

# 电容器的设计与计算

西安电力电容器研究室译

一九七二年八月

# 电容器的设计与计算

# 毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

外国有的，我们要有，外国没有的，我们也要有。

一切外国的东西，如同我们对食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

# 前 言

伟大领袖毛主席教导我们：“学习外国的东西，是为了研究和发展中国的东西。”在以毛主席为首的党中央的领导下，我国的社会主义革命事业正在迅猛发展，电容器在科学技术和工业部门各个领域中得到广泛的应用。但是，目前关于电容器制造的设计与计算国内尚无专著论述，为了促进我国电容器制造业的发展，满足我国广大工人、技术人员从事电容器制造工作的参考，我们试译出版了《电容器的设计和计算》一书供参考。

遵照毛主席关于“应当以中国人民的实际需要为基础、批判地吸收外国文化”的教导，这本书已经较旧了，其中列举的一些参数显得比较保守。因此，只能参考一般理论概念、计算公式及方法，而设计参数的选择，则应根据我们自己的实践为依据。至于近年来有关电容器新技术的发展，书中就更少加以论及了。此外，书中不少地方突出了“专家”、“权威”的个人成就，这是必须加以批判的。由于我们学习毛主席著作很不够，业务水平也有限，所以书中错误和不妥之处一定不少，请同志们予以批评指正。

西安电力电容器研究室

一九七一年七月

# 目 录

## 第一章 电容器计算的一般概念

- § 1. 计算的基本原理及任务…… ( 1 )
- § 2. 电容器电气强度的计算…… ( 6 )
- § 3. 电容器的电容计算…… ( 37 )
- § 4. 电容器的电感计算…… ( 47 )
- § 5. 电容器内损耗计算…… ( 70 )
- § 6. 电容器热计算基础…… ( 91 )
- § 7. 套管计算…… ( 113 )
- § 8. 电容器比特性的决定…… ( 128 )

## 第二章 无机固体介质电容器的设计与计算

- § 9. 小容量云母电容器…… ( 138 )
- § 10. 陶瓷电容器…… ( 147 )

## 第三章 纸质电容器的设计与计算

- § 11. 纸电容器的主要材料…… ( 178 )
- § 12. 直流1500伏以下纸电  
容器…… ( 198 )

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| § 13. 1500伏以下的金属纸<br>电容器.....     | ( 214 ) |
| § 14. 直流1600伏及以上的<br>纸电容器.....    | ( 219 ) |
| § 15. 改进50赫电工装置功<br>率因数用电容器.....  | ( 229 ) |
| § 16. 中频 0.5—10 千赫纸<br>电力电容器..... | ( 256 ) |
| § 17. 耦合及抽能电容器.....               | ( 271 ) |
| § 18. 脉冲电容器.....                  | ( 278 ) |

## 第四章 有机合成薄膜电容器的 设计与计算

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| § 19. 薄膜电容器的一般特性.....      | ( 296 ) |
| § 20. 非极性合成薄膜电容器.....      | ( 297 ) |
| § 21. 极性合成薄膜介质电<br>容器..... | ( 313 ) |

## 第五章 电解电容器的设计与计算

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| § 22. 电解电容器的一般特性..... | ( 318 ) |
| § 23. 极性干式电容器.....    | ( 319 ) |
| § 24. 非极性干式电容器.....   | ( 329 ) |

|                    |         |
|--------------------|---------|
| § 25. 湿式电解电容器..... | ( 331 ) |
|--------------------|---------|

## **第六章 气体和液体介质电容器的设计与计算**

|                    |         |
|--------------------|---------|
| § 26. 一般概念.....    | ( 336 ) |
| § 27. 固定空气电容器..... | ( 338 ) |
| § 28. 充气电容器.....   | ( 348 ) |
| § 29. 真空电容器.....   | ( 357 ) |
| § 30. 液体介质电容器..... | ( 370 ) |

