

高等学校工科电子类规划教材

# 电解电容器

(修订本)

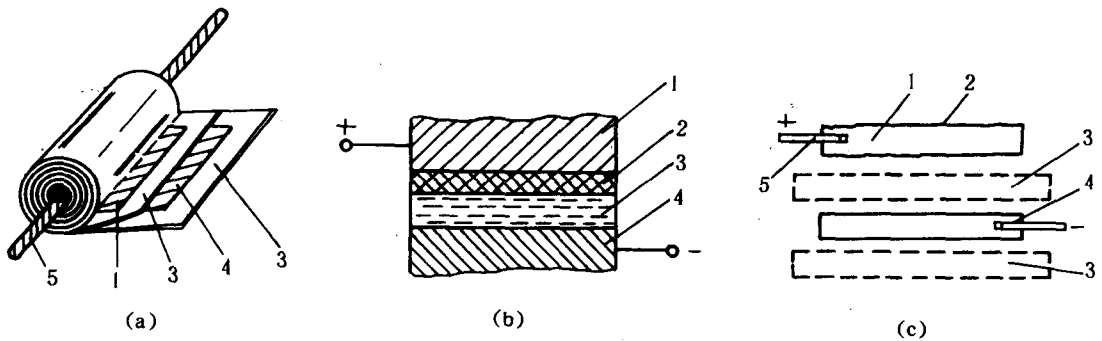
陈国光 曹婉真 编著

西安交通大学出版社

# 第一章 电解电容器的特点、类型和表征电参数

## 第一节 电解电容器的特点

一般大容量电容器具有能储存电量,进行充、放电,允许通过交流电而阻断直流电等性能,电解电容器也基本上具有以上性能。在结构与外形上,以箔式卷绕类型圆筒芯子为例,如图1-1所示,从外观上比较,电解电容器的芯子几乎与纸介电容器芯子无甚差别。因此要区分电解电容器与其他类型电容器的差别,首先还应在结构及性能上找出其独特之点,以认识其间的不同。



(a) 卷绕型芯子; (b) 层状结构示意图; (c) 局部放大的内部结构图

图 1-1 箔式电解电容器结构示意图

1—金属阳极或称正极; 2—金属氧化膜(电介质); 3—浸有电解质的衬基纸(阴极);  
4—引出极箔(负极); 5—引出极片

### 一、 电解电容器的结构特点:

电解电容器的内部结构与其他类型电容器相比,有明显的不同,大致有三个特征:

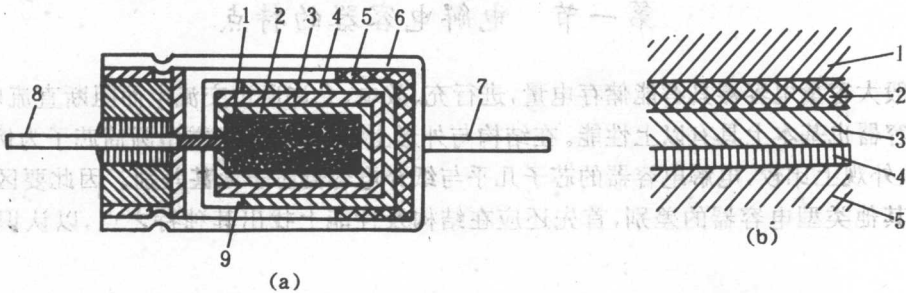
(1) 电解电容器的工作介质是在一些金属(如铝、钽、铌之类)表面上所生成的一层极薄的金属氧化膜,此层氧化膜介质完全与组成电容器的一端电极结合成一个整体,不能单独存在。而我们通常所认识的电容器介质则是由一种独立制造的绝缘材料(如电容器纸、有机薄膜、云母片和陶瓷片等)所构成,且须另加电极。

(2) 电解电容器中生成氧化膜介质的金属是电容器的一个电极称为阳极,在极性电解电容器中是接入电路中应用时的正极。电容器的另一极并非金属,而是所谓“电解质”(注意,电解质不是电介质),它可以为液体,也可为糊状、凝胶或者是固体,这是使电容器获得极高的工作电场强度以及保持产品可靠性的必要条件,这一极称为电容器的阴极。

(3) 为了使阴极能与外界电路相连接,又以另一金属与电解质相接触,这是电容器接入电

路时的负极,仅起引出阴极的作用。

再以烧结型电解电容器芯子为例,如图 1-2 所示。图 1-2(a)表明以一种金属粉(如钽粉)将其压制成型后,又经高温真空烧结成一多孔的坚实芯块,其外表可做成片、珠、圆柱等形状,再经阳极化处理生成氧化膜,仍和烧结块成一整体,最后经浸渍或被覆电解质,根据产品类型不同,或浸渍于液体电解质中并装入金属外壳者称液体烧结电解电容器;或被覆固体电解质后再被覆上一层导电金属如石墨及铝锡涂层,最后装入金属外壳或用树脂包封者称固体烧结电解电容器。图 1-2(b)则是它的层状结构局部放大示意图。



(a) 烧结型电解电容器芯子截面图 (b) 层状结构局部放大示意图

图 1-2 固体烧结型电解电容器结构示意图

- |                             |             |           |
|-----------------------------|-------------|-----------|
| 1—已形成氧化膜的烧结阳极块;             | 1—阳极基体;     | 2—氧化膜层;   |
| 2—固体电解质被覆层(已渗入压块内部者,图上未显示); | 3—阴极固体电解质层; | 4—石墨层;    |
| 3—石墨层;                      | 5—锡焊料;      | 5—铅锡合金浆层; |
| 4—银及铅锡浆涂层;                  | 6—外壳;       |           |
| 5—锡焊料;                      | 7—负极引线;     |           |
| 6—外壳;                       | 8—正极引出线;    |           |
| 7—负极引线;                     | 9—绝缘漆层;     |           |

从以上两种结构,不论是箔式或烧结型,均具有以上所述的三点共同结构特征。

## 二、 电解电容器的性能特点:

电解电容器结构上的这些特征,决定了这类电容器在性能上有其独特之处,现简述如下:

(1) 单位体积内所具有的电容容量特别大,即比容量非常高。当工作电压越低时,这方面的特点也就越突出,因此特别适宜于小型化,例如 CD26 型低压大容量铝电解电容器和 CA30 型液体烧结钽电解电容器,其比容量约为  $300$  和  $500\mu\text{F}/\text{cm}^3$ 。与其他类型电容器作比较,如在小型化方面也呈现特色的小型金属化纸介电容器以及低压独石瓷介电容器,它们的比容量一般不会超过  $2\mu\text{F}/\text{cm}^3$ 。两者相差非常悬殊。由于电解电容器的工作电压可以做得相当低,同一容量的电容器,显然低工作电压的比容量要比高工作电压的比容量大得多,这样相比就不够确切。因此还常用单位体积内的电容量和电压乘积值来表示,即微法·伏/厘米<sup>3</sup>。在此的体积大小是指外形尺寸而言,不单是阳极烧结基体或卷绕芯子。如液体钽电容器为  $14\ 000\ \mu\text{F}\cdot\text{V}/\text{cm}^3$ 。

