

田村(中国)上海技术研发中心  
中国电源学会专家委员会  
电源学会磁技术专业委员会

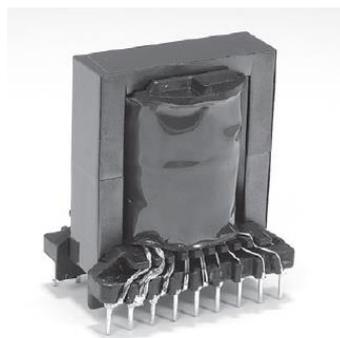
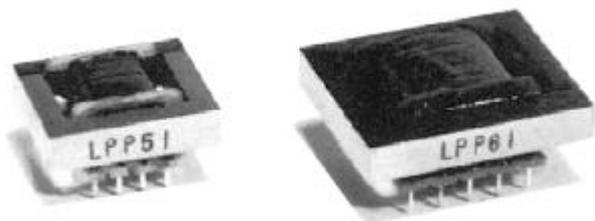
副所长  
委员  
委员

邵革良

'2015/4/25

# 6小时精通反激电源及变压器设计

*Advanced Magnetics Technology*

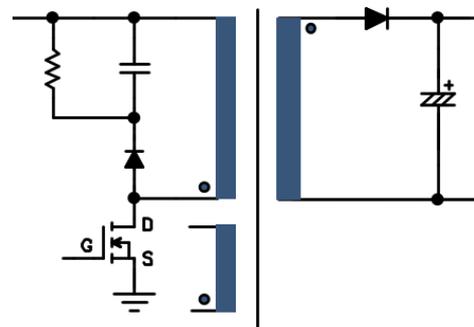


## 第一讲：反激开关电源基本原理和电路拓扑

- 1) 小功率AC/DC高频开关电源拓扑
- 2) 反激型AC/DC开关电源的基本工作原理
- 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项
  - a) 固定频率控制IC及其工作机理
  - b) 准谐振控制IC及其工作机理

## 第二讲：反激电源变压器的设计计算

- 1) 反激电源变压器用磁性材料
- 2) 变压器设计计算方法的掌握
  - a) CCM, DCM工作模式
  - b) CRM工作模式
  - c) 设计计算实例



## 第三讲：反激电源变压器设计软件应用说明

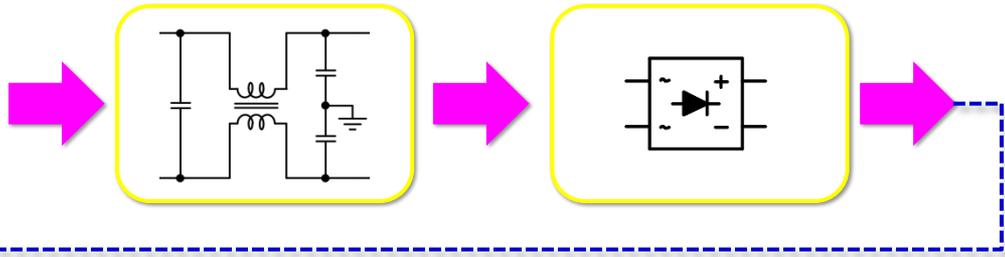
- 1) Flyback Transformer Wizard V1.0的功能介绍
- 2) Flyback Transformer Wizard V1.0的使用方法
- 3) 设计实例
- 4) 主电路元件选型方法及高品质设计评价技术初步

