

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6讲 电解电容器基础知识（一）

### Chapter 6 Basic Knowledge of Electrolytic Capacitor

陈永真  
Chen Yongzhen

#### 1 大电容量的需求

电容器的一个主要应用，就是在工频整流过程中将脉动直流电平滑成为平稳的直流电（这个过程也可以称为滤波）。例如将正弦交流电转化为直流电时，为平滑整流后的直流电，通常需要电容器滤波，将脉动直流电中的交流成分用电容器“短路”。然而，将从零到峰值（有效值的1.414倍）的脉动电压平化成接近平滑的直流电压需要很大电容量的电容器，如将单相桥式整流输出电压平滑到仅有10%波动，需要多大电容呢？以单相桥式整流器为例：在电容输入式滤波电路中，一般每个整流二极管导电仅能导通3ms左右的时间向输出供电，其余7ms左右的时间输出则由滤波电容供电，这时电容器的储能将波动约20%，即电容器的每半个电源周波向输出提供20%的储能，对应输出功率的70%，在1s的时间里电容器需要向输出提供能量为：

$$0.7P_0 = 0.2 \times 2f \times \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (1)$$

$$P_0 = 0.2 \times 2f \times \frac{1}{2} C \cdot U^2 \div 0.7 = \frac{0.2}{0.7} f \cdot C \cdot U^2 = \frac{2}{7} f \cdot C \cdot U^2 \quad (2)$$

当频率 $f$ 为50Hz时：

$$P_0 = \frac{2 \times 50}{7} \cdot C \cdot U^2 \quad (3)$$

$$C = \frac{7}{100} \times \frac{P_0}{U^2} (\mu\text{F}) \quad (4)$$

以交流220V输入直接整流输出电压峰值大约为300V、向100W负载供电为例，需要的电容量为：

$$C = \frac{7}{100} \times \frac{100}{300^2} = \frac{7}{90000} = \frac{700}{9} (\mu\text{F}) \quad (5)$$

约为80 $\mu\text{F}$ ，1个80 $\mu\text{F}$ /400V的薄膜电容器的体积与价

格都是很难以接受的。

再如，为 15V/1A（整流器需要在稳压电路前具有 20V 的电压，功率 20W）供电的整流器，需要滤波电容为：

$$C = \frac{7}{100} \times \frac{20}{20^2} = \frac{0.007}{2} \approx 3300(\mu\text{F}) \quad (6)$$

3300  $\mu\text{F}$ /25V 的薄膜电容器将是天价！

基于以上原因，必须寻求一种电容量大、体积小、并且价格便宜的电容器。在电容器制造技术不是很先进的上世纪前半叶，想获得高电容量的电容器，薄膜电容器、陶瓷电容器实现起来价格将是极其昂贵的，不能投入使用。因此，不得不另寻出路，来获得高电容量的电容器实现方法。

## 2 增大电容量的方法

在无法改变电容器介质的介电系数的基础上，增加电容器电容量的方法就是设法增大电容器电极面积。

增大电极面积可以简单地增大电极面积，这样就会使得电容器体积变大。另一种方法，是改变电极表面，在不增加电极面积的基础上增加电极表面积，可以使得基本不增加电容器体积的情况下，来增加电容器的电容量。

