

编者按：作为三大无源元件之一，电容器有着重要而广泛的用途，在电子电气装置中几乎无处不在。辽宁工业大学电容器研究与应用专家陈永真教授将撰写电容器系列文章，从11月刊起在本刊连续刊登。通过专栏讲座，系统详实地阐述时下各种电容器的原理及典型技术数据、在不同领域中的应用及注意事项、应用电容器时对电容器的选择及其注意事项等。本专栏所含内容丰富，具有很好的参考价值。每期针对不同主题，连续刊登，希望对电气与电子工程师、科研人员及电子爱好者带来帮助，亦诚挚邀请广大业界人士参与讨论及互动。

## 第8讲 电解电容器基础知识（三）

### ——一般用途电解电容器（续1）

## Chapter 8 Basic Knowledge of Electrolytic Capacitor, for General Purposes

陈永真  
Chen Yongzhen

### 1 电容量

铝电解电容器的电容量指标主要有：额定电容量、静电容量和电容量的容差范围等。

#### 1.1 额定电容量

额定电容量是标称电容量，定义在120Hz和25℃条件下测试。额定电容量也就是单体电容量。电容量的标称电容量多数为E3系列优选值，即1.0、2.2、3.3、4.7、6.8；少数也有采用E6系列优选值，即：1.0、1.5、2.2、2.7、3.3、3.9、4.7、5.6、8.2；大容量铝电解电容器也有采用E12系列部分优选值，如18,000 $\mu$ F。

#### 1.2 静电电容量

静电电容量即直流电容量，是在对电容器施加直流电压时测量其电荷得到，在常温下的容量比交流稍微大一点，并且具有更优越的稳定特性。

#### 1.3 电容测量

电容器的电容量可通过测试它的交流阻抗、或测试直流电压下可保持的电荷量获得。两种方法产生的结果有略微的不同。一般来说，采用直流电压测试方法测得的电容量值（直流电容量）要稍高于交流电流方法测得的电容值（交流电容量）。

为了与最普遍的应用（例如：整流滤波或隔直耦合）条

件一致，铝电解电容器的交流电容量最常见的测试频率，一般为 50Hz 或 60Hz 工频交流电的 2 倍频；IEC384-1、IEC384-4 给出的频率为 100Hz 或 120Hz。是在 IEC384-1 和 IEC384-4 中给出的特殊测试方法测得的。

可以在铝电解电容器施加一个  $\leq 0.5V$ （不会使铝电解电容器反向击穿）的交流电压检测器电流，电容量根据在固定频率下的容抗与电容量的关系、和容抗与电压电流的关系  $C=I/(2\pi fU)$  即可确定。交流电容量随温度的变化可能大于 10%，同时也随频率增加而减小，因此，IEC384-1、IEC 384-4 给出了频率为 100Hz 或 120Hz、温度为 20℃ 时的基本测试条件。也可以采用测试一般电容器电容量的测试方法，测试电容量用桥式电路，在电源侧施加 1Vrms 最大 AC 信号电压，是无直流正偏电压的无高次谐波和次谐波的 120Hz 正弦波电压。尽管电源电压的峰值接近 1.5V，但是通过桥式电路的分压作用，施加在铝电解电容器的峰值电压将低于 1V，不会对铝电解电容器造成损害。一般而言，铝电解电容器多用于整流后的滤波、旁路和隔直耦合，这些应用对电容量的数值和精度要求不高，其电容容差（精度）多为  $\pm 20\%$  就可以很好的满足要求。

在一些应用中（例如：放电电路和定时电路）直流电容量将起决定性的作用。这就需要测量直流电容量。通常可以采用充/放电的方式，根据电容量与电荷、电压的关系和电荷与电流的关系，采用恒流充/放电用  $C=(I \cdot t)/\Delta U_c$  的方式，通过检测  $t$  来得到电容量  $C$ 。因此，在需要精确的直流电容量时，最好不用铝电解电容器。为了获得比较精确的电容量，可以采用多只电容器并联方式得到比较精确的电容量。

然而，也有一些例外的情况需要确定直流电容量，IEC 出版商没有给出任何相关的说明。因此，确定了一个独立的 DIN 标准，这个标准是：DIN41328，第 4 部分，描述了关于一次性、非循环充放电电容器测试方法。

