

1 · 铝电解电容器的概述

1-1 铝电解电容器的基本模型

1) 电容器是无源器件，在各种电容器中，铝电解电容器与其他电容器相比相同尺寸时，CV值更大，价格更便宜。电容器的基本模型如图-1所示，静电容量计算式如下：

$$C = 8.854 \times 10^{-12} \epsilon S (F) \dots\dots\dots (1)$$

$\epsilon$  : 介电常数  $S$  : 电极板表面积 ( $m^2$ )  
 $d$  : 两极板间距离=电介质的厚度 (m)

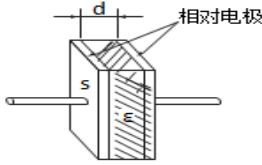


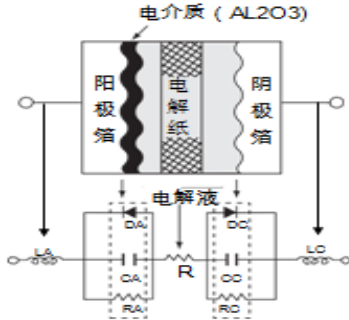
图1 电容器基本模型

2) 从式(1)中可以看出：静电容量与介电常数，极板表面积成正比，与两极板间距离成反比。

作为铝电解电容器的电介质氧化膜 (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)的介电常数通常为8~10，这个值一般不比其他类型的电容器大，但是，通过对铝箔进行蚀刻扩大表面积，并使用电化学的处理得到更薄更耐电压的氧化电介质层，使铝电解电容器可以取得比其他电容器更大的单位面积CV值。铝电解电容器的等效电路如图-2所示：

3) 铝电解电容器主要构成如下：

- 阳极 ……铝箔
  - 电介质…阳极铝箔表面形成的氧化膜(AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
  - 阴极 ……真正的阴极是电解液
- 其他的组成成分包括浸有电解液的电解纸，和电解液相连的阴极箔。综上所述，铝电解电容器是有极性的非对称构造的组件。两个电极都使用阳极铝箔的是两极性（无极性）电容。



- CA, CC : 阳极箔、阴极箔的静电容量
- DA, DC : 阳极箔、阴极箔氧化膜的整流作用
- LA, LC : 阳极箔、阴极箔的电感
- R : 电解液和电解纸的电阻
- RA, RC : 阳极箔、阴极箔的氧化膜电阻

