



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。

《电源世界》投稿：editor@cps800.com

第四讲 与时俱进的电容器——薄膜电容器 Advanced Capacitor--Film Capacitor

陈永真
Chen Yongzhen

1 电解电容器不能包打天下

铝电解电容器可以获得很高的电容量，似乎就可以替代其他的电容器。但是，事实并非如此，电解电容器并不能包打天下。

电解电容器是有极性的，不适合双极性电压条件下工作，除了短时工作的马达启动电容器和音响用交流电解电容器外，电解电容器均只能工作在直流电压，至少是电容器端电压不能反极性。

由于铝电解电容器的负极为电解液，在相同的电容量条件下，其ESR值相对薄膜电容器、陶瓷电容器、空心电容器高得多，损耗因数远远大于薄膜电容器、陶瓷电容器、空心电容器。海绵状阳极的钽电解电容器的ESR，尽管比铝电解电容器低，其ESR、损耗因数也远远高于其他介质电容器。

电解液中的氯离子对绝缘介质膜（氧化铝）的腐蚀作用，

使得铝电解电容器的漏电流远高于薄膜电容器、陶瓷电容器、空心电容器等，不适合用于对漏电流要求严格的场合。

由于电解电容器的电极结构和高ESR，使得电解电容器不适合高频应用。

电解电容器电容量随频率和其他因素的变化，使得电解电容器不适合对电容量稳定性有要求的应用中。

由于高ESR和电容器散热能力差等因素，电解电容器耐电流能力比较差。

由于以上因素，电解电容器最适合应用于交流电的整流滤波，甚至电源旁路都不适合。其他的应用，需要如薄膜电容器、陶瓷电容器等介质的电容器。

2 电子技术促进电容器的发展

在电解电容器之前，1876年英国D. 斐茨杰拉德就发明纸

介电容器。在没有进入电子技术时代以前，电容器主要用于电磁学研究。相对莱顿瓶，纸介电容器可以大大减小体积。

1906年德福雷斯特在真空二极管基础上发明了真空三极管，1912年德福雷斯特发现了真空管的放大作用，自此人类进入电子技术时代。在交流放大器中，前后级需要隔直电容器，需要至少400V耐压、0.01 μ F或0.1 μ F的电容量，在那个时代，纸介电容器几乎是唯一的选择方案。400V耐压、0.01 μ F纸介电容器，其尺寸大概为直径15mm、长度40mm，在今天看来这个尺寸是绝对不可思议的，好在那个年代大多数电子产品对体积还没有严格的要求。

在大功率音频放大和射频放大应用中，由于高耐压二极管的特性比较差，不适合作为高压、大电流整流管，这时的电子线路一般需要汞弧整流管整流，同时滤波电路需要LC滤波方式。由于当时的铝电解电容器仅仅能做到450V，500V以上的直流母线电压将选择两只450V铝电解电容器串联，而1000V以上的直流母线电压不得不选择纸介电容器。例如1600V/4 μ F，是一个体积很大的油浸电容器。

由于电容器纸是一种多空纤维构成，为了获得足够的绝缘强度、防止水汽进入而影响电容器纸，需要浸蜡或浸油，这样才能确保纸介电容器的可靠性。

3 聚酯薄膜电容器、聚丙烯薄膜电容器等有机合成薄膜电容器逐渐替代纸介电容器

低压应用，如100V以下，电容器纸无法减薄耐压仅仅100V以下需要的厚度，体积也无法减小。为了减小电容器的体积，需要更薄的介质薄膜。石化工业的发展产生了丰富多彩的有机合成薄膜：聚酯薄膜、聚丙烯薄膜、聚苯乙烯薄膜、聚碳酸酯薄膜等等。

在众多有机合成薄膜中，聚酯薄膜是最早应用有机合成薄膜。现在聚酯薄膜可以拉到1.8 μ m甚至更薄，相比最薄的电容器纸还要薄的多，因此可以有效地减小低压电容器的体积。现在的1F的聚酯薄膜电容器的体积可以做到5 \times 5 \times 5mm，这在过去的纸介电容器是不可想象的，现在做到了。

聚酯薄膜在整个温度范围内的介电系数变化接近 $\pm 3\%$ ，在需要电容量稳定的应用中，聚酯薄膜一般不再适应，需要电容量稳定的介质薄膜。聚苯乙烯薄膜是一种稳定性非常好的介质材料，在需要电容器具有比较高的电容量精度和稳定性应用中，常可以看见聚苯乙烯薄膜电容器。聚碳酸酯薄膜，是一种在聚苯乙烯薄膜电容器之后的又一种具有比较稳定介电系数的有机合成薄膜电容器。可以工作在120 $^{\circ}$ C~130 $^{\circ}$ C，而聚苯乙烯薄膜电容器最高工作温度为70 $^{\circ}$ C。

