

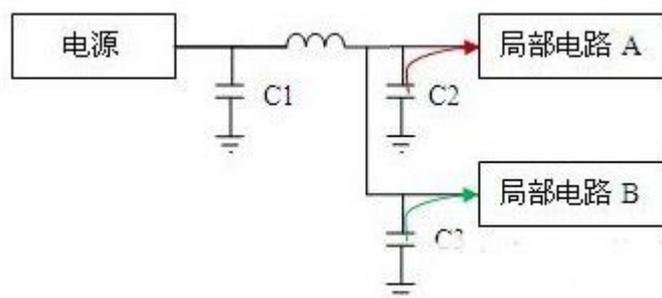
电源设计中的电容选用规则

电源往往是我们在电路设计过程中最容易忽略的环节。作为一款优秀的设计，电源设计应当是很重要的，它很大程度影响了整个系统的性能和成本。电源设计中的电容使用，往往又是电源设计中最容易被忽略的地方。

一、电源设计中电容的工作原理

在电源设计应用中，电容主要用于滤波（filter）和退耦/旁路（decoupling/bypass）。滤波是将信号中特定波段频率滤除的操作，是抑制和防止干扰的一项重要措施。根据观察某一随机过程的结果，对另一与之有关的随机过程进行估计的概率理论与方法。滤波一词起源于通信理论，它是从含有干扰的接收信号中提取有用信号的一种技术。“接收信号”相当于被观测的随机过程，“有用信号”相当于被估计的随机过程。

滤波主要指滤除外来噪声，而退耦/旁路（一种，以旁路的形式达到退耦效果，以后用“退耦”代替）是减小局部电路对外的噪声干扰。很多人容易把两者搞混。下面我们看一个电路结构：



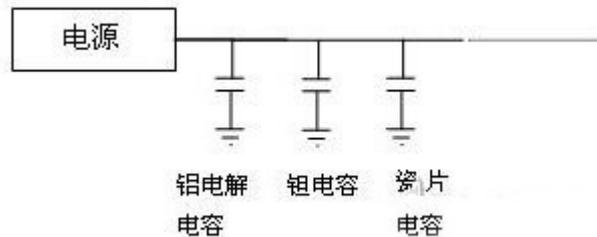
图中电源为 A 和 B 供电。电流经 C1 后再经过一段 PCB 走线分开两路分别供给 A 和 B。当 A 在某一瞬间需要一个很大的电流时，如果没有 C2 和 C3，那么会因为线路电感的原因 A 端的电压会变低，而 B 端电压同样受 A 端电压影响而降低，于是局部电路 A 的电流变化引起了局部电路 B 的电源电压，从而对 B 电路的信号产生影响。同样，B 的电流变化也会对 A 形成干扰。这就是“共路耦合干扰”。

增加了 C2 后，局部电路再需要一个瞬间的大电流的时候，电容 C2 可以为 A 暂时提供电流，即使共路部分电感存在，A 端电压不会下降太多。对 B 的影响也会减小很多。于是通过电流旁路起到了退耦的作用。

一般滤波主要使用大容量电容，对速度要求不是很快，但对电容值要求较大。如果图中的局部电路 A 是指一个芯片的话，而且电容尽可能靠近芯片的电源引脚。而如果“局部电路 A”是指一个功能模块的话，可以使用瓷片电容，如果容量不

够也可以使用钽电容或铝电解电容(前提是功能模块中各芯片都有了退耦电容—瓷片电容)。

滤波电容的容量往往都可以从电源芯片的数据手册里找到计算公式。如果滤波电路同时使用电解电容、钽电容和瓷片电容的话,把电解电容放的离开关电源最近,这样能保护钽电容。瓷片电容放在钽电容后面。这样可以获得最好的滤波效果。



退耦电容需要满足两个要求,一个是容量需求,另一个是 ESR 需求。也就是说一个 0.1 μ F 的电容退耦效果也许不如两个 0.01 μ F 电容效果好。而且,0.01 μ F 电容在较高频段有更低的阻抗,在这些频段内如果一个 0.01 μ F 电容能达到容量需求,那么它将比 0.1 μ F 电容拥有更好的退耦效果。

很多管脚较多的高速芯片设计指导手册会给出电源设计对退耦电容的要求,比如一款 500 多脚的 BGA 封装要求 3.3V 电源至少有 30 个瓷片电容,还要有几个大电容,总容量要 200 μ F 以上...