(2) 在电容器的工作过程中,具有自动修补或隔绝氧化膜中的疵点所在的性能使氧化膜介质随时得到加固和恢复其应有的绝缘能力,而不致遭到连续的累积性破坏,这种性能称为自愈特性。

(3) 工作电场强度非常高与具有自愈特性有关。如工作电压为 450V 的铝电解电容器,按计算其氧化膜厚度约为  $0.78\mu\text{m}$ ,则其工作场强约达  $600\text{kV/mm}$ ;同样,低工作电压的产品,也具有类似的工作场强,这样的场强约是纸介电容器的三十几倍之多。固体电解质钽电解电容器的工作场强虽略低一些,但其值也具有相同的数量级。正因为电解电容器的工作场强较任何类型电容器都大,才保证了它的小型化。

(4) 可以获得很大的额定电容量。电解电容器在较低的工作电压范围内,能非常方便地获得几百上千微法数值的电容量(据报道目前能够向计算机电源提供所需要的  $6\text{V}/1\text{F}$  的电容量,而其体积也还在合理的尺寸范围内,如  $\phi 90\times 160\text{mm}$ 。可以这么说,当要求几十微法以上电容量时,只有从电解电容器方面去考虑)。特别是在电源滤波,交流旁路等用途上尚无竞争对手。

(5) 具有单向导电性,即所谓有“极性”。应用时应按电源的正、负方向接入电路,电容器的阳极(正极)接电源的“+”极,阴极(负极)接电源的“-”极;如果接错不仅电容器发挥不了作用,而且漏电流很大,短时间内芯子就会发热,破坏氧化膜,随即失效损坏。如果需要短期应用在完全是交流电源或交流成分较强的直流电路中,可以采用一种称为“双极性”的电解电容器,就是将阴极引出箔换成与具有氧化膜的阳极相同的电极,这样实际上是两个电解电容器背对背串联的结构,不仅容量减少一半,而且总体积也随之增加。“双极性”电解电容器仅是改变了电容器的结构,并没有改变氧化膜的单向导电本质,这给用户使用带来了一定的不方便。

(6) 工作电压有一定的上限值。例如单个铝电解电容器的工作电压一般最高值为 500V,固体电解质烧结钽电解电容器的上限值为 125V(正在研究达到 150V),纵使今后有进一步提高上限值的可能,潜力也是有限的,但这方面的缺点对配合晶体管或集成电路来说,是不重要的。

(7) 绝缘性能较差。绝缘性能一般均以漏电流的大小来表明,可以说电解电容器是所有类型电容器中的最差者,如高压大电容量的铝电解电容器的漏电流可达  $1\text{mA}$  以上,相应的绝缘电阻尚不足  $1\text{M}\Omega$ ;在这方面钽电容器要比铝的优越得多,其漏电流以微安计。

(8) 损耗角正切值较大,而且温度、频率特性亦差。但钽电容器相应的性能要比铝电容器为佳。

(9) 铝电解电容器易老化,性能的可靠性将逐年下降。这与所使用的原材料和工艺条件有密切的关系,虽也有长寿命的铝电容器,但一般地说它的作用和贮存均有一定限制,特别是经长期贮存不用,突然加上额定电压值,最易导致电解电容器的失效损坏甚至爆破。在这方面,钽电容器则不存在这个问题,久贮后可以随时使用。

如果进一步考虑到产品的价格,则铝电解电容器的价格便宜,在消费类电子产品中的应用更显得有吸引力;在投资类电子产品及军事航天等应用时,由于钽电容器的性能优良,虽然价格稍贵,还是值得选用。

以上概括地说明了电解电容器的结构和性能特点,我们只有掌握了它的性能特点,才能在实际中更好地使用它们。它们的不少特点和介质氧化膜的性质以及应用电解质作阴极密切相关,甚至可以说基本上取决于这两者,在后面的章节中将再详细介绍。

## 第二节 电解电容器的类型

电解电容器是电容器种类中的一个大大类,虽然它与非电解电容器的根本区别在于是否应用电解质,而电解质又有液体、糊状、固体等的区别。但实际应用时还需根据其阳极金属材料与外形的不同、使用电压的高低不同、封装形式的不同、或根据电解质的形态或按电容器用途与工作环境不同等作更详细的分类,便于应用时选择。现将电解电容器的类型简介如下:

### 1. 以阳极金属的种类区分

根据金属材料的特性,能在电解液中产生阳极氧化而生成一层致密且绝缘性能良好的金属氧化物薄膜的这类材料,才能作阳极,称为阀金属。能实际应用的阀金属材料也非常有限,仅限于铝和钽,其他如铌、钛均因制成的氧化膜性能不佳而不被采用,或应用后又停用。因此只分为:铝电解电容器和钽电解电容器两大类。

### 2. 以阳极金属的外形区分

根据金属材料制成为不同厚度的金属箔或以金属粉经压制烧结制成为不同形状的烧固体,可分为箔式铝电解电容器、箔式钽电解电容器以及烧结铝电解电容器、烧结钽电解电容器。另外,为了获得小电容量的产品,烧结阳极还可制成丝形、杆形、片形等,如钽丝电解电容器、铝片电解电容器等。

### 3. 以电解质的形态区分

使用液状电解质的,称液体电解电容器如液体钽电解电容器;使用浸渍于衬垫纸内的液体(或糊状、半液体)电解质的称干式电解电容器均有别于以上类型;一般的铝电解电容器即属此类。使用固体电解质的,称固体电解电容器如固体钽电解电容器和固体铝电解电容器;又由于所用阳极一般均为烧结块形态,因此在类型区分上常称为“固体烧结”,如固体烧结钽电解电容器,至于介于液体和固体形态之间的电解质,一般常以凝胶状态出现则称为非固体电解质,此类型电容器称为非固体电解电容器,如非固体钽电解电容器。

### 4. 以电容器外形封装形式区分

根据产品应用的环境不同,如对耐潮湿的要求也不相同,大致上可分为全密封与半密封两种,以金属外壳密封的称密封电解电容器,其他各种采用金属套管、塑料外壳、树脂包封等等外包封手段,并且引出端头又不能起到全密封作用的形式都属于非密封或半密封类型。

### 5. 以工作电压高低区分

所谓工作电压的高低也仅是彼此相对比较而言,由于电解电容器的特性所限,它所能承受的工作电压高者也不过500—600V直流电压,而低者却低至3~4V,因此大致按电压可分为:低压、中压、及高压;对铝电解电容器而言,低压指4~63V,中压指100~300V,高压则指300V以上者;而对固体钽电解电容器来说,它的高压指63V及以上者,低压则为6.3~25V。