## 第四讲：变压器绕线工艺及设计书的作成

- 1) 反激电源变压器的排线及安规
- 2) 高频变压器设计文件的项目定义
- 3) 高频变压器设计文件的作成

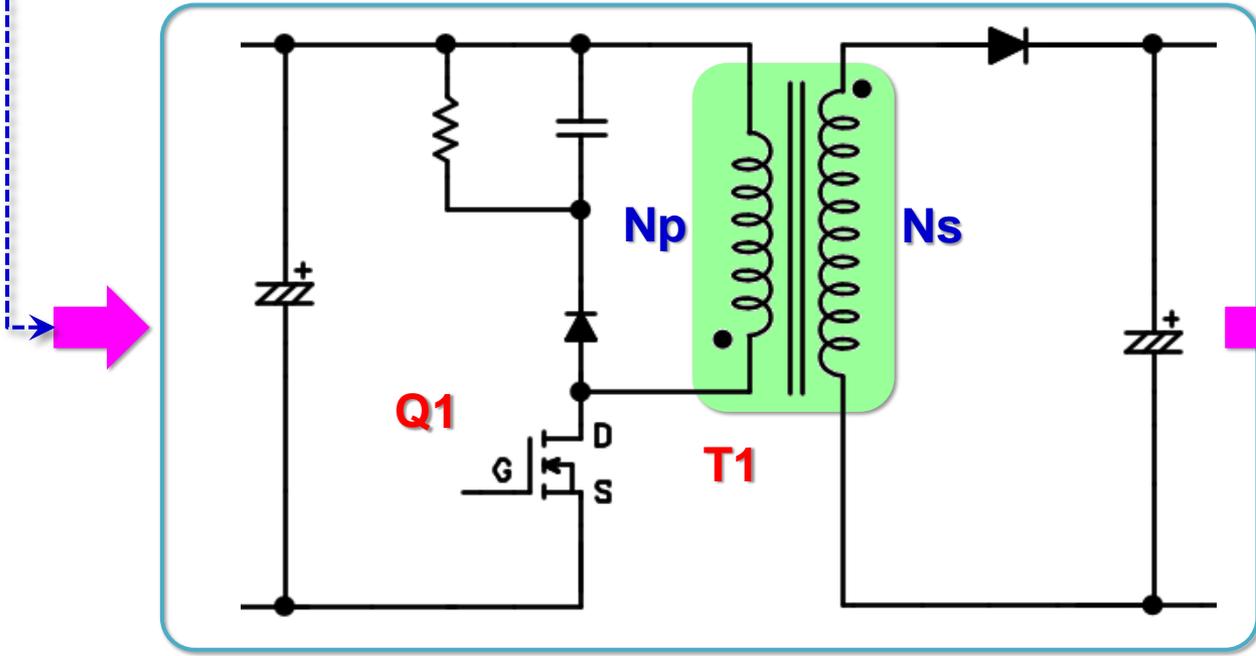
第一讲：反激开关电源基本原理和电路拓扑

1) 小功率AC/DC高频开关电源拓扑



### 反激电源的实质

Q1 驱动开通时 → Np 储能充电  
 Q1 驱动关断时 → Ns 放电输出



### 反激电源的优点

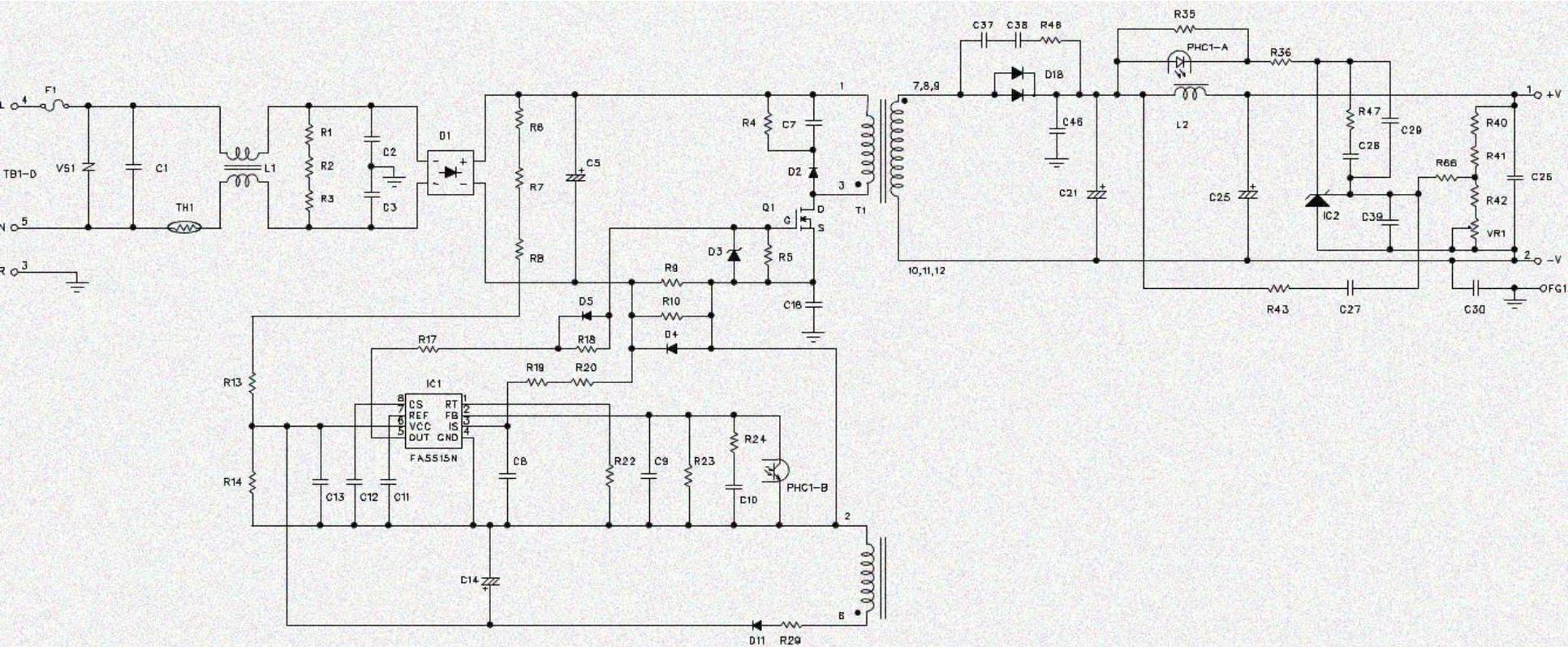
- 结构简单低成本
- 小功率 < 200W
- 宽电压输入范围
- 易实现隔离输出