图2 电容器等效回路

1-2 铝电解电容器的基本构造

1) 铝电解电容器素子的构造如图-3所示，由阳极箔，电解纸，阴极箔和端子（内外部端子）卷绕在一起含浸电解液后装入铝壳，再用橡胶密封而成。

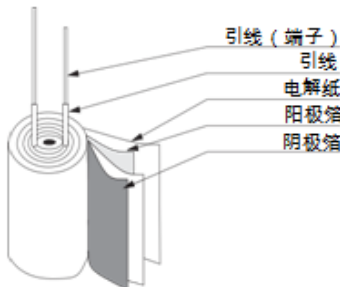


图3 素子基本构造

铝电解电容器、根据制品的形状不同，外部端子的形状，密封橡胶的材料和构造也不同。如图-4所示

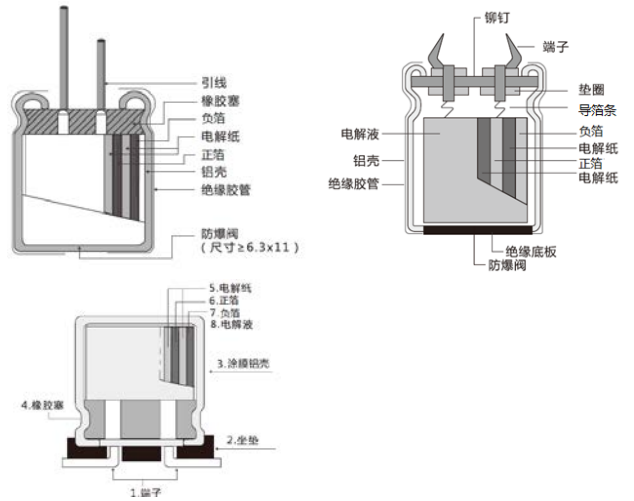


图4 铝电解电容器的构造（形状的代表列）

1-3 电容器材料的特性

铝箔是铝电解电容器主要材料，将铝箔设置为阳极，在电解液中通电后，铝箔的表面会形成氧化膜(AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，此氧化膜的功能为电介质。如图-5所示，形成氧化膜后的铝箔在电解液中是具有整流特性的金属，被称之为阀金属。

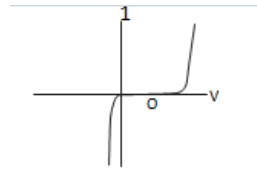


图-5 氧化铝箔 V-I 特性

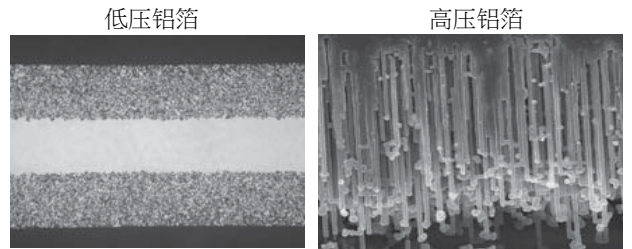
《阳极铝箔》

首先，为了扩大表面积，将铝箔材料置于氯化物水溶液中进行电化学蚀刻。然后，在硼酸铵溶液中施加高于额定电压的电压后，在铝箔表面形成电介质氧化层 (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，这个电介质层是很薄很致密的氧化膜，大概1.1~1.5nm/vot，绝缘电阻大约为108 ~ 109 Ω / m。氧化层的厚度和耐压成正比。为了增加扩大表面积的效率，根据额定电压的不同，而蚀刻形状也不同。

（如图-6）

《阴极铝箔》

同阳极箔一样，阴极铝箔同样有蚀刻的程序，但是没有氧化的程序。因此，阴极铝箔表面只有少量的自然氧化形成的(AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，能承受的电压只有0.5V左右。



AC电蚀刻表面截面图 DC电蚀刻表面截面图 图-6 铝箔蚀刻横截面

《电解液》

电解液是由离子导电的液体，是真正意义上的阴极，起着连接阳极铝箔表面电介质层的作用。而阴极铝箔类似集电极一样起着连接真正阴极和内部电路的作用。电解液是决定电容器特性（温度特性，频率特性，使用寿命等）的关键材料。

