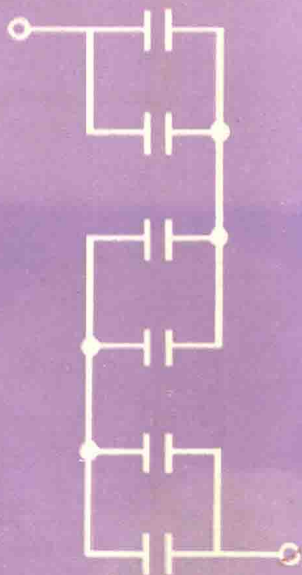


TM53/1
008



曲喜新 编

电 容 器 设 计

科 学 出 版 社



电 容 器 设 计

曲喜新 编

科 学 出 版 社

1 9 8 5

内 容 简 介

本书系统地介绍了电容器的设计原理和计算公式。全书共分五章。第一章介绍了设计电容器时的依据；第二、四两章是本书重点，详细介绍了电容器的技术经济性能和芯子的设计；第三章介绍了如何选取电容器的外部保护结构；第五章为电容器的热计算。

本书可作为高等院校有关专业的教学参考书，也可供从事电容器设计的工程技术人员阅读参考。

电 容 器 设 计

曲喜新 编

责任编辑 魏 玲

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年1月第一版 开本：787×1092 1/32

1985年1月第一次印刷 印张：3 7/8 插页：1

印数：0001—7,000 字数：84,000

统一书号：15031·022

本社书号：3868·15—7

定价：~~0.68~~ 元

1.00

序 言

电容器是一种基本的电路元件，它被广泛地用于高压输电线路、城市、工矿的配电网路，以及各种各样的通讯和电子电路。因此，尽管电容器已经有了较长的发展历史，但是，随着社会电气化和电子化的需要，电容器仍在迅速发展着。

因为用途不同，电容器被分为电力电容器和电讯电容器。前者用于强电，后者用于弱电。但是在设计原理和制造工艺上，两者基本相同。

近年来，电力电容器有了很大的发展。同时，随着晶体管和各种集成电路的出现，作为电子元件之一的电讯电容器的类别和品种也在不断增多。

随着我国“四化”的进展，对电容器的质量和数量的要求必将越来越高。

本书的内容是讲述电容器的设计原理。该书是根据成都电讯工程学院选编的《电容器》（1961年出版）一书中第九章改写而成。在这次作为单行本出版时，又作了适当的修改和补充。

在本书的编写过程中，得到了有关同志的热情帮助，刘苏川同志为本书绘制了插图，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者经验和水平有限，书中一定会有不少缺点和错误，诚恳地希望读者批评指正。

曲喜新

1983年10月19日

目 录

第一章	电容器的设计依据	1
1.1	设计电容器的依据	1
1.2	两种设计情况	4
1.3	设计电容器的主要过程	5
第二章	电容器芯子的设计和计算	7
2.1	电容器的耐压强度(电气强度)	7
2.2	确定电容器的介质厚度	8
2.3	确定电容器的极板面积	23
2.4	确定电容器的极板厚度	43
2.5	确定介质边缘的长度	47
2.6	计算电容器芯子的几何尺寸	57
第三章	确定电容器的外部结构	63
3.1	外部结构的选定	63
3.2	芯子与外壳间的绝缘	66
3.3	计算外部结构的尺寸	68
第四章	计算电容器的比率特性	70
4.1	电容器的比率特性	70
4.2	比率特性的重要意义	83
4.3	计算电容器的比率特性	86
4.4	计算电容器的材料用量	87
第五章	电容器的热计算	90
5.1	电容器热击穿的基本概念	90
5.2	电容器热计算的内涵	92
5.3	平板形电容器的热计算	95

5.4 圆柱形电容器的热计算	100
5.5 多芯子矩形电容器的热计算	104
5.6 计算电容器的散热系数	111
参考文献.....	115

第一章 电容器的设计依据

1.1 设计电容器的依据

对电容器进行设计和计算的目的, 在于求得它的最佳尺寸, 以保证在最低成本下获得所需要的电气性能。但是, 在某些情况下, 例如电容器使用在特别重要的设备中, 其成本可能是次要的, 主要应致力于获得尽可能高的电性能, 或者尽可能小的体积和重量。