使电极板表面变得粗糙、凸凹不平，或将极板做成像海绵一样多孔化，可以增加电极表面积，如图 1。

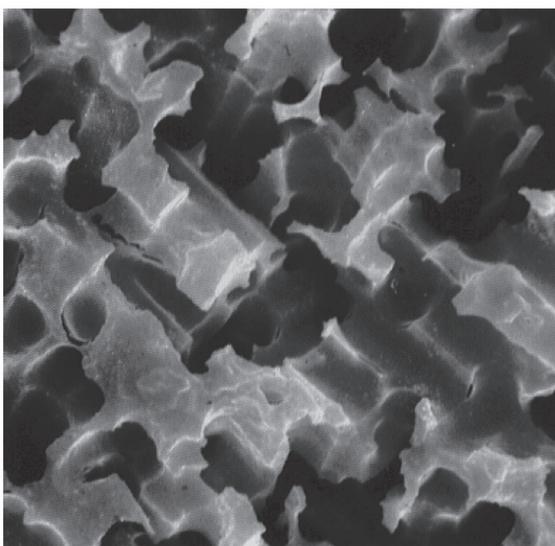


图 1 电极表面凸凹不平可以增加电极表面积

由于铝的延展性非常好，可以轧制非常薄的铝箔，因此，铝电解电容器可以通过腐蚀阳极、阴极箔来扩大电极有效面积。由于钽的延展性极差，故钽电解电容器则采用将钽粉通过烧结成为多孔化的钽块作为阳极，通过将多孔化的钽块表面氧化，形成五氧化二钽的绝缘介质（相对介电系数 27）。如固体钽电解电容器的阴极是二氧化锰，再将二氧化锰与五氧化二钽的绝缘介质紧密接触，通过引出电极形成钽电解电容器。钽电解电容器的结构示意图，如图 2。

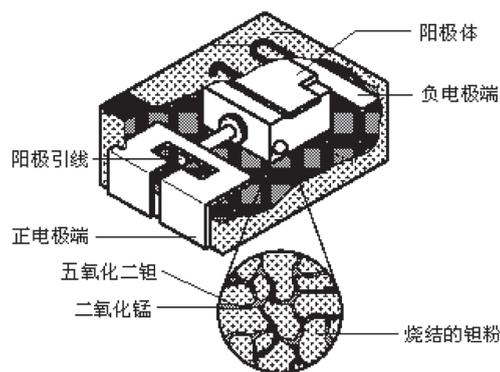


图 2 固体钽电解电容器的实际结构图

接下来的问题就是，当一个极板变得粗糙或多孔化后，怎样使另一个极板与其匹配的紧密接触？而且中间还要夹一个厚度、质地均匀的介质材料。这些技术要求，对于普通的薄膜电容器和陶瓷电容器来说几乎是不可能的。因此，需要寻求一种适应这种要求的介质和电极形式，电解电容器在这种技术需求和市场需求下应运而生。

## 3 介质薄膜的获得

电解电容器的第一个问题，是如何获得与粗糙电极紧密结合且厚度均匀、质地均匀的介质膜。在日常生活中，人们最常用的金属之一是铝。通常，为了增加铝的表面硬度和耐磨性，通常要在铝的表面进行阳极氧化，通过增加氧化铝薄膜的厚度来增加表面硬度。而固体氧化铝是一种良好的绝缘体，而且介电系数很高（大约为 8），介电强度也非常高（大约为  $800 \times 106\text{V}$ ）。因此，肯定也是一种良好的介质材料。

厚度均匀、质地均匀的氧化铝薄膜，可以通过阳极氧化的形式来得到，氧化铝薄膜的厚度，可以通过控制阳极氧化电压来精确的控制。即使是表面粗糙的电极，氧化铝薄膜的厚度与质地均匀性都不会受到影响，并且会紧密的与铝接触。这就为铝电解电容器的实现打下了最坚实的第一步。铝电解电容器电极结构与介质膜结构如图 3 所示。

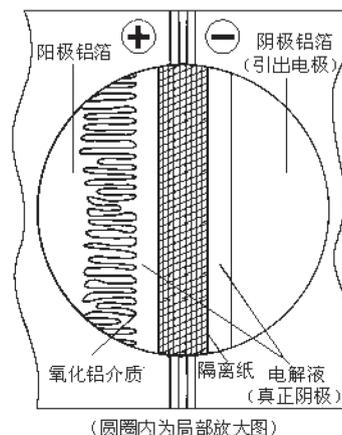


图 3 铝电解电容器电极结构

除了铝以外，能够通过阳极氧化的方法在金属表面上形成氧化膜介质的金属，还有钽、铌、钛等，统称为阀金属，这类金属有：铝、钽、铌、钛。这样，可以利用铝或钽阳极氧化方法在表面形成密致的氧化膜的特性，利用氧化铝、氧化钽膜构成绝缘介质，由于氧化铝、氧化钽具有高的绝缘强度而且相对介电系数大（相对介电系数：氧化铝为 8、氧化钽为 20 左右，远高于一般薄膜的 2~3 介电系数），如导电的液体或用浸入的方法，使二氧化锰的负极以及其他形式的负电极（如高导电率聚合物）与正极严密接触的介质也形成严密接触。因此，五氧化二钽、五氧化二铌等金属氧化物，也可以成为良好的电容器介质。需要注意的是，金红石结构的五氧化二钽的介电系数高达 140！这对于制造高电容量电解电容器尤为重要，关键是能否工业化制造。