### 6. 以极性区分

根据电解电容器的特点其阳极和阴极,不能混淆,即具有极性,在使用中应以电源正极接电容器阳极;但在极性需要经常变换的电路中,应采用一种称为双极性电解电容器,过去称之为无极性电解电容器,因其名称不能确切代表其特性,故废弃不用。其意义是双极性电解电容器并不等于交流电解电容器,主要应用于极性需要经常变换的直流电路,但也不排斥它应用于交流电压值较小的讯号电路中。

### 7. 按工作环境与用途区分

如按不同的使用温度范围可分常温(指 $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ )、高温( $105^{\circ}\text{C}$ 以上)、宽温( $-55\sim+125$ ) $^{\circ}\text{C}$ 等;按电压性质可分直流、高纹波、交流(如单相电动机启动)等;按不同用途的储能类型可分高压储能、计算机级大容量、照相闪光、激光能源等等。此外尚可按引出方式分为单向引出和轴向引出;按内部结构可分为单芯与组合式等。

在混合集成电路中,为了达到微型化目的,元件的外型尺寸以及其高度受到严格的限制,电解电容器仍能继续扮演重要的角色,但工艺难度不断提高。目前使用的有微型钽电解电容器、片式铝电解电容器、固钵铝电解电容器三大类型。

## 第三节 电解电容器电性能参数

表征电容器电性能的参数有标称容量、损耗角正切、额定电压和绝缘电阻四大基本参数,电解电容器的参数也不能例外,但由于其性能特点,以致在具体数值上或有所限制,或对其偏离标称值的允许误差有所放宽,或对参数的称谓上有些更改,最明显的就是以“漏电流”参数代替“绝缘电阻”参数,现分别说明如下:

### 1. 标称容量与允许偏差

值的选取是按 E6 系列的优选数确定的,共计 6 个数,作为标称值系列,即

$$1.0 \quad 1.5 \quad 2.2 \quad 3.3 \quad 4.7 \quad 6.8$$

或以上值再乘以  $10^N$ , 其中  $N$  为整数。

标称容量可以  $C$  表示,其单位为法(F),但在电解电容器使用中常用的单位为微法( $\mu\text{F}$ )。

相当于 E6 系列的允许偏差为  $\pm 20\%$ ,但对通用的铝电解电容器来说,其正偏差常放宽至  $+50\%$ 。

电容量将随温度的变化而相应地发生改变,在此采用容量温度变化百分率表示:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C_t - C_0}{C_0} \times 100 \quad (\%)$$

其中  $C_0$  为室温时的电容量,  $C_t$  为正或负极限温度时的电容量。

### 2. 损耗角正切( $\text{tg}\delta$ )

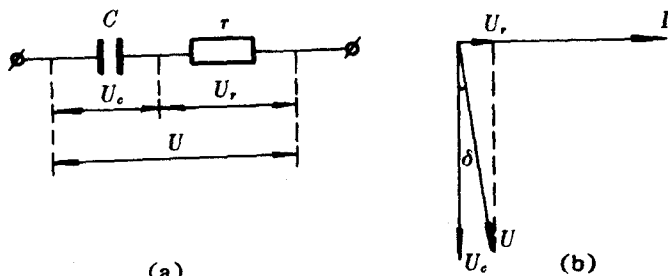
在交流电路中,实际电容器必定要消耗掉一小部分有用的讯号功率,在规定频率的正弦电压下,所消耗的有功功率与无功功率的比值称为损耗角正切。如以串联等效电路来表示一实用电解电容器的电容量  $C$  与代表损耗的等效串联电阻  $r$ ,如图 1-3 所示

$$\text{tg}\delta = \frac{U_r}{U_c} = \frac{I r}{I \frac{1}{\omega C}} = \omega C r$$

一般规定在双倍工频下进行测量,其值约为 0.01 至 0.20 视电解电容器的类型、容量的大小、额定电压的高低而异,并和温度、频率密切相关。有时也以百分比表示。

### 3. 漏电流

本参数表征电解电容器的绝缘质量,相当于其他类型电容器的绝缘电阻参数。由于电解电容器的漏电流值与其电容量大小及施加电压(不能大于额定电压)高低密切相关,所以容许最



(a) 串联等效电路图 (b) 电压、电流矢量图

图 1-3 电解电容器的损耗角正切图解

大值应低于下式所示值

$$I_l = KCU \quad (\mu A)$$

其中  $I_l$ —漏电流容许值,  $K$ ——与电容器类型有关的常数;

$C$ —电容器的电容量( $\mu F$ );  $U$ ——所加直流电压值(V)。

漏电流的大小并和所处环境温度有关,因此测量时应严格控制温度的改变,一般当温度升高  $10^{\circ}C$ ,所测值可能会成倍增加。

#### 4. 额定电压( $U_R$ )

表征在规定的环境温度范围内,所能施加到电容器上的最高直流工作电压的系列值,称为额定电压。额定电压虽然不是衡量电容器的测量参数,但因施加到电容器上的工作电压值与它有密切关系,一般规定应低于额定电压值。降低施加电压,对提高产品的使用寿命常有显著的作用,但究竟工作电压可降低至何种程度则并无定论;何况也有人怀疑,对铝电解电容器这种特定产品,降压使用会不会影响到氧化膜的质量?

按国家标准 GB2472-81 规定,适用于电解电容器的额定电压系列为由下列数值所组成:

4.0 6.3 10 16 25 32 40 50 63 100 125 160 250 300 450 500 630

以  $U_R$  表示,单位为伏(V),仅指直流电压值。

另外,也应注意产品型号命名方法,如代表铝电解电容器为 CD,代表固体烧结钽电解电容器为 CA 等等,以及正、负温度系列规定和标准圆柱形外壳壳号尺寸规定,这样才能对电解电容器有一较全面的认识。

## 第二章 电解电容器的电特性与基本计算

### 本章提要:

根据电解电容器的结构与工艺特点,结合等效电路,对箔式电容器由于应用浸渍电解液的衬垫纸而引起的附加电容量和串联电阻,分析它们的电容量和  $\text{tg}\delta$  与温度、频率的关系。同样地对烧结粉型作了相应的分析,特别强调了阻抗和等效串联电阻 ESR 的温频特性,并对 ESR 的各个组成成分进行了分析计算。提出了计算电解质电阻、衬垫纸附加电容量、腐蚀系数等参量的有关公式。另外分析了电解电容器在脉动电压下的状态,根据其承受纹波电压的能力,计算其发热功率引起的温升。考虑到电解电容器应用到高频场合的需要,针对固有电感的影响,分析产生电感的原因和计算方法,并研究改进产品结构以达到降低固有电感的目的。