为了保证电容器具有所要求的电性能, 在进行电容器的设计和计算时, 需要依据对它的技术要求和使用条件:

1. 对电容器的技术要求

对电容器的技术要求主要是:

(1) 标称电容量(额定电容量) C_n 及其允许偏差 ΔC_n , 或者无功功率 P_r (对于功率较大的交流电容器)。

(2) 工作电压(额定电压) V_w 。对于在脉动电压下工作的直流电容器, 脉动电压中的直流分量和交流分量之和不得超过额定直流电压。

(3) 工作频率 f_w 。对于交流电容器, 必须给定电容器的工作频率。

(4) 电容量的温度系数 TCC 或者电容量从 20°C 到上下两个极限工作温度的变化百分率 $\frac{\Delta C}{C_{20}}\%$ 。

(5) 损耗角正切的最大允许值 $\lg \delta_{\max}$ 。

(6) 绝缘电阻或时间常数的最低允许值 $(R, C_n)_{\min}$. 这项要求对于储能用的直流电容器、特别是高温直流电容器, 有非常重要的意义。

2. 电容器的使用条件

在电容器的使用条件中, 主要包括以下一些条件。

(1) 工作温度范围。为了进行电容器的热计算, 必须在设计任务书中规定电容器的工作环境温度上限 $t_{0, \max}$. 这个温度对选择电容器的结构形式、其中包括密封结构, 也有较大的意义。

工作温度的下限 $t_{0, \min}$ 也需要注意, 特别是对于用液体浸渍或浇注的电容器, 其中包括用电解液的干式和湿式电解电容器。在这些情况下, 必须考虑由于温度在整个变化范围内变动所引起的液体体积和性能的变化。例如, 在下限工作温度下, 液体浸渍的高压纸介或复合介质电容器就易于发生电离性击穿。

(2) 工作环境的相对湿度。这项要求对于确定电容器的外部保护结构具有决定性的意义。按电容器的工作环境, 湿度可分为室内的、室内较高的、露天高湿的以及高温高湿的(热带环境)几种。

(3) 工作环境的气压。周围环境的空气压力对电容器出线绝缘的放电电压有显著的影响, 因此, 在计算绝缘子的表面放电电压时, 需要加以考虑。

(4) 电容器在工作中可能遇到的过电压。因为电压中的交流分量能使电容器明显发热, 并且影响它的游离特性, 所以在设计直流电容器时, 需要考虑在使用条件中, 脉动电压中交流分量的大小和频率。对于交流电容器, 应说明电压中高次谐波的有无和性质。对于使用在脉冲电压下的电容器, 必

须说明脉冲的波形和频率，还要特别指出脉冲的极性是否改变。

(5) 电容器的可靠工作期限(寿命)。对电容器所要求的可靠工作期限(使用期限)有时差别很大。有的要求15年或25年,有的要求几小时甚至更短。如果对电容器提出了可靠性要求,则通常给出故障强度的最大允许值 λ ,其单位为1/小时。

故障强度的定义是在最高允许工作温度下,在电容器上加上额定电压后,单位时间(1小时)内损坏的电容器的相对数:

$$\lambda = \frac{2n}{(N_1 + N_2)\tau} \quad (1.1)$$

式中, τ 为加电压后的时间; $n = N_1 - N_2$ 为上述时间内损坏的电容器数; N_1 为开始加电压时电容器的总数; N_2 为经过时间 τ 后剩下的尚能工作的电容器数。

需要指出,有时也在其他温度和电压下确定 λ 值。当提高环境温度及增大电容器上的电压时, λ 将增大,即是电容器的可靠性变差。除此以外,还有的是在电容器储存条件下确定 λ 值。这时电容器的损坏不表现为击穿,而表现为密封性的破坏、参数超出允许范围等。

在设计电容器时,不可能算出 λ 值,但是在选择电场强度的安全系数时(如要求可靠性高时,应增大安全系数,以降低 λ 值),以及在选择外部保护结构时,必须考虑最大允许的故障强度 λ 值。