钽电解电容器的介质膜严密与阳极电极接触，是利用将海绵状钽快浸泡在磷酸泳液中电解，在海绵钽表面氧化成五氧化二钽介质膜，如图 2。

钛电解电容器至今不能得到应用，可能由于如何获得高介电系数的金红石结构的氧化钛，因为其他结构的二氧化钛的介电系数远远低于金红石结构氧化钛；其二，可能是电极像铝电解电容器那样轧制成钛箔还是像钽电解电容器那样制成海绵钛。

## 4 负极的获得方法

仅仅通过增加粗糙的正极表面积与金属负极，事实上并不能增加极板有效面积，只有负极的极板与正极同样粗糙，并且整个电极的表面处处严密接触，才能实现极板面积的有效增加，如果采用常规的固体金属电极，这将是不能实现的。欲实现正负电极在粗糙的表面下严密接触，只能是一个电极是固态金属，而另一电极是非固态的或设法制造出这样的负极，如导电的液体或气体，考虑气体的导电性远不如液体，故这个电极应该是导电的液体。这样，2 个电极面积就可以比电极的几何面积大得多，使电容量大大增加。因此，铝电解电容器、钽电解电容器的电容量可以是一般电容器的数百倍，很容易获得数 100  $\mu\text{F}$  甚至数 F 的电容量，这是一般薄膜电容器所不能实现的。

然而，不可否认的是，液态电解质和固态电解质均为离子导电，其电导率、温度的稳定性均不如自由电子导电的金属。这也是电解电容器的等效串联电阻、损耗因数等参数，均不如金属电极的薄膜电容器、陶瓷电容器的最主要原因之一。

### 4.1 铝电解电容器负极制造方法

铝电解电容器的负极采用电解液，这样可以使得负极与介质膜严密接触。由于电解液不能直接引出，需要用实体的金属作为引出电极。在铝电解电容器中负极引出电极为铝箔。

由于铝箔不可避免的存在氧化层，作为负极引出电极的

负极箔与电解液之间，实际上也构成了电容器。这样，铝电解电容器实际上是“2 只”电容器串联而成。因此，铝电解电容器的负极也要制成腐蚀箔，以确保负极引出电极与电解液具有足够的电容量，确保在实际应用中，不至于在负极引出电极与电解液之间产生过高的电压。

不同的电解液会使得铝电解电容器具有不同的特性，有的是影响 ESR、有的是决定电解电容器寿命与最高工作温度，甚至还会影响铝电解电容器的快速放电能力。

为了确保正极箔、负极箔之间不产生物理接触，需要在正极箔与负极箔之间用柔软的物质隔离，同时这种柔软物质还要吸纳电解液，尽可能的使电解液“畅通无阻”。这种柔软透水物质就是电解电容器纸，不同的电解电容器纸也会影响铝电解电容器的性能。

由于电解电容器纸浸含电解液，可以将电解电容器纸算作负极的一部分。这样铝电解电容器的负极，由电解液、电解电容器纸、负极箔构成。

由于电解液是离子导电，还要考虑具有修复介质膜功能、闪火电压等问题，铝电解电容器的等效串联电阻（ESR）大多在电解液中产生。为了降低负极的 ESR，最简单的办法可以是选用高含水率电解液，与此同时也存在着在高温条件下的水合反应问题。高含水率的低 / 超低 ESR 铝电解电容器，曾多次出现早期失效的问题，即使是世界著名电解电容器制造商也躲不过。在常温条件下，高含水率电解液的铝电解电容器还是很好用的。避免高含水率电解液的铝电解电容器的水合反应问题，铝电解电容器制造商想出很多抑制水合反应的方法，如水合反应抑制添加剂等。使得高含水率电解液的铝电解电容器制造过程的控制极其严格，稍有不慎就会出现产品质量问题。因此，现在即使是世界著名铝电解电容器制造商，也尽量规避高温长寿命铝电解电容器应用高含水率电解液，宁可牺牲 ESR。