# 电容器的设计与计算

## 第一章 电容器计算的一般概念

### § 1. 计算的基本原理及任务

电容器的计算在于求得合理的尺寸，以保证获得电容器一定的电气特性，并在其生产费用最少的条件下能可靠地运行。在某些情况下，如果电容器使用在特别重要的设备中，其价格可能是次要的，则应致力于获得尽可能高的特性或尽可能小的体积和重量。

通常计算时在所设计电容器内使用的介质类型是予先知道的。在这种情况下为了完成计算应该给定三个主要参数：电容器的额定电容 $C_H$ 、额定工作电压 $U_p$ 、工作频率 $f_p$ 。

对于大型交流电容器可能指定无功功率来代替电容。

$$P_p = U_p^2 \omega C_H = 2 \pi U_p^2 f_p C_H \quad (1-1)$$

已知无功功率、电压及频率后，可由此式得到计算电容的式子

$$C_H = P_p / 2 \pi U_p^2 f_p \quad (1-2)$$

如果计算任务中假定，电容器系用于直流电压 ( $f = 0$ )，则直流有时理解为整流电压。在此情况下电压曲线中有两个分量：不变分量及交变分量。交变分量可使电容器显著发

热，以及影响其游离特性。电容器的瞬时电气强度将决定于不变分量及交变分量幅值的总和。因此在计算任务中应说明脉动（整流的）电压交变分量的幅值及频率。

当电容器在可能有高次谐波的交流电路中运行时，必须说明那些在电压曲线显出最强的高次谐波的频率及幅值。高次谐波的存在是危险的，因为电压曲线显著畸变为非正弦波时，损耗的增加会引起电容器的附加发热。

如果电容器使用于脉冲电压，则必须说明脉冲的波形及脉冲之间频率。并且着重指出脉冲极性是否改变。

通常对于一定介质的电容器在工作电压  $U_p$  和 试验电压  $U_{исп}$  之间有一定的比例。如果在工作条件下电容器将经受

瞬时较大过电压作用而可能要求比值  $\frac{U_{исп}}{U_p}$  较通常数值为大时，则这点也应在计算任务中说明。

除  $U_p$  值外，在计算任务中还应规定电容器上电压作用时间的长短，即电容器的使用期限，因为电容器使用在不同的条件下，该值可能有从几十万小时到几小时甚至更低的波动。对脉冲电容器可以规定在整个电容器使用期内可能作用于其上的脉冲总次数来代替使用期限。如果对电容器提出了一定的运行可靠性的要求，则在计算任务中通常是指故障强度的最大允许值  $\lambda$ ，其单位为 1/小时。

故障强度为在最高允许工作温度下施加额定电压进行连续运行试验时单位时间内（1 小时内）损坏电容器的相对数，

$$\lambda = \frac{2n}{(N_1 + N_2)\tau}, \quad (1-3)$$

式中  $\tau$  —— 试验时间；

$n = N_1 - N_2$  —— 在上述时间内损坏的电容器数；

$N_1$  —— 试验开始时一批被试电容器的数总；

$N_2$  —— 试验终了时，即经过时间  $\tau$  后该批电容器中剩下的尚能工作的电容器数。

同时应记住，有时也在其它的电压和温度下确定  $\lambda$  值，当增大电容器的外施电压及环境温度时  $\lambda$  将增大，即恶化电容器的可靠性。有时不仅在由于电压而老化的情况下确定  $\lambda$  值，而且也有的是在电容器的储存条件下确定。在这种情况下电容器的损坏不是表征为击穿，而是密封性的破坏，参数超出允许标准范围等。

在计算电容器时，不可能算出  $\lambda$  值，但在选择电气强度的安全系数时（如要求可靠性高，应增大安全系数，即降低  $\lambda$  值），在选择密封系统等时必须对它加以注意。