### 非隔离方式

- DC Boost
- PFC Converter

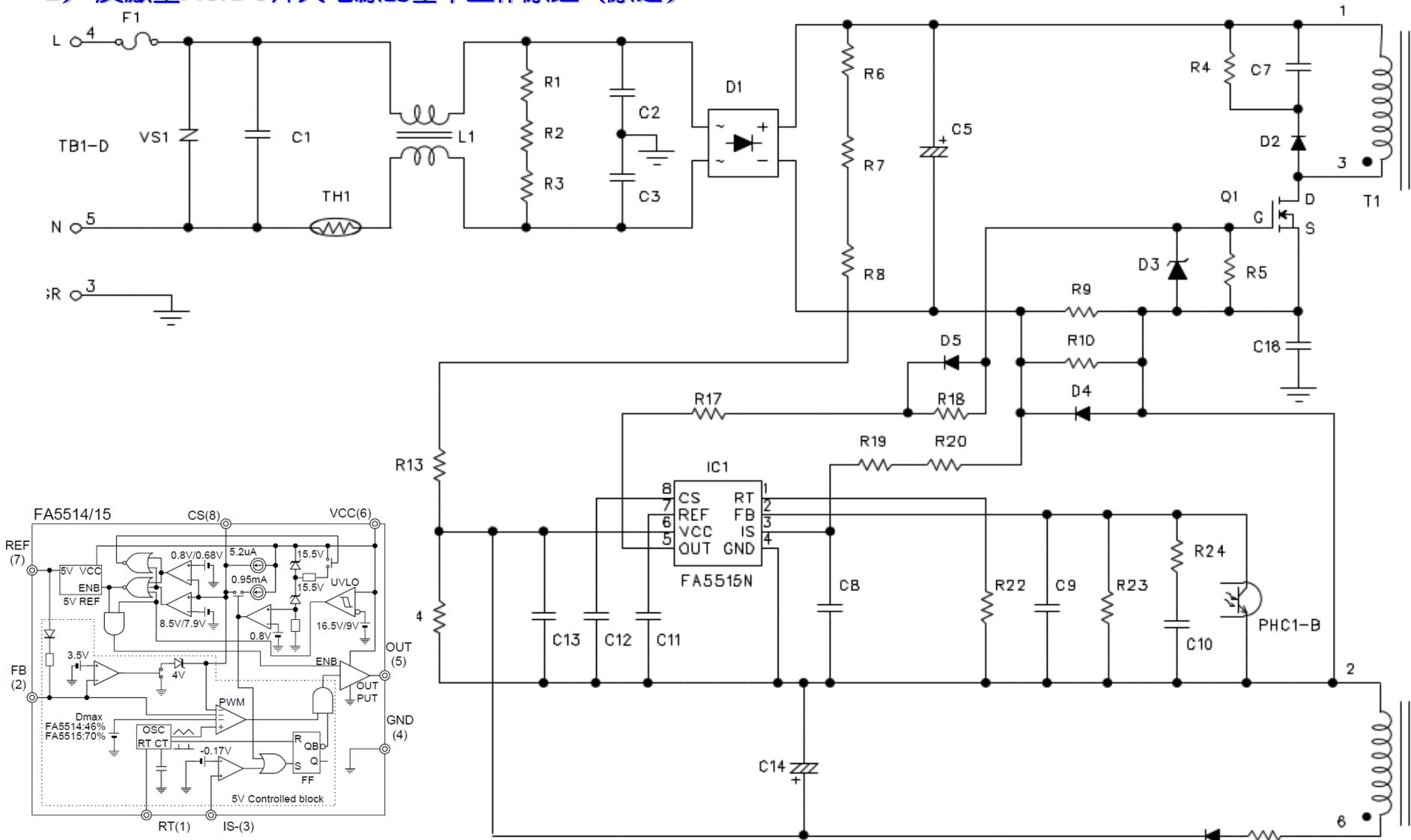
## 第一讲：反激开关电源基本原理和电路拓扑

### 