

开关电源中电容器的选择

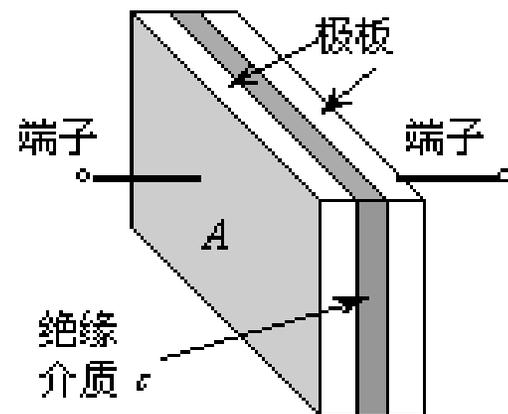


南京航空航天大学自动化学院
赵修科
世纪电源网上海电源技术研讨会
2010.6

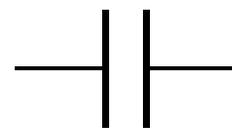
一、电容器的基本原理

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。

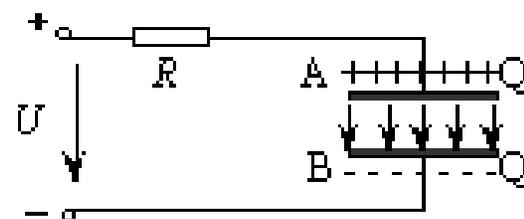
充电： 当两个端子接到电源时，电源正极将相连极板电子吸走，留下正电荷；而负极向另一极板同时送入相等电子。在外电路形成电流。直到极板电压等于极板两端电压。



(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 (m^2); d —极板间距离 (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	ϵ_r	材料	ϵ_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）， μ 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 $4.7\mu\text{F}$ ， $0.047\mu\text{F}$ ， 47pF 等等

容量标注在外壳上，测试条件为 25°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。

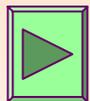
通常选择电容额定电压不得小于电容所承受电路最高电压的125%。

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。

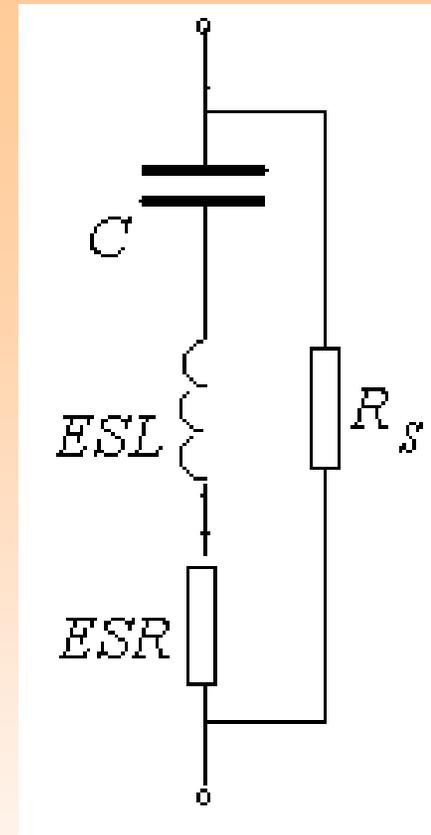


ESL ：引线、电容极板结构有关。

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 (μF)， 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 ΔT 。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°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 ΔU_{pp} 和纹波电流 ΔI (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 $C = 4 \times 65 \times 10^{-6}/0.1=2600 \mu\text{F}$ 。

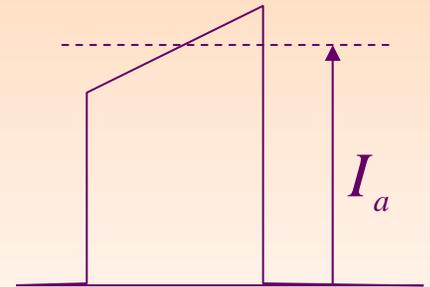
如果不考虑ESR, 按照此容量计算纹波电压为 $\Delta U_{pp} = \Delta IT/2C$