为了进行电容器热计算，必须在计算任务中规定电容器使用的工作环境温度的上限  $t_{\text{Макс}}$ ，此温度对选择电容器的结构形式包括对密封系统也有意义。为了正确选择外结构形式，还必须规定周围环境温度和空气的压力。湿度（可分：室内的，在储存或在不加温室内运行条件下增高的，在露天运行条件下很高的，在高湿和高温环境同时作用的运行条件下热带的等）对选择密封系统有着决定意义。周围环境的空气压力对电容器出线绝缘的放电电压有影响，因此在计算绝缘子时应予以考虑。

周围环境温度下限  $t_{\text{Мин}}$  也值得注意，特别对那些用液体介质浸渍或浇注的电容器。在此情况下计算时必须考虑注

在电容器中的液体体积由于温度在整个可能变化的范围内的变动所引起的变化。

如果已知介质类型，则在多数情况下也就决定了电容器的基本结构——电容器元件的结构类型：平板式、圆柱式或螺旋式（卷绕式）。有时同一种介质可以采用好几种结构，如果在选择结构方案方面没有特殊的理由，则必须计算若干个方案从中选出一个合理的方案来。

如果在计算任务中未指定介质类型，则计算应从选择介质开始。这一任务可以简化，因为一定数值的 $C_H$ 、 $U_p$ 及 $f_p$ 的结合业已决定了只能采用现代电容器制造业上拥有的那些介质中的某几种。

为了简化介质类型的正确选择，在计算任务中希望有下列电容器特性的补充数据：电容值的准确度（电容对额定值的允许偏差 $\Delta C_H$ ）；电容温度系数 $ТКЕ$ 或在工作温度极限值 $t_{мин}$ 及 $t_{макс}$ 时电容与 $20^{\circ}\text{C}$ 时电容值相比的允许变化。

（如果不要求电容随温度的变化而直线变化的话）；损失角正切 $\text{tg}\delta$ 的最大允许值；电容器绝缘电阻的最小允许值 $(R_{из})_{мин}$ 或最小时间常数 $(R_{из}C)_{мин}$ 。

考虑这些总要求后，可以选出一种确定的介质。如果可以选两种或更多种不同介质，则必须对它们每一种都进行计算，然后再选出合理的方案。

电容器计算中基本的一点是正确的选择介质厚度 $d$ ，因为电容器的尺寸及其运行可靠性均将由它来决定。实际上每次必须在下列两个相反的要求之间采取折衷的办法：保证高的可靠性，为此要求增加 $d$ ，而为保证电容器的最小重量，体积和成本，则要求减少 $d$ 。将如下所述，电容器体积的变

化十分近似地正比于介质厚度的平方，因此减少厚度  $d$  是降低电容器价格及减少外形尺寸的重要方法。

对于直流及低频电容器， $d$  值通常根据电容器电气强度  $U_p$  的计算来确定，对于一系列高频电容器， $d$  值按热计算求得，然后仅再核对一下电气强度的安全率。

由于在电子技术中半导体技术的应用，很多种电容器的  $U_p$  的极限值大大降低了，因此在计算低压电容器时可以不计算  $d$  值，而只根据工艺条件对该介质选定其最小值即可。通常对纸、人造薄膜、云母等材料，必须参照有关 ГОСТ（苏联国家标准）或 ТУ（技术条件）中所述的最小厚度值。

现代为了获得极小厚度的介质层开拓了许多新工艺方法（真空蒸发、阴极溅射、热及化学氧化、高温分解，气体放电聚合、薄层涂敷等）。在此情况下即使电压小也应考虑电气强度来选取介质厚度  $d$ 。