二、各类电源中电容器的正确选用

电容器作为基本元件在电子线路中起着重要作用,在传统的应用中,电容器主要用作旁路耦合、电源滤波、隔直以及小信号中的振荡、延时等。随着电子线路,特别是电力电子电路的发展对不同应用场合的电容器提出了不同的特殊要求。

电容器的结构上说起。最简单的电容器是由两端的极板和中间的绝缘电介质(包括空气) [1] 构成的。通电后,极板带电,形成电压(电势差),但是由于中间的绝缘物质,所以整个电容器是不导电的。不过,这样的情况是在没有超过电容器的临界电压(击穿电压)的前提条件下的。我们知道,任何物质都是相对绝缘的,当物质两端的电压加大到一定程度后,物质是都可以导电的,我们称这个电压叫击穿电压。

电容也不例外,电容被击穿后,就不是绝缘体了。不过在中学阶段,这样的电压在电路中是见不到的,所以都是在击穿电压以下工作的,可以被当做绝缘体看。但是,在交流电路中,因为电流的方向是随时间成一定的函数关系变化的。

而电容器充放电的过程是有时间的，这个时候，在极板间形成变化的电场，而这个电场也是随时间变化的函数。

1. 滤波电容器

交流电（工频或高频）经整流后需用电容器滤波使输出电压平滑，要求电容器容量大，一般多采用铝电解电容器。铝电解电容器应用时主要问题是温度与寿命关系，基本遵循 50℃法则。因此在很多要求高温和高可靠性场合下，应选用长寿命（如 5000h 以上，甚至 105℃，5000h）电解电容器。一般体积小的电解电容器，其寿命相对较短。

用于 DC/DC 开关稳压电源输入滤波电容器，因开关变换器是以脉冲形式向电源汲取电能，故滤波电容器中流过较大的高频电流，当电解电容器等效串联电阻（ESR）较大时，将产生较大损耗，导致电解电容器发热。而低 ESR 电解电容器则可明显减小纹波（特别是高频纹波）电流产生的发热。

用于开关稳压电源输出整流的电解电容器，要求其阻抗频率特性在 300kHz 甚至 500kHz 时仍不呈现上升趋势。而普通电解电容器在 100kHz 后就开始呈现上升趋势，用于开关电源输出整流滤波效果相对较差。笔者在实验中发现，普通 CDII 型中 4700 μF，16V 电解电容器，用于开关电源输出滤波的纹波与尖峰并不比 CD03HF 型 4700 μF，16V 高频电解电容器的低，同时普通电解电容器温升相对较高。当负载为突变情况时，用普通电解电容器的瞬态响应远不如高频电解电容器。

由于铝电解电容器在高频段不能很好地发挥作用，应辅之以高频特性好的陶瓷或无感薄膜电容器，其主要优点是：高频特性好，ESR 低，如 MMK5 型容量 1 μF 电容器，谐振频率达 2MHz 以上，等效阻抗小于 0.02 Ω，远低于电解电容器，而且容量越小谐振频率越高（可达 50MHz 以上），这样将得到很好的电源的输出频率响应或动态响应。

在滤波电容器中我们着重讲解在开关电源中怎样选用滤波电容

开关电源怎样选用滤波电容

滤波电容在开关电源中起着非常重要的作用，如何正确选择滤波电容，尤其是输出滤波电容的选择则是每个工程技术人员十分关心的问题。

50 赫兹工频电路中使用的普通电解电容器，其脉动电压频率仅为 100 赫兹，充放电时间是毫秒数量级。为获得更小的脉动系数，所需的电容量高达数十万微法，因此普通低频铝电解电容器的目标是以提高电容量为主，电容器的电容量、损耗角正切值以及漏电流是鉴别其优劣的主要参数。而开关电源中的输出滤波电解电容器，其锯齿波电压频率高达数万赫兹，甚至是数十兆赫兹。这时电容量并

不是其主要指标，衡量高频铝电解电容优劣的标准是“阻抗-频率”特性。要求在开关电源的工作频率内要有较低的等效阻抗，同时对于半导体器件工作时产生的高频尖峰信号具有良好的滤波作用。

许多电子设计者都知道滤波电容在电源中起的作用，但在开关电源输出端用的滤波电容上，与工频电路中选用的滤波电容并不一样，其上的脉动电压频率仅有 100 赫兹，充放电时间是毫秒数量级，为获得较小的脉动系数，需要的电容量高达数十万微法，因而一般低频用普通铝电解电容器制造，目标是以提高电容量为主，电容器的电容量、损耗角正切值以及漏电流是鉴别其优劣的主要参数。

在开关稳压电源中作为输出滤波用的电解电容器，其上锯齿波电压的频率高达数十千赫，甚至数十兆赫，它的要求和低频应用时不同，电容量并不是主要指标，衡量它好坏的则是它的阻抗-频率特性，要求它在开关稳压电源的工作频段内要有低的等的阻抗，同时，对于电源内部，由于半导体器件开始工作所产生高达数百千赫的尖峰噪声，亦能有良好的滤波作用，一般低频用普通电解电容器在 10 千赫左右，其阻抗便开始呈现感性，无法满足开关电源使用要求。