《电解纸》

电解纸主要起着均衡电解液的分布并保持阴极箔和阳极箔间隔的作用。

《铝壳和封口材料》

铝壳和由橡胶制成的封口材料主要作用是保持电容器气密性。

1-4 制造工艺

① 蚀刻（扩大表面积）

蚀刻的作用是扩大铝箔表面积。蚀刻是在氯化物溶液中施加交流或直流电流的电化学过程。（如图7）

② 化成（形成电介质层）

化成是在阳极铝箔表面形成电介质层（ $Al_2O_3$ ）的过程。一般将化成过的铝箔作为阳极使用。（如图8）

③ 裁切

按照不同产品的尺寸要求将铝箔（阴极箔和阳极箔）和电解纸剪切为需要的尺寸。（如图9）

④ 钉卷

将阴极箔和阳极箔之间插入电解纸，然后卷绕成圆柱形，在卷绕工艺上阴极箔和阳极箔上连接端子。（如图10）

⑤ 含浸

含浸是将素子浸入电解液中的过程。电解液能对电介质层进一步修复。（如图11）

⑥ 组立

组立是将素子装入铝壳中后用封口材料（橡胶，橡胶盖等）密封的过程。（如图12）

⑦ 老化

老化是对密封后的电容器在高温下施加电压的过程。这个过程能将裁切和卷绕过程时电介质层的一些受损进行修复。

⑧ 全检、加工、包装

老化之后，将对所有产品进行电气特性检查。并进行端子加工，编带等。最后进行包装。

⑨ 出货检查

根据产品检验标准进行出货检验。

⑩ 出货

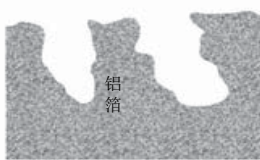


图7- 蚀刻模型图

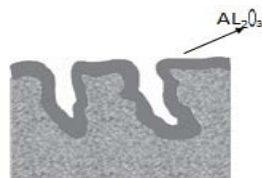


图8- 化成模型图

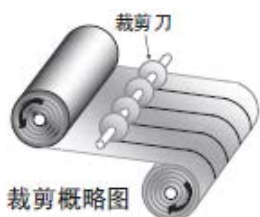


图9- 裁切概略图

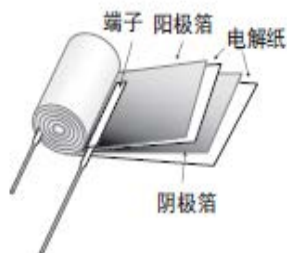


图10- 卷绕概略图

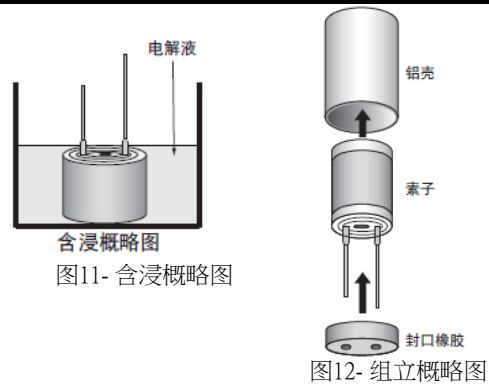


图11- 含浸概略图

图12- 组立概略图

2 · 基本性能

2-1 基本的电气特性

2-1-1 静电容量

电极表面积越大，容量（储存电荷的能力）越大。铝电解电容器的静电容量值是在20℃，120Hz 0.5V的交流电条件下测试的值。一般来说温度升高，容量也会升高；温度降低，容量也会降低（如图13）。

频率越高，容量越小；频率越低，容量越大（如图14）。

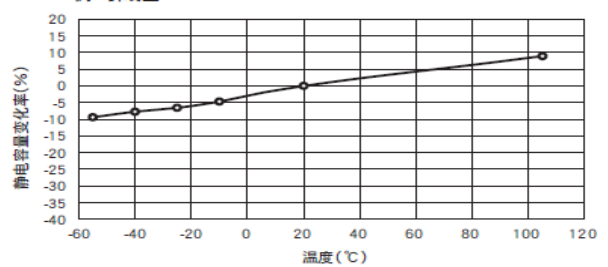


图13- 静电容量的温度特性

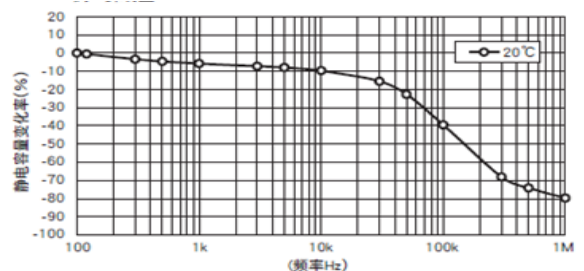


图14- 静电容量的频率特性

2-1-2 Tan δ（也称为损失角或损失系数）

（图15）是等效电路图2的简化等效电路（图2）是理想的电容器的等效电路电阻 $R=0$ ， $\tan \delta = 0$ 。但实际上，铝电解电容器因为电解液、电解纸及其他接触电阻的存在，等效电路电阻 $R$ 不为0。1/ωC和R的关系如图16和公式（2）。