### 第一节 电解电容器的等效电路

#### 一、简化等效电路的局限性

在讨论电解电容器的漏电流参数时可引出一个在直流情形下的等效并联电路,如图 2-1(a);在讨论  $\text{tg}\delta$  参数时,又可引出一个在交流情况下的简单的等效串联电路,如图 2-1(b)所示。如果考虑在直流叠加交流纹波电压的脉动状态,又可把以上两等效电路作一归并,成为图 2-1(c)的形式。但在分析其作用时,实际上仍是彼此无关,因此不能把代表漏电流的漏电阻 ( $R_l$ ) 与代表交流损耗的等效串联电阻 ( $r$ ) 联系起来。其中  $r$  值的大小包括氧化膜介质损耗的等效电阻,工作电解质的电阻以及引出箔或导电接触层本身的电阻和它们与引出线之间的接触电阻等等。一般的情况下,工作电解质电阻是主要的部分,但如果工艺不当,矛盾也可以转移到其他方面。

将电容器接到有极性的电压源的电容电桥上测量,如图 2-2 所示,如应用 CQ 型电桥,实用上也可应用纯交流电容电桥。当电桥平衡时,则有

$$C_x = C \left( \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$r_x = r \left( \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$\text{tg}\delta = \omega C_x r_x = \omega C r$$

例如测出  $C_x = 47.5 \mu\text{F}$ ,  $\text{tg}\delta = 6\%$  (100Hz),

可求出  $r_x = 2.01 \Omega$

从以上的等效电路中,由于氧化膜介质的电容温度系数只为几百 ppm/°C 而介电常数与



$f$  的关系又甚微。所以我们还看不出电容量与温度、频率有任何联系,但在实际的测量中,又确实观察到(例如铝电解电容器)电容量随着温度向低温区迅速下降的现象;虽然我们能够理解  $\text{tg}\delta$  将随着温度下降而增加,可能是由于电解质粘度增加使电阻率增加的缘故,但无法解释电容量的变化与电解质的电阻之间有着直接的联系。另外,在测量电容频率特性时,也观察到电容量随频率增加而下降的现象。这也是费解之处。

因此可说图 2-1(b) 的简化等效电路只适用于温度、频率有局限性的条件下(例如室温范围、工频或两倍工频)。当温度、频率的变化范围较广时,就需要作一番补充和调整,才有可能分析出问题的症结所在。

在作进一步深入分析以前,先将等效电路的并联形式和串联形式的互换关系作一简单介绍,见图 2-3 所示。

对于串联电路的复阻抗  $Z_r$  应为

$$Z_r = r - j \frac{1}{\omega C_r}$$

对于并联电路的复阻抗  $Z_R$  应为

$$Z_R = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C_R} = \frac{R - jR^2\omega C_R}{1 + R^2\omega^2 C_R^2}$$

根据实数部分和虚数部分应彼此相等,则可求出

$$R = r \left( 1 + \frac{1}{\text{tg}^2\delta} \right) \quad (2-1)$$

$$C_R = C_r \left( \frac{1}{1 + \text{tg}^2\delta} \right) \quad (2-2)$$

对于并联等效电路的  $\text{tg}\delta$  应为

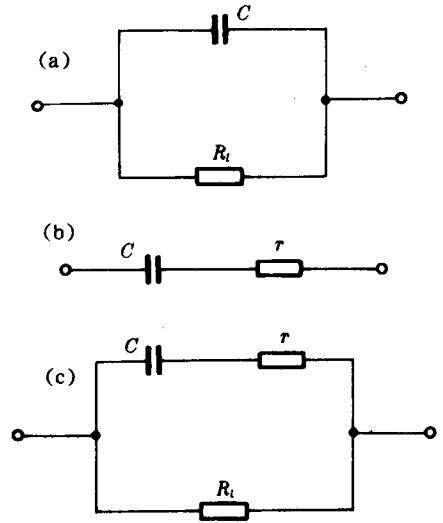
$$\text{tg}\delta_{\#} = \frac{1}{\omega C_R R} \quad (2-3)$$

如  $\text{tg}\delta \ll 0.1$  则  $\text{tg}^2\delta \ll 0.01$ , 可简化为

$$R = \frac{r}{\text{tg}^2\delta} \text{ 及 } C_R = C_r \quad (2-4)$$

## 二、箔式电容器引入浸渍纸附加电容量的等效电路分析

以箔式卷绕结构为例,我们注意它的结构,将会发现浸渍了电解液的衬垫纸,虽然其作用为阴极,但是纸本身却又是电介质,这种浸渍了诸如乙二醇电解液的纸纤维素的介电常数相当大,能达到 10~15 左右。这样它以阳极箔和阴极引箔为两个电极也组成了一个电容器(参看图



(a) 适用于直流情形下

(b) 适用于交流成分情况下

(c) 在脉动电压情形下

图 2-1 电解电容器的简化等效电路

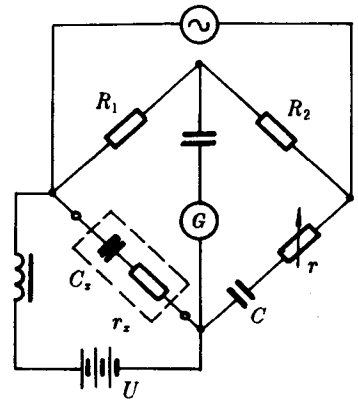


图 2-2 CQ 型电桥测量电解电容器原理图

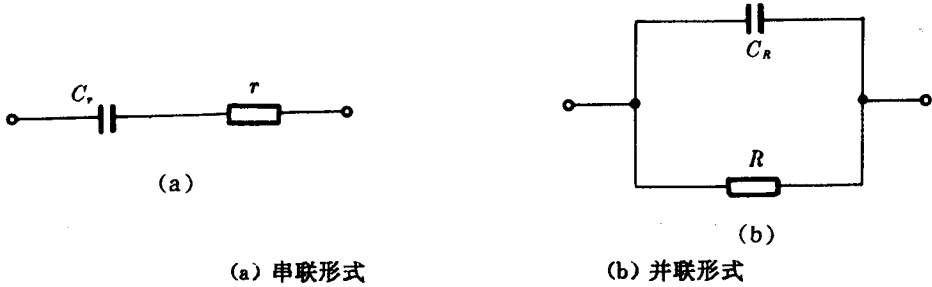


图 2-3 等效电路的两种形式

1-1 中的结构), 我们称此时所产生的电容量为浸渍纸附加电容量, 或称衬垫电容量( $C_{\text{纸}}$ )。

由于存在这一附加电容量以及电解质的因素, 就使等效电路趋于复杂, 由此可引起电容量与温度、频率的关系。现根据双层介质的概念, 设计了一个相应的等效电路如图 2-4 所示, 并依次化简。

