

高等学校教材

电解电容器

陈国光 编著



西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书是电子材料与元器件专业的专业课教材。根据电解电容器的性能和结构特点,本书分五章依次讨论了电解电容器的电特性与基本计算;电解电容器的阳极氧化膜;铝电解电容器工艺;钽电解电容器工艺原理以及电解电容器的参数测量、应用与发展,并在每章后附有思考题和参考文献。

本书以简明易懂的物理概念来阐明电解电容器的原理、结构、性能和工艺上的特殊性,它有别于一般电容器概念及其电介质基本理论和特性。

本书深入浅出、便于自学,是目前国内系统全面介绍电解电容器的专著,它不仅是电子材料与元器件专业的专业课教材,同时也是电解电容器产品使用者、电子电路设计人员和电容器专业工厂技术人员的学习参考书。

电 解 电 容 器

陈 国 光 编著

责任编辑 贺晓鸿

西安交通大学出版社出版
(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装
陕西新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 12.75 字数 309 千字

1986年10月第1版 1986年10月第1次印刷

印数 1—6000 册

统一书号: 15340·062 定价: 2.15 元

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社、西安交通大学出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系电子材料与固态器件教材编审委员会电子材料与元件编审小组评选审定，并推荐出版。

本教材由西安交通大学陈国光担任主编，电子工业部十一研究所高工杨臣华担任主审，编审者均是依据电子材料与元件编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为 50 学时，其主要内容为电解电容器的等效电路、交流特性、脉动电压下的状态分析，及电容量、损耗角正切、等效串联电阻等参数温度频率特性的基本计算方法；阀金属阳极氧化膜形成动力学，氧化膜结构与形成电解液的关系，氧化膜的整流效应，自愈作用的工作特性；铝电解电容器的交直流腐蚀机理和其微观结构，腐蚀工艺分析，对形成电解液与工作电解液的要求及成份和其作用；钽电解电容器的成型与烧结、形成工艺分析，被覆阴极层对电性能的影响，液体钽电容器与负极容量；电解电容器的主要及特殊参数的测量，在电路中的各种应用，发展中的新产品与发展动向等。

使用本教材应注意电解电容器的原理、结构、性能及工艺上的特殊性，它有别于一般电容器概念及其电介质的基本理论和特性。本教材力求以简明易懂的物理概念来阐述电解电容器的有关基础理论、参数特性、工艺原理，避免使用繁琐的数学推导。本教材不仅可作为大专院校选修课程的教学用书，也可作为社会上数目众多的专业工厂培训技术人员时使用，同时对电解电容器产品使用及设计人员也是一本有用的参考书。

本教材共分五章，第一、二、五章由陈国光编写，第三章由曹婉真编写，第四章由夏云发编写，并由陈国光统编全稿。其中所有插图均由邵祖发绘制。参加审阅工作的还有成都电讯工程学院的曲喜新教授。在编写过程中，得到了杨臣华总工程师的精心审稿，并提出了许多宝贵意见，同时也得到电子工业部及省市各有关单位的热情支持，在此表示诚挚的感谢。

由于编著者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1984 年 12 月

目 录

前 言

第一章 电解电容器的电特性与基本计算	(1)
第一节 电解电容器的性能特点.....	(1)
第二节 电解电容器的等效电路.....	(4)
第三节 电解电容器的交流特性.....	(10)
第四节 电解电容器的电感量计算与减少电感的措施.....	(26)
第五节 电解电容器在脉动电压下的状态.....	(31)
第六节 电解电容器的漏电流.....	(41)
思考题.....	(47)
计算题.....	(48)
参考文献.....	(50)
第二章 电解电容器的阳极氧化膜	(51)
第一节 阳极氧化膜形成动力学.....	(51)
第二节 阳极氧化膜的结构与形成液的关系.....	(60)
第三节 阳极氧化膜的工作特性.....	(70)
思考题.....	(78)
参考文献.....	(79)
第三章 铝电解电容器工艺分析	(81)
第一节 主要原材料及其要求.....	(81)
第二节 铝箔表面的腐蚀工艺分析.....	(84)
第三节 铝电解电容器的形成工艺.....	(101)
第四节 铝电解电容器的工作电解液.....	(106)
第五节 芯包卷绕与密封老练.....	(116)
思考题.....	(121)
参考文献.....	(122)
附录.....	(123)
第四章 钽电解电容器工艺原理	(127)
第一节 材料的纯度和性质.....	(127)
第二节 成型与烧结.....	(132)
第三节 形成工艺.....	(137)

