



# 开关电源中电容器的选择

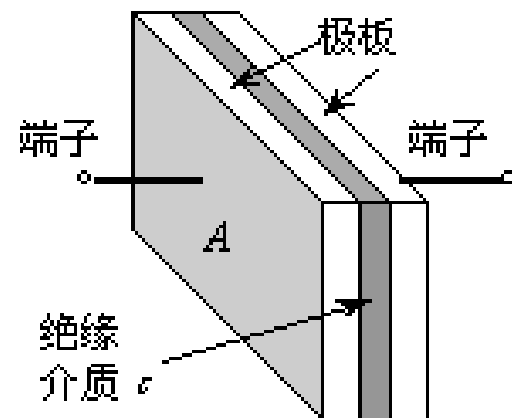


南京航空航天大学自动化学院  
赵修科  
世纪电源网上海电源技术研讨会  
2010.6

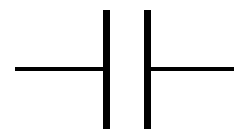
# 一、电容器的基本原理

**结构：** 电容器的基本结构是由两块导体极板，中间隔离有不同的电介质（绝缘体）组成。其符号如图（b）所示。

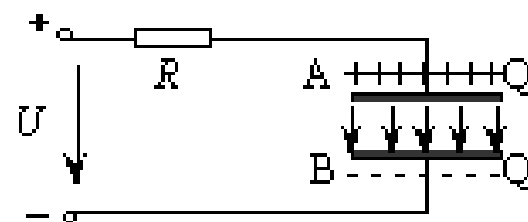
**充电：** 当两个端子接到电源时，电源正极将相连极板电子吸走，留下正电荷；而负极向另一极板同时送入相等电子。在外电路形成电流。直到极板电压等于极板两端电压。



(a)



(b)



(c)

电容器结构示意图和符号

定义:  $Q = CU$  或  $C = \frac{Q}{U}$

电容量与结构和介质有关:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} = \frac{\varepsilon_r A}{36\pi d} = 8.85 \frac{\varepsilon_r A}{d} \times 10^{-6} \mu\text{F}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m} (1 \times 10^{-9} / 36 \pi)$$

$A$ —极板面积 ( $\text{m}^2$ );  $d$ —极板间距离 ( $\text{m}$ )

通常电容器名称是以介质材料来命名的

表1 一些材料的相对介电常数

材料	$\epsilon_r$	材料	$\epsilon_r$
空气	1.0	橡胶	2.7
蒸馏水	8.0	云母	6~7.5
腊纸	4.3	玻璃	5.5~8
矿物油	2.2	陶瓷	5.8
尼龙	3.55	氧化铝	7.5~10
聚酯薄膜	3.1	导热硅脂	3.9~4.3
人造云母	5.2	聚四氟乙烯	1.8~2.2

## 电容电路中电流

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$

电容存储的能量

$$W = \int_0^t u i dt = \int_0^t u C \frac{du}{dt} dt = \int_0^U C u du = \frac{1}{2} C U^2 \quad (\text{J})$$

电容电压不能突变

正弦交流( $u=U_m \sin \omega t$ )电路中的电容

$$i = C \frac{du}{dt} = \sqrt{2} C \omega U \cos \omega t = \frac{\sqrt{2} U}{1/\omega C} \cos \omega t = \frac{\sqrt{2} U}{X_c} \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \pi/2)$$

式中  $X_c = \frac{1}{\omega C}$

## 二、电容器的主要参数

1. 容量：单位—F，（mF）， $\mu$ F，nF，pF  
误差等级— $\pm 1\%$ （00）级， $\pm 2\%$ （0）级， $\pm 5\%$ （I）级， $\pm 10\%$ （II）级和 $\pm 20\%$ （III）级

标称值—和电阻相同。按照公差等级决定序列。

如公差10%：1.0，1.2，1.5，1.8，2.2，2.7，3.3，4.7和6.8等，像 $4.7\mu\text{F}$ ， $0.047\mu\text{F}$ ， $47\text{pF}$ 等等

