膜作为介质。介质的更新对电力电容器发展起了很大作用。纸质电容器以氯化联苯代替矿物油作浸渍剂, 每千乏重量及体积可以减小一半以上, 目前采用的聚丙烯薄膜和纸组合介质电容器又比纸电容器(浸三氯化联苯)减少25~50%以上。因此, 电容器的发展, 采用新介质是最重要的一个方面。

介质的相对介电常数由材料本质决定, 而耐电强度则不但与材料本质有关, 也与结构设计及制造工艺有极密切的关系。

研究电容器时除了比特性之外, 其他性能如介质损耗、绝缘电阻、老化性能、运行可靠性和成本等当然也必须注意。在一定场合中某一特性可能成为主要矛盾, 如耦合电容器要求特别高的运行可靠性, 某些脉冲电容器要求电感很小, 这些都必须根据具体情况决定。

由于材料、结构、工艺多方面的改进, 电力电容器的比特性已有很大改进。七十年代中的世界先进水平如表 1-1 所示。

表 1-1 各种电力电容器某些先进水平技术经济指标一般情况

电 容 器 类 型	比 特 性	备 注
工频电力电容器: 三氯化联苯浸渍纸作介质	0.255~0.4dm <sup>3</sup> /kvar 0.324~0.7dm <sup>3</sup> /kvar	tg $\delta$ 0.2%, 单台容量 100kvar, 工作温度下限 -40℃
聚丙烯薄膜与纸组合浸三氯化联苯作介质	0.171~0.25dm <sup>3</sup> /kvar 0.175~0.4dm <sup>3</sup> /kvar	tg $\delta$ 0.04~0.05%, 单台容量 150~400kvar
耦合电容器: 油纸介质	13~52dm <sup>3</sup> /kvar	
三氯化联苯浸渍纸作介质	5.6~8.2dm <sup>3</sup> /kvar	电容随温度变化较大
三氯化苯与氯化联苯混合浸渍纸介质	5.6~8.2dm <sup>3</sup> /kvar	电容在工频 -60℃ 及 100kHz -40℃ 以上变化很小
中频电热电容器: 三氯化联苯浸渍纸作介质	0.05dm <sup>3</sup> /kvar	1500伏、3000Hz、水冷式
聚苯乙烯薄膜与纸组合浸三氯化联苯	0.2~0.1dm <sup>3</sup> /kvar	自然冷却
聚苯乙烯薄膜浸油	0.08dm <sup>3</sup> /kvar	1500伏、3000Hz、自然冷却
脉冲电容器: 蓖麻油浸渍纸作介质	130~140 J/dm <sup>3</sup>	6 千伏 150 $\mu$ F, 寿命百万次放电, 电感 (1~9) $\times$ 10 <sup>-9</sup> H 以下
聚酯薄膜纸组合浸油作介质	176 J/dm <sup>3</sup>	5 kV 32 $\mu$ F, 寿命千万次放电, 电感 (1~9) $\times$ 10 <sup>-9</sup> H 以下
聚酯薄膜浸氟化硅油	480 J/dm <sup>3</sup>	电感为 (5~10) $\times$ 10 <sup>-9</sup> H, 放电次数 500~5000 次
滤波电容器: 三氯化联苯或五氯化联苯与三氯化苯混合浸渍纸作介质	10~28 J/dm <sup>3</sup>	2.5~125kV
聚酯薄膜浸油或蓖麻油	27~40 J/dm <sup>3</sup>	2.5~125kV

## § 1-2 电力电容器的分类和基本结构

电力电容器按其用途不同可以分成若干类型。

在电力系统中, 有用来改进电力系统、线路和设备功率因数的移相电容器, 有用来提高线路传输功率和稳定度、改进电压调整率和提高输电线路效率的串联电容器, 有自高压

线路抽取功率及用于工频交流输电线路的通信、测量、控制、保护等装置作部件用的耦合电容器，有并联在断路器的断口上作均压用的均压电容器，有作为直流输变电站滤波之用的直流电容器等，此外还有作为发电机电压保护用的防护电容器等。

在高压试验室中，电容器用以制造冲击电压和冲击电流发生器、振荡回路、直流高压设备，也有用于测量线路如电容分压器、标准电容器等。

在工业上，电容器有用于那些熔融金属、热处理和加热等高频或中频电炉以改进功率因数，也有用以对感应电动机、电焊机等感性负载进行补偿，还有与电抗器串联产生谐振用的谐振电容器等。

在科学技术部门中，电容器用于特种用途，如X光设备、激光、脉冲放电、电火花加工、引爆以及原子能研究等方面。随着新技术的发展，电容器的用途正在日益扩大。

下面介绍目前工厂生产的几种主要的电力电容器。

### 一、移相电容器

这种电容器又称为并联电容器或余弦电容器，是用途最广、生产量最大、最基本的一种电力电容器。它用于电力设备和系统以提高功率因数。实际上它是无功功率发生器，将它并联于电力系统或用电设备的两端能补偿一般工业用电的电流对电压的滞后效应。这种电容器的需要量很大，在某些电力系统中可以达到发电厂额定容量的一半左右。

移相电容器在应用中的功益可以计算。图1-1和1-2所示电感性电力系统或设备（例

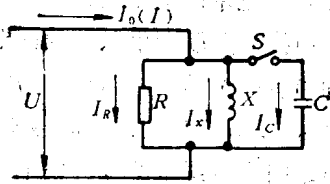


图1-1 移相电容器应用时线路

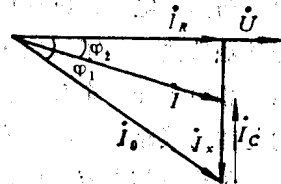


图1-2 移相电容器补偿电流相量图

如感应电动机）上并联了移相电容器后，电流对电压滞后的相角由 $\varphi_1$ 变为 $\varphi_2$ ，由图中所示的相量图可知电流由 $I_0$ 减小为 $I$ ，则

$$\text{电容补偿电流} \quad I_c = I_0 \sin \varphi_1 - I \sin \varphi_2$$

$$\text{所需电容器的无功功率} \quad Q = UI_c = U(I_0 \sin \varphi_1 - I \sin \varphi_2)$$

该电力系统或设备的有功功率为

$$P = UI_0 \cos \varphi_1 = UI \cos \varphi_2$$

由以上二式消去 $I_0$ 、 $I$ ，得

$$Q = P \left( \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} - \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} \right) = P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