#### 1.4 哪个方法测量电容量更加合理

交流方法测量电容量时，测量电容器的阻抗值和性质。由于电容器不可避免的带有等效串联电阻、等效串联电感，特别是等效串联电感使测试值随频率上升而增加。与其相反，电容器的容抗在随频率的上升而下降。因此，在用电桥测试电容量时，会发现随着频率的提高电解电容器的电容量会下降，甚至测量频率再高一些（如 40kHz 以上），就会出现某些品牌电解电容器的电容量变为“负值”的现象，体现了电解电容器的整个外特性、也就是阻抗特性，不再仅仅是电容量。

阻抗特性的意义在于：在实际应用时，施加到电解电容器的电压将不仅仅是直流电或简单的 100/120Hz 交流电；流过电解电容器的电流也不再仅仅是 100/120Hz 交流电流，很可能是“高频”交流电流。例如，当电解电容器从传统的整流滤波电容器转变为功率因数校正的直流支撑电容器后，流过电

解电容器的电流不再是 100/120Hz 为主的交流电流成分，变为以 40kHz 以上开关频率为主的交流电流成分时，电解电容器外特性变得尤为重要。

有的电解电容器在电桥上测电容量时则测不出来了。这时候不能起到滤波作用。幸好，实际上并没有发生电解电容器不能滤除 40kHz 及以上频率的纹波电压成分，只不过效果有些差异。这表明，对于直流支撑来说，静电电容量要比电桥测试的交流电容更具有实际意义。

对于电子线路中定时、延迟、滤波、谐振等场合，用电桥测试的电容量是具有意义的。而电解电容器主要应用于整流滤波、电源旁路，因此静电电容量更具有实际意义。

#### 1.5 电容容差

电容容差是允许的最小和最大电容值以额定电容减小和增大的百分比表示，即  $\Delta C/C$ 。典型电容容限  $\pm 20\%$ ， $-10\% + 50\%$  和  $-10\% + 75\%$ 。高压电容器的容差可以做得比较小，如大于 150V，一般容差可以做到小于  $\pm 10\%$ 。电容随温度和频率变化，通常这个变化也应在电容容差范围内。通常这个变化本身也受电容器额定电压和电容尺寸的影响。

## 2 漏电流 (DCL)

### 2.1 漏电流产生的原因和减小的必要性

由于作为绝缘层的氧化铝介质的特殊性：氧化铝介质在铝箔切割、铆接过程中受到的损伤，或受电解液中氯离子的腐蚀产生缺陷而产生的漏电流，需要通过施加直流电压的（阳极氧化）方式加以修补。因此，即使已经施加很长一段时间直流电压，仍会有一个小的修补电流流过，这个电流成为漏电流。

漏电流低，意味着电解液中的氯离子极少，可以得到良好的修补结果，也表明作为绝缘层的氧化铝介质是良好的。电解液和铝箔中的铁、铜离子，在铝电解电容器的电极上施加电压后会产生原电池效应电流，需要较多的电荷将其消耗掉，这就是一些铝电解电容器在初次加电后需要较长时间，“漏电流”才能降到正常值的原因。这种现象也说明了铝电解电容器出厂前需要“老化的必要性”。

### 2.2 漏电流的测量方法

铝电解电容器漏电流的测试方法和测试条件为：在 25℃，被测电容器串联一个 1kΩ 的保护电阻接于额定电压，测量漏电流。施加电压 5min 后，漏电流不超过说明书的最大值为合格。小容量的铝电解电容器可以采用 1min 测试结果，大容量的铝电解电容器将需要更长的测试时间。图 1 为铝电解电容器串联电阻后接于直流电压的电流与时间的关系。

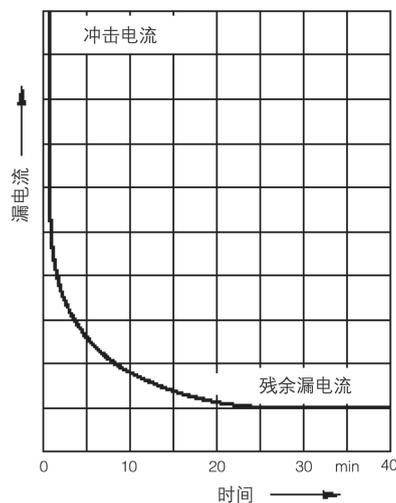


图1 铝电解电容器充电时间与“漏电流”的关系

从特性曲线中可以看到，电流将无限趋近于最终的“漏电流”值——修补氧化铝介质需要的电流值。

铝电解电容器的漏电流可以通过计算得到，如 EPCOS 铝电解电容器的  $I_{\text{lkop}}$  可通过下式计算：

LL 级：

$$I_{\text{lkop}} = \frac{0.0005 \mu\text{A}}{\mu\text{F} \cdot \text{V}} \cdot C_r \cdot U_r + 1 \mu\text{A} \quad (1)$$