$d$  值决定后必须选择电容器的元件结构——电容器的基础，这通常决定于指定的或选好的介质类型，以及计算任务中规定的电容器的额定参数。按照结构来选用与介质厚度及极板主要尺寸相关的电容计算公式。用所选好的电容公式，已给定的  $C_H$  值及已获得的  $d$  值，以及从结构的观点选定极板的宽度与长度之比，并对平板式或卷绕式电容器指定极板长度或指定圆柱式电容器直径后，可以求得介质有效部分的尺寸。为了确定电容器元件尺寸，还必须根据不闪络的要求或者工艺条件附带选择边缘尺寸（从极板边缘到介质边缘的距离），以及根据机械强度要求亦即根据工艺条件或基于极板中损耗值的计算（对中频或高频电容器）选择极板厚度。

确定电容器元件尺寸后（在某些情况下，即确定了芯子

尺寸，如果元件系串联、并联或混联的话），再根据外结构形式的选择，以及对壳（如为金属壳时）绝缘的计算，电容器的尺寸就确定了。同时，如果介质厚度仅系根据电气强度的计算选定的，则在决定外形尺寸后，应对用于交流或脉冲电压（在较高的脉冲重复频率下）的电容器，以及对工作温度上限大的（约 $100^{\circ}\text{C}$ 及以上）※直流电容器进行热计算。

损耗通常是在研究新型电容器时决定的，这时对于热计算不能采用已生产的类似电容器上测得的损失角的实际数据。电感计算则在要求电容器具有小的该参数时进行之（高频电流的分路、储能及瞬时放电等）。

## § 2. 电容器电气强度的计算

电容器必须作技术上的计算，使其电气强度无论在试验电压或瞬时过电压（瞬时强度）作用下，还是在额定工作电压的连续作用下（长期强度）都得到保证。在上述两种情况下均不应发生介质击穿或边缘击穿（表面击穿）。并且不仅应该考虑分隔电容器极板的有效（主要的）介质，而且应考虑元件之间绝缘及对壳绝缘（当采用金属外壳和金属压板时），以及电容器出线的外绝缘（引出绝缘子，引出导线绝缘等）。

计算时主要注意力应放在有效介质上，其厚度决定电容器的比电容，因而应尽可能地小。至于对壳绝缘或出线绝缘

---

※ 在СИ系统中温度按凯氏刻度  $T_K = t + 273.15$  测量，式中  $T_K$ —温度， $^{\circ}\text{K}$ ， $t$ —温度 $^{\circ}\text{C}$ 。

则可用很大的厚度。将电压施加于有效介质的电极面积，通常远大于对壳绝缘及出线绝缘的面积，因此增加了有效介质击穿的危险性。

电气强度的计算在于求得允许的电场强度值：瞬时电压作用下的 $E_{ucn}$ 及长期电压作用下的 $E_p$ 。然后决定两个介质厚度值：

$$d_1 = \frac{U_{ucn}}{E_{ucn}} \text{ 及 } d_2 = \frac{U_p}{E_p} \quad (1-4)$$

并选用其中最大的。通常对电容器的连续运行进行计算，即决定 $E_p$ ，由所求得厚度值，然后求得相应该厚度及已给定的试验电压的 $E_{ucn}$ 值，并检查能否保证该值 $E_{исп}$ 在瞬时击穿时有足够的电气强度的安全系数

$$K = \frac{U_{np}}{U_{ucn}} = \frac{E_{np}}{E_{ucn}} \quad (1-5)$$

式中 $K$ ——安全系数。

如果正确选择了允许电场强度的话，通常在生产中采用的 $\frac{U_{ucn}}{P_p}$ 比就能保证在试验电压下有必要的电气强度的安全系数。

但在使用条件下电容器有时要受到大的过电压作用，因此可能要求 $U_{ucn}$ 比通常数值大。这时可能出现这种情况，按瞬时电气强度条件不得不把介质厚度取得比为了保证长期电气强度所要求的为大。因此电容器既要依据在瞬时电压作用下又要依据在长期电压作用下来计算。

## 在瞬时电压作用下电气强度的计算

计算根据已给定的试验电压值  $U_{ucn}$  进行，试验电压值是电容器在短时间试验时应能瞬时承受的，通常试验时间改为几秒钟，很少为一分钟。试验时间将在技术任务书中说明，或者如系计算已生产的电容器，将按现行 ГOCI 或技术条件决定。 $U_{ucn}$  值的确定，应考虑电容器在实际运行条件下可能受到的瞬时过电压。