普通的低频电解电容器在万赫兹左右便开始呈现感性，无法满足开关电源的使用要求。而开关电源专用的高频铝电解电容器有四个端子，正极铝片的两端分别引出作为电容器的正极，负极铝片的两端也分别引出作为负极。电流从四端电容的一个正端流入，经过电容内部，再从另一个正端流向负载；从负载返回的电流也从电容的一个负端流入，再从另一个负端流向电源负端。

开关稳压电源专用的高频铝电解电容器，它有四端个端子，正极铝片的两端分别引出作为电容器的正极，负极铝片的两端也分别引出作为负极。稳压电源的电流从四端电容的一个正端流入，经过电容内部，再从另一个正端流向负载；从负载返回的电流也从电容的一个负端流入，再从另一个负端流向电源负端。因为四端电容具有良好的高频特性，它为减小输出电压的脉动分量以及抑制开关尖峰噪声提供了极为有利的手段。

开关稳压电源具有多功能综合保护：稳压器除了最基本的稳定电压功能以外，还应具有过压保护（超过输出电压的+10%）、欠压保护（低于输出电压的 -10%）、缺相保护、短路过载保护最基本的保护功能。尖脉冲抑制（可选）：电网有时会出现幅值很高，脉宽很窄的尖脉冲，它会击穿耐压较低的电子元件。稳压电源的抗浪涌组件能够对这样的尖脉冲起到很好的抑制作用。

高频铝电解电容器还有多芯的形式，它将铝箔分成较短的若干小段，用多引出片并联连接以减小容抗中的电阻成份，同时，采用低电阻率的材料并用螺杆作为引出端子，以增强电容器承受大电流的能力。

叠片电容也称为无感电容，一般电解电容器的芯子都卷成圆柱形，等效串联电感较大；叠片电容的结构和书本相仿，因流过电流产生的磁通方向相反而被抵消，因而降低了电感的数值，具有更为优良的高频特性，这种电容一般做成方形，便于固定，还可以适当减小占机体积。

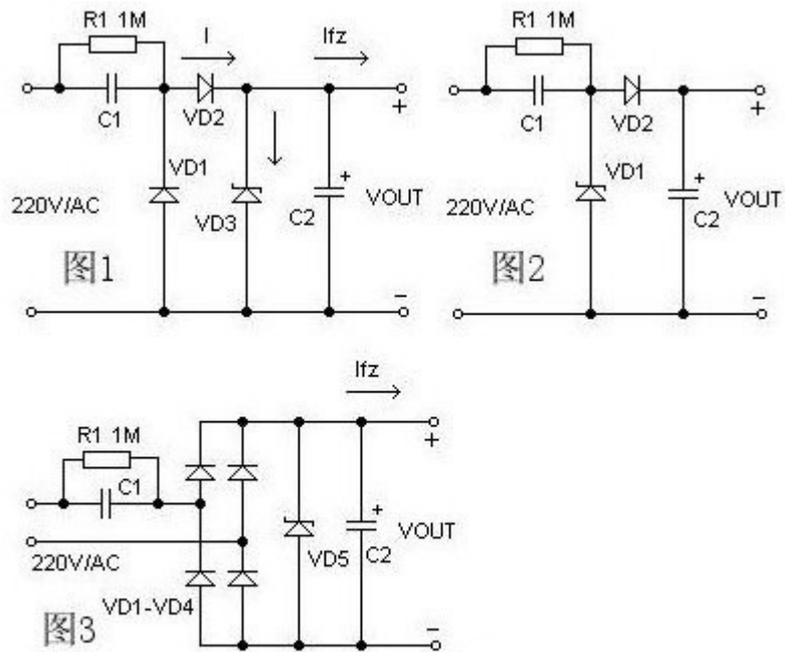


图 电容降压电源电路

2. 吸收与换相电容器

随着栅控半导体器件的额定功率越做越大，开关速度越来越快，额定电压越来越高，对缓冲电路的电容器仅仅要求足够的耐压、容量及优异的高频特性是不够的。

在大功率电力电子电路中，由于 IGBT 的开关速度已小于 $1\mu\text{s}$ ，要求吸收电路电容器上的电压变化速率 $dv/dt \gg V/\mu\text{s}$ 已是很正常的，有的要求 $V/\mu\text{s}$ 甚至 $V/\mu\text{s}$ 。

对于普通电容器，特别是普通金属化电容器的 $dv/dt \ll 100V/\mu\text{s}$ ，特殊金属化电容器的 $dv/dt \leq 200V/\mu\text{s}$ ，专用双金属化电容器小容量（小于 10nF ）的 $dv/dt \leq 1500V/\mu\text{s}$ ，较大容量（小于 $0.1\mu\text{F}$ ）的则为 $600V/\mu\text{s}$ ，在这种巨大且重复率很高的峰值电流冲击下是很难承受的。损坏电力电子电路的现象。