(6) 能承受的机械应力。对有的电容器,需要考虑在机械应力方面的要求,特别是在引出方式上。

1.2 两种设计情况

在设计电容器时,根据对电容器的介质已知与否,可将电容器的设计和计算分为两种情况。

1. 已知电容器的介质

在作电容器的设计和计算时,常常是已经知道电容器所用的介质类别,即是已经知道所设计的是何种电容器。在这种情况下,在设计任务书中不需要给定上述的全部技术要求和使用条件;因为在已知所用介质类别的情况下,上述的许多条件即已给定。在这种情况下,为了计算电容器的芯子,只需要知道下列条件:

(1) 在电容器的电性能方面,需要给定标称电容量 C_n 或者无功功率 P_r 、工作电压 V_w 和工作频率 f_w 。

(2) 在电容器的使用条件方面,需要给定上下两个极限工作温度、过电压大小、脉动或脉冲电压的情况。除此以外,还应该提出所要求的可靠工作期限。

假若对所设计的电容器,在工作温度、过电压以及工作期限等方面,无特殊要求时,为了计算电容器芯子,只需要知道 C_n 或 P_r 、 V_w 和 f_w 三个参量。

在电容器芯子的设计和计算结束以后,就可根据湿度、气压和温度来选定或者设计电容器的外部保护结构。

2. 未知电容器的介质

在这种情况下,电容器的设计和计算需要先从选择介质开始。这时,在设计任务书中,需要给出电容器的上述六项电气性能。

经过对这六项电性能的综合分析以后,不难选择出一种最合适的介质。假若实在不能选定一种介质、而是有两种或两种以上的介质可用时,则必须对用每种介质的情况进行设计和计算,然后从中选出一个最佳方案。

需要指出,常常是在知道 C_n 或 P_r 、 V_w 和 f_w 三个参量以后,不需要再知道电容器的其他电性能,就可从现代电容器制造业所用的众多介质中选定出几种来。

选定了介质以后,就按上述的第一种情况,进行电容器的设计和计算。

1.3 设计电容器的主要过程

按结构,电容器分为芯子和外部保护结构两个部分;而外部保护结构的大小又主要取决于芯子的大小。因此,在设计电容器时,首先要对芯子的结构和尺寸进行设计和计算。在确定了芯子的几何尺寸以后,再根据电容器的工作条件,设计或选用所需要的外部保护结构。

因为对电容器芯子的设计和计算,是以对电容器所要求的电气性能为依据,所以在确定了电容器的整个结构和尺寸以后,只能保证所设计的电容器具有所要求的电性能,但是还不能保证它是最经济的设计方案,因此为了评定产品的技术经济指标,需要进行比率特性(例如比率容量和比率重量)的计算。除此以外,为了能对生产上的用料定额提出参考数据,还需要对电容器的各种用料数量进行计算。

为了能够保证电容器长期可靠地工作,需要使它的介质在某一极限温度以下工作。因此,最后还要对所设计的电容器进行热计算,从而确定电容器在工作时,它的内部温度是否高于介质所允许的最高温度。

根据上述，可以看出，电容器的设计有以下几个主要过程：

- (1) 确定电容器芯子的几何尺寸；
- (2) 确定电容器的外部保护结构；
- (3) 计算电容器的比率特性和用料数量；
- (4) 电容器的热计算。

在设计和计算电容器的芯子时，首先要确定介质厚度。正确的确定介质厚度，即是正确的确定电容器的工作电场强度，这不但是电容器设计的基本任务，而且是设计中的一个最为关键和困难的问题。

确定了介质厚度以后，下一步就是计算电容器的极板面积。在这以前，要先对芯子的结构类型（平板形、圆柱形、卷绕形或其他形状）进行设计或者选定。虽然介质确定以后，在很多情况下芯子的结构即已确定，但是，有时对同一种介质可以采用几种芯子结构。假若这时没有其他的条件可以作为选定某一结构的依据，则必须对每种结构的芯子都进行计算，然后从中选出一个最佳方案。

第二章 电容器芯子的设计和计算

2.1 电容器的耐压强度(电气强度)

为了保证电容器在电路中能长期可靠地工作,在设计电容器时,需要根据下列原则来考虑电容器的有关电场强度问题:

(1) 在过电压的短时(≤ 1 秒—1分)作用下,电容器不当发生电击穿;

(2) 在工作电压下,在其可靠工作期限以内,电容器不能发生击穿.