电容器试验时其介质中的允许电场强度值按对瞬时击穿场强  $E_{np.kp}$  已知的安全系数选择。当选择安全系数  $k$  时，必须考虑  $E_{np.kp}$  与很多因素的关系，包括与承受时间的关系，即使时间很短（1 秒——1 分）。因此希望，用以计算  $U_{ucn}$  所采取的  $E_{np}$  值是在电容器作瞬时电压试验时或在尽可能接近于该时间时取得的。

关于所选介质电气强度的数据可能有两种特征： $E_{np}$  的平均值或能够评价各个试样的对  $E_{np}$  平均值偏差的样品试验的整个数据。

如果仅有试验若干数量同类试样所取得的平均值，且这些试样的数目及对平均值的必然分散数据都不知道，则  $U_{ucn}$  值应按平均值的已知裕量来确定。

$$U_{ucn} \leq \frac{E_{np}}{K_1} \quad (1-6)$$

考虑到对于小厚度介质及小的电极面积分散率约为  $\pm 50\%$ ，大体上应取  $K_1$  值不低于 2。如果电极面积增大，介质厚度增加，则分散率可达  $\pm (25-30)\%$ ，但为安全可靠起见

可维持 $K_1 = 2$ 。

如果 $E_{np}$ 直接由试验得出，则除平均值外可将整个试验结果作成击穿积分几率（试样在一定的 $E_{np}$ 值或任何更小值下击穿的总相对数与整批试样之比）的关系曲线（图1）。

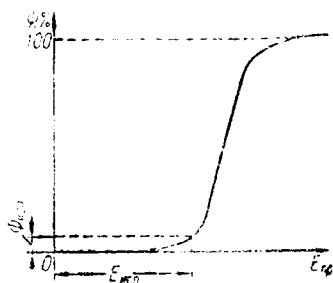


图1 电气强度分散曲线

当试验足够多的试品时可以从曲线找到这样的 $E_{ucn}$ 值，它使击穿几率不超过某一确定的最小值 $\Psi$ ，例如1或0.1%等。这时就不需再采用 $E_{np}$ 平均值和引进为了考虑平均值分散的安全系数 $K_1$ 了。

但是必须注意到，瞬时试验时 $E_{np}$ 值与介质厚度及电极面积有很大关系。测定 $E_{np}$ 的试样的制造工艺，应该尽可能接近被设计的电容器的制造工艺。

假设平板式或绕卷式电容器，以及通常的管式电容器具有不固定的均匀电场，并且用来求 $E_{np}$ 的试样的电场图特性和被设计的电容器一样，在这种情况下瞬时电气强度与介质厚度的一般关系曲线示于图2。在小厚度范围内由于介质弱点影响加强， $E_{np}$ 随介质厚度减少而降低；在大厚度范围内则由于边缘效应影响（在这一范围内击穿主要发生在极板边缘）， $E_{np}$ 随厚度增加而降低。据以选择 $E_{ucn}$ 的 $E_{np}$ 值，应该在与被设计的电容器所用相同的厚度下获得。实际上最好对选定的介质在电容器制造上可能采用的厚度范围内作出一条 $E_{np} = f(d)$ 的曲线。

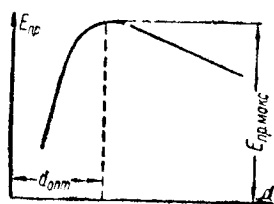


图2 在瞬时电压作用下  
平均击穿场强与介  
质厚度关系曲线

从图2曲线看出，在某一厚度值 $d_{опт}$ 下 $E_{np}$ 值达到最大 $E_{np \cdot макс}$ 。当采用层叠介质（纸质、薄膜及其他电容器），