第四节	被覆固体电解质工艺及其对电性能的影响·····	(141)
第五节	液体电解质烧结钽电容器·····	(153)
第六节	钽电解电容器的老练和失效分析·····	(164)
思考题	·····	(169)
参考文献	·····	(170)
第 五 章	电解电容器的参数测量及应用与发展·····	(171)
第一节	电解电容器的参数测量·····	(171)
第二节	电解电容器的应用·····	(175)
第三节	发展中的新产品·····	(184)
一、	固体铝电解电容器·····	(184)
二、	有机半导体固体电解质电解电容器·····	(187)
三、	高频电解电容器·····	(189)
四、	双电层电容器·····	(191)
第四节	电解电容器的发展动向·····	(193)
思考题	·····	(197)
参考文献	·····	(198)

第一章 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 $\tan\delta$ 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 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 电解电容器的性能特点

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,大致有三点:

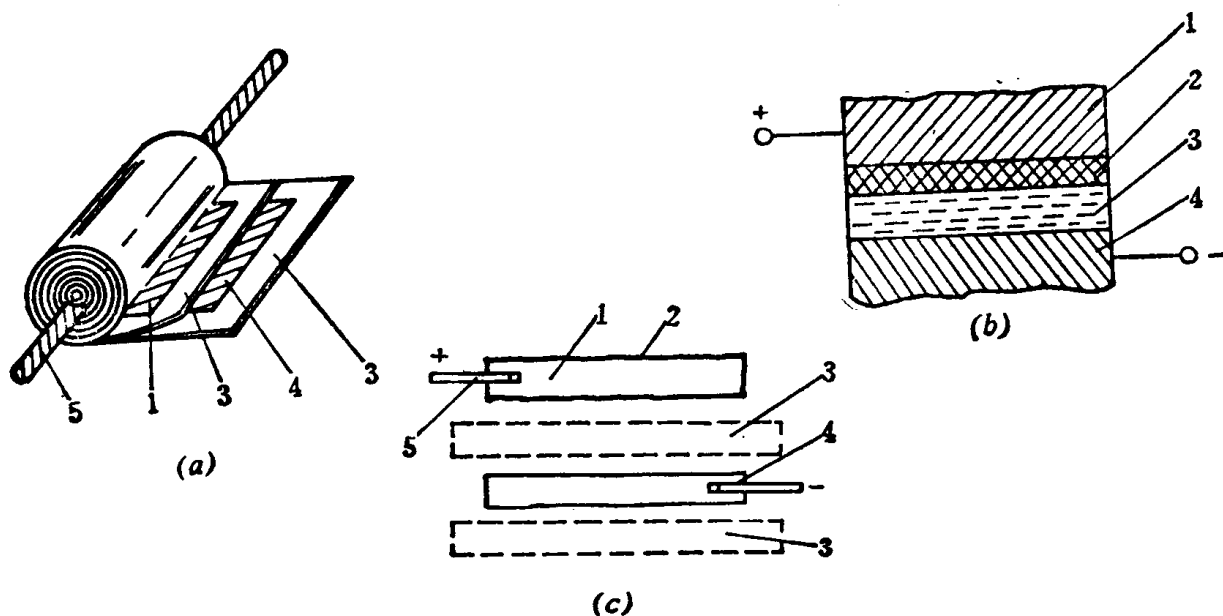
(1) 电解电容器的工作介质是在一些金属(如铝、钽、铌之类)表面上所生成的一层极薄的金属氧化膜,此层氧化膜介质完全与组成电容器的电极一端结合成一个整体,不能单独存在。而我们通常所认识的电容器介质则是由一种独立制造的绝缘材料(如电容器纸、有机薄膜、云母片和陶瓷片等)所构成,且须另加电极。