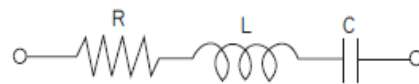


图15

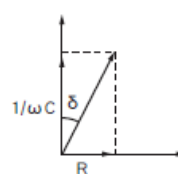


图16

$$\tan \delta = \frac{R}{1/\omega C} = \omega CR \dots\dots\dots (2)$$

$$\omega: 2\pi f$$

$$\pi = \text{圆周率}、f: \text{频率}(f = 120\text{Hz})$$

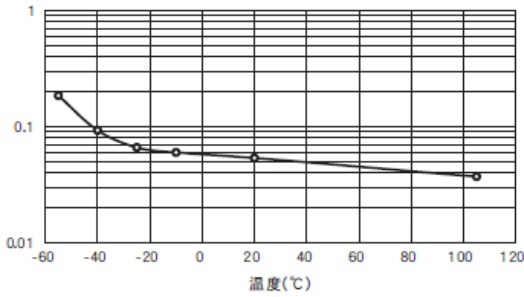


图17-tan δ 的温度特性

2-1-3 漏电流 (LC)

①漏电流是铝电解电容器特性之一，当施加直流电压时，电介质氧化层允许很小的电流通过，这一部分小电流称为漏电流。理想的电容器是不会产生漏电流的情况（和充电电流不一样）。

②漏电流(LC)会随时间而变化，如图-18所示。LC随时间而减小后会达到一个稳定值。因此，LC的规格值为20°C下施加额定电压一段时间之后所测量的值。当温度升高时，LC增加；温度降低，LC减少（图-19所示）。施加的电压降低，LC值也会减少。

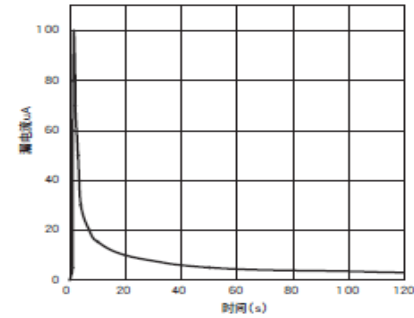


图18- 漏电流随时间的变化

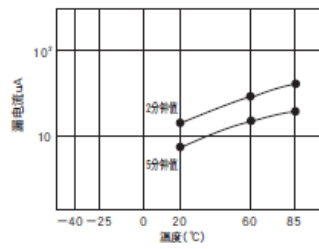


图19- 漏电流的温度特性

2-2 阻抗的频率特性

①施加在电容器上的交流电压的频率变化的话，作为阻止AC电流的参数阻抗 (Z) 也会产生变化（如图-20所示）。这就是电容器的阻抗-频率特性。

②（图-15）是电容器等效电路的简化模型。（图20）的虚线部分代表这个电路中的组成成分（C,R,L）。从图可得之，阻抗-频率特性是由C,R,L的频率特性组合而成。

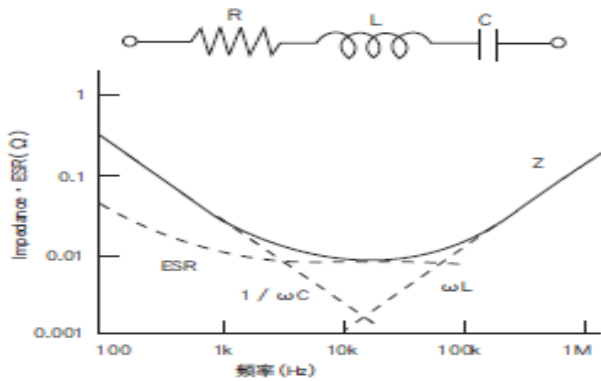


图20- 阻抗的频率特性

③ $1/\omega C$ 是容抗，图中容抗的直线向下角成45°角。 $\omega L$ 是感抗，它的直线向右上角成45°角。R代表等效串联电阻。在低频率区间，有频率相关性的电介质损失影响大，因而R曲线向下。在高频区间，电解液和电解纸的阻值占主导地位，不再受频率的影响，因而R值趋于稳定。阻抗表达式如式（3）所示。