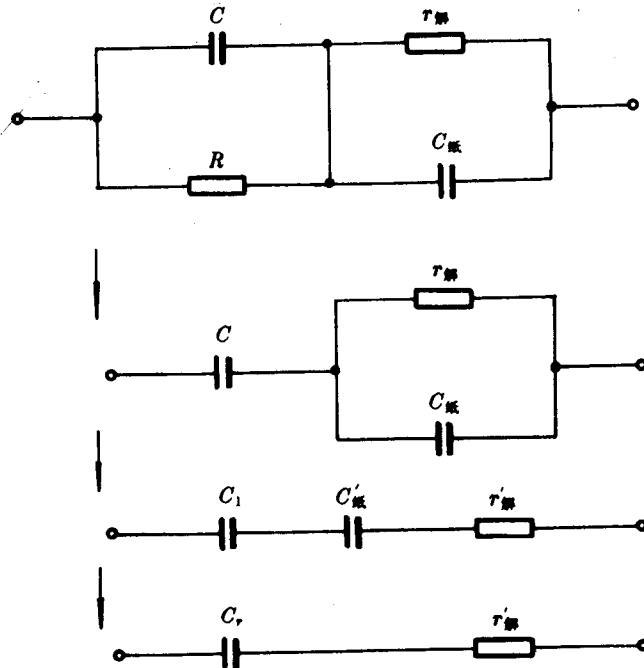


图 2-4 引入衬垫附加电容量的等效电路图

$C$ —阳极氧化膜的电容量;

$R$ —阳极氧化膜的损耗等效并联电阻, 受  $r_{\text{解}}$  影响较大,  $R$  很大时可以忽略;

$r_{\text{解}}$ —浸有电解液的衬垫纸的串联电阻;

$C_{\text{纸}}$ —浸有电解液的衬垫纸的电容量

按串、并联等效电路的换算方式得

$$C'_{\text{纸}} = C_{\text{纸}} \left( 1 + \frac{1}{(\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2} \right) \quad (2-5)$$

$$r'_{\text{解}} = \frac{r_{\text{解}}}{1 + (\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2} \quad (2-6)$$

由于  $C$  和  $C'_{\text{纸}}$  是串联的, 所以

$$C_r = \frac{CC'_{\text{纸}}}{C + C'_{\text{纸}}}$$

将(2-5)式代入并简化, 得等效电容量( $C_r$ )即为能测量出来的电容量:

$$C_r = \frac{CC_{\text{纸}} \left[ \frac{1 + (\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2}{(\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2} \right]}{C + C_{\text{纸}} \left[ \frac{1 + (\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2}{(\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2} \right]} = \frac{C[1 + (\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2]}{1 + \omega^2 r_{\text{解}}^2 (C + C_{\text{纸}}) C_{\text{纸}}} \quad (2-7A)$$

如  $(\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2 \ll 1, C_{\text{纸}} \ll C$ , 可进一步简化得

$$C_r \approx \frac{C}{1 + \omega^2 r_{\text{解}}^2 (C) C_{\text{纸}}} \quad (2-7B)$$

以及能测量出来的损耗为(在此忽略了氧化膜的介质损耗)

$$\text{tg} \delta = \omega C_r r'_{\text{解}} = \omega \left\{ \frac{C[1 + (\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2]}{1 + \omega^2 r_{\text{解}}^2 (C + C_{\text{纸}}) C_{\text{纸}}} \right\} \left[ \frac{r_{\text{解}}}{1 + (\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2} \right]$$

化简, 得

$$\text{tg} \delta = \frac{\omega C r_{\text{解}}}{1 + \omega^2 r_{\text{解}}^2 C C_{\text{纸}}} \quad (2-8)$$

当  $C_{\text{纸}} \rightarrow 0$  时,  $C_r \rightarrow C, \text{tg} \delta \rightarrow \omega C r_{\text{解}}$

即与简化等效电路所得结果一样。因此考虑了引入  $C_{\text{纸}}$  的影响后才能反映出电容量与温度、频率的关系。

我们先讨论极限情况下的理论值。

(1) 当  $r_{\text{解}} = 0$  即温度相当高, 电解液的电导率非常大的理想情况下, 或  $\omega = 0$  (直流时): 则  $C_r = C, \text{tg} \delta = 0$

(2) 当  $r_{\text{解}} \rightarrow \infty$  即温度甚低, 甚至电解液冰冻时。(而  $\omega \rightarrow \infty$  则缺乏实用意义)

因

$$C_r = \frac{CC'_{\text{纸}}}{C + C'_{\text{纸}}} = \frac{C'_{\text{纸}}}{1 + \frac{C'_{\text{纸}}}{C}} \approx C'_{\text{纸}}$$

按(2-5)式

$$C'_{\text{纸}} = C_{\text{纸}} \left( 1 + \frac{1}{(\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2} \right) \approx C_{\text{纸}}$$

当  $C_{\text{纸}} \ll C$  时,  $C_r \rightarrow C_{\text{纸}}$

从这个极限下, 可以看到电容量在低温时, 有下降至  $C_{\text{纸}}$  值的可能。显然在任何其它温度时, 电容量将在  $C$  与  $C_{\text{纸}}$  的范围内变动, 这说明浸渍纸附加电容引入的影响是严重的。

以下我们将通过一些具体数值来计算理论上的  $C_r$  和  $\text{tg} \delta$  与  $r_{\text{解}}$  (也就是温度的函数) 之间的关系。例如  $C = 100 \mu\text{F}, C_{\text{纸}} = 0.1 \mu\text{F}, \omega = 2\pi \times 100 = 2\pi \times 10^2$ , 可绘出  $C_r, \text{tg} \delta$  和  $r_{\text{解}}$  的关系, 如