由于加上电容器而节省的表观功率伏安数为

$$P_{s(\text{伏安})} = UI_0 - UI = P \left( \frac{1}{\cos \varphi_1} - \frac{1}{\cos \varphi_2} \right) \quad (1-4)$$

一般工厂如不采取并联电容器补偿则功率因数较好者为70~75%，较差者为60~65%，并联电容器后可大为节省电力。例如 $\cos \varphi$ 从0.75提高到0.9，由上式可得 $Q =$

0.4P千乏,节省表观功率  $P_s = 0.22P$ 。因此大致可认为1千乏电容器可以节省  $0.22/0.4 = 0.55$  千伏安供电量。

对于电力系统,并联了移相电容器后,由于电容电流补偿使线路总电流减少,从而可以减少线路电阻的有功损耗,减少线路压降和空载与满载间的电压波动;由于表观功率减少,可提高原有电力设备(如发电机、变压器)的有功负荷。

用电容器补偿比用同步补偿机好,运行方便,维修简单,成本低,功率损耗因数小(用油纸电容器时约0.2~0.4%),而同步补偿机还有声音大、振动、电力损耗大、寿命短等缺点。

移相电容器分为高压和低压电容器,由外壳及芯子组成。外壳一般为薄钢板制成完全密封的箱,浸三氯联苯的也有采用内壁有  $Al_2O_3$  层的外壳或铝外壳。铝外壳可以降低电容器的损耗,减轻重量和增强耐腐蚀性。为了改善散热增加冷却面积,外壳呈扁形,长与宽之比达3.3以上。此外,扁形外壳有对油热胀冷缩补偿体积变化的作用。外壳顶部装有引出线用的绝缘瓷套。我国移相电容器外壳,箱底面积统一为  $380 \times 115$  毫米和  $303 \times 122$  毫米,但因容量和电压等级不同而高度有340、375毫米等几种。芯子中包括有构成电容的元件和绝缘件。元件常用铝箔作极板和电容器纸作介质卷绕后压扁形成,目前比较先进的采用聚丙烯塑料薄膜作介质。考虑到散热,元件的体积不宜大。一般元件容量不超过1~2千乏,每个元件电压为700~1500伏(如用聚丙烯薄膜可为1200~1500伏)。一般元件卷制时铝箔不凸出于电容器纸外面,但有时为了改进散热,也用凸出铝箔极板,以便改善芯子与外壳接触传热。为了适应多种电压,元件在芯子中接成并联和串联。我国电压525伏及以下的移相电容器,全部元件并联,每个元件单独串有一个熔丝,当元件击穿时熔断,使击穿的元件与线路断开,电容器仍能继续工作。电压3.15千伏及以上的移相电容器内部无熔丝。单台三相电容器内部接成三角形。元件组之间有电缆纸绝缘,整个元件外面包电缆纸以对外壳绝缘。由于电压高低不同,极板间所用电容器纸不同。低压用的可以密度稍大,厚度较薄、层数较少,例如YY<sub>3</sub>0.4-12-3移相电容器(400伏、12千乏、三相)及YL<sub>3</sub>0.4-22-3(400伏、22千乏、三相),所用电容器纸密度1.2克/厘米<sup>3</sup>,厚度  $3 \times 10$  微米。

表1-2 我国移相电容器的技术数据情况

产品型号	频率 (Hz)	电压 (kV)	容量 (千乏)	外形尺寸(毫米) (长×宽×高)	重量 (kg)	浸渍剂	备注
YY0.4-12-3	50	0.4	12	303×122×414	21	矿物油	箱底尺寸目前统一为303×122mm和380×115mm两种
YY <sub>3</sub> 0.4-14-3	50	0.4	14	380×115×420	25	矿物油	
YY6.3-12-1	50	6.3	12	303×122×485	21	矿物油	
YY <sub>3</sub> 6.3-14-1	50	6.3	14	380×115×524	24.5	矿物油	
YY10.5-12-1	50	10.5	12	303×122×510	21	矿物油	
YGB0.23-5-1	50	0.23	5	180×150×270	5	干式	
YG6.3-40-1	50	6.3	40	380×115×524	40	硅油	
YGM6.3-75-1	50	6.3	75	380×115×524	27.5	硅油	
YL <sub>3</sub> 6.3-40-1	50	6.3	40	380×115×524	27.5	三氯联苯	
YLW6.3-75-1	50	6.3	75	380×115×920	58	三氯联苯	

注:型号中第1字母Y表示移相,第2字母表示浸渍剂(Y为矿物油,G表示硅油或干式,L表示三氯联苯),第3字母B表示干式薄膜电容器,M表示薄膜,W表示户外。第1数字表示额定电压(kV),第2数字表示标称容量(kvar),第3数字表示相数。氯化联苯电容器现已不生产,但电力系统净油中不少仍在运行中。

高压用的纸密度较小，层数较多（3.15 千伏、6.3 千伏及 10.5 千伏 40 千乏的移相电容器用密度 0.8 克/厘米<sup>3</sup>、厚度 15 微米的纸，极板间纸层数为 5~6 层或更多层）。芯子装入箱壳后，经真空处理灌注浸渍剂，焊箱盖上的封口，电容器完全密封。

这种电容器单台容量，用氯化联苯浸电容器纸作介质时一般不超过 50~100 千乏，比特性达 0.29~0.4 分米<sup>3</sup>/千乏和 0.45~0.7 公斤/千乏；用聚丙烯薄膜作介质时可以提高到几百至一千千乏以上，比特性达 0.171~0.25 分米<sup>3</sup>/千乏。

表 1-2 列举了我国生产的几种移相电容器的技术数据。

## 二、串联电容器

这种电容器又叫纵向补偿电容器。它串联在输电线或电网中用以补偿输电线路的感抗，从而减少线路压降，提高线路传输功率和稳定度，改进电压调整率，提高输电线路的效率。

图 1-3 为一短输电线，未加串联电容器以前， $U_s > U_r$ ， $\phi_s > \phi_r$ 。加了串联电容器以后， $\phi_s < \phi_r$ ，则功率因数改善，此时又可使  $U_s$  和  $U_r$  差不多，即改善了电压调整率  $(U_s - U_r)/U_r \times 100\%$ ，一般可自 20% 改进至 3% 左右。