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \dots\dots\dots (3)$$

④由于铝电解电容器的阻抗特性主要受电解液和电解纸的阻值的影响，在自身共振频率时，Z值相对要较高（如图-21所示）。同时，阻抗也受温度影响：温度升高，阻抗减少；温度降低，阻抗增大（如图22）

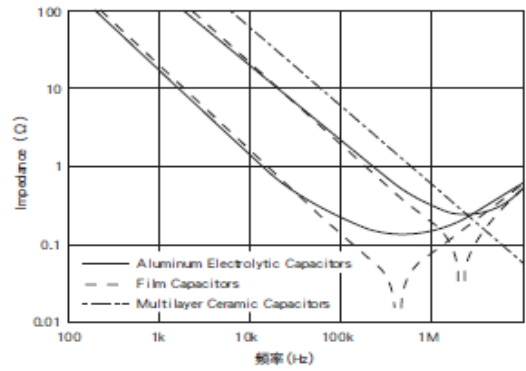


图21- 不同阻抗的频率特性

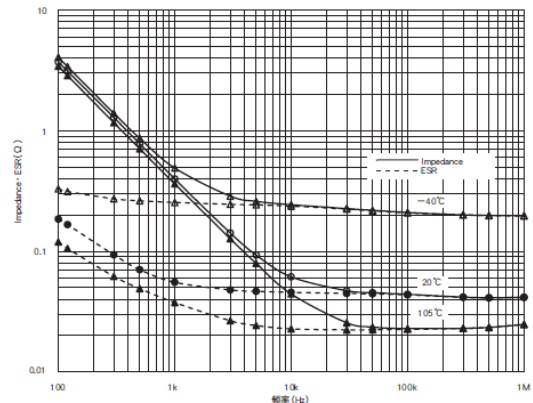


图22- 阻抗 · ESR的温度频率特性

3 · 可靠性

在设计需要使用电容器的设备的时候要重点考虑其电容器的可靠性,故障率及使用寿命.铝电解电容器的故障率近似于图-23的浴盆曲线。

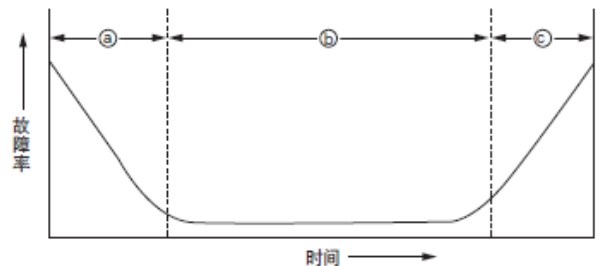


图23- 浴盆曲线

a.初期故障期

开始使用后不久由设计,制造上的缺陷或与使用环境不适应所产生的故障期间.铝电解电容器是指在制造工序中调试剔出的不良、是产品出货前的故障。

b.偶发故障期

故障发生率低且稳定,发生一些与时间无关的故障期间.铝电解电容器与其它半导体、钽固体电解电容相比,此期间发生破坏故障率要低。

c.损耗故障期

特性慢慢被老化,随着时间的推移,故障率升高的期间.从铝电解电容制造完成开始,含浸过后的电解液透过封口橡胶、随着时间蒸发、静容量及损失角正切超出规格的期间定义为损耗故障期（寿命）。到损耗故障为止的期间即为有效寿命。