容量标注在外壳上，测试条件为 $25^\circ\text{C}$ ， $>1\mu\text{F}$ 测试频率为120Hz， $1\mu\text{F}>C>1\text{nF}$ 测试频率为1kHz

表2 色码电容误差值

F	G	C	D	J	K	M	Z
$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 0.25\text{pF}$	$\pm 0.5\text{pF}$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$+80-20\%$

## 2.电压定额

电容器介质中的电场强度大于它的允许电场强度，这是绝缘介质中的电子被拉出来，产生雪崩效应，引起介质击穿。额定电压一般比击穿电压低。高电压定额的电容需要更厚的介质，比低电压体积大。

**额定直流电压：** 电容两极能施加的最高直流电压。

**额定交流电压：** 受损耗限制，一般比直流电压低得多。并随频率增加允许交流电压降低。

例如：某电容直流额额定电压为600V，而50Hz交流额定电压为30V。某电容50Hz交流额定电压为400V，而在400HZ应用，额定电压降低为240V等。

通常选择电容额定电压不得小于电容所承受电路最高电压的125%。



### 3. ESR、ESL和损耗系数

电容等效电路： $C$ ， $ESR$ ， $ESL$ 和 $R_S$

$$Z \approx \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_{ESL} + R_{ESR}$$

$ESR$ ：引线、焊接和介质极化损耗。介质损耗与温度和频率有关。

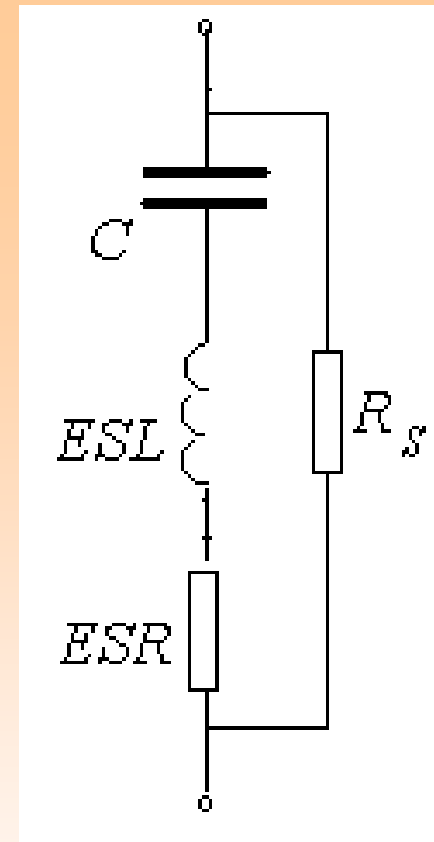


$ESL$ ：引线、电容极板结构有关。

$R_S$ ：泄漏电阻，一般很大

损耗系数：容量 $>1\mu\text{F}$ ，用120Hz； $<1\mu\text{F}$ ，用1kHz。  $C$  ( $\mu\text{F}$ )，  $DF$  (%)

$$DF = \frac{\tan \delta}{10000} = \frac{R_{ESR}}{1000/\omega C} = \frac{R_{ESR} \omega C}{10000}$$





# 各种电容引线结构典型ESL

- ◀ • SMT元件典型值在2~8nH。  
径向引线型电容在10nH~  
30nH，螺旋端子电容  
20~50nH，轴向引线型低于  
200nH。

容芯卷绕大，平叠小。

## 4. 纹波电流和 $dv/dt$ 定额

电容温升是ESR损耗引起的。为了保证电容的寿命,电容规定了允许纹波电流值,而有些电容规定了电压变化率,即 $dV/dt$ ,一般用 $V/\mu s$ 表示。决定此电容脉冲电流( $CdV/dt$ )能力。

$$\text{电容损耗: } P = I^2 R_{ESR} \quad T_m - T_a = \Delta T = R_{th} P$$

$I$ —纹波电流有效值 (A) ;

绝缘介质决定了最高温度 $T_m$ ,环境温度 $T_a$ 决定温升 $\Delta T$ 。而电容器的体积决定了散热面积,即决定了热阻,因此给定电容的允许损耗也就确定了。不同电容的 $ESR$ 不同,各种电容允许的稳态电流有效值也不同。