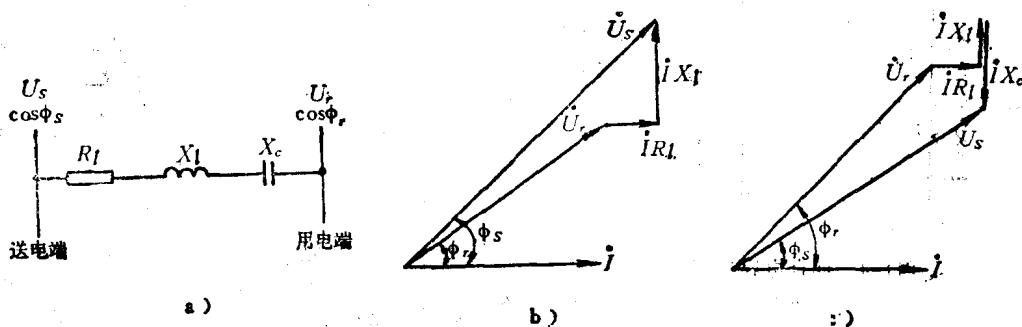


图 1-3 串联补偿电容器的作用

a) 串联电容器的应用情况 b) 未加串联电容器时 c) 已加串联电容器后

串联电容器的结构相似于移相电容器，但由于它直接串联在高压输电线上，负荷（电流）随线路负荷而变化，因而经常出现过负荷和受到过电压的威胁，主要是线路短路时，电流超过额定电流的若干倍，从而在串联电容器上引起同样倍数的过电压。串联电容器技术要求较高，要求能经受很大的短时过电压和长时间过载。我国技术条件规定串联电容器可以在  $1.25U_n$  下运行 4 小时， $1.5U_n$  下历时 1 小时， $5U_n$  下历时 0.2 秒作用后再受  $2.5U_n$  历时 30 秒。上述  $U_n$  为额定电压。一般设计工作场强取得较低，以保证其可靠运行。

我国所生产的 CG1-45-1 单相串联电容器，额定电压为 1 千伏，容量 45 千乏，重量 54 公斤，电容量  $143.2 \mu\text{F} \pm 10\%$ 。芯子由 45 个用电容器纸和铝箔卷制的元件并联组成，每个元件上装有单独的熔丝。外壳由 1.5 毫米厚钢板焊接而成，盖上有二只 6 千伏级的出线瓷套管。这种电容器出厂试验时承受一分钟 7 倍  $U_n$  值的直流试验电压，极板与外壳间承受一分钟工频交流试验电压 20 千伏和工频湿试验电压 20 千伏。

## 三、耦合电容器和电容式电压互感器

耦合电容器主要用于工频交流输电线路的高频通信、测量、控制、保护以及抽取电能



等装置作部件用。图 1-4 所示为输电线上通信和抽取电力所采用的耦合电容器的连接方法。

耦合电容器直接接在高压输电线与地之间。高压输电线与通信、保护等装置间无隔离开关，可省去一个隔离开关，由耦合电容器保护线路。耦合电容器必须能在输电线全电压下工作和露天安装。它在 1.15 倍额定工频高压叠加通信用的高频（40~500 千赫）电压下长期工作，并能经受高压电线上所发生的过电压作用，要求有特别高的工作可靠性，工作场强取得较低，每一电容元件的电压也比移相电容器低 15~20%。电容器的电容和电感是高频信号电路参数，其数值及稳定性影响通信及保护装置工作情况，因此要求电容器电感较小，额定电容容差及电容的温度系数均要求小。为此，这种电容器通常用矿物油浸渍，也可用苯甲基硅油浸渍。耦合电容器在工频及冲击电压下外绝缘的干、湿放电电压应不低于相应绝缘等级的绝缘子放电电压。耦合电容器装在露天，器身较高，风力负荷作用大，因此要求有较高的机械强度。

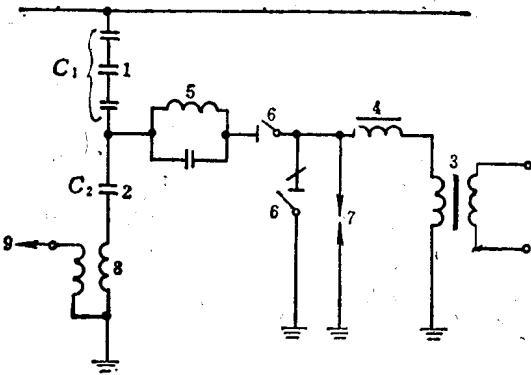


图1-4 耦合电容器应用示意

1—耦合电容器 2—抽取功率用电容器 3—抽取功率用变压器 4—电抗器 5—高频阻波器 6—隔离开关 7—避雷器 8—高频变压器 9—接高频通信设备

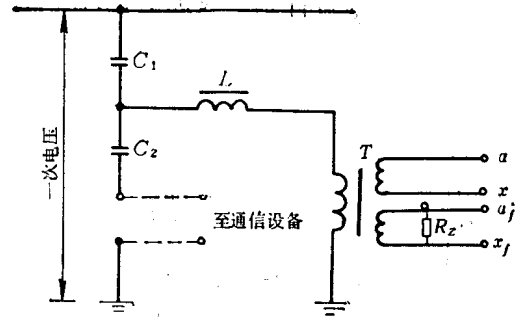


图1-5 电容式电压互感器原理接线

$C_1$ —主电容器  $C_2$ —分压电容器  $L$ —共振电抗器  $T$ —中间变压器  $R_2$ —阻尼器  $a, x$ —主二次接线端子  $a_f, x_f$ —辅助二次接线端子

上述要求决定了耦合电容器的结构与移相电容器根本不同，通常采用有伞裙的大瓷套装配上钢板制成的底座和端盖作为外壳，底和盖用螺栓及压环紧固在瓷套的两端。芯子由数十个甚至上百个元件串联而成并固定于电容器的底座上。在芯子上部装有用薄钢板制成的扩张器，作为补偿油体积随温度的变化。

我国生产的 OY35-0.0035 耦合电容器电压为 35 千伏，电容量为 0.0035 微法，为悬挂式，其他型号为座立式。OY35-0.0035 及 OY55-0.0044 型的引出头接在底和盖上，使用时底座须与地绝缘。为此对 OY55-0.0044 配有绝缘底座，对于 OY35-0.0035 可用悬式绝缘子悬挂或用支柱绝缘子支持。OY110/ $\sqrt{3}$ -0.0066 的引出头，一端接在盖上，另一端则是通过底座上的瓷套接出，使用时底座可直接装于地上。110 千伏及以上电压的耦合电容器均为组合装置。

电容式电压互感器是耦合电容器与其他电器组合的一种装置，其原理接线如图 1-5。它在工频电力系统中用作测量及保护，并作通信用。

电容式电压互感器由电容分压器、中间变压器和电抗器及阻尼器等组件构成。电容分压器由耦合电容器  $C_1$  及分压电容器  $C_2$  串联组成。利用电容分压器获得一中间电压，然后