4 · 故障模式

电解电容的故障分为失效故障和损耗故障。

《失效故障》由短路、开路等引起电容器的功能完全丧失的故障形态。

《损耗故障》特性渐渐劣化所产生的故障形态。根据设备的使用目的而故障的判定基准也不同。以下判定基准的耐久性项目是按系列来规定的。

- 静电容量的变化率
- 损失角的正切
- 漏电流

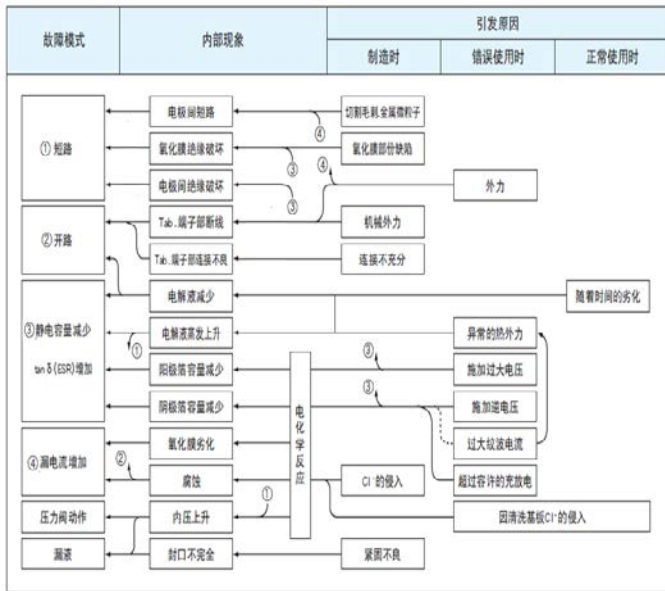
①作为故障率的单位% /1000 小时 (10<sup>-5</sup>/小时) 用的最多。

而要求故障率更低的高可靠性部品使用Fit10<sup>-9</sup>/小时。

②铝电解电容器是，电气特性随着时间的推移而渐渐劣化、故障率升高的损耗故障部品。一般的故障率Fit是由试料数x时间来决定。

③对于铝电解电容器来说、即使在试料数多的时候算出来的故障率和试验时间长的时候算出来的故障率相等，含义还是不同。所以作为铝电解电容器的可靠性并不适应故障率这一说法，而应该考虑作为电气特性判定基准的寿命时间的可靠性。

④虽然有MTBF(平均故障间隔)和MTTF(到故障为止的平均时间)两个参数来衡量产品的可靠性。但铝电解电容器属于MTTF(不用修理的机器·部品)的范畴，所以到故障为止的工作时间的平均值用【MTTF 时间】来表示。故障模式，根据引发故障的使用条件而不同。(图-24)



$$V_0 \leq 100WV : L_x = L_r \times 2^{(T_0-T_x)/10} \times 2^{(\Delta T_0 - \Delta T_x)/5}$$

$$V_0 \geq 160WV : L_x = L_r \times 2^{(T_0-T_x)/10} \times 2^{(\Delta T_0 - \Delta T_x)/5} \times (V_0/V_x)^{4.4}$$

在这里 $\Delta T_x = \Delta T_0 \times (I_x / I_0)^2$   
温度略低于指定最大温度，有效纹波寿命用以上公式推算，但预期公式不适用于周围温度低于40℃的条件。

- $L_0$ =预期寿命 (允许的最高工作温度)
- $L_R$ =预期纹波寿命 (允许的最高工作温度)
- $L_x$ =实际工作寿命
- $T_0$ =允许的最大工作温度
- $T_x$ =实际工作周围温度
- $I_x$ =在工作频率下实际印加的纹波电流
- $I_0=f_0$  (HZ) 下，额定许可的最大纹波电流X频率补偿系数
- $V_0$ =额定直流工作电压
- $V_x$ =实际使用时印加在电容上的直流电压( $V_x \leq V_0$ )