超过电容的温升,将引起电容寿命大大缩短或爆裂。

# 三、电容类型和应用场合

## 3.1 极性电容—电解电容—铝电解，钽电解和铌电解电容

### 1. 铝电解电容—一般电解电容指铝电解电容

**结构：**纯铝阳极电极板一面电极，一面阳极化生成氧化铝介质，为了增加面积，增加电容量极板氧化成多孔结构。电解液与阴极电气相连。

**温度范围：**  $-25^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ ，  $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ ，  $-55^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ ，  $-40^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$ ，  $-55^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$  和  $-55^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$  等等

**工作寿命：** ESR增加30% ， 或电容量减少到80%判定电容寿命终止。温度上限的工作时间为工作寿命。如2k小时， 5k小时或10k小时等。

**寿命降额：**阿亨纽斯（Arrhenius）定律，容芯温度减少 $10^{\circ}\text{C}$ ，寿命增加1倍。电压超过额定电压也要降额。但额定工作电压最大不应大于电容定额的电压。

**ESR与纹波电流：**电解电容的温升是 $R_{\text{ESR}}I^2$ 引起的。开关电源中输出纹波电压主要是ESR引起的。而 $I$ 为纹波电流的有效值。

**ESR：**20kHz以上，一般ESR与其容量的乘积为 $R_{\text{ESR}}C=50\sim 80\times 10^{-6}(\text{s})$ 。

# 电解电容的选择

- 电压定额的选择

因为电解电容的化成电压高于额定电压（30~50）%，一般选择电容额定直流电压大于或等于电路最高峰值电压即可。

- 容量选择

- 1、按ESR选择

按开关电源允许输出纹波电压  $\Delta U_{pp}$  和纹波电流  $\Delta I$  (Buck类LC滤波通常为负载电流的20%) 选择电容量。

例：Buck类LC滤波输出电流为20A,允许纹波纹波电压为100mV。  $f=50\text{kHz}$  .选择电解电容。

解：纹波电流为  $0.2I_o=0.2 \times 20=4\text{A}$ 。因为  $\Delta U_{pp} = \Delta IR_{ESR} = 4 \times 65 \times 10^{-6}/C$  ,则需要  $C = 4 \times 65 \times 10^{-6}/0.1=2600 \mu\text{F}$ 。

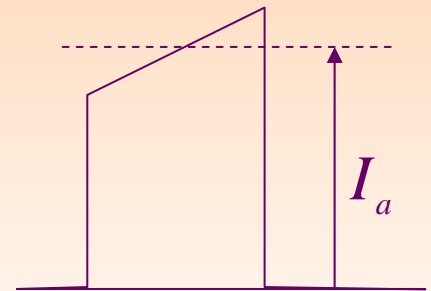
如果不考虑ESR，按照此容量计算纹波电压为  $\Delta U_{pp} = \Delta IT/2C$

$$= 4 \times 20 \times 10^{-6}/(2 \times 2600 \times 10^{-6}) = 15.4\text{mV}$$

如果是反激类电感（反激变换器变压器，Boost，Buck/Buck，Cuk等电感）电容电流有很大的峰值电流。除了按峰值电流选取电容 $I_{OFp} \times R_{ESR} = \Delta U_{pp}$ 外，还应检查电容交流有效值不应当超过限值。

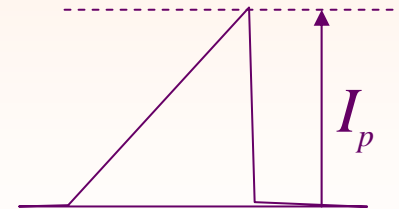
如果电感电流是连续模式( $I_a$ —中值电流):

$$I = I_a \sqrt{D(1-D)}$$



断续( $I_p$ —峰值电流):

$$I_{ac} = I_p \sqrt{\frac{D_{on}}{3} - \frac{D_{on}^2}{4}}$$





## 2、按保持时间选择

- 保持时间—输入瞬时跌落引起输出电压直流电压下降（ $\Delta U$ ）到欠压保护前的时间 $T_h$ 。一般数十ms。这种情况下利用电容放电维持输出功率。