通过一中间变压器在主二次侧进行测量及在辅助二次侧接继电保护线路。中间变压器和电抗器装置在同一油箱中，它们的线圈都备有若干抽头，电抗器还具有可调气隙的铁芯，均可在误差试验时（比差和角差）调定。阻尼器为一电阻器（可用可控硅阻尼器来改善互感器的暂态响应速度），为了抑止互感器二次侧发生瞬时短路或强烈电冲击时产生低次谐波而接在中间变压器的二次侧。

电容式电压互感器的成本主要在于电容分压器，而耦合电容器为了通信目的总是需要用的，做成电容式电压互感器增添费用不多，因此，220千伏以上线路现已广泛采用电容式电压互感器以代替电磁式电压互感器。我国在1963年试制成功110千伏、220千伏等级电容式电压互感器后，逐步推广应用。1970年试制成功330千伏等级的产品，投入运行，性能良好，1979年又试制成功了500千伏的产品。

#### 四、电热电容器

这种电容器主要用于提高各种感应加热设备的功率因数或改善电路特性（调频），其工作频率为100~10000赫。目前我国主要生产频率1000、2500、4000、8000赫四种，近年又发展了工频电热电容器。当频率较高时，单位体积的介质发热量大，散热是主要问题。在电热电容器中，工作场强不决定于介质的耐电强度而决定于介质的发热，除了降低工作场强外还必须采取措施以改善散热，因此结构与移相电容器有较大的不同。为了改善散热，芯子的一侧极板与蛇形冷却水管相焊接。元件用宽度较小的电容器纸和较厚的铝箔以露箔式卷绕，全部元件并联连接，这样便于焊接蛇形管，也可减小电感。在频率高时，减少电容器本身的电感很重要，这可减少电容器的容量损失。外壳一般用薄钢板制成，但当频率高（8000赫）时用铜外壳，以减少涡流损失避免电容器过热。用 $\text{tg } \delta$ 小的薄膜或薄膜与纸组合作介质，可以不用水冷却而靠自然冷却以简化结构。为了提高比特性，水冷式冷却系统也有改进，例如将两个极板各焊一个水管，两水管一端用绝缘管连通，另一端通过接线瓷套引出。

#### 五、脉冲电容器

这是一类用途广泛的电容器的总称，主要用于各种高电压脉冲技术设备如冲击电压发生器、冲击电流发生器、供给瞬时大能源的振荡回路和供给连续脉冲的电源电路等。

脉冲电容器由于用途不同，其电压和电容的范围十分宽广，电压有几十千伏到几百千伏，电容有几十微微法到几百微法，它们之间结构差别很大。归纳起来，电容器的外壳，较高电压的用胶纸筒、瓷套筒或铁壳（绝缘板盖或瓷套出线）结构；较低电压的用钢板焊成外壳。胶纸筒外壳的电容器，用厚钢板或铸铝合金做底和盖，瓷套筒的用厚钢板做底盖，这两种电容器的出线头分别从外壳的两端引出。钢板外壳的电容器，顶盖有钢板的及绝缘板的两种。用钢板做顶盖的，一个出头直接在顶盖上，另一个出头通过装在盖上的瓷套管引出。用绝缘板做顶盖的，出头均装在绝缘板上。脉冲电容器内部芯子的结构分为单芯式及多芯式的两种。单芯式的元件一般全部接成串联或并联，多芯式的由几个芯子组成，可并联或串联。脉冲电容器发展方向主要是特殊需要的低电感电容器。介质除了应用一般的浸渍剂（主要用矿物油）外还采用蓖麻油等浸渍剂，用薄膜代替纸可以提高使用寿命和比能（小体积产品）。这类电容器因工作条件和寿命要求不同，工作场强取值范围很大，但一般都比交流类型的高很多。如国外有6千伏、150微法的脉冲电容器，工作场强

高达 85~100 兆伏/米，其比能为 130 焦耳/分米<sup>3</sup>，以蓖麻油浸纸作介质。聚酯薄膜脉冲电容器有的场强高达 200 兆伏/米，水冷式比能达 480 焦耳/分米<sup>3</sup>，电感为 0.5~5 毫微亨。现代脉冲电容器采用同轴出头等结构电感已小到 10<sup>-9</sup> 亨以下；浸蓖麻油的寿命长达几百万次放电，场强较高时也不低于十万次；浸油或蓖麻油的聚酯薄膜与纸组合或全薄膜电容器寿命可达千万次以上，比能约达 300 焦耳/分米<sup>3</sup>。

### 六、直流电容器

这种电容器主要用于直流电滤波、高压电容分压器和电气铁道供电装置等，有很宽的工作电压（从低压到几十万伏）及电容（从几百微微法到几十微法）范围。根据不同工作温度范围要求，采用不同的结构和浸渍剂。我国生产的 LY27-0.125（滤波、油纸、27 千伏、0.125 微法）及 LY32.5-0.25 是用矿物油浸渍纸作介质的滤波电容器，分别重 8.5 及 21 公斤；芯子由卷绕后压扁的元件串联而成；外壳由薄钢板焊成并涂有抗腐蚀油漆层防潮。直流电容器工作时一般仍有一定交流电压分量作用，但基本上处于较稳定的直流电压下工作，因此允许较高的工作电场强度，可用密度大的电容器纸作介质，极板间介质厚度也可用得较厚。交流分量较大时则工作场强及极板间介质厚度均应取得较小。

### 七、均压电容器

它主要并联在断路器的断口上作均压用。高压断路器的灭弧室常由几个断口串成，而各个断口对地的电容往往不均匀，因此造成电压分布不均匀。采用均压电容器后，使断口间的电压分布均匀，以利切断电流且避免断口损坏。

均压电容器基本结构与耦合电容器相似，我国生产的电压 40、60 和 90 千伏的均压电容器的电容为 0.0015 及 0.0018 微法，其外形比耦合电容器小得多。

### 八、标准电容器

这种电容器主要用于工频高压测试电路，例如西林电桥用标准电容器以及电容分压器。它要求损耗极小，电容值稳定和不发生电晕。这种电容器通常以压缩气体（N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 或 SF<sub>6</sub> 等）为介质，由两个同轴的金属圆柱体构成高低压电极，外壳由酚醛纸筒或其他绝缘筒制成，底座和盖以钢板制成。我国已制成有 500~1000 千伏的标准电容器，更高电压级的产品也在试制中。当采用 N<sub>2</sub> 或 CO<sub>2</sub> 时，常用 13~15 大气压，采用 SF<sub>6</sub> 时则为 4~6 大气压，最高工作场强均约 10~12 兆伏/米，气压再增高时会增加机械和密封的困难，且击穿场强渐趋饱和。