(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”*,它可以为液体,也可是糊状、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工作可靠的必要条件,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。

以箔式电解电容器的芯子结构为例,如图 1-1 从外观上来看电解电容器的芯子几乎与纸介电容器的芯子无甚差别,因此更需要我们着重注意其间的不同。

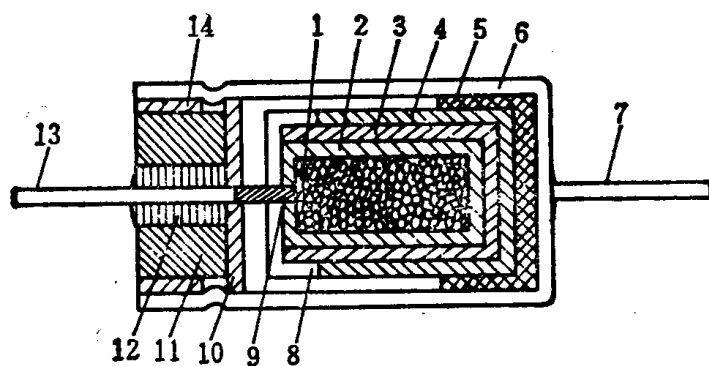
• 注:虽然在一般词汇应用中,常将“解”字简化为“介”字,但由于在本教材中电容器用的电解质并不等于电介质,因此必须予以正确区别,不能混淆。



1. 金属阳极(或经腐蚀的)(正极); 2. 金属氧化膜(电介质); 3. 浸有电解质的衬垫纸(阴极); 4. 引出极箔(负极); 5. 引出极片

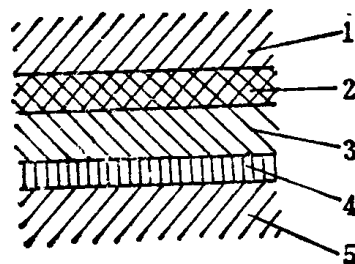
图 1-1 箔式电解电容器结构示意图

图 1-2 表示一种金属粉(例如钽粉)将其压制成型后,经高温真空烧结成多孔的坚硬芯块,外表可以做成片、珠、圆柱等形状,再经过阳极化生成氧化膜,然后被复或浸渍电解质,



1. 已形成氧化膜的烧结钽块; 2. MnO_2 层; 3. 石墨层; 4. 铅锡合金层; 5, 12, 14. 锡焊料; 6. 外壳; 7. 负极引线; 8. 绝缘漆层; 9. 钽引出丝; 10. 绝缘垫片; 11. 玻璃绝缘子; 13. 正极引出线。

图 1-2(a) 固体烧结电解电容器截面图



1. Ta 基体 2. Ta_2O_5 膜
3. MnO_2 阴极层 4. 石墨层
5. 铅锡合金或银层

图 1-2(b) 局部放大的层状结构示意图

根据产品类型不同,浸渍于液体电解质中并装于金属外壳者称为液体烧结电解电容器;被复固体电解质后再被复上导电金属如石墨及铅锡合金层或银涂层,最后装入金属外壳或用塑料包封者称为固体烧结电解电容器。

不论箔式或烧结式均具有以上基本的结构特征。

二、电解电容器的性能特点

电解电容器结构上的一些特征,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³。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 $14000\mu\text{F}\cdot\text{V}/\text{cm}^3$ 。

(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 450 伏的铝电解电容器, 按计算其氧化膜厚度约为 0.78 微米, 则其工作场强约达 600 千伏/毫米; 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 $\phi 90 \times 160$ 毫米。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) 铝电解电容器的价格便宜, 可以供各个方面的应用, 而且在电性能上也非常出色, 可称价廉物美。钽电容器的价格较高, 但可靠性却比较高、储存寿命也长, 适宜于要求比较严格的场合应用。