目前吸收电路专用电容器，即金属箔电极可承受较大的峰值电流和有效值电流冲击，如：较小容量（ 10nF 以下）的可承受 $100000V/\mu\text{s} \sim 455000V/\mu\text{s}$ 的电压变化率、 3700A 峰值电流和达 9A 有效值电流（如 CDV30FH822J03）；较大容量（大于 10nF ，小于 $0.47\mu\text{F}$ ）或较大尺寸的可承受大于 $3400V/\mu\text{s}$ 以及 1000A 峰值电流的冲击。

由此可见，尽管同是无感电容、金属化和金属箔电容，应用在吸收电路中将有不同的表现，外形相近但规格不同在这里是绝对不能互换的。电容器的尺寸将影响电容器的 dv/dt 及峰值电流的耐量，一般而言，长度越大 dv/dt 和峰值电流则相对较小。

吸收电路中电容器的工作特点是高峰值电流占空比小，有效值电流不十分高，与这种电路相似的还有晶闸管逆变器的换相电容器，尽管这种电容器要求的 dv/dt 较吸收电容器小，但峰值电流与有效值电流均较大，采用普通电容器在电流方面不能满足要求。

在某些特殊应用中要求储能电容器反复急促放电，而且放电回路电阻极低、寄生电感很小，在这种场合下只能将吸收电容并联使用以保证长期使用的可靠性。

3. 谐振电容器

谐振式变换器，如谐振式开关稳压电源及晶闸管中频电源谐振回路中的谐振电容器，工作时往往流过很大电流。又如电子镇流器的谐振电容规格选择不当时，会出现电容上电压虽没达到击穿电压但由于流过较大的谐振电流而损坏的现象。

在含有电容和电感的电路中，如果电容和电感并联，可能出现在某个很小的时间段内：电容的电压逐渐升高，而电流却逐渐减少；与此同时电感的电流却逐渐增加，电感的电压却逐渐降低。而在另一个很小的时间段内：电容的电压逐渐降低，而电流却逐渐增加；与此同时电感的电流却逐渐减少，电感的电压却逐渐升高。电压的增加可以达到一个正的最大值，电压的降低也可达到一个负的最大值，同样电流的方向在这个过程中也会发生正负方向的变化，此时我们称为电路发生电的振荡。

电路振荡现象可能逐渐消失，也可能持续不变地维持着。当震荡持续维持时，我们称之为等幅振荡，也称为谐振。

谐振时间电容或电感两端电压变化一个周期的时间称为谐振周期，谐振周期的倒数称为谐振频率。所谓谐振频率就是这样定义的。

综上所述，在现代电源技术中，不同应用场合需要不同性能的电容器，不能混用、滥用、错用，以尽可能消除不应出现的损坏，并保证产品性能。

延伸阅读：现代电源技术中电容器的正确选用

三、电容降压式电源设计实例

将交流市电转为低压直流的常规方法是采用变压器降压后再整流滤波，当受体积和成本等因素限制时，最简单实用的方法就是采用电容降压式电源。

1. 电容降压式电源电路原理

电容降压式简易电源的基本电路如图 1，C1 为降压电容器，D2 为半波整流二极管，D1 在市电的负半周时给 C1 提供放电回路，D3 是稳压二极管，R1 为关断电源后 C1 的电荷泄放电阻。在实际应用时常常采用的是图 2 的所示的电路。当需要向负载提供较大的电流时，可采用图 3 所示的桥式整流电路。整流后未经稳压的直流电压一般会高于 30 伏，并且会随负载电流的变化发生很大的波动，这是因为此类电源内阻很大的缘故所致，故不适合大电流供电的应用场合。

2. 阻容降压电路的器件选择原则

(1) 电路设计时，应先测定负载电流的准确值，然后参考示例来选择降压电容器的容量。多余的电流就会流过稳压管，若稳压管的最大允许电流 I_{dmax} 小于 $I_c - I_o$ 时易造成稳压管烧毁。

(2) 为保证 C1 可靠工作，其耐压选择应大于两倍的电源电压。

(3) 泄放电阻 R1 的选择必须保证在要求的时间内泄放掉 C1 上的电荷。

3. 设计举例

图 2 中，已知 C1 为 $0.33 \mu F$ ，交流输入为 220V/50Hz，求电路能供给负载的最大电流。

C1 在电路中的容抗 X_c 为： $X_c = 1 / (2 \pi f C) = 1 / (2 * 3.14 * 50 * 0.33 * 10^{-6}) = 9.65K$

流过电容器 C1 的充电电流 (I_c) 为： $I_c = U / X_c = 220 / 9.65 = 22mA$ 。

通常降压电容 C1 的容量 C 与负载电流 I_o 的关系可近似认为： $C = 14.5 I$ ，其中 C 的容量单位是 μF ， I_o 的单位是 A。