## § 1-3 电力电容器的介质

前已述及，电力电容器的比特性主要决定于所用介质的  $\epsilon_r E^2$ ，可见电容器选用介质材料比其他任何电气产品在决定其技术经济性能方面有更直接的影响。对电力电容器介质材料的要求，首先是电气性能好，如  $\epsilon_r E^2$  高、 $\text{tg } \delta$  小、 $\rho_v$  大，其次还要考虑物理、化学性能、工艺性能及经济性（来源、成本）、无毒性等。

六十年代以前，电力电容器广泛使用绝缘液体浸渍电容器纸作介质。最早用矿物油（电容器油）浸渍，后来逐步用  $\epsilon_r$  较高且在交流电场及高温下可靠性较好的合成液体代替矿物油浸渍，使电容器比特性提高一倍多。近年来，由于合成化学的迅速发展，出现了一

些某些性能比纸更好的有机合成薄膜介质，目前使用较多的是聚丙烯薄膜。

### 一、电容器纸

电容器纸用植物纤维制成。植物纤维的成分很复杂，包括纤维素即 $\alpha$ -纤维素( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>、半纤维素、木质素、油脂、蜡、树脂、蛋白质和灰分等。电容器纸主要用其中的纤维素，造纸时通过化学处理除去非纤维素杂质。

电容器纸的特点是厚度小，密度（或叫紧度）大，机械强度高，杂质含量少，电气强度比其他电工用纸都高。电容器纸是由纤维组成的多孔介质，其中纤维占其体积的51~87%。由于多孔性和纤维的极性，吸湿性很强，电容器纸含水量约7~10%。为了提高电气性能，制造电容器时，电容器纸必须经过干燥后浸渍电性良好的液体介质。电容器纸在常温下化学稳定性很好，在120~130℃时明显氧化，机械强度下降；当温度高达150~160℃时纸纤维很快分解；在真空（无氧和水分）下纸分解较慢。

纸的电气性能决定于纸浆的成分及造纸工艺。纸浆中含 $\alpha$ -纤维素越多，导电杂质越少，电气性能就越好。造纸过程中应减少混进纸中的杂质和污染物，尽量避免纤维束状堆积、斑点、皱纹、小孔以利于提高电气性能。

纸是极性材料， $\text{tg } \delta$ 与频率及温度有密切关系。低温时纸的 $\text{tg } \delta$ 主要是其中的有机成分（ $\alpha$ -纤维素、半纤维素和木素）的偶极损耗，其数值大小取决于纸中 $\alpha$ -纤维素含量，如图1-6所示。高温时纸的损耗主要是纸中夹杂无机盐金属离子（特别是碱金属离子 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ ；而 $\text{Li}^+$ 的含量很少可以忽略）其次是低价阴离子（ $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ ）的离子电导损耗如图1-7所示。

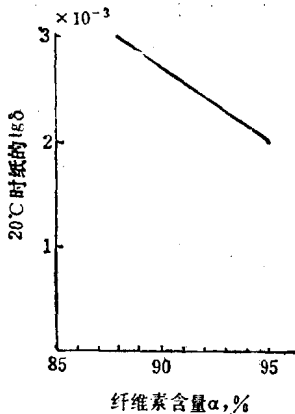


图1-6 三氯联苯浸渍密度 $0.8 \text{ g/cm}^3$ 的电容器纸  $\text{tg } \delta$  与纸中 $\alpha$ -纤维素含量的关系

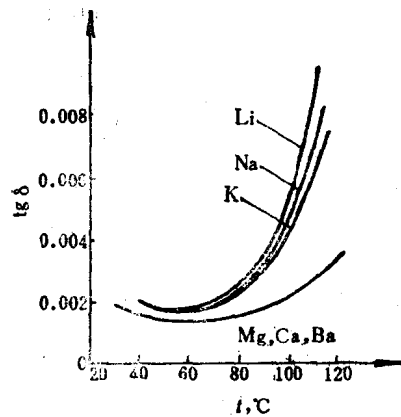
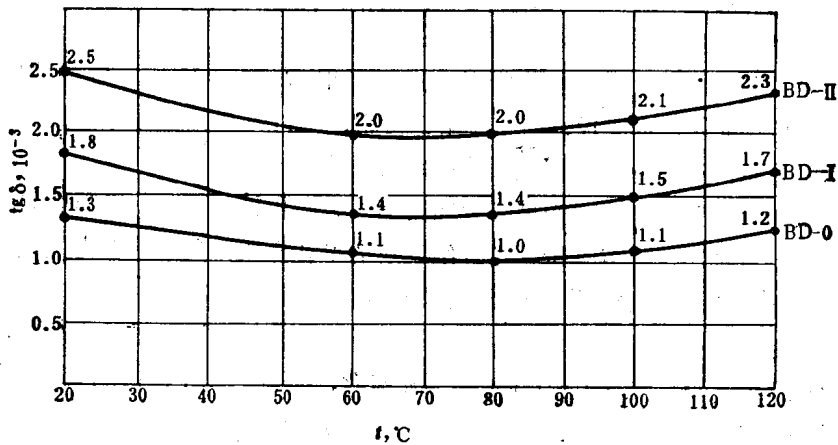


图1-7 不同金属离子存在时电容器纸工频  $\text{tg } \delta$  与温度关系

为了提高电容器的热稳定性能、单台容量、效率及寿命，要求降低电容器纸的高温损耗。目前国内不同密度的高温低损耗电容器纸（BD型纸） $\text{tg } \delta - t$  曲线如图1-8所示。

我国纸厂和电容器厂共同努力，制造低损耗纸方面已积累了很多经验。实践指出，纸的高温损耗与纸中 $\text{Na}^+$ 的含量有近似线性关系，只要碱金属离子含量降低到某一程度，高温时的 $\text{tg } \delta$ 就可以很小。如对于BD-I电容器纸，用脱盐水冲洗（若冲洗时加上电场，可加快纸的脱盐）使其含钠量在百万分之六以下，干纸100℃时的 $\text{tg } \delta$ 可低于0.002。