(6) 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。

(7) 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 500 伏, 固体电解质烧结钽电解电容器的上限值为 125 伏(正在研究达到 150 伏), 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。

(8) 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 毫安以上, 相应的绝缘电阻尚不足 1 兆欧; 在这方面钽电容器要比铝的优越得多, 其漏电流以微安计。

(9) 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。

(10) 铝电解电容器易老化，性能的可靠性逐年下降。这与所使用的原材料和工艺条件有密切关系，虽也有长寿命的铝电容器，但一般地说它的使用和贮存均有一定限制，特别是经长期贮存不用，突然加上上限工作电压值，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。

(11) 由于有些产品使用液体电解质或者是使用过程中内部放气量较大，当金属外壳的密封性不够完善时，有可能导致漏液，影响仪器设备内部。不过这个缺点完全可以从加强工艺和密封措施来解决。

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地谈到。

第二节 电解电容器的等效电路

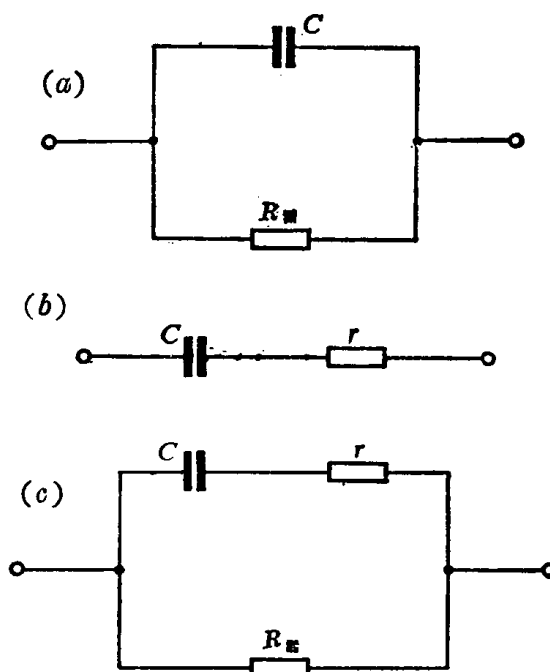
一、简化等效电路的局限性

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 1-3(a)；在讨论 $\lg \delta$ 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 1-3(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 1-3(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导电阻 ($R_{\text{漏}}$) 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 1-4 所示，如应用 CQ—1 型或 CQ—4 型，当电桥平衡时，则有

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

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



(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 1-3 电解电容器的简化等效电路

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

例如测出, $C_x = 47.5 \mu\text{F}$, $\operatorname{tg} \delta = 6\%$ (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 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 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 $\operatorname{tg} \delta$ 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 1-3(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, 才有可能分析问题的症结所在。