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

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。

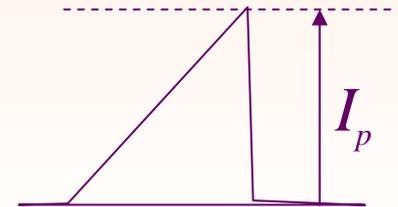
如果电感电流是连续模式(I_a —中值电流):

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



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（ ΔU ）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

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

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

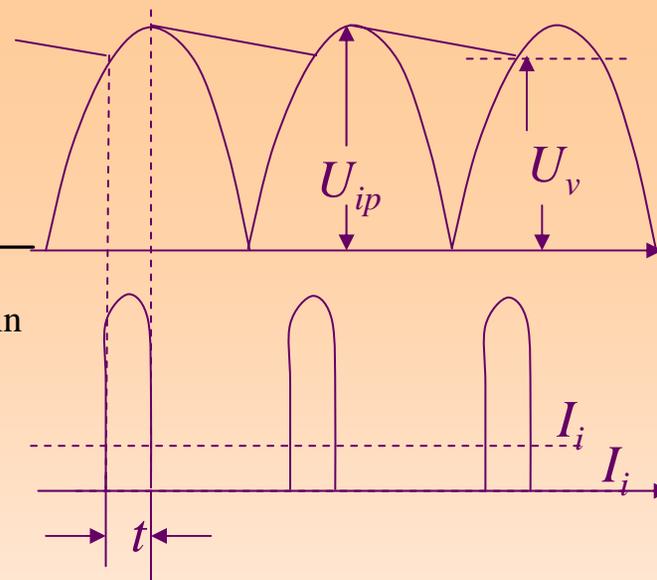
$$k = U_v / U_p;$$

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

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
α	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
β	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 μF 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°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 μ 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 $+15\%\sim -25\%$ ；

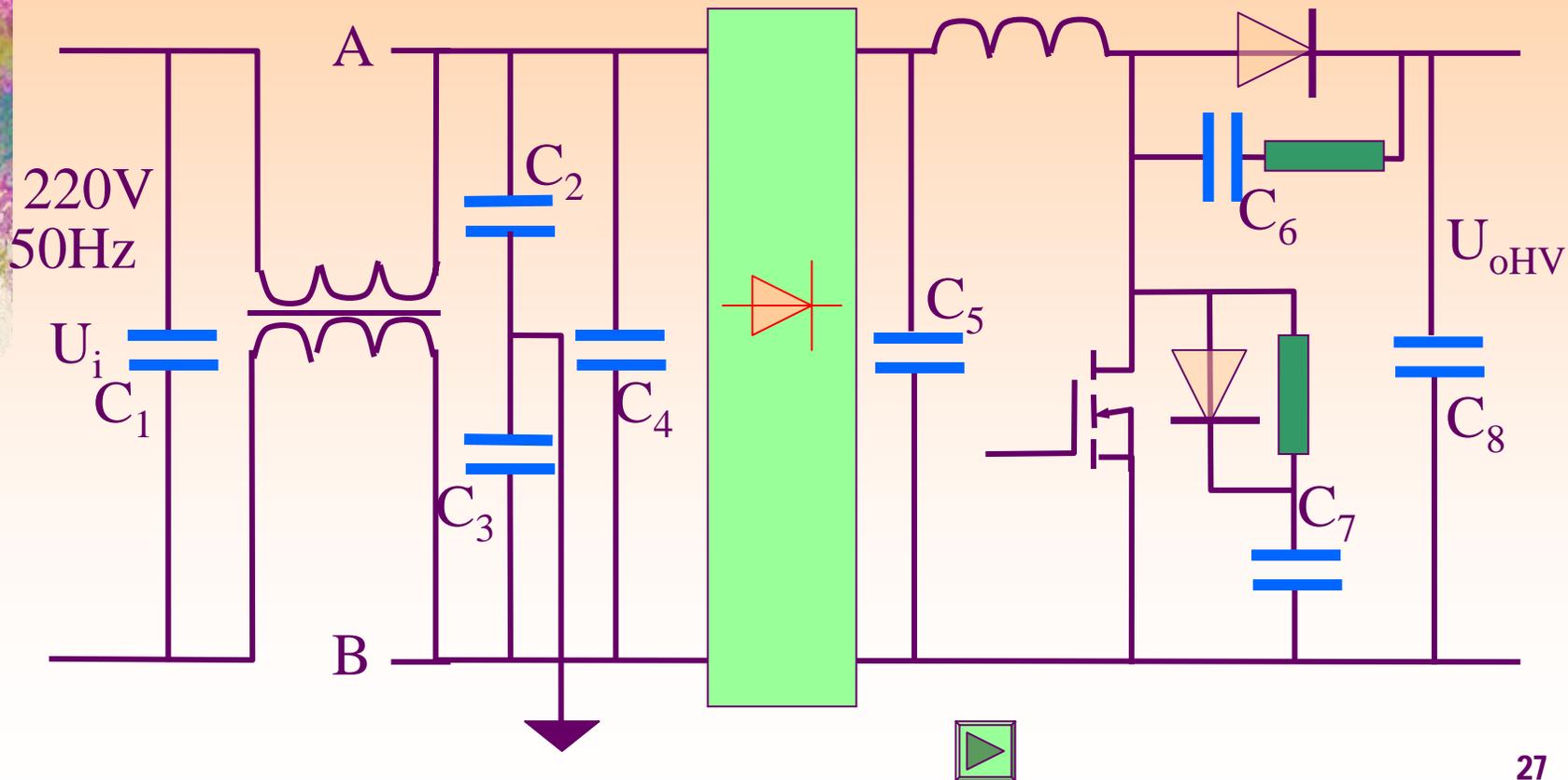
3类：电容容量是2类大约5倍，电容量随电压和温度变化较大。温度范围 $-25^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ ，电容变化大约 $+20\%\sim -65\%$