※纹波电流计算  
※对于纹波寿命,  $I_x$ 和 $V_x$ 应大于或等于80% $I_0$ 和 $V_0$ , 如果少于80%,以80%计算。

- $\Delta T_0 \leq 5^\circ C$  印加 $I_0$ 的最大温升
- $\Delta T_c$ =印加 $I_x$ ，铝壳的温升
- $\Delta T_x$ =印加 $I_x$ ，素子的温升
- = $K_c \Delta T_c = K_c (T_c - T_x)$

在这里:

$T_c$ =铝壳的表面温度

$T_x$ =实际工作周围温度

$K_c$ =以下表格中素子与铝壳的转换系数

|        |          |      |         |      |      |      |      |      |      |
|--------|----------|------|---------|------|------|------|------|------|------|
| $\Phi$ | $\leq 8$ | 10   | 12.5/13 | 16   | 18   | 22   | 25   | 30   | 35   |
| $K_c$  | 1.10     | 1.15 | 1.20    | 1.25 | 1.30 | 1.35 | 1.40 | 1.50 | 1.65 |

※有效寿命为15年，如果超出15年，以15年为准。

★等效串联电阻 (ESR)公式

$ESR, DF, f$  &  $C$ 的工作频率必须一致，通常在120Hz下测试。

$$ESR = DF / 2 \pi f C \dots \dots \dots (2)$$

在这里： $DF$ ：散逸因子 ( $\tan \delta$  损失角)

纹波电流影响电容器的寿命，因其内部损耗 (ESR)产生热量。产生的热量：

$$P = I^2 R \dots \dots \dots (3)$$

在这里： $I$ =纹波电流(Arms)、 $R$ =ESR( $\Omega$ )

在这时，电容器的温升：

$$\Delta T = I^2 R / AH \dots \dots \dots (4)$$

在这里： $\Delta T$ :铝芯的温升(度)

$I$ :纹波电流(Arms)

$R$ :ESR( $\Omega$ )

$A$ :电容器的表面积( $cm^2$ )

$H$ :散热系数(大约 $1.5 \sim 2.0 \cdot 10^{-3} W / cm^2 \cdot ^\circ C$ )

以上公式(4)显示：铝壳的温升与印加电流的平方及电阻成正比与表面积成反比/因此,纹波电流总量决定产生的热量,热量影响电容器的寿命, $\Delta T$ 的取决于电容器的类型和加工的条件。如果 $\Delta T$ 仍低于5℃,使用状况一般是令人满意的。由于纹波电流导致的温升测量点如图-25所示。

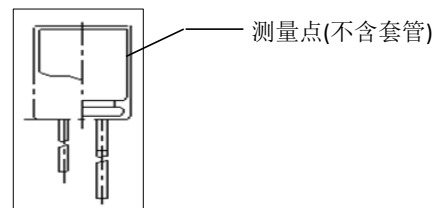


图-25

5.电路设计

1) 工作温度，等效串联电阻(ESR)纹波电流和负荷寿命

★MTTE(平均失效前时间/平均无故障时间)，指在室温25℃下有效寿命。

1-1高温负荷寿命

如果电容器最高温度是105℃(85℃)，然后在105℃ (85℃)下印加额定电压 (WV) $L_0$ 小时，电容器应满足详细规范的要求。在这里， $L_0$ 称之为高温负荷寿命或有效期。

$$V_0 \leq 100WV : L_x = L_0 \times 2^{(T_0-T_x)/10} \times 2^{-\Delta T_x / 5}$$

$$V_0 \geq 160WV : L_x = L_0 \times 2^{(T_0-T_x)/10} \times 2^{-\Delta T_x / 5} \times (V_0/V_x)^{4.4}$$

在这里 $\Delta T_x = \Delta T_0 \times (I_x / I_0)^2$

1-2纹波寿命

如果电容器最高温度是105℃(85℃)，然后在105℃ (85℃)纹波电流的条件下，印加额定电压 (WV)  $L_r$ 小时。电容器应满足详细规范的要求。在这里， $L_r$ 称之为纹波寿命或有效纹波寿命。