在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 1-5 所示。

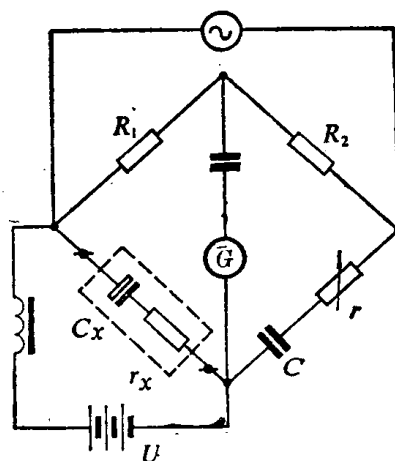


图 1-4 CQ 型电桥测量电解电容器原理图

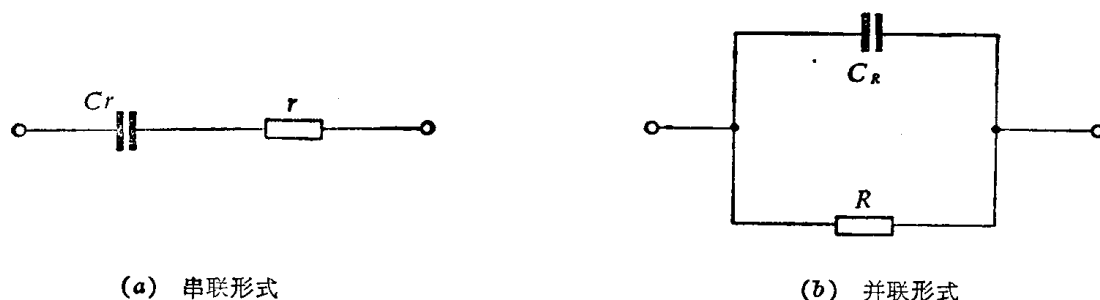


图 1-5 等效电路的两种形式

对于串联电路的复阻抗 Z_r 写为

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

对于并联电路的复阻抗 Z_R 写为

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

根据实数部分和虚数部分应彼此相等, 则可求出

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

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

对于并联等效电路的 $\operatorname{tg} \delta$ 写为

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

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

$$R = \frac{r}{\text{tg}^2\delta} \text{ 及 } C_R = C, \quad (1-4)$$

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 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)。

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 1-6 所示, 并依次化简。

按串、并联等效电路的换算方式得

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

由于 C 和 $C'_\text{纸}$ 是串联的, 所以

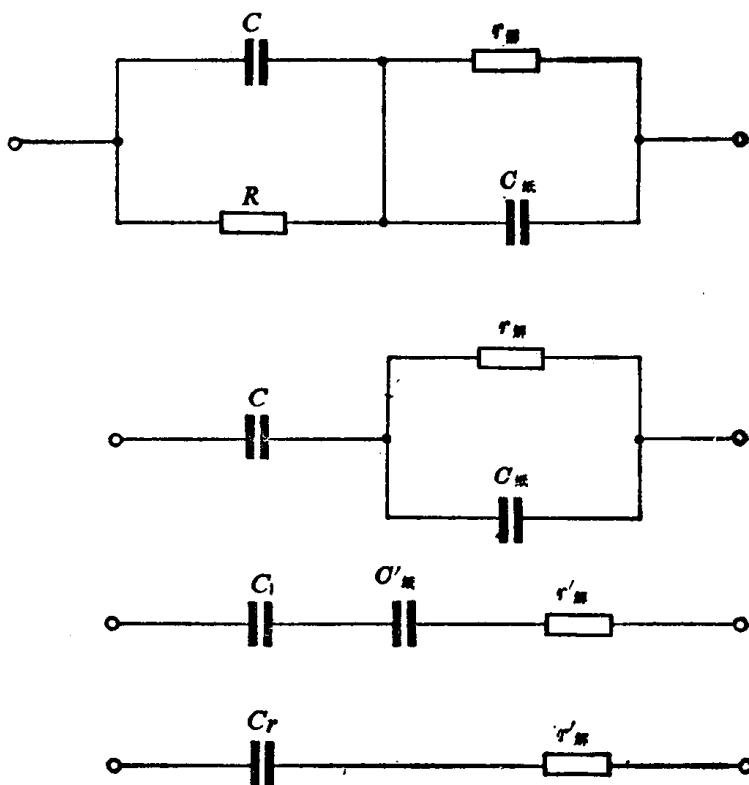
$$C_r = \frac{CC'_\text{纸}}{C + C'_\text{纸}}$$

将(1-5)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:

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

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

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



- 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。

图 1-6 引入衬垫附加电容量的等效电路图

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

以及能测量出来的损耗为(在此忽略了氧化膜的介质损耗):

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

化简, 得

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

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

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 $C_r = C$, $\operatorname{tg} \delta = 0$

(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

$$C_r = \frac{C C_{\text{纸}}'}{C + C_{\text{纸}}'} = \frac{C_{\text{纸}}'}{1 + \frac{C_{\text{纸}}'}{C}}$$

有

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

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

从这个极限情况下, 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 $\operatorname{tg} \delta$ 与 $r_{\text{解}}$ (也就是温度的函数) 之间的关系。例如 $C = 10 \mu\text{F}$, $C_{\text{纸}} = 0.01 \mu\text{F}$, $\omega = 2\pi \times 50 = 10^2 \pi$, 按表 1-1 所列值, 可绘出 C_r 、 $\operatorname{tg} \delta$ 和 $r_{\text{解}}$ 的关系, 如图 1-7 所示。