(3) 电容器没有热击穿的可能性,并且要保证电容器的内部温度低于介质所允许的最高温度.

一般来说,电容器中包含有多种介质和绝缘层,例如两个极板间的介质、芯子与芯子以及芯子与外壳间的绝缘层、内引线之间的绝缘、外引线之间的绝缘(引出绝缘子、引出导线绝缘)等.显然,为了保证电容器的可靠性,在这些介质和绝缘的内部和表面都不应当发生电的和热的击穿.

由于极板间介质所承受的电场强度及介质的面积远大于其他绝缘层,所以设计时的注意力几乎全放在介质上.

在介质上的击穿有两种形式:一种是贯穿击穿(内部击穿);一种是边缘击穿(表面击穿).下面叙述如何确定介质的工作电场强度 E_w 以防止介质贯穿击穿. 在 2.5 节中将介绍为了防止边缘击穿,如何确定介质边缘的大小.

2.2 确定电容器的介质厚度

前面已经指出,在设计电容器时,应当先从确定极板间介质的最佳厚度开始. 根据电容器的工作电压 V_w 可知所需要的介质最小厚度为

$$d_d = \frac{V_w}{E_w} \quad (\text{微米}) \quad (2.1)$$

式中, V_w 为电容器的工作电压(伏); E_w 为介质的工作电场强度(千伏/毫米).

从该式看出,为了算出介质厚度 d_d 必须先确定出 E_w .

合理的确定或选取工作电场强度 E_w 是电容器设计的核心问题. 通常根据介质材料的性能和质量、电容器的生产工艺水平、试制品的快速老化(即加速寿命)试验数据以及实践经验等因素,加以综合分析后确定 E_w .

从可靠性的观点考虑,所选取的工作场强 E_w 值对于短时电击穿场强、热击穿场强等,都应该有足够的裕度. 但是为了提高电容器的比率特性,却希望选取尽可能大的 E_w , 以求减小介质厚度,从而提高电容器的技术经济指标.

为了便于确定工作场强,根据电容器的工作期限和所用介质,可以分为以下两种情况.

1. 电容器的工作期限很短或者不太老化的介质

在这种情况下,对于直流、脉冲或功率不大的交流电容器,应该首先根据介质的瞬时耐压强度 E_b , 确定出工作电场强度 E_w . 这时,先根据下式确定出电容器的测试电场强度 E_t :

$$E_t = \frac{E_{b,av}}{K_1} \quad (2.2)$$

这里, $E_{b,av}$ 为介质的平均瞬时耐压强度; K_1 为测试电场强度对瞬时耐压强度的安全系数。

因为电容器在使用过程中有时会受到过电压的作用, 并且在制造过程中难免出现次品。所以在电容器的生产中, 每个电容器都要通过耐压测试, 以保证电容器将来能长期可靠的工作。

因此, 所选定的测试场强 E_t 不仅应该保证优质电容器在耐压测试时不发生击穿, 而且应该大于在使用过程中所遇到的过电压场强。这样就可看出, K_1 的大小主要取决于介质瞬时耐压强度的分散性。显然与介质的品种和质量有关系。除此以外, 因为介质的 $E_{b,av}$ 与极板面积、介质厚度、极板边缘电场的性质以及电压的类别和频率等有关, 所以在应用式 (2.2) 时, 应该选用与所设计的电容器有近似情况的 $E_{b,av}$ 值。在没有可靠的 $E_{b,av}$ 的数据可以应用时, 须在安全系数 K_1 中加以考虑。例如对于介质厚度和极板面积较小的电容器, 选用 $K_1 \geq 2$ 。当介质厚度和极板面积都增大时, 选取 $K_1 = 2$ 。