图1-8 高温低损耗电容器纸  $\text{tg } \delta - f$  标准曲线

为了保证电气性能，对纸的化学成分要求很严格。我国电容器纸试行标准规定，灰分量不大于 0.35%，水抽出物酸度不大于 0.007%，水抽出物碱度不大于 0.007%，水抽出物电导率 25°C 时不大于  $4 \times 10^{-3}$  西/米，水抽出物氯化物含量不大于 0.004%。表 1-3 所列为我国电力电容器纸试行标准规定的机械物理和电气性能指标。

表1-3 电力电容器纸的机械物理和电气性能指标

项 目	BD-0				BD-I				B-I				B-I				
厚度 ( $\mu\text{m}$ )	15	10	12	15	8	10	12	15	10	12	15	8	10	12	15		
允许误差	0.8	0.7	1.0	1.0	+0.4 -0.5	0.6	0.7	1.0	0.7	1.0	1.0	+0.4 -0.5	0.6	0.7	1.0		
紧度 $\text{g/cm}^3$	0.8				1.0				1.2				1.0				
允许误差	+0.05 -0.04				0.05				0.05				0.05				
纵向长度(m)不小于	7000				7000				8000				7000				
透气度(ml/min)不大于	5				7				5				3				
工频交流击穿电压(V)每层纸不小于	380				300				325				350				
导电点(个/ $\text{m}^2$ )不大于	50				300				150				80				
$\text{tg } \delta$ (不大于)	80°C	0.001				0.0014				0.0018				—			
	60°C	—				—				—				0.0017			
水分(%)	4~10																

注：电容器纸试验方法试行标准规定：“厚度在 15 $\mu\text{m}$  和 15 $\mu\text{m}$  以上者用 5 层纸样，厚度在 15 $\mu\text{m}$  以下者用 10 层纸样进行测定。卷筒宽度在 280mm 和 280mm 以上者横幅测定 5 点厚度，卷筒宽度在 280mm 以下者横幅测定 3 点厚度，厚度计分度值为 1~2 $\mu\text{m}$ 。测定结果以  $\mu\text{m}$  表示之，修正至 0.1 $\mu\text{m}$ 。”

A型电容器纸主要用于电子工业用电容器，厚度有更薄的，如4、5、6、7微米。薄的纸要求打浆很细，价格昂贵，且拉力较差难以卷制电容大的元件，因此在电力电容器中很少采用。从表1-3中可以看到纸密度不同，电气性能也不一样。密度越大，即体积中纤维比例越大，则干纸的 $\epsilon_r$ 及耐电强度越高，但介质损耗也增加。高密度的纸主要用于直流、脉冲及低压交流电容器。低密度纸， $\text{tg } \delta$ 较低，用于高压交流电容器。特别是用氯化联苯浸渍时，因氯化联苯的 $\text{tg } \delta$ 比矿物油高，更要用低密度纸，以降低 $\text{tg } \delta$ ，减少老化和热击穿的影响，使工作场强可以取得更高些。近代低密度（达 $0.75\text{g/cm}^3$ ）纸，由于纸浆成分改进， $\text{tg } \delta$ 可达 $(8\sim 9)\times 10^{-4}$ ，浸渍后也有较好的电气强度。近年来还出现了一些改性纸：如含有5%氧化铝的特种纸，在浸渍氯化联苯后，由于纸中含氧化铝可作吸附剂，吸收浸渍物中的污染物离子，净化液体使损耗降低；氰乙基化纸，由于氰基是强极性基， $\epsilon_r$ 可达15.5（但高温时 $\text{tg } \delta$ 也大），耐热性也提高；乙酰化纸（使纤维素大分子中的羟基酯化成乙酸酯），由于去除许多羟基，这种纸的吸湿性下降，乙酰化使极性下降从而 $\epsilon_r$ 和 $\text{tg } \delta$ 也下降，热稳定性也有所提高。还有一种在纸成分中除普通纤维外，加入一定量的合成有机纤维或玻璃丝，可以提高纸的耐热性减少吸湿性和改善电性；也有在纸浆中加入胺类，可以提高纸的热稳定性。

## 二、塑料薄膜

由于纸的固有介质损耗较大和击穿强度较低，要大幅度提高电容器性能，进一步发展重量轻、体积小、容量大、寿命长的产品，必须采用新型介质材料。近代塑料薄膜的发展为电力电容器提供新介质开辟了广阔的道路。塑料薄膜的特点是机械强度高，可以做得很薄和柔软可卷制，电性能方面有很高的绝缘电阻和击穿强度。中性和弱极性材料薄膜 $\text{tg } \delta$ 很小， $\epsilon_r$ 及 $\text{tg } \delta$ 几乎与频率无关，可用于各种频率，所做的电容器吸收比很小（即电容器的剩余电荷值小，但是如用液体介质浸渍，则由于液体中自由离子存在，吸收比可能增大）。极性薄膜和某些非极性薄膜的耐热性往往比纸高，用以制造电容器允许提高工作温度，温度较高时击穿强度仍较高，从而可以提高比特性。但是薄膜材料难以浸渍，如浸渍不好，由于薄膜耐电晕性差，工作场强就难以提高。表1-4列出了电容器用的几种薄膜性

表1-4 电力电容器应用的油浸纸和几种薄膜性能

材 料 名 称	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	吸潮 (%)	抗张强度 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )	延伸率 (%)	长期 工作 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\epsilon_r$ 50Hz	电容温度 系 数 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\text{tg } \delta$ 50Hz 20 $^{\circ}\text{C}$ 不大于	$\rho_v$ $\Omega \cdot \text{m}$ 20 $^{\circ}\text{C}$ 不小于	$E_f$ ( $\text{MV}/\text{m}$ ) 不低于	导热系数 ( $\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )
聚丙烯	0.91	<0.01	纵向>100 横向>140	20~100	100	2.2	$-2 \times 10^{-4}$	0.0004	$10^{13}$	200	$2.2 \times 10^{-1}$
聚苯乙烯	1.05	<0.01	40~75	2~4	60	2.5	$-7 \times 10^{-5}$	0.0004	$10^{15}$	110	$8 \times 10^{-1}$
聚酯	1.39	0.3~ 0.4	>140	40~130	120	3.2	$5 \times 10^{-4}$	0.003	$10^{14}$	160	$15 \times 10^{-1}$
聚碳酸酯	1.2	<0.01	50~70	100	125	3.0	$3.5 \times 10^{-4}$	0.002	$10^{14}$	160	
矿物油 浸渍纸	0.7~ 1.15		20~100		75	3~4	$2.7 \times 10^{-4}$	0.0013~ 0.003	$10^{10}$	50~130	$1.7 \times 10^{-1}$