聚苯乙烯薄膜电容器、聚碳酸酯薄膜电容器的价格比较高，在需要比较低成本或对电容量稳定性要求不十分高的需求时，也可以考虑复合膜电容器。复合膜电容器是将正温度

系数和负温度系数介质薄膜（例如聚酯薄膜与聚丙烯薄膜组合），以合适的配比将电容量在整个温度范围内具有比较低的温度系数。

由于聚酯薄膜是一种有极性介质，在高压、高频应用还需要性能更好的有机合成薄膜。聚丙烯薄膜是一种高压、高频性能优秀的介质薄膜，具有相对聚酯薄膜更高的介电强度、更低的介质损耗，在高压薄膜电容器中，以聚丙烯薄膜电容器为主。

相对于聚丙烯薄膜，聚酯薄膜具有更高的介电系数（聚丙烯薄膜的介电系数为2.2，而聚酯薄膜的介电系数为2.8），相同的厚度、相同的电极面积，聚酯电容器要比聚丙烯电容器的电容量高约30%；在耐压方面，耐压超过600V，聚酯薄膜电容器相对聚丙烯薄膜电容器不再具有优势，取而代之的是聚丙烯薄膜电容器。

4 金属化使得纸介电容器的体积有效地减小

4.1 箔式电容器的“问题”

箔式电容器是卷绕式电容器最早的形式，作为金属电极的金属箔，一般为价格便宜且延展性良好的铝箔，将铝箔夹在绝缘介质中间经过卷绕而成。考虑到卷绕电容器时，作为电极的铝箔需要足够的抗拉伸强度，通常需要（3~5） μ m的厚度，这个厚度与介质薄膜的厚度相当，甚至更厚。为了减小电容器的体积，在不可能减薄用来保证电容器耐压的绝缘介质厚度时，就需要考虑如何减薄电极的厚度。如果将电极厚度减薄到可以忽略的程度，电容器的体积将会减半；如果考虑箔式电容器的绝缘介质膜，需要考虑薄膜的最弱点具有足够的耐压能力，选择薄膜厚度时需要留有足够的裕量。如果再将这一因素忽略，薄膜电容器的体积还会继续减小。在绝缘介质膜上溅射一层金属化层作为电极，就可以省去铝箔，使得电容器体积大大缩小，这就是金属化电容器。

4.2 金属化纸介电容器

最早金属化电容器是纸介金属化电容器（metallized paper capacitor），那时还没有合成有机薄膜电容器。金属化纸介电容器是用金属化纸制成的电容器。其电极不用金属箔，而是用真空蒸发的方法在电容器上淀积一层极薄的金属膜而成。它的分类与纸介电容器相同。金属化纸介电容器的主要特点是：具有自愈作用，比电容比同类纸介电容器大。

如果电容器纸金属化工艺做的不好，就会出现电容器漏电流大的问题，上世纪80年代国产纸介金属化电容器就存在这个问题，其原因在于电容器纸是多孔纤维材料，如果不能阻止金属化物质进入多孔化纤维深处，就会产生漏电流通道。合成有机薄膜电容器很好的解决了这个问题。

4.3 金属膜电容器的优点

金属膜电容器比金属箔电极电容器的明显优点：就是自

愈性。

箔式电容器在击穿时，击穿点的铝箔无法全部蒸发，并且形成短路点。因此，箔式电容器一旦击穿将无法回复。金属化电容器的金属化膜直接附着在塑料薄膜上的真空沉积金属附着物，仅有（20-50）nm。如果在弱点、疵点或绝缘体中的混合物中绝缘体介电强度被超过，绝缘体将被击穿。能量在衰落通道中弧形放电能将通道附近的薄金属外层全部蒸发掉。衰落通道中等离子的迅速延伸，使其在几十 ms 内冷却，使放电结束。绝缘区这样的话，在先前不完善的区域使电容器重新获得其全部的绝缘性能。