2) 反激型AC/DC开关电源的基本工作原理

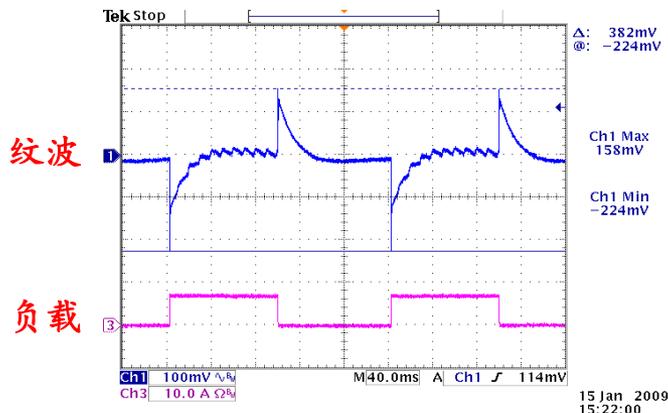
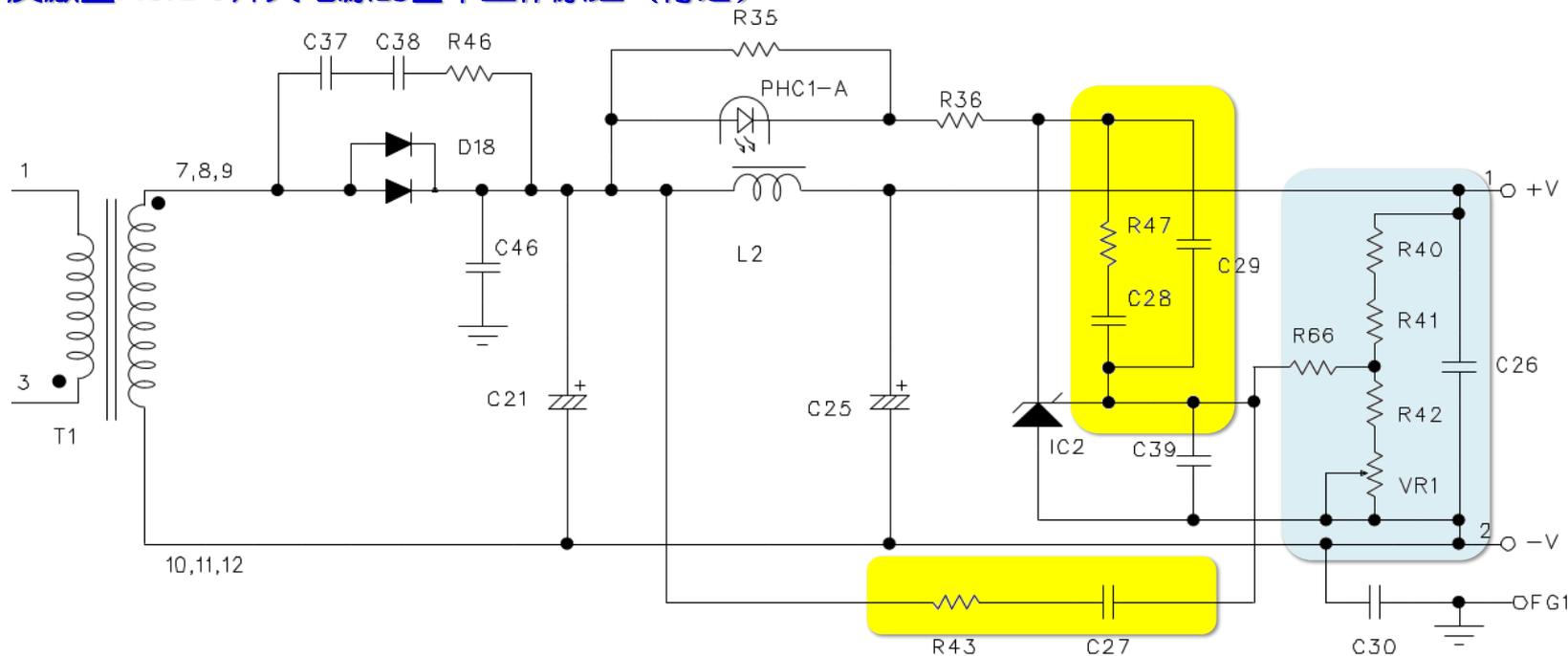