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。

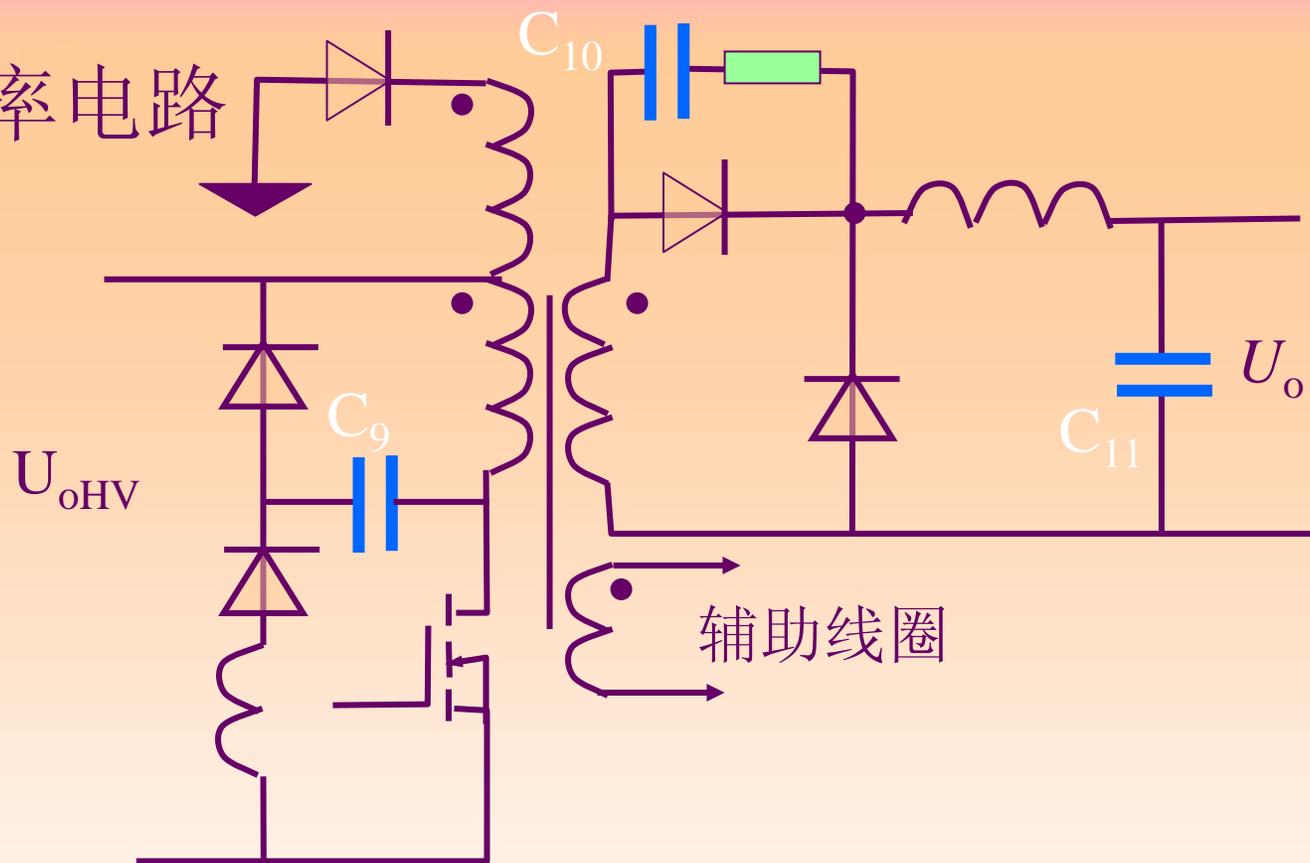
C_2, C_3 —EMC共模滤波：一般称为Y电容。通常采用高压一类陶瓷电容，或高压金属化电容。要求较低的ESR。数值受安全泄漏电流($<3\text{mA}$)限制。