高导电聚合物作为铝电解电容器负极可以明显的降低铝电解电容器的 ESR。例如，330  $\mu\text{F}$  聚合物铝电解电容器的 ESR 仅仅为 10  $\text{m}\Omega\sim 20\text{m}\Omega$ ，而同电容量的电解液作为负极的铝电解电容器，ESR 大概要在 0.3  $\Omega\sim 1\Omega$  之间。

### 4.2 钽电解电容器负极制造方法

将液态的硝酸锰加入钽块，然后将其在水蒸汽（催化剂）环境中进行热分解，分解成二氧化锰与二氧化氮。硝酸锰吸附性好，生成的二氧化锰可以完全吸附在海面状钽块内部的无数个小孔当中。假如这里直接使用固体的二氧化锰，就无法达到这种效果，这就是为什么二氧化锰只能在制造过程中得到的原因。假如，使用 PPY/PEDT 等固体聚合物，因其熔点很低，就可以直接将其溶解然后放进去。

## 5 钽电解电容器的制造方法简介

固体钽电解电容器，基本上由钽粉（正极）+氧化膜（不能独立于钽粉存在）+二氧化锰+银粉+石墨+环氧树脂+引线等环节构成。

第一步：将钽粉和有机溶剂掺杂在一起，按照一定的形状加压成形，同时埋入钽引线。

第二步：在 2000℃ 以上的真空高温环境下，将掺杂有机溶剂的钽粉在真空中进行烧结，变成类似于海绵的状态，同时和引线真正地融合在一起。

第三步：将海绵状的钽，泡在磷酸溶液里面电解，氧化后表面即生成五氧化二钽。五氧化二钽的介电常数非常高，在 27 左右，性能高于铝电解电容的三氧化二铝介质（介电常数 7 左右）。

第四步：将液态硝酸锰加入钽块，然后将其在水蒸汽（催化剂）环境中进行热分解，分解成二氧化锰与二氧化氮。硝酸锰吸附性好，生成的二氧化锰可以完全吸附在海面状钽块内部的无数小孔当中。假如这里直接使用固体的二氧化锰，就无法达到这种效果，这就是为什么二氧化锰只能在制造过程中得到的原因。假如，使用 PPY/PEDT 等固体聚合物，因其熔点很低，就可以直接将其溶解然后放进去。

第五步：最后要将银粉和石墨涂在二氧化锰的表面上，减少它的 ESR，增强它的导电性。

第六步：加入外引线，然后用环氧树脂进行封装。

由上述生产过程可以看到，由于固体钽电解电容器的负极为二氧化锰，因而失去了铝电解电容器可以依靠外加直流电压来修复介质膜的性能，同时电解质以及正、负电极中的杂质将继续存在，即钽电解电容器漏电流的大小在制造出来

时就被决定了，不会通过老化或赋能的方式减小。同时，也不会像铝电解电容器那样，长期置放后漏电流会明显增加，而导致铝电解电容器性能的劣化。

## 6 铝电解电容器的封装

早期铝电解电容器封装，分纸筒封装、轴向引线，这种封装方式很适合真空管电路的接线架搭接方式；高级一些的是铝壳封装，外壳为负极，一个引出端为正极，这种封装方式适合于真空管的底台接地方式，可以将铝电解电容器外壳直接固定在底台上，与汽车蓄电池搭铁类似。电流不大时很多使用。

晶体管时代和小规模集成电路时代，电子线路装配技术从底台加接线架变为尽可能多的将电子元件安装在印刷电路板上。小型铝电解电容器，欧洲多采用轴向引线方式，日本和原来的中国则采用同侧引线方式，同侧引线有利于减小电解电容器对电路板的占用面积，相对而言，同侧引线也有利于减小电解电容器的寄生电感。总的来说，同侧引线优于轴向引线，而且同侧引线方式成本低于轴向引线。