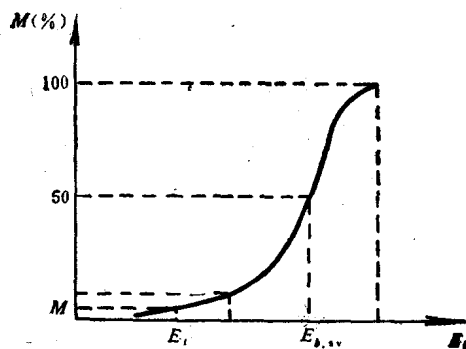


图 2.1 击穿场强分散曲线

需要指出,为了更好地确定出 E_t , 最好的方法是自己用试验得出击穿积分几率(试样在一定的 E_b 值及其更小值下击穿总数与样品总数之比)曲线(图 2.1)。

当试验的样品足够多时,可以从该曲线上直接找到 E_t 值,而不再需要应用式(2.2)。其方法是选取击穿几率不超过某一 $M(\%)$ 值(例如 1% 或 0.1%)时的击穿场强,作为测试场强 E_t 。

在确定了 E_t 以后,就可根据下式确定 E_w :

$$E_w = \frac{E_t}{K_2} \quad (2.3)$$

式中, K_2 是工作场强对测试场强的安全系数。 K_2 之所以需要,首先是因为要保证电容器在过电压作用下,不发生击穿;以及电容器的耐压测试通常是在室温下、用直流或 50 赫交流电压进行的,而电容器的使用条件(如温度和频率)却可能比较恶劣。除此以外,在 K_2 内还含有某些保险因数;这是因为常有一些电容器的偶然和个别缺陷在耐压测试中不能被揭露。基于以上这些原因,在设计电容器时,一般选用 $K_2 = 1.5-3$ 。因为高压电容在使用中所遇到过电压与工作电压之

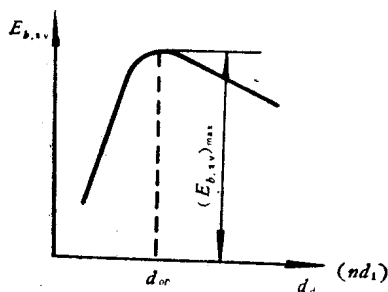


图 2.2 瞬时电压下 $E_{b,av}$ 与 d_d 的关系。图中 n 为介质层数, d_1 为每层厚度, d_{op} 是介质的最佳厚度, $(E_{b,av})_{max}$ 为最大耐压强度

比较小,所以选用较低的 K_2 值。有的甚至取 $K_2 = 1.2$ 。对于老化比较缓慢的介质,通常取 $K_2 = 1.5-2$; 对于老化显著者,取 $K_2 = 3$ 。对工作期限很短者, K_2 的值可以更小。

由于介质中疵点(导电和半导体微粒、孔洞、密度不均匀处等)和极板边缘电场分布不匀的影响,许多介质的耐压强度 $E_{b,av}$ 显著地依从于它的厚度 d 或层数 n (图 2.2)。因此在设计高压电容器时,要想法利用介质的最佳厚度 d_{op} 。但是,对于高压电容器,按(2.1)式算出的介质厚度 d_d 可能远大于耐压强度有最大值时的 d_{op} 。这时,需要采用串联芯子的办法,使每个芯子的介质厚度 d_d 等于其最佳厚度 d_{op} 。在式(2.2)中代入介质的最大耐压强度 $(E_{b,av})_{max}$ 以后,就可从式(2.2)和式(2.3)算出 E_w , 从而得出每个芯子的工作电压:

$$V'_w = E_w d_{op}$$

由此确定出串联芯子的数目:

$$N = \frac{V_w}{V'_w}$$

在设计大容量的电容器时,必须考虑随着极板面积的增大,介质的瞬时击穿强度下降的情况。这是因为增大了耐压强度特别低的疵点处于极板间的可能性。因此,这时为了合理的利用介质,提高产品的质量,需要采用并联芯子的办法。

在介质厚度不大(例如二、三层电容器纸或有机薄膜)的情况下,平均耐压强度 $E_{b,av}$ 与电容器容量(与极板面积)的关系,可用经验公式表示如下:

$$E_{b,av} = a - b \lg C \quad (2.4)$$

和

$$E_{b,av} = a' - b \lg S \quad (2.5)$$

式中, C 为电容量; S 为极板面积; a 、 a' 和 b 为用一定厚度的给定介质制造的电容器的常数。显然, a 和 a' 分别为单位容