典型的反激开关电源原理图例

## 2) 反激型AC/DC开关电源的基本工作原理 (原边)



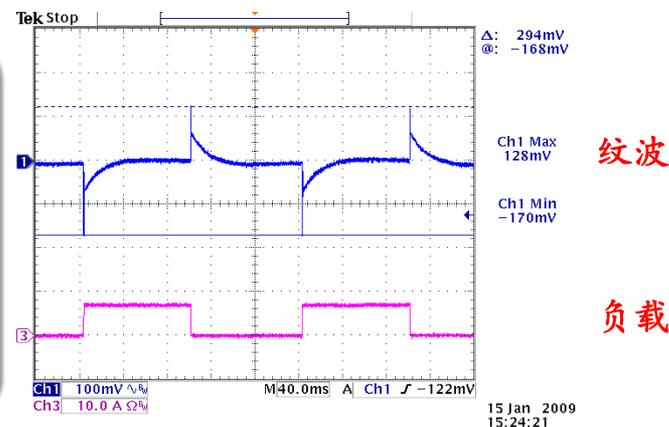
## 2) 反激型AC/DC开关电源的基本工作原理 (付边)



**动态负载响应**  
**0~100%**

← **85Vac**

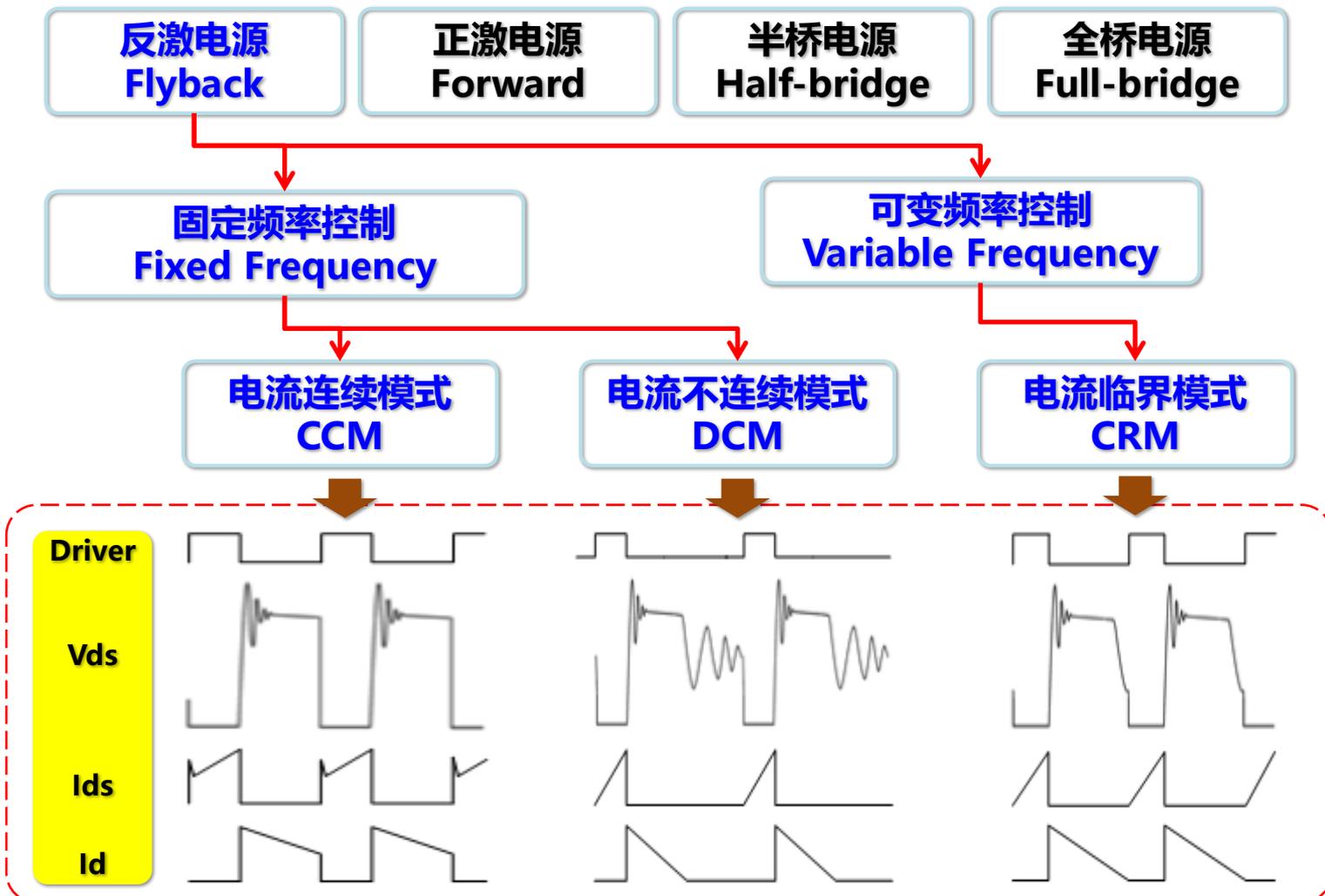
**264Vac** →



### 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项

a) 固定频率控制IC及其工作机理

b) 准谐振控制IC及其工作机理



### 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项

a) 固定频率控制IC及其工作机理 (Onsemi代表例)