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。

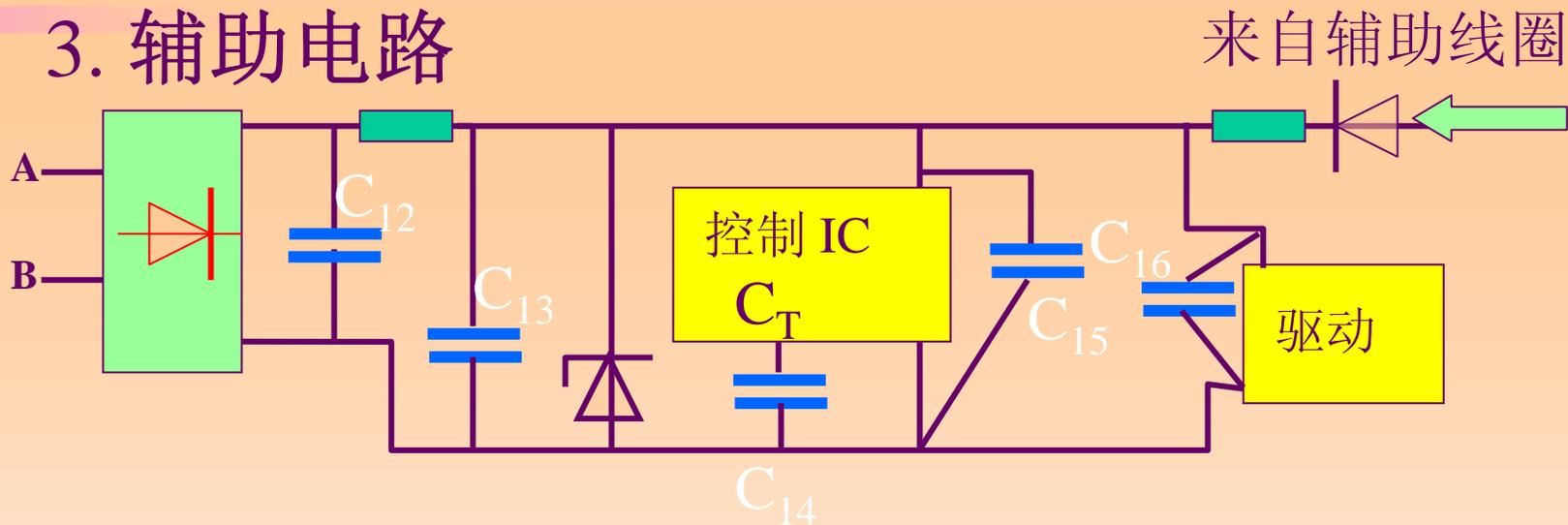
2. 功率电路



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