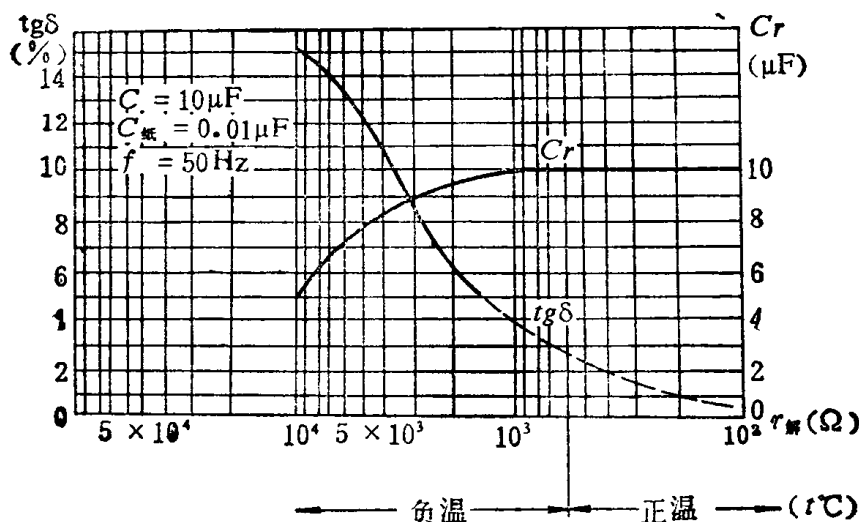


图 1-7 由于存在 $C_{\text{纸}}$ 和 $r_{\text{解}}$ 引起的电容量与 $\operatorname{tg} \delta$ 的温度关系

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 1-7 也反映了测量电容值和 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系。

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

总之, 温度对电容量和 $\text{tg}\delta$ 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。

表 1-1

$r_{\text{解}} (\Omega)$	$(\omega C_{\text{纸}} r_{\text{解}})^2$	按 (1-7B) 式 C_r	$\omega C r_{\text{解}}$	按 (1-8) 式 $\text{tg}\delta$
10	$(\pi \times 10^{-3})^2 \ll 1$	$\approx C$	≈ 0.03	≈ 0.03
10^2	$(\pi \times 10^{-4})^2 \ll 1$	$\approx C$	0.31	0.31
10^3	$(\pi \times 10^{-3})^2 \ll 1$	$\approx 0.99 C$	3.14	3.1
5×10^3	$(5\pi \times 10^{-3})^2 \ll 1$	$0.8 C$	15.7	12.6
10^4	$(\pi \times 10^{-2})^2 \ll 1$	$0.5 C$	31.4	15.7

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, 可得出等效电路如图 1-8 所示。

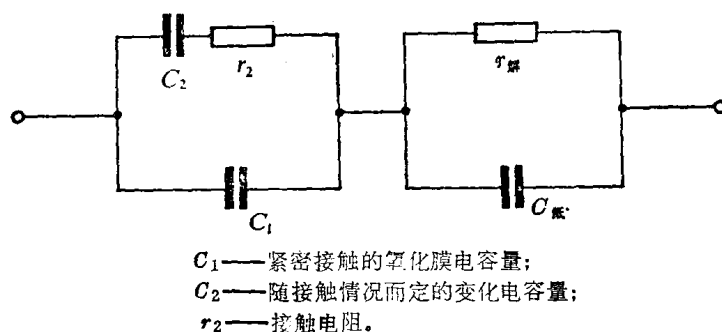


图 1-8 引入 C_2 变化电容量的箔式电容器等效电路

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 1-6 的形式, $C_{\text{纸}}$ 及 $r_{\text{解}}$ 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: 在此对低压电容器的负极容量对温度的影响尚未考虑在内。