如果输出额定电流为 $I$ ，则需要的电容量为

$$C \geq \frac{IT_h}{\Delta U}$$

### 3.按允许纹波选

- 对于工频整流，通常按允许纹波和输出功率选择电容量：
  - 1.对于直接从工频220V输入整流，工程上可以简单按约 $1 \mu\text{F}/\text{W}$ 选择电容量。
  - 2.如果不是直接从220V/50Hz输入，或电源时110V，或经变压器降压等等，可以按以下方法选取：

# 工频整流电容滤波电容选择

- 能量关系

$$C = \frac{P_o}{f(U_p^2 - U_v^2)} = \frac{P_o}{fU_p^2(1 - k^2)} = \frac{\alpha P_o}{fU_{i\min}^2}$$

$$\alpha = \frac{1}{2(1 - k^2)}$$

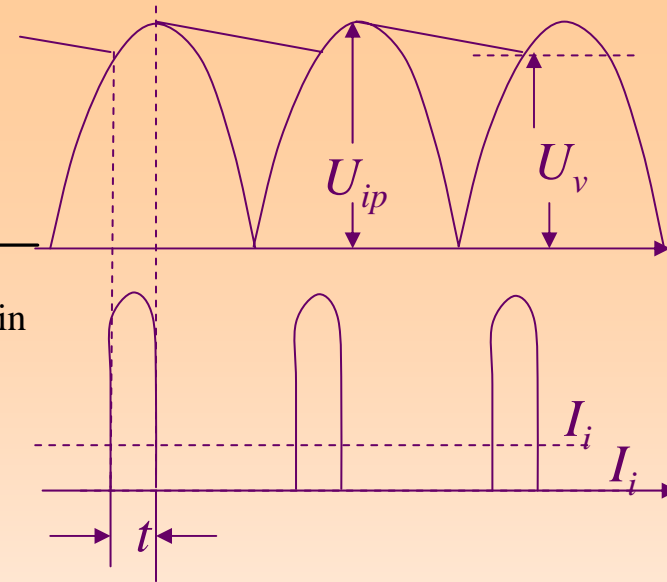
$$k = U_v / U_p;$$

$$U_p = \sqrt{2}U_{i\min}$$

脉冲宽度

$$t = \frac{\cos^{-1} k}{2\pi f}$$

$$D = \frac{t}{T/2} = 2ft = \frac{\cos^{-1} k}{\pi}$$



流过电容的交流有效值

$$I_{ac} = \beta C f U_{i\min}$$

$$\beta = 2\sqrt{2}(1 - k)\sqrt{D - D^2} / D$$

# 设计计算参数表

k	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
$\alpha$	5.128	2.632	1.818	1.389	1.143	0.980
D	0.101	0.1436	0.1766	0.2048	0.2300	0.2532
$\beta$	0.422	0.691	0.916	1.115	1.282	1.455

- 举例：输出功率为100W，变换器效率为85%，变换器由220V/50Hz交流电源供电，经桥式整流，电容滤波，给DC/DC变换器供电，变换器允许输入纹波电压峰峰值为30V，选择输入滤波电容。

$$P_i = P_o / \eta = 100 / 0.85 = 118 \quad k = (U_p - 30) / U_p = 0.90$$

查得  $\alpha = 2.632, D = 0.1436, \beta = 0.691$

得到电容  $C = \frac{\alpha P_o}{f U_{i\min}^2} = \frac{2.632 \times 118}{50 \times 220^2} = 128 \mu F$  取  $150 \mu F$

电容电流有效值

$$I_{ac} = \beta C f U_{i\min} = 0.691 \times 150 \times 50 \times 220 \times 10^{-6} = 1.14 A$$