自愈性允许金属膜电容器的绝缘物质全绝缘强度的利用。而金属箔电极电容器必须被设计成有一定的安全范围，在这个安全范围内不允许绝缘体的任何可能性错误。

金属化电容器有很多的优点，在大额定容量时这些优点尤为明显。

因为有了金属化的设计，它也可以应用于一些更复杂的电容器设计中，例如：用于处理高 DC 电压与高 AC 负载耦合的多重内部串联。

在需要高电流脉冲和高 di/dt 的电容器中，可以采用金属箔、金属膜和无金属膜的联合应用，使电容器具有携带极大电流与自愈性。

4.4 金属化合成有机薄膜电容器

合成有机薄膜电容器问世后，金属化技术也应用在合成有机薄膜电容器中。合成有机薄膜电容器分为：单层金属化、双面金属化、渐变厚度金属化等。金属化材料可以分为：铝膜、锌铝合金膜、锌膜。

4.4.1 单面金属化电容器

单面金属化电容器是将绝缘介质薄膜的一面溅射成金属化作为电极，同时绝缘介质薄膜也承担绝缘介质的作用，一个薄膜既是电极、又是绝缘介质，起到了一举两得的作用。大多数金属化电容器都采用这种制造方法。也是成本最低的产品。

单面金属化薄膜在溅射金属化层后，绝缘强度会不同程度的降低，因此这个金属化膜一般很薄（如 20nm）。金属化层越厚对介质薄膜的损伤程度越大，因此，在需要流过大电流的电容器中，单层金属化将不是最好的选择，双面金属化膜应运而生

4.4.2 双面金属化纸 - 塑料薄膜电容器

双面金属化纸 - 塑料薄膜电容器（double-sided metallized paper-plastic film capacitor），是将双面金属化纸和塑料薄膜交替迭罗，卷绕成芯子，端头喷上金属，将电容器纸两面的金属膜电极连起来，焊上引线、封入外壳而构成的电容器。塑料薄膜一般采用聚酯、聚丙烯或聚碳酸酯等。电容器纸纯粹作为电极的载体，塑料薄膜作为电容器的介质，即只有塑料薄膜承受电场的作用。这样就会充分发挥塑料薄膜损耗小、

绝缘强度高的特点。

这种电容器由于金属膜紧密地附在纸的表面，自愈能力强，电压稳定性高。与蒸发到塑料薄膜上的金属膜相比，蒸发到纸上的金属膜接触要可靠些，而且短时高温不影响金属膜形状，这样就可以承受较高的电流负荷。由于塑料薄膜没有金属化，即使塑料薄膜上存在疵点、针孔等缺陷，也不会因金属化而产生短路，因而工作强度高于塑料薄膜金属化电容器。另外，因为金属膜在纸上，自愈时纸的破坏代替了部分塑料薄膜的破坏，从而提高了塑料的再击穿强度和电压稳定性。因此，这种电容器具有体积小、损耗小、工作电压高和电流负载大的特点。

单面金属化结构如图 1（a），双金属化结构如图 1（b），当需要较高的耐压时还可因采用图 1（c）的结构。电极从上面的双金属化层引出，这样，左边的双金属化层和右边的双金属化层分别与下边的单金属化层组成两个电容器，再通过下边的单金属化层的连接，使上边的两个双金属化层形成串联的电容器，从而在单绝缘薄膜的基础上获得 2 倍的耐压。

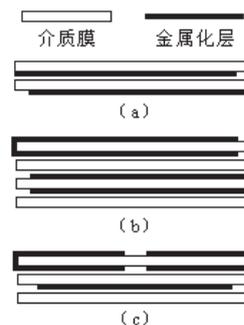


图 1 各种金属化电极结构：（a）单面金属化结构；（b）双金属化结构；（c）串联型双金属化结构

5 从有感电容器到无感电容器

有感电容器的绕制及电极引出如图 2（a）所示。很明显，这种绕制及电极引出方法将产生比较明显的电感，特别是远离电极引出端的电极部分到引出端，将产生明显的寄生电感。因而不适于高频应用。有感电容器的另一个缺点，是通常有感电容器的每个电极仅有一处电极引出，由于电极为箔或金属化膜，与引出线的接触面积非常小，如遇大电流即可能将引出线与电极的接触处烧坏，严重者形成击穿点。



图 2 有感电容器与无感电容器的结构：（a）有感电容器结构；（b）无感电容器结构

为尽可能地减小绕制电容器芯子的寄生电感，需采用电极无感引出方式，如图 2 (b) 所示。从图中可以看到，电容器的两个电极各从一个端面引出，消除了电极的绕制电感，因此称为无感电容器。实际上，无论是有感电容器还是无感电容器，从电极到引出端，只要存在空间距离就存在电感，只不过无感电容器的寄生电感比有感电容器的寄生电感小得多。同样无感电容器的长度越长，其寄生电感越大（尽管这个电感已经很小），因此，欲获得更小的寄生电感，应采用尺寸短的电容器。