GP 级：

$$I_{\text{lkop}} = \frac{0.001 \mu\text{A}}{\mu\text{F} \cdot \text{V}} \cdot C_r \cdot U_r + 3 \mu\text{A} \quad (2)$$

其中： $I_{\text{lkop}}$ 、 $C_r$ 、 $U_r$  分别为工作漏电流、额定电容量、额定电压。

这个结果，是 20℃ 时额定电压  $U_r$  下得出。

### 3 损耗因数

电解电容器的损耗因数（Dissipation Factor，缩写：DF）可以理解为在交流电流激励下得到，电解电容器的无功功率和等效串联电阻（ESR）的有功功率分别为：

$$Q = \frac{I^2}{\omega C} \quad (3)$$

$$P = I^2 R \quad (4)$$

根据电容器的损耗因数的原始定义第 2 讲中式（13），将式（3）和式（4）代入，得：

$$\frac{I^2 R}{I^2 / \omega C} = \omega C R = \tan \delta \quad (5)$$

很显然，这是容抗与串联等效电阻（ESR）之比。由于式（5）非常像交流电路中的 RC 电路，而且，这个比值非常像三角函数的对边与邻边之比——正切函数。因此，电解电容器的损

耗因数（DF）在很多技术文献中也称为损耗角正切（ $\tan \delta$ ），如图 2 所示。

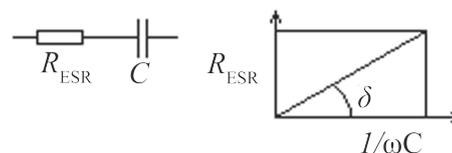


图2 铝电解电容器的简化等效电路与损耗角正切（ $\tan \delta$ ）的关系

由式（5）可以看到，随着频率的增加（ $\omega$  增加）， $\omega C R$  随之增加，即铝电解电容器的损耗因数随着测量频率的增加而变大。

由于电容器损耗因数的测试标准是使用 60Hz 频率的国家首先提出，故电容器的损耗因数的测试频率为 60Hz 交流电全波或桥式整流后的最低纹波频率（60Hz 的两倍频）120Hz。这个测试条件的测试值，比我国 50Hz 电网频率下的损耗因数大 20%。

DF 测量是在 25℃ 和 120Hz、无正向电压偏置、最大交流有效值 1V 信号电压调谐条件进行。DF 值由温度和频率决定。

### 4 工作温度范围与寿命

#### 4.1 工作温度范围

由于铝电解电容器是电解液负极，随着温度的升高将会达到电解液的沸点。因此，电解液的沸点将是铝电解电容器不可逾越的最高工作与存储温度。在实际应用中，最高工作温度要比电解液的沸点低（10~20）K；同样，也是由于铝电解电容器的负极是电解液，在温度过低时，电解液将变得粘稠、甚至凝固时，铝电解电容器不能应用。因此，铝电解电容器也有工作温度与存储温度的下限。在工作 / 存储温度上限与下限之间的整个温度范围，就是铝电解电容器的工作温度范围。

对于比较低级的商业应用，铝电解电容器的最高工作 / 存储温度和最低工作 / 存储温度为 +85℃ / -20℃。如果对低温有特殊要求时，最低工作温度可以达到 -40℃；如果铝电解电容器的工作 / 存储温度比较高，则需要 105℃ 最高工作 / 存储温度的铝电解电容器；当遇到更高的工作温度，如节能灯或汽车发动机舱内的应用时，要求铝电解电容器的最高工作 / 存储温度要达到 125℃、甚至是 150℃。

通过上述分析可以看到，铝电解电容器的最高工作 / 存储温度可以分为：一般应用为 +85℃，比较高工作 / 存储温度为 +105℃，非常高工作温度为 125℃，甚至是 140℃、150℃ 的 5 个最高工作 / 存储温度。

#### 4.2 寿命

同样是由于铝电解电容器的负极是电解液，随着时间的推移，电解液会渐渐的干涸。当电解液干涸到一定程度后，

（上接第 54 页）