# 使用

1. 因为电容老化与温度紧密相关，多个电容安装在一起时，电容之间应当留有空隙，便于散热，电解电容不同外形尺寸的电容间距离为  $\phi 40$  以上  $>5\text{mm}$ ， $\phi 18\sim 35$  应  $>3\text{mm}$ ， $\phi 6\sim 16$  应  $>2\text{mm}$ ；
2. 电容安装时尽量不要靠近功率器件和发热源；
3. 不要用有机洗涤剂清洗；
4. 电路电压最高电压不超过耐压值的1.2倍；
5. 不能反极性；
6. 已安装在PCB上的电容不得强迫拉压或歪扭；
7. 在电压允许的情况下，电容的十端尽可能靠近，减少引线电感。
8. 并联

## 2、钽电容

钽电容比铝电容具有好得多的高频特性，但价格贵，而且电压限制在100V和容量数百 $\mu\text{F}$ 以下，失效为常为短路极易着火。中功率电源输入最好选择铝电解电容，而输出低压采用贴片钽电容。当然贴片比插件的容量小而电压低。比铝电解电容更好的低温性能。

钽电解电容选择与铝电解电容相似。仍以输出纹波电压和ESR选择电容量。

## 3.2 无极性电容

### 1. 有机薄膜电容

介质：薄膜电容有聚乙烯、聚酯（CL）、聚丙烯（CB）、聚四氟乙烯（CF）、聚碳酸酯（CLS）等薄膜电容。精密、温度特性好、低漏电流。

类型：1. 金属箔/膜电容—金属箔作为电极。极低的ESR，可以承受很高的 $dV/dt$ 和交流电流。体积大，价格高。容量小（低于 $0.01\mu F$ ）

2. 金属化电容—喷涂在介质铝层作为电极。ESR大，较低的 $dV/dt$ 和交流电流能力。体积小，价格低，有自愈能力。容量大。



## 使用:

相同容量金属箔常用于脉冲、交流高压、缓冲电路 (snubber) 和谐振电路。

金属化电容在局部击穿时产生高温, 金属箔蒸发不会短路, 电容量减少极小, 这种现象就是所谓自愈能力, 体积小, 价格低。这类电容除了一般应用以外, 常用于电磁兼容的X电容和Y电容。

金属化聚碳酸酯膜介质CLS体积小, 耐高温、温度系数小、绝缘电阻高、自愈性。常应用于逻辑控制电路、延时、积分、滤波、耦合和移相电路。

\*金属化电容不使用在低电容, 小于 $0.01\mu\text{F}$ , 谐振电路, 吸收电路, 低噪声。

壳温升不超过 $15^{\circ}\text{C}$ , 高温环境壳温不超过最高允许温度。

## 2. 无机介质电容

云母电容：云母片为介质，浸银后形成电极。

电容量在数pF到1  $\mu$  F；

电压定额在50Vdc到2500V

-55 $^{\circ}$ C ~ 150 $^{\circ}$ C内电容量漂移不超过0.5%

比有机介质箔电容更高的dV/dt能力

体积较大，成本较高。适合于定时、缓冲电路和高频交流电路使用。

## 陶瓷介质电容：

介质成分是钛酸盐、铌镁酸铅等

分类：3类

**1类：**高精度，1pF到几个mF；**1类：**高精度，1pF到几个mF；

**2类：**独石电容，和1类相同的壳体，容量是以上电容20~70倍，但在温度 $-55^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 范围内变化大约 $\pm 10\%$ ，最大变化为 $+15\%\sim -25\%$ ；