无感电容器的制造技术使得薄膜电容器电极引出点面积加大，电极引出点可以承载远远高于有感电容器的电流承载能力。在各类薄膜电容器产品中，有感电容器所允许流过的电流相对很小，而相同尺寸的无感电容器则可以流通很高的电流。

无感电容器的两极箔或金属化膜引到电容器的两侧后，将熔融的焊料或其他金属靠压缩空气喷射到电容器芯子的两端，将两极箔或金属化膜与喷射上的金属结为一体，形成电极引出端。这两个电极引出端加以处理后，可以作为贴片电容器的电极引出端，也可以作为引线式电容器的阴极基础。这个过程称为电容器芯子端面喷金属，简称喷金。根据不同的电极材料，喷金的材料也不一样，主要有铅锡合金、铅锌合金、铝、铜等。喷金端面与电极的接触如图 3 所示。

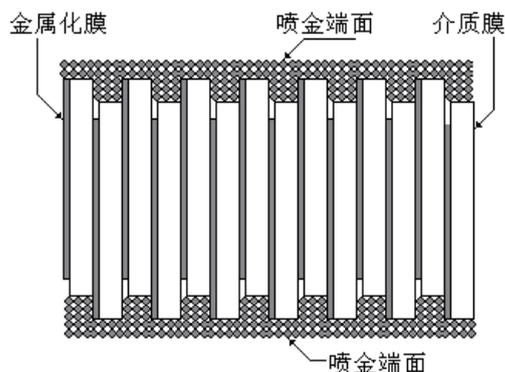


图 3 无感电容器的喷金端面与电极接触

图中，两个带有金属膜的薄膜在绕制电容器时，为了获得喷金端与金属膜的良好接触，两个薄膜需要 0.5mm~1mm 左右的错边。喷金颗粒可以进入这个错边缝隙与金属膜良好接触。当喷金端面高出错边后就形成完整的喷金端面。由于金属膜仅仅为数十 nm，喷金颗粒不能与另一边的金属膜接触。可以看到，喷金端面的质量将直接影响薄膜电容器的性能。

6 开始考虑电流承受能力

最初的电子技术中，电容器似乎没有什么电流流过，所以不管电容器做成什么样，都不会因为过电流而烧坏。

当电子技术开拓了电力电子技术领域后，电容器流过的电流越来越大，电容器将不得不考虑电流承受能力问题。

最先提出这个问题的是彩色电视机。其中的枕校电容器、行逆程电容器不仅需要承受高电压，还要承受足够的电流，一只不到 10nF 的电容器需要承受约 5A 有效值电流！这是过去薄膜电容器不可想象的，归功于无感电容器和金属箔聚丙烯电容器制造技术。后来开关电源中的耦合电容器、缓冲电容器、谐振电容器均需要流过较大的电流。

在晶闸管中频感应加热电源中，通常采用并联谐振式，谐振电容器流过的电流是负载电流或逆变器输出电流的（5~10）倍，空载时可达 30 倍！以 100kW/380V 交流电输入的中频感应加热电源为例，最大负载电流将达到 2A/kW，甚至更高。100kW 时负载电流是 200A，流过谐振电容器的电流将超过 1000A！如此高的电流，谐振电容器将不得不采用水冷方式，将电容器耗散功率产生的热量带走。甚至需要多只电容器并联，来解决电流承受能力问题。

到了现代电力电子技术时代，IGBT 高频感应加热电源由于谐振频率高，电容量已经不再像晶闸管感应加热电源要求的那么大了。随着谐振电容器体积的减小，电容器的损耗也随之减小，不再采用水冷电容器，而是选择扁平形状或相对短的电容器，这种电容器的喷金端面面积大、电极窄，所产生的损耗大大降低。如图 4(a)、(b)、(c) 所示。