(2) 对烧结型结构来说, 使用液体电解质 (或凝胶电解质) $r_{\text{解}}$ 与温度的关系是显而易见的。使用固体电解质的, 其 ρ 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 1-9 的等效电路。

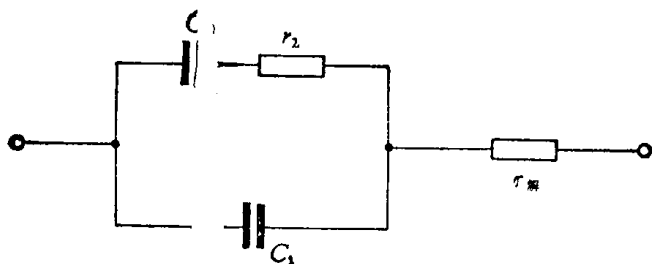


图 1-9 引, r_2 变化电容量的烧结型电容器等效电路

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

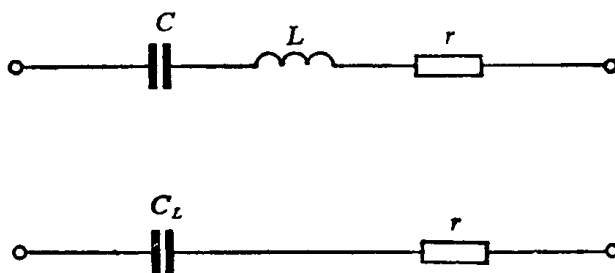
$$C = C_1 + C_2 \left(\frac{1}{1 + (\omega C_2 r_2)^2} \right) \quad (1-9)$$

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 1-10 所示。

其复阻抗为



(a) 具有电感的电容器等效电路
(b) 等效于前者的电路

图 1-10 具有电感量的电解电容器等效电路图

$$\begin{aligned} Z &= r - j \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right) \\ &= r - j \left(-\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} \right) \\ &= r - j \frac{1}{\omega C} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \end{aligned}$$

其中 $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$, ω_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

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

其中 f_0 为 L , C 的谐振频率。

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

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。

第三节 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 ESR 的关系

对图 1-10(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

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

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

当 L 很小时， $\omega^2 LC \ll 1$ ，则

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

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 ($C_{\text{效}}$)

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

当 $\omega^2 LC \ll 1$

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

而 $C_{\text{效}}$ 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，在实际中使用有效电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

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

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，既要从小工艺上找原因，也要从结构上来分析。

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

r 值由三个部分所组成，即：i) 介质损耗所代表的等效串联电阻($r_{\text{介}}$)，ii) 电解质所代表的等效串联电阻($r_{\text{电}}$)，iii) 极板的欧姆电阻、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 。

$$ESR = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C}$$

由于氧化膜介质的 $\operatorname{tg} \delta_{\text{介}}$ 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 也可忽略掉，这样

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_{\text{介}} + \omega C r_{\text{电}} \quad (1-18)$$

如以直线方程式来代替， $y = A + Bx$

其中 $y = \operatorname{tg} \delta$ ， $\operatorname{tg} \delta_{\text{介}} = A$ ， $B = 2\pi C r_{\text{电}}$ ， $x = f$ ，在此 C ， $r_{\text{电}}$ 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(1-18)式更适合于分析固体钽电解电容器的电特性。

例题 一 CA 型固体钽电容器，标称电容量为 $22\mu\text{F}$ ，实测数值如下；

$f(\text{Hz})$	100	1000	2000
$C(\mu\text{F})$	24.5	24.25	24.08
$\operatorname{tg} \delta$	0.040	0.307	0.610

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

解：根据式(1-18)，可列出下式

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

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

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

$$r_{\text{电}} = \frac{3 \times 10^{-4}}{2\pi \times 24.5 \times 10^{-6}} = 1.95 \Omega \quad (\text{实际上包含 } r_{\text{金}} \text{ 在内})$$

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

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{金}} = 0.03$$

相应可求出

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

$$\therefore \operatorname{tg} \delta_{\text{介}} \cong 0.01 = \text{常值},$$