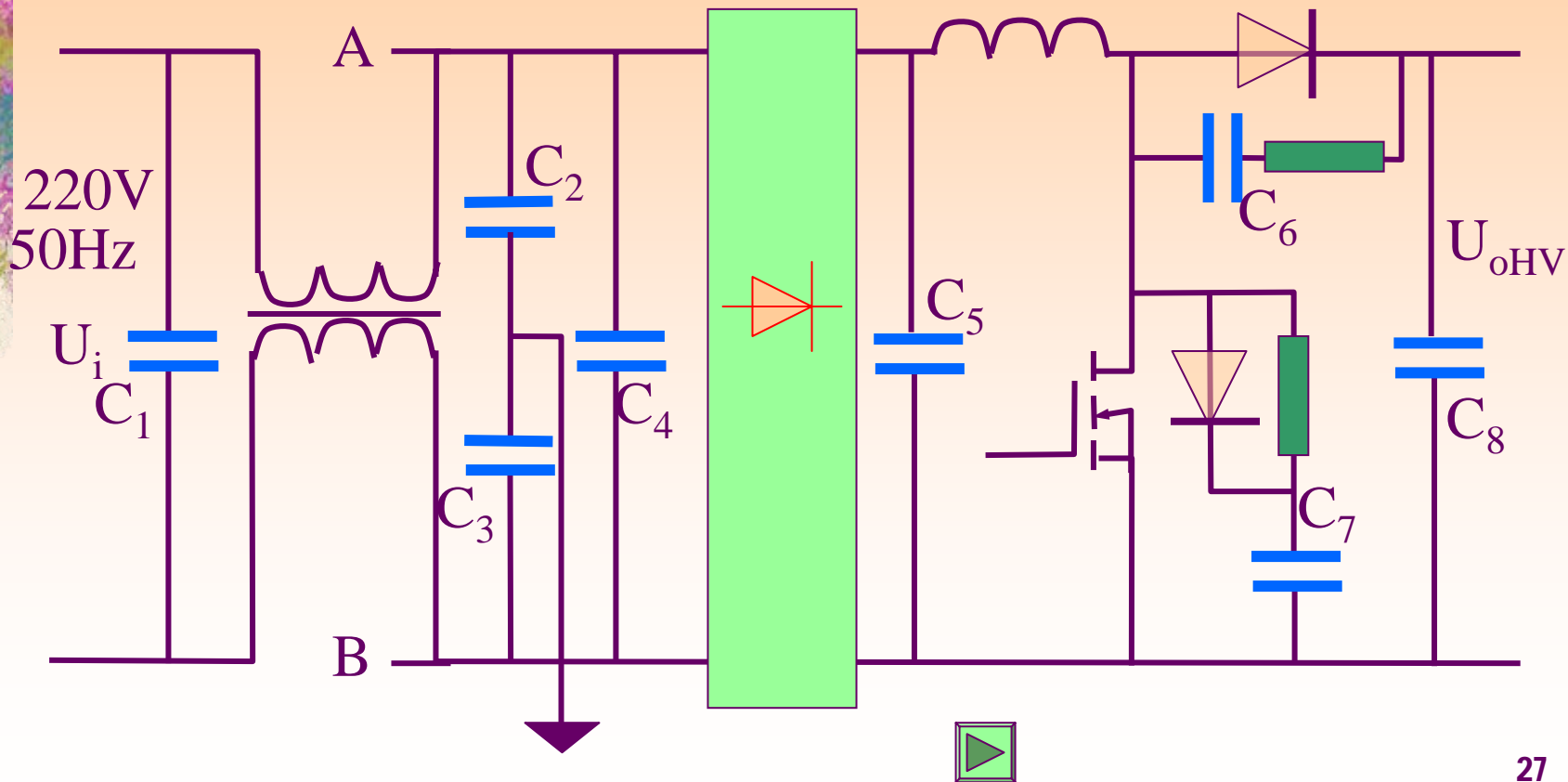
**3类：**电容容量是2类大约5倍，电容量随电压和温度变化较大。温度范围 $-25^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ ，电容变化大约 $+20\%\sim -65\%$

## 使用

- 1类用于定时、谐振电路和需要补偿温度效应的电路，也适合要求低损耗和高绝缘电阻的一般电路中使用。在收音机、电视机、收录机等电子产品种要求容量稳定的交直流的脉冲电路中使用。在收音机、电视机、收录机等电子产品种要求容量稳定的交直流的脉冲电路中使用。
- 2类电容量大，外形尺寸小。电路中用于隔直流、旁路耦合、滤波和对损耗和容量稳定性要求不高的场合。
- 3类 容量大，但要求不高的地方，价格低廉。多层陶瓷电容，代替低压电解电容。

# 四、开关电源中电容器

## 1、输入EMC滤波、整流和PFC





$C_1, C_4$ —EMC差模（常模）滤波：一般采用有机介质金属化交流电容。通常称为X电容。

$C_2, C_3$ —EMC共模滤波：一般称为Y电容。通常采用高压一类陶瓷电容，或高压金属化电容。要求较低的ESR。数值受安全泄漏电流( $<3\text{mA}$ )限制。