能与油纸性能的比较。聚苯乙烯薄膜较早用于电力电容器，浸渍不含芳香馏分的高度净化的矿物油，可用以制造中频电热电容器，由于损耗小，可由空气自然冷却，使电容器结构简单，并提高比特性。近年来，聚酯薄膜、聚碳酸酯薄膜用于直流和脉冲电容器，有浸矿物油的，也有浸蓖麻油的。对工频电力电容器所用的塑料薄膜，要求 $\epsilon, E^2$ 大， $\text{tg } \delta$ 小，耐热性较高，不溶解于浸渍剂，机械强度高，老化性能好，来源方便，成本低。很多薄膜由于某种缺陷，用于工频电力电容器都不合适。如有些薄膜由于含有稳定剂或抗氧剂或反静电剂而 $\text{tg } \delta$ 较大或在聚合过程中残留杂质引起电性恶化。有些非极性薄膜（例如聚苯乙烯薄膜）电性虽好但工作温度较低；有些极性薄膜（如聚酯薄膜）能在直流上应用，但因 $\text{tg } \delta$ 较大不宜用于工频交流；有几种薄膜如聚碳酸酯、聚苯撑氧、芳香性聚砜，其他性能都好，但还没有合适的浸渍剂。到目前为止，仅双轴定向等规聚丙烯薄膜广泛用于电力电容器，它具有工频交流电力电容器介质所要求的综合性能。下面分别介绍几种薄膜。

### （一）聚丙烯薄膜

制造聚丙烯薄膜的原料是聚丙烯树脂。聚丙烯树脂是石油精炼过程中副产品丙烯( $\text{C}_3\text{H}_6$ )经过聚合或共聚后的产品，来源广泛，价格低廉。

聚丙烯比重0.9，是目前最轻的一种塑料。它的化学和物理性能都相似于高密度聚乙烯，但其某些性能如抗拉强度高于高密度聚乙烯。耐磨性优于除尼龙外的其他许多热塑料；耐热性高于聚乙烯（聚乙烯熔点为 $120^\circ\text{C}$ ，聚丙烯为 $166^\circ\text{C}$ ）；化学稳定性较好，室温下几乎不溶于任何溶剂，稳定性随聚丙烯结晶度增大而提高。它能耐强酸、强碱和盐水溶液。因为它是非极性聚合物，吸水性小，电性能与聚苯乙烯相近似。

聚丙烯制成薄膜有非定向膜和单轴及双轴定向膜三种。这三种薄膜可用扁平模把加热的树脂挤压到冷却辊上，然后用拉膜机进行纵的（单轴）定向及纵和横的（双轴）定向，也可用吹塑法制造非定向薄膜。非定向聚丙烯薄膜一般用于包装。双轴定向可使结晶取向性提高，从而在机械和电气特性方面比非定向薄膜有显著提高，抗张强度和硬度明显提高，有更高的熔点，低的介质损耗、高的电阻率，低吸水性（ $<0.03\%$ ）和很好的耐油性。现在双轴定向等规聚丙烯薄膜已开始推广作为电缆和电容器等的绝缘材料。这种聚丙烯薄膜在电气性能方面和电容器纸比较起来有很大的优越性，如击穿强度比纸大8倍而 $\text{tg } \delta$ 小9倍，基本上没有针孔和导电质点，能和多种液体介质组合使用，是电力电容器的一种十分理想的介质材料。

聚丙烯薄膜在电力电容器中的应用，通常是聚丙烯薄膜和纸组合交替放置以便浸渍，但采用全薄膜介质也渐多。在薄膜与纸组合介质系统中夹纸是吸收浸渍剂的重要措施，现在一般用薄膜、纸各一层或两层薄膜夹一层纸的组合介质。薄膜与纸组合的介质系统有较好的工艺性。纸价格较低，与薄膜组合浸渍后使组合介质的 $\epsilon$ 较高。由于组合介质中场强分配和材料的介电常数成反比，而薄膜 $\epsilon$ 低又能承受高得多的电场强度，使组合系统的平均场强高于纯纸质电容器。组合介质的 $\epsilon_r$ 、 $\text{tg } \delta$ 和工作电场强度与薄膜与纸的比例有关，较多的是薄膜占组合介质比例为60~70%，浸硅油时平均工作场强约可提高到纸质电容器的两倍（30~35兆伏/米），矿物油浸聚丙烯和纸组合介质工作场强在20兆伏/米以上，即可减少介质厚度，从而大大改进比特性。组合介质电容器除能提高比特性外，还有损耗低，短时过电压特性好，单台容量高，电容稳定，寿命长，效率高，经济性好等优点。采

用纯薄膜制造电容器，主要问题在于浸渍困难，必须采用  $10^{-5}$  毫米汞柱的高真空浸渍工艺及其他专门措施（粗化薄膜表面和用湿润性较大的浸渍液体）。全薄膜电容器工作场强可达 50 兆伏/米， $\text{tg } \delta$  不大于 0.03%，有效体积仅为纸电容器的 1/4。全薄膜电容器浸渍后数天内不应加最大工作电压，以求剩余气体充分溶解。采用聚丙烯（全薄膜或与纸组合）作介质时，必须注意与浸渍剂的相容性，它在  $86^{\circ}\text{C}$  以上时会溶解于含芳香族的浸渍剂中。聚丙烯薄膜含有约 95% 立体规则的（等规）聚合物，但具有结晶性的不超过 65~80%。等规聚合物是不溶解的，只有约 5% 非等规的、不结晶、不定形的聚合物才能溶解于浸渍剂中达到饱和状态。为了充分浸渍和提高电气强度，真空浸渍工艺应在薄膜部分溶解和同时液体被薄膜吸收的温度下进行。三氯联苯、硅油、矿物油、蓖麻油及聚异丁烯等都可以用作聚丙烯薄膜电容器的浸渍剂。由于使用薄膜，场强提高很多，必须注意浸渍剂的稳定问题。试验表明，如加环氧稳定剂，薄膜（或与纸组合）电容器可降低起始损耗并可在运行开始几个月内继续降低；不加稳定剂的，这种作用较小。

### （二）聚苯乙烯薄膜

聚苯乙烯薄膜较早广泛用于高频和电容量要求稳定的场合。在电力方面，由于它的  $\text{tg } \delta$  小，制造电热电容器可采用空气自然冷却，使结构简化，比特性得到改善。选择聚苯乙烯电容器的浸渍剂有一定困难。聚苯乙烯会溶解于氯化联苯，用矿物油浸渍时油中的芳香族化合物也会溶解聚苯乙烯，现在一般用液体石蜡浸渍。如用矿物油浸渍则必须用高度净化的油，使其不含芳香馏分，以免溶解聚苯乙烯。