图 2-5 所示。

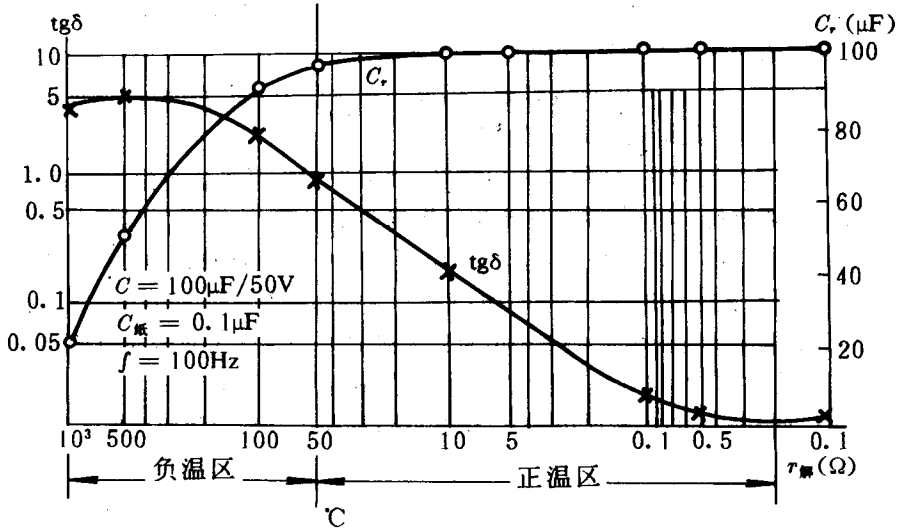


图 2-5 由于存在  $C_{膜}$  和  $r_{膜}$  引起的电容量和  $tg\delta$  与温度的关系

如果承认电解质电阻在负温区是随温度的下降而增加的，则图 2-5 也反映了测量电容值和  $tg\delta$  与温度的关系。

另外，如  $C_{膜}$  值较大时， $C_r$  随  $r_{膜}$  的增加而下降的速度将加快。

总之，温度对电容量和  $tg\delta$  的影响，主要因素是电解液的变化，但必须有衬垫附加电容量的存在，才能显现。

### 三、电解质与氧化膜接触变化的等效电路分析

仔细研究箔式或烧结型电解电容器的结构，可发现以下情况。

(1) 由于阳极箔经过腐蚀处理表面积增大，箔表面的不平整性大大增加，浸渍电解液的纸与其紧密接触的程度，将随着电解液粘度的增加而部分减弱。如果将电容量分成两个部分，其中一部分  $C_1$  表示不随温度影响，始终保持紧密接触的氧化膜电容量；另一部分  $C_2$  表示将随温度影响，氧化膜与阴极有失去接触或增大接触电阻的变化电容量，与之相串联的接触电阻为  $r_2$ ，在其他因素仍相同时，可得出一等效电路如图 2-6 所示。

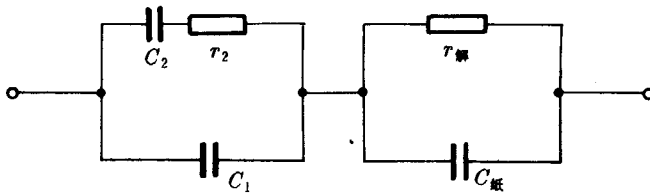


图 2-6 引入  $C_2$  变化电容量的箔式电容器等效电路

阳极箔的腐蚀系数越大，则  $C_2$  所占的比例也将增加， $C_2$  值将大于  $C_1$  值。在负温范围内，显然增加了电解液要和膜表面的凹陷处接触的困难，随着温度的降低，膜表面积的有效利用系

数相应减少,使得  $C_2$  值下降和  $r_2$  值增加,在温度更低时,  $C_2$  支路可视为开路状态,完全失去  $C_2$ ,同时等效电路又转变为图 2-4 的形式,  $C_{低}$  及  $r_{漏}$  的影响继续存在,这样在实用中测量出的电容量值与温度的关系是非常密切的。

注意:在此对电解电容器的负极容量受温度的影响尚未考虑在内。可参见第四章第一节第 5 小节第二节第 6 小节及第五章第五节内容。

(2) 对烧结型结构来说,使用液体电解质(或凝胶电解质)  $r_{漏}$  与温度的关系是显而易见的。使用固体电解质的,其  $\rho$  值受温度变化的影响要小得多,特别在低温区。但是由于烧结块是由阳极金属细粉压制成型再在高温真空烧结而成的一多孔性整体,电解质进入多孔体的细小孔隙间,一方面扩大了电容量,但同时也引入了附加的颗粒层之间的电解质电阻(对固体钽来说也包括石墨导电层与电解质的接触电阻)。如果将整个块状表面金属氧化膜所造成的电容量称作恒定电容量  $C_1$ ,也可以将多孔体的其余部分氧化膜所能得到的电容量称作变化电容量  $C_2$ ,与之串联者即为附加的电解质电阻  $r_2$ ,这样就得到如图 2-7 的等效电路。

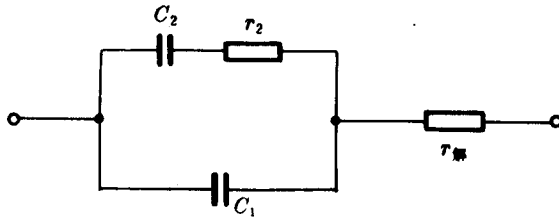


图 2-7 引入  $C_2$  变化电容量的烧结型电容器等效电路

如把  $C_2$  及  $r_2$  串联电路转换成并联等效电路,再把电容量相加,则得到总的电容量为

$$C = C_1 + C_2 \left( \frac{1}{1 + (\omega C_2 r_2)^2} \right) \quad (2-9)$$

由于  $C_2$  将随着温度变化而变化,这样即表示出测量电容量与温度的关系,由于  $r_2$  随着频率的提高而增大,将导致部分  $C_2$  失效,因而产生电容量与频率的关系。

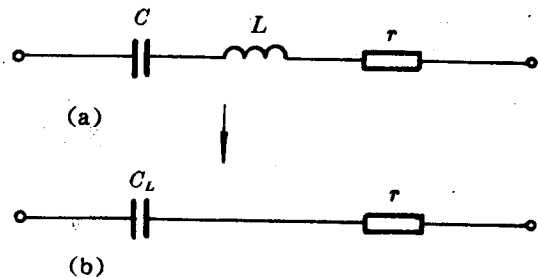
#### 四、考虑电容器结构本身具有电感的等效电路

由于电容器有金属箔以及引出线,所以它们必存在固有电感量,我们将在

以下小节中讨论。现在分析的是具有电感量的电解电容器的等效电路,如图 2-8 所示。

其复阻抗为

$$\begin{aligned} Z &= r - j \left( \frac{1}{\omega C} - \omega L \right) \\ &= r - j \left( \frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} \right) \end{aligned}$$



(a) 具有电感的电容器等效电路

(b) 等效于前者的电路

图 2-8 具有电感量的电解电容器等效电路图

$$= r - j \frac{1}{\omega C} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)$$

其中  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ ,  $\omega_0$  为  $L, C$  串联的谐振角频率。

其电抗部分也可视为一具有电感影响的电容器, 其等效电容量 ( $C_L$ ) 为

$$C_L = \frac{C}{1 - \omega^2 LC} = \frac{C}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (2-10)$$

其中  $f_0$  为  $L, C$  的谐振频率。

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_L r = \frac{\omega C_r}{1 - \omega^2 LC} = \frac{\omega C_r}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (2-11)$$

由于存在电感, 电容器在高频使用时, 如小容量的固体钽片电容器, 将受到使用频率上限的限制, 即必须低于  $f_0$  谐振频率。同时随着频率的增加, 单考虑电感的影响, 理论上  $C_L$  将出现假象的电容量增加, 成为一个不稳定的值; 但由于介质特性, 电容量随频率增加而下降将更显著一些, 而且  $\operatorname{tg} \delta$  也跟着大大上升。关于电感影响及减少的措施也将在有关小节中讨论。