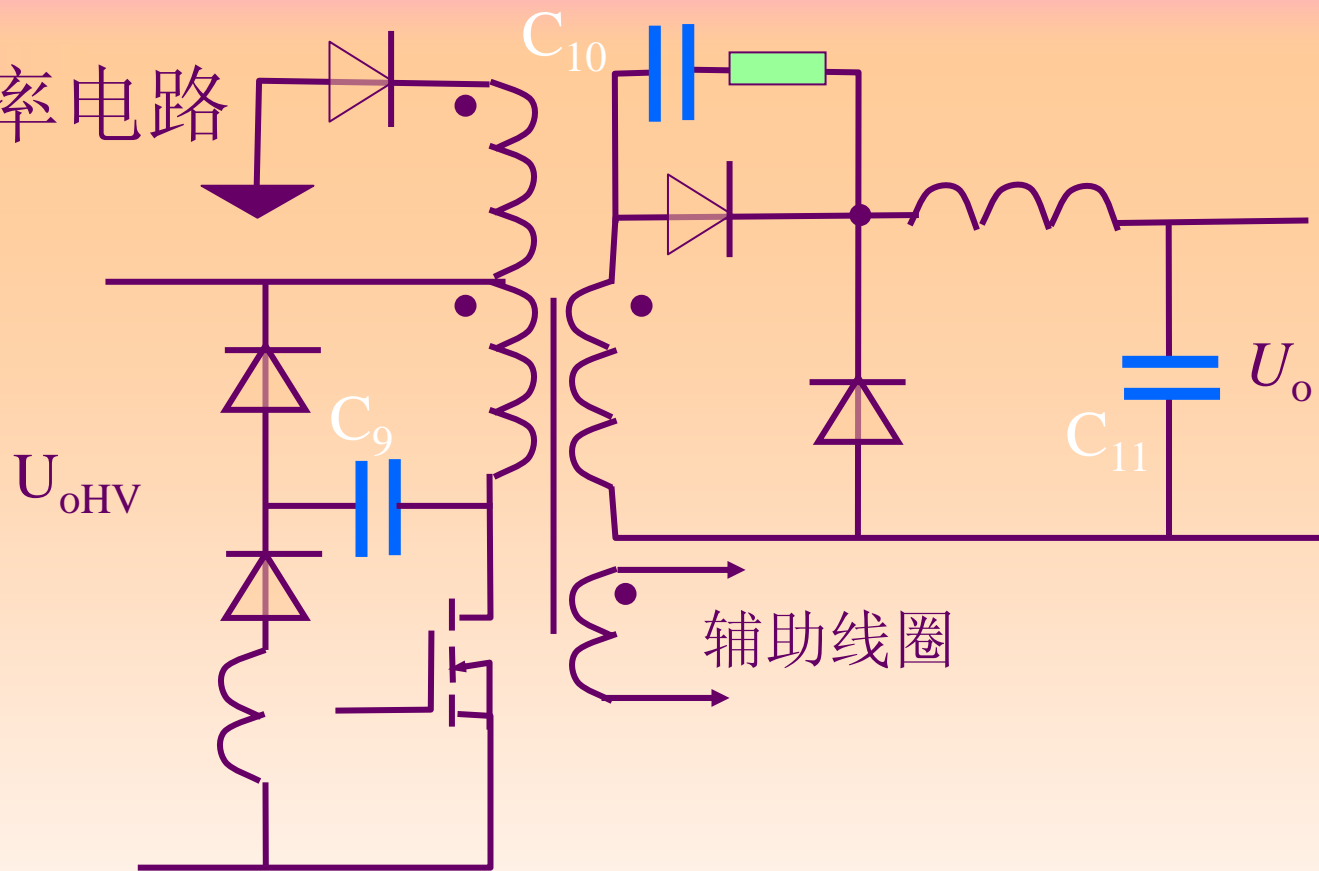
$C_5$ —PFC输入电容：通常采用金属化电容，如CBB。保证PFC工作，输入整流电压为零附近有1V左右电压。减少输入电流过零失真，一般在 $1\sim 4\ \mu\text{F}$ 。