### （三）聚酯薄膜

聚酯（聚对苯二甲酸乙二酯）薄膜是极性介质，它的特点是机械强度高，可制得很薄（6~3.5 微米）的薄膜，高度耐湿、耐水解作用。击穿电场强度高于电容器纸（薄膜厚度为 30 微米时约为 240 兆伏/米）；室温和电压为 400 伏时的体积电阻率为  $3 \times 10^{14}$  欧·米；在常温范围不超过  $80 \sim 85^{\circ}\text{C}$  及在低频时， $\epsilon_r$  与温度的关系不大。在高频时， $\epsilon_r$  和  $\text{tg } \delta$  随频率而显著变化。室温下频率 1 兆赫时损耗出现最大值。聚酯薄膜同其他薄膜一样，耐电晕性较差，用于电力电容器必须浸渍液体介质，一般用矿物油或蓖麻油浸渍。聚酯薄膜可以应用纯薄膜或者与纸组合浸油作介质，一般用来制造直流和脉冲电容器。纸和聚酯薄膜组合介质的 5 千伏 32 微法的储能电容器，体积和重量仅为纸电容器的 40%，价格约增 20%，因此聚酯薄膜用来做要求体积小重量轻的储能电容器很有前途。

### （四）聚碳酸酯薄膜

聚碳酸酯薄膜也是极性薄膜，具有与聚酯薄膜相似的电气特性，目前仅在储能电容器中使用。与聚酯薄膜比较，其优点是：在较高温度时， $\epsilon_r$  稳定， $\text{tg } \delta$  比较小，制成的电容器工作温度上限较高（ $125 \sim 150^{\circ}\text{C}$ ）其缺点是机械强度不如聚酯，所制薄膜较厚（最薄 10 微米）。

## 三、金属化纸和金属化薄膜

电容器用纸和薄膜作介质时，都用铝箔作极板。极板材料对电容器的老化有很大影响，必须注意金属对浸渍剂有可能起不良的催化作用或化学作用。铝箔有一层氧化膜，能避免与浸渍剂直接接触，所以在大多数情况下铝箔极板优于锡箔或铜箔。电力电容器用作极板的铝箔厚度有 0.007 和 0.016 毫米等几种，其宽度视不同类型电容器而定。聚丙烯用于电



容器后，也有用双面涂敷铝的金属化纸作极板，此时纸主要用作吸收浸渍剂而不处于电场中。

金属化纸和金属化薄膜，是在纸或薄膜上涂敷一层极薄金属膜作为电极，这也是电容器制造上的一个发展。金属膜厚度仅 0.05~0.1 微米，比铝箔厚度小得多，因此大大节约了金属材料 and 减轻了电容器重量。金属化纸和金属化薄膜的突出优点是具有“自愈性”，即当某处击穿时，短路电流使击穿部位周围的金属膜熔化和蒸发而又形成绝缘，致使介质中贯穿性导电质点和弱点对耐电强度的影响显著减少，从而提高工作场强。用铝箔极板时，考虑到介质中贯穿性导电微粒和弱点的存在，不得不在极板间至少用三层介质，而金属化介质只要一层即可，这对低压电容器特别有利。用金属化纸或金属化薄膜做电容器时，可利用少量的直流脉冲烧去绝缘层的导电性弱点，这就有可能用薄的单层介质制造出工作可靠的电容器。

金属化纸和金属化薄膜的制造工艺相似。直流或脉冲电容器用的金属化纸是在电容器纸单面或双面涂以约 1 微米厚快干纤维漆以提高绝缘电阻，然后采取真空喷镀的方法喷上一层厚 0.05~0.1 微米无毛刺的金属（锌、镉、镍、铝都可以，而以锌最合适，沸点较低）。交流电容器用的金属化纸或薄膜，为了减少介质损耗不喷漆，可在纸或薄膜表面上直接蒸发金属膜。这种金属化纸或薄膜的等效  $\epsilon_r$  更高（浸蜡时为 5.38）。因为无喷漆，金属蒸发膜和与纸或薄膜的接触面凹凸增多，使电极实际面积增大而电极间的实际厚度减小，极间电容增大，等效  $\epsilon_r$  提高。金属化薄膜采用这种方法时，为了提高金属与薄膜的机械附着强度，有些薄膜（如聚酯）先在薄膜表面喷银底层，再喷锌层。聚苯乙烯、聚酯、聚碳酸酯等薄膜都比较容易金属化。必须注意，金属化介质的金属膜层吸潮后在高温下容易被损伤腐蚀，这可能引起电容器的性能变坏（如电容减小， $\text{tg } \delta$  增加），因此金属化介质必须严格防止吸收水分，在储存加工过程中要有适当的防护措施。金属化纸一般不可用氯化物浸渍（金属化薄膜可以），因为纸析出氢，氯化物浸渍剂析出氯，形成腐蚀性的 HCl；但加某些特殊的稳定剂后可以采用氯化物浸渍。无线电用金属化介质电容器，通常用纯地蜡（有时加凡士林）或合成石蜡浸渍。

金属化纸和金属化薄膜开始用于直流和脉冲电容器，近年来也用于交流低压电容器。我国有些电力电容器厂早已生产金属化纸移相电力电容器，1974 年又试制成金属化聚丙烯薄膜干式移相电容器。金属化聚丙烯薄膜干式移相电容器，比用矿物油或三氯联苯浸的纸质同类产品体积小，重量轻（例如 0.23-5-1 产品，氯化联苯浸纸的比特性为 3.93 千克/千乏，油浸纸为 5.06，而金属化聚丙烯薄膜干式的为 1~1.26 千克/千乏），工艺简化，工序减少（不需要真空干燥及浸渍过程最为突出），在使用中无渗漏现象，不易燃，这是电力电容器生产的一条新途径。工频交流金属化介质电容元件，电压一般不超过 280 伏，电压更高时，则需元件串联。由于金属化介质电容器导热性差，为了防止温升过高，容量不能太大，一般 250 伏时不大于 10 微法，1000 伏时不大于 1 微法。

#### 四、无机介质

无机介质主要介绍特种电瓷和云母。高介电常数的特种电瓷电容器大量用于无线电装置，近年来也用于电力系统，如高压空气断路器中所用的均压电容器有的就是用高介电瓷作介质。云母主要用以制造工作温度较高的电容器。云母电容器有很宽的温度范围，电性