## 第二节 电解电容器的交流特性

电解电容器用在脉动电路中, 它的参数有时用电容量及  $\operatorname{tg} \delta$ , 有时则用阻抗和等效串联电阻 (ESR), 前者便于生产厂考核产品质量, 后者便于使用单位在电路设计时应用。我们对此都应有必要了解, 从等效电路中就可知道其间关系。

### 一、阻抗和有效电容量、 $\operatorname{tg} \delta$ 和 EXR 的关系

对图 2-8(a) 这样一种具有电感的一般等效电路来说, 其复阻抗为

$$Z = r - j \left( \frac{1}{\omega C} - \omega L \right)$$

其模量为  $|Z| = \sqrt{r^2 + \left( \frac{1}{\omega C} - \omega L \right)^2} (\Omega) \quad (2-12)$

$$= \frac{1}{\omega C} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \delta + (1 - \omega^2 LC)^2} \quad (2-13)$$

当  $L$  很小时,  $\omega^2 LC \ll 1$ , 则

$$|Z| = \frac{1}{\omega C} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (2-14)$$

阻抗值将随  $\operatorname{tg} \delta$  的增大而增大, 这意味着在同一电压下, 阻抗大者容许通过的交流电流要小一些。换句话说, 即由于电容器有损耗, 所以在电路中它的电容量相应地有所减小, 不是测量出来的  $C$  值, 而是它的有效电容量 ( $C_{\text{效}}$ )

$$C_{\text{效}} = \frac{C}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \delta + (1 - \omega^2 LC)^2}} \quad (2-15)$$

当  $\omega^2 LC \ll 1$

$$C_{\text{效}} = \frac{C}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} \quad (2-16)$$

而  $C_{\text{实}}$  并不能直接由测量仪器测出,只能从测量得到的阻抗值  $|Z|$  或从施加的电压和通过的电流值计算出,在实际中使用有效容量的大小反而不如在电路设计中直接使用阻抗值来得方便。

因为

$$|Z| = \frac{1}{\omega C_{\text{实}}} = \left| \frac{U}{I} \right| \quad (2-17)$$

显然,电解电容器的阻抗值,概括了各种影响因素,既能反映电容器本身在电路中的真正作用,又能根据它的温度频率特性的好坏,从中分析电容器的工艺及结构是否合理。例如低温时阻抗增大很多,就要从工艺上分析其原因;频率升高时,阻抗值下降迟缓,既要找原因,也要从结构上来分析。

从等效电路中已知  $\text{tg}\delta = \omega C r$ ,

$r$  值由三个部分所组成,即:1) 介质损耗所代表的等效串联电阻( $r_{\text{介}}$ ),2) 电解质所代表的等效串联电阻( $r_{\text{电}}$ ),3) 极板欧姆电阻、导电层的欧姆电阻,以及其间的接触电阻( $r_{\text{金}}$ )。

$$r = r_{\text{介}} + r_{\text{电}} + r_{\text{金}}$$

$r$ ——等效串联电阻,英文缩写为 ESR。  $\text{ESR} = \frac{\text{tg}\delta}{\omega C}$

由于氧化铝介质的  $\text{tg}\delta_{\text{介}}$  值在电解电容器的工作频率范围内,可近似地认为是一个常值,与频率无关;在工艺上如果不出差错而且工作频率较低时, $r_{\text{金}}$  也可忽略掉,这样

$$\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_{\text{介}} + \omega C r_{\text{电}} \quad (2-18)$$

如以直线方程式来代替,  $y = A + Bx$  其中  $y = \text{tg}\delta$ ,  $\text{tg}\delta_{\text{介}} = A$ ,  $B = 2\pi C r_{\text{电}}$ ,  $x = f$ ,在此  $C$  与  $r_{\text{电}}$  当作与频率无关的参数。对固体烧结型电容器来说,在 50Hz ~ 10kHz 的频率范围内,电容量的下降较少;但对铝箔电容器来说,则影响较大一些。因此(2-18)式更适合于分析固体钽电解电容器的电特性。

**例题** — CA 型固体钽电容器,标称电容量为 22 $\mu$ F,实测数值如下;

$f(\text{Hz})$	100	1 000	2 000
$C(\mu\text{F})$	24.5	24.25	24.08
$\text{tg}\delta$	0.040	0.307	0.610

求:  $r_{\text{电}}$ 、 $\text{tg}\delta_{\text{介}}$  和  $\text{tg}\delta_{\text{电}}$  值

解: 根据式(2-18),可列出下式

$$0.04 = A + 100B \quad (1)$$

$$0.307 = A + 1000B \quad (2)$$

$$\text{求出 } B = 3.00 \times 10^{-4}$$

$$r_{\text{电}} = \frac{3 \times 10^{-4}}{2\pi \times 24.5 \times 10^{-6}} = 19.5\Omega \text{ (实际上包含 } r_{\text{金}} \text{ 在内)}$$

$$A = \text{tg}\delta_{\text{介}} = 0.04 - 3 \times 10^{-4} \times 100 = 0.01$$

$$\text{tg}\delta_{\text{电}} = 0.03$$

则

相应可求出

$$r_{\text{介}} = \frac{0.01}{2\pi \times 10^2 \times 24.5 \times 10^{-6}} = 0.65\Omega(100\text{Hz})$$

$$r_{\text{分}} = \frac{0.01}{2\pi \times 10^2 \times 24.25 \times 10^{-6}} = 0.06\Omega (1\text{ 000Hz})$$

在正常工艺情况下,在一定频率范围内,钽氧化膜的  $\text{tg}\delta_{\text{分}}$  可认为近似一常值,一般不应大于 0.02 值。

并设  $r_{\text{解}}$  在某一温度下也是不变值。在此例题中  $r_{\text{解}}=1.95\Omega$ ,按  $\text{ESR}=r \approx r_{\text{解}}+r_{\text{分}}$   
 在 100HZ 时;  $r=1.95+0.65=2.60\Omega$   
 在 1kHz 时;  $r=1.95+0.06=2.01\Omega$

## 二、箔式电解电容器的交流特性及有关参数的计算

所谓电容器的交流特性在此仅指电容量或阻抗的温度频率特性及  $\text{tg}\delta$  或 ESR 的温度频率特性。我们结合上一小节讨论过的有关等效电路来分析计算。

### 1. 温度特性

由于电容量大小、额定电压的高低,极箔表面的状态(光箔、腐蚀箔的腐蚀程度)、工作电解液  $\rho$  值的大小、衬垫纸吸收电解液的能力等等均对电参数的温度特性带来影响,因此不可能罗列一大批特性曲线来认识它,而是希望从典型曲线中找出某些规律,并分析这些影响因素。

#### (1) 电容量及阻抗温度特性

从图 2-9 中可以看出以下几点;