$C_6, C_7$ —缓冲（Snubber）电容：一般采用金属箔/膜电容，具有很高的 $dV/dt$ 能力，以及非常小的ESR和ESL。通常称为snubber 电容。

$C_8$ —输出滤波电容：铝电解电容，按纹波电压要求，根据峰值电流和电容的ESR选择容量，检查电容的纹波电流定额是否满足电路要求。



## 2. 功率电路

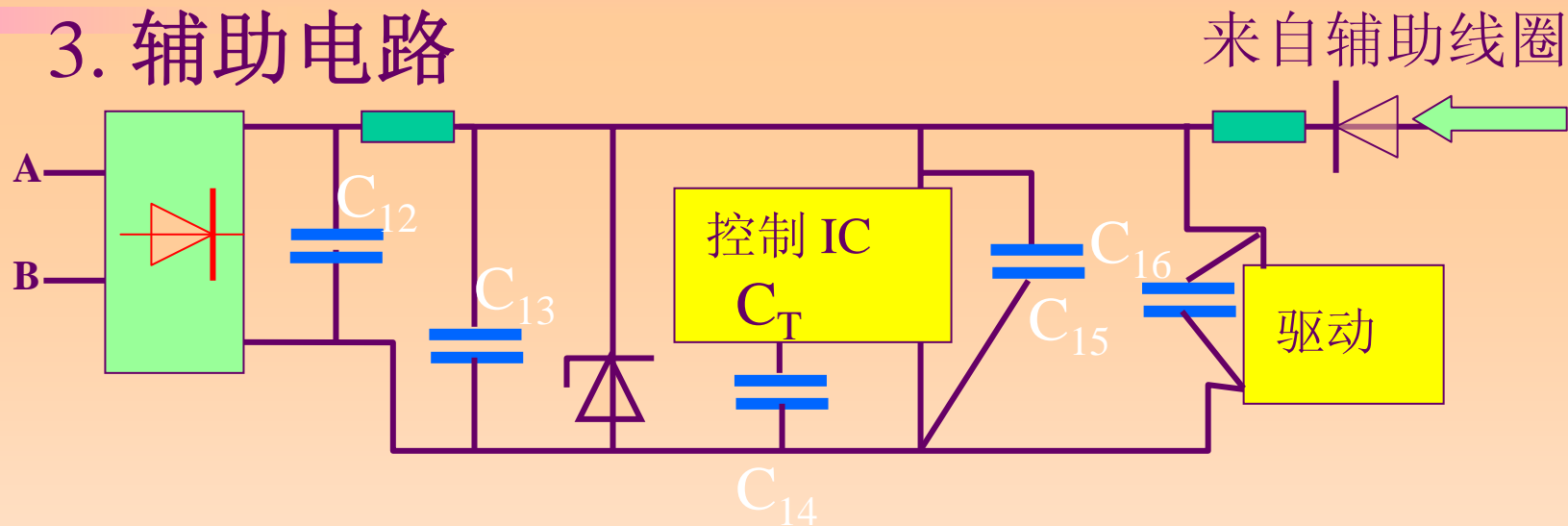


$C_9, C_{10}$  — Snubber电容, 要求极低ESR, 一般按 $dV/dt$ 能力选择电容。

$C_{11}$  — 输出滤波电容, 电解电容, 按纹波电压要求, 根据纹波电流和电容的ESR选择电容量。 29



### 3. 辅助电路



$C_{12}$ —工频滤波，电解电容。如前。

$C_{13}$ —电解电容。按控制芯片欠压保护回差  $\Delta U_{UN} = IT/C$  选择电容量。 $I$ —控制电路输入电流； $T$ —功率电路启动时间。

$C_{14}$ —定时电容。薄膜电容或云母电容等精密电容。

$C_{15}$   $C_{16}$ —去耦电容。一般用途，3类陶瓷及任何电容。



谢谢!



欢迎您到南京航空航天大学来