图 5 引线式铝电解电容器

较大的铝电解电容器，例如直径超过 25mm，简单的两根纤细的引脚无法很好地固定电解电容器，因此，出现了插脚式铝电解电容器（俗称牛角电解电容器）。由于插脚式封装形式的插脚式铆接在盖板上，相对比较坚固。如果电解电容器尺寸更大一些，可以采用 4 脚的插脚式，其中 2 个脚为固定脚。现在的插脚式电解电容器可以做到 2200 μF/450V。



图 6 插脚式铝电解电容器

再大的铝电解电容器就是螺栓型的。可以做到 450V/10 000 μF，或者 16V/3 000 000 μF。很多人曾经说过，高中老师讲过，地球的电容量为 1F，地球上不会有 1 个 F 以上的电容量，甚至某高校电气工程专业教授也声称，绝对不会有 1 个 F 以上的电容器。事实上，不仅超级电容器突破了 1 个 F，铝电



(a)



(b)

图 4 (a) 老式纸筒铝电解电容器；(b) 老式铝壳电解电容器

解电容器同样突破了1个F电容量。



图7 螺栓式铝电解电容器

为了适应电子线路的表面贴装技术，铝电解电容器也有贴片铝电容器，如图8所示。



图8 贴片式铝电解电容器

提高铝电解电容器的性能，甚至还出现了叠片铝电解电容器，如图9所示。

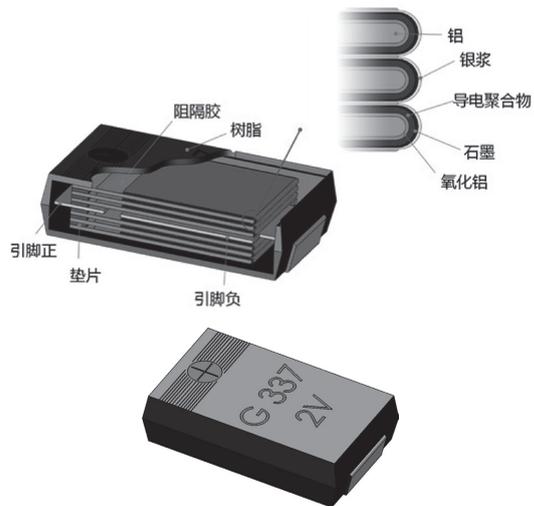


图9 国产铝聚合物叠片电容器

## 7 钽电解电容器的封装

现在的钽电解电容器封装，主要是引线式和贴片式，如图10和图11所示。



图10 引线式钽电解电容器

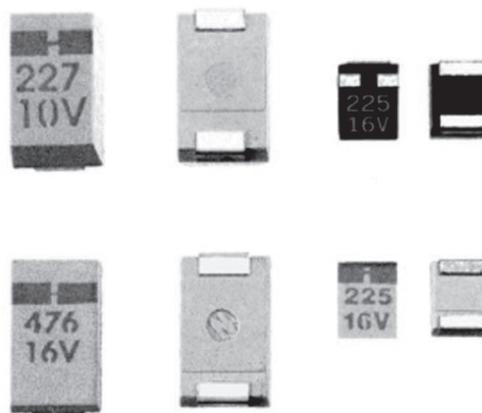


图11 贴片式钽电解电容器

### 作者简介

陈永真，1956年生，1982年1月毕业于大连工学院工业自动化专业。辽宁工业大学教授、电力电子与电力传动硕士生导师，中国电源学会常务理事、编辑工作委员会主任、专家委员会副主席、学术工作委员会委员，中国电工技术学会电力电子学会名誉理事。承担国家“863”计划电动汽车重大专项“解放牌混合动力城市客车用超级电容器”，出版专著10部。主要研究课题：高效率功率变换；新型电力电子器件应用；电力电子电容器应用；超级电容器应用；电池的电源管理。

## 中国光伏电力投融资联盟成立

中国光伏电力投融资联盟日前在京成立，联盟在中国循环经济协会可再生能源专业委员会号召及能源基金会的支持下，由中民新能、保利协鑫、阿特斯、天合光能、民生银行、华能天成租赁、中国电力科学研究院、鉴衡认证等十几家机构共同发起成立。联盟旨在按照“公正平等、客观诚信、协同创新、互惠共赢”的原则，通过有效的联盟机制，搭建专业、高效、公正的投资机构与融资项目及企业间的投融资服务平台。