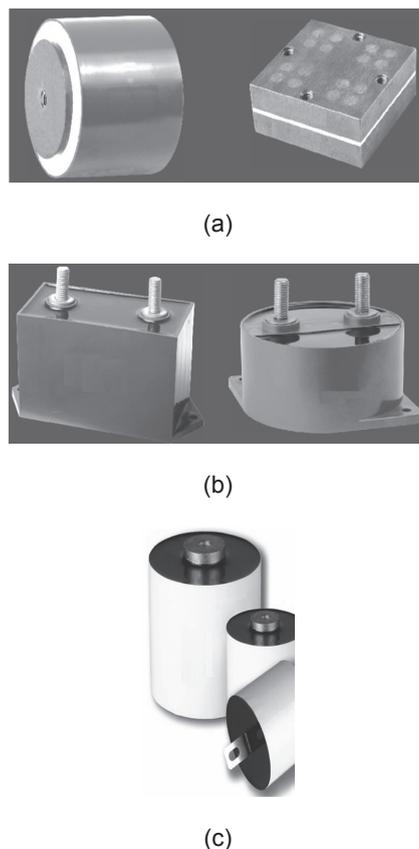


图 4 感应加热谐振电容器

20 世纪 80 年代，变频器开始大量应用，其中的直流母线

缓冲电容器，需要在不太高的电容量条件下流过很高的有效值电流，同时，要求寄生电感尽可能的低。需要与 IGBT 的直流母线端直接连接，这种直流母线缓冲电容器外形如图 5。



图 5 母线缓冲电容器

变频器进入 660V 交流电供电后，直流母线电压接近 1200V，这时再用铝电解电容器就需要 3 只串联，与薄膜电容器相比将不再具有竞争优势，因此，DC-Link 电容器呼之欲出，外形如图 6。

这种 DC-Link 电容器在国内已经是成熟的制造技术了，有越来越多的薄膜电容器制造商加入了 DC-Link 电容器制造行列。国内 DC-Link 市场基本被国产电容器占领，国外 DC-Link 不再具有优势。



图 6 DC-Link 电容器

新型能源、电动汽车、电力机车、智能电网是现代电力电子技术的新成果，同样需要大量的直流母线缓冲电容器和 DC-Link 电容器，成为电力电子电容器产业的而有力支撑。

7 电力电容器

随着纸介电容器的耐压做得越来越高、电容量越来越大。可以利用电容器电流超前于电压的特性，将纸介电容器用于功率因数补偿。

上 1000V、数 μF 甚至十几 μF 纸介电容器，鼓舞着科技工作者将纸介电容器用于低压 380V/220V 功率因数补偿。从低压侧改善了电网的性能，降低了电网高压侧同步补偿机的负担。

到后来的 10kV/6.6kV 的功率因数补偿，再到后来 10kV、220kV、330kV、500kV，甚至 1000kV 各类等级交流电网，都需要电力电容器来补偿滞后的功率因数。

电力电子电容器是电容器领域产值最高的。

8 外形适应应用的需求

随着要求电容器寄生电感的减小、承受电流能力加大、

方便安装等因素，薄膜电容器不再是规矩的圆筒状、两侧引线方式，为了适应应用的需求而演绎出多种多样的外形。

9 电源电磁干扰抑制电容器

电源电磁干扰抑制电容器产生的原因：雷电、大型负载的投切，突变负载的应用（如电弧炉、电焊机、开关电源变频器等），在交流电网中产生瞬变过电压、浪涌电压等。如果不加以抑制，这些过电压将直接对各类用电器，特别是电子装置造成损害。

为了阻止上述负载所产生的电磁干扰进入电子线路，或者阻止上述电路所产生的电磁干扰进入电网，需要性能特殊的电源电磁干扰抑制电容器，俗称 X 电容器和 Y 电容器。

X 电容器和 Y 电容器的性能要求：

(1) X 电容器是接在电源两端的电源电磁干扰抑制电容器，要求能够承受过电压和瞬态过电压的冲击而不至于短路甚至不损坏；

(2) Y 电容器是接在电源线和机壳、或接地线两端的电容器，因此，具有人身安全的要求，即使在极端条件下也不允许击穿；

(3) 还要有良好的频率特性和电压瞬变的抑制能力。

X 电容器和 Y 电容器可以是聚酯电容器、聚丙烯电容器、纸介电容器、陶瓷电容器。

10 结语

薄膜电容器是很重要的一种电容器，其应用领域随着社会的发展，已经不仅仅在一般电子技术领域应用。大量新的应用领域随着社会源源不断的出现，特别是电力电子技术领域、新型能源领域、电动汽车领域、电气化铁路领域、智能电网领域，薄膜电容器在大多数情况下是不可替代的。

社会在进步，科学技术在飞速发展，相应的电容器也必须与时俱进来适应这个社会。

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。

下期推荐

第五讲《与时俱进的电容器—陶瓷电容器》将于《电源世界》2015 年 3 月刊刊出，敬请关注！