- 1) 使用腐蚀箔的比用光箔的电容量温度稳定性差。
- 2) 同类型的低压产品比高压的电容量温度稳定性差。
- 3) 使用粘度大的比用粘度小的电解液的电容量温度稳定性差。
- 4) 使用电阻率温度特性差的电解液的电容量温度稳定性差。

由于没有使用其他衬垫材料的实践,所以特性曲线中没有这方面的数据,但根据吸收电解液的容易程度来判断。应用棉布要比用电解电容器衬垫纸的好。

从图 2-10 中可以看出:

1) 在正温区域,  $Z$  值比较平坦。电容量愈大,  $Z$  值一般只在几个欧姆以下。在高频下甚至只有  $10^{-2}\Omega$  数量级。

2) 在负温区域,阻抗显著增加达到正温值的数倍,甚至数十倍,表明有效电容量急剧下降的趋势,其中有由于  $\text{tg}\delta$  增加的缘故,也有由于衬垫纸附加电容量的影响,并通过  $r_{\text{解}}$  的增加而显现。

3) 随着脉动电压使用频率的提高,阻抗温度特性显著变坏,也限制了它的应用。选择 100kHz 作为测量阻抗值的极限频率是考虑到如果超过这个频率范围,将由电解电容器的固有电感所引起的感抗起主要作用,电容器就没有实用意义。

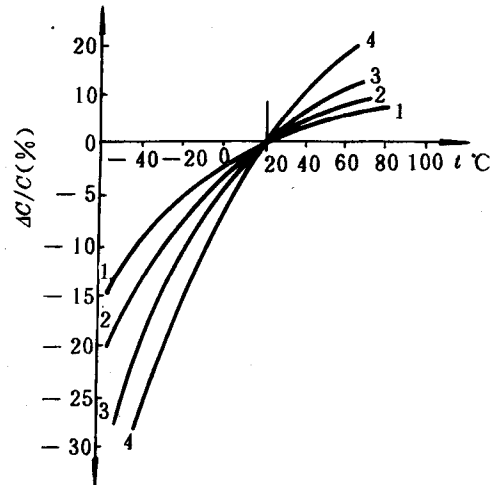


图 2-9 铝电解电容器的电容温度特性

- 1—CD26 型 6.3V/470 $\mu$ F 腐蚀箔有机酸 DMF 系列电解液;
- 2—CD 型 450V/10 $\mu$ F 光箔磷酸铵乙二醇电解液;
- 3—CD 型 450V/20 $\mu$ F 腐蚀箔电解液同上;
- 4—CD 型 50V/100 $\mu$ F 腐蚀箔电解液同上



## (2) $\text{tg}\delta$ 温度特性

铝箔电解电容器  $\text{tg}\delta$  温度特性主要取决于工作电解液，特别是它的低温电阻率大小。从图 2-11 也可看到这个规律，因此曲线表示的特点如下：

1) 使用低温特性好的工作电解液要比使用差的其  $\text{tg}\delta$  温度特性要好。

2) 高额电压的  $\text{tg}\delta$  温度特性比低压的要好一些。

3) 电容量小的一般要比电容量大的  $\text{tg}\delta$  温度特性好。

4) 使用腐蚀系数小的铝箔要比系数大的  $\text{tg}\delta$  温度特性好。

在实用上比较少用 ESR 的温度特性这一表示形式，故在此不加分析。

### 2. 频率特性

近年来由于电路应用的需要，铝电解电容器的应用也逐渐向较高的频率区域伸展。图 2-12 表明三种不同电容量产品的  $Z-f$  特性。

电容量大者如未采取特殊结构措施，其  $Z$  值的最低点仅在 10kHz 以下。图 2-13 为其 ESR- $f$  特性。电容量大者 ESR 值不仅很小，而且在整个频段近似一平直线。

### 3. 有关参数的计算

从等效电路来看，卷绕型箔式电容器影响电容量和  $\text{tg}\delta$  的主要参数是  $r_{\text{解}}$  和  $C_{\text{纸}}$  以及阳极箔的表面状态等。因此首先讨论这些参数的计算方法。

#### (1) 浸渍纸电阻 ( $r_{\text{解}}$ ) 的计算

浸渍纸电阻  $r_{\text{解}}$  是指以易浸润的衬垫纸或其他多孔性纤维材料浸透了工作电解液后的电阻，有时也称为衬垫物电阻。

$$r_{\text{解}} = \varphi \rho_{\text{解}} \frac{d_{\text{纸}}}{2A} \quad (\Omega) \quad (2-19)$$

其中  $\varphi$ ——衬垫材料的渗透系数，与其多孔性结构有关。

$$\varphi = \frac{\text{浸渍后衬垫材料的电阻率}}{\text{电解液的电阻率}}$$

电解电容器衬垫纸的  $\varphi=25\sim35$ ,

$\rho_{\text{解}}$ ——电解液的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

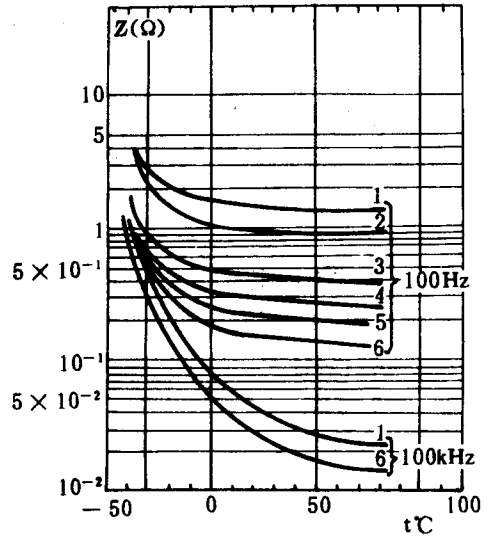


图 2-10 低压大容量铝电解电容器的阻抗温度特性

- 1—63V/1 000 $\mu\text{F}$ ; 2—50V/1 500 $\mu\text{F}$ ;  
3—25V/3 300 $\mu\text{F}$ ; 4—16V/4 700 $\mu\text{F}$ ;  
5—10V/6 800 $\mu\text{F}$ ; 6—6.3V/10 000 $\mu\text{F}$ ;

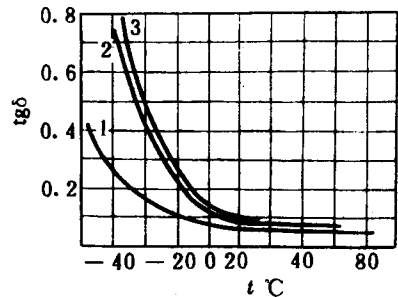


图 2-11 铝电解电容器的  $\text{tg}\delta$  温度特性。

- 1—CD26 型 6.3V/470 $\mu\text{F}$  腐蚀箔有机酸 DMF 系列电解液;  
2—CD 型 450V/20 $\mu\text{F}$  光箔磷酸铵乙二醇电解液;  
3—CD 型 50V/100 $\mu\text{F}$  腐蚀箔电解液同上