## NCP1236

### Fixed Frequency Current Mode Controller for Flyback Converters

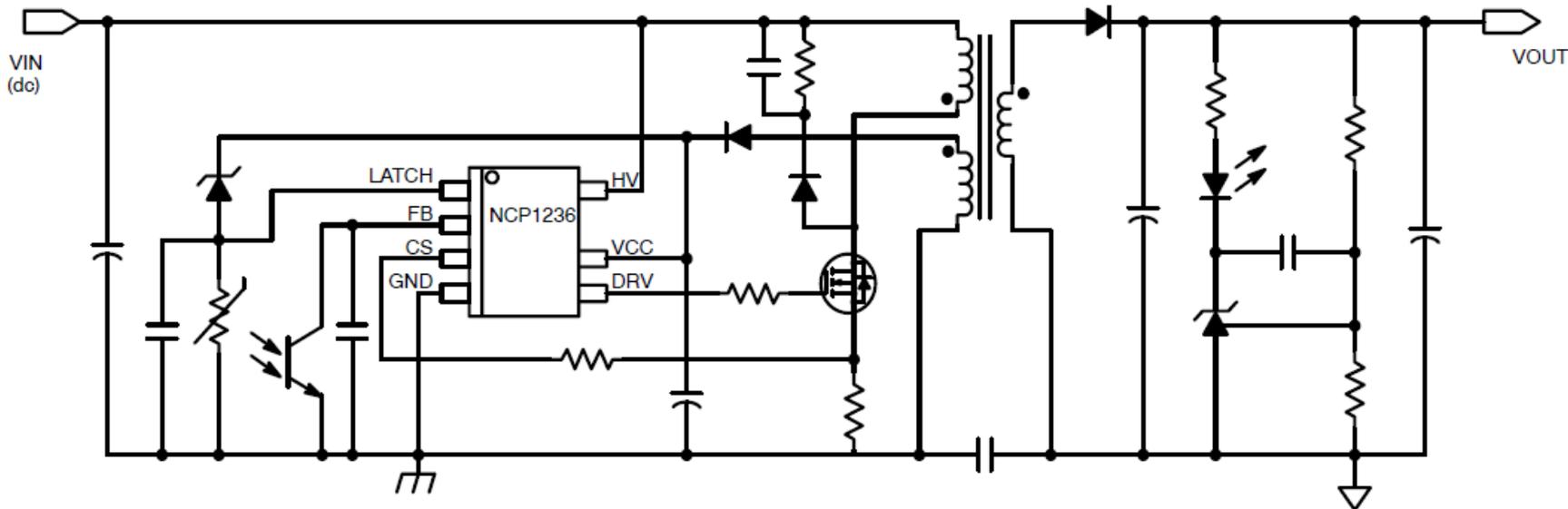
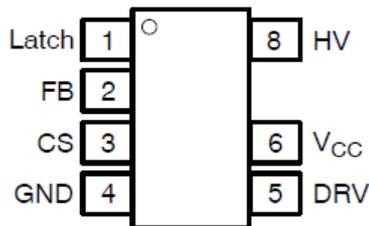
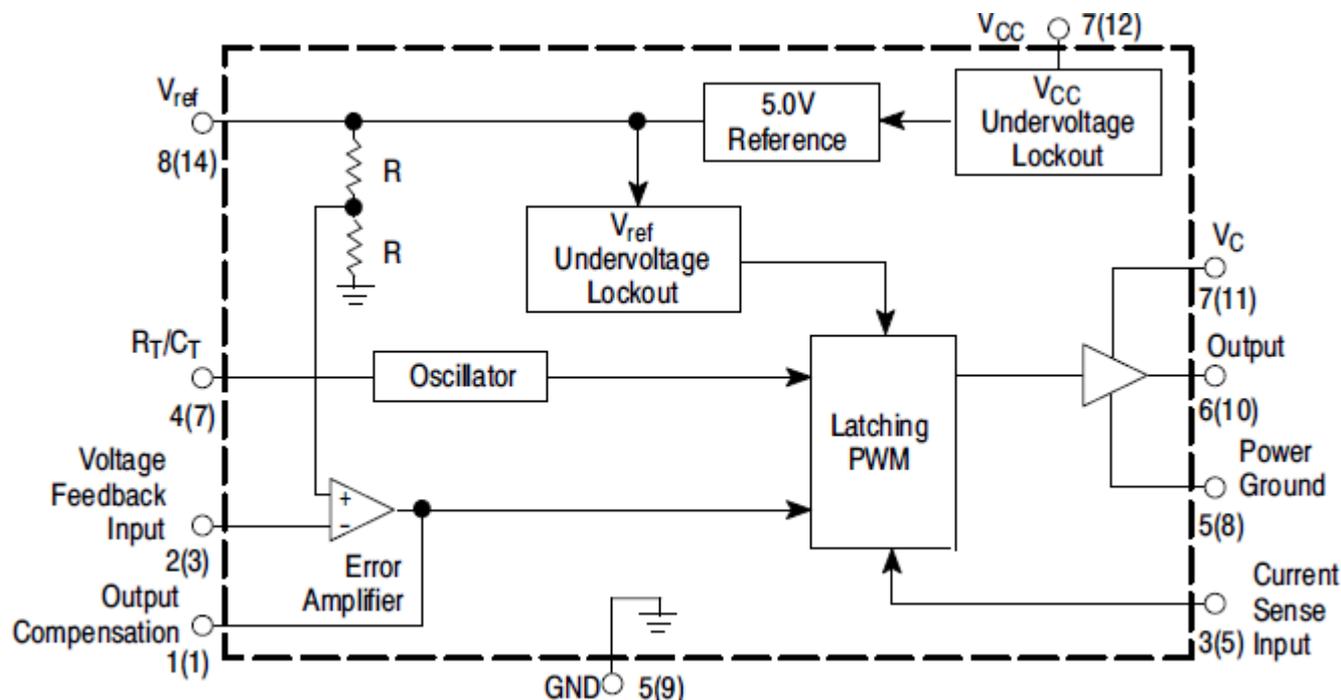


Figure 1. Flyback Converter Application Using the NCP1236

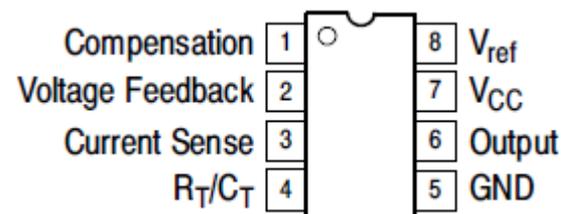
### 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项

#### a) 固定频率控制IC及其工作机理 (Onsemi代表例)



**UC3842B, UC3843B,  
UC2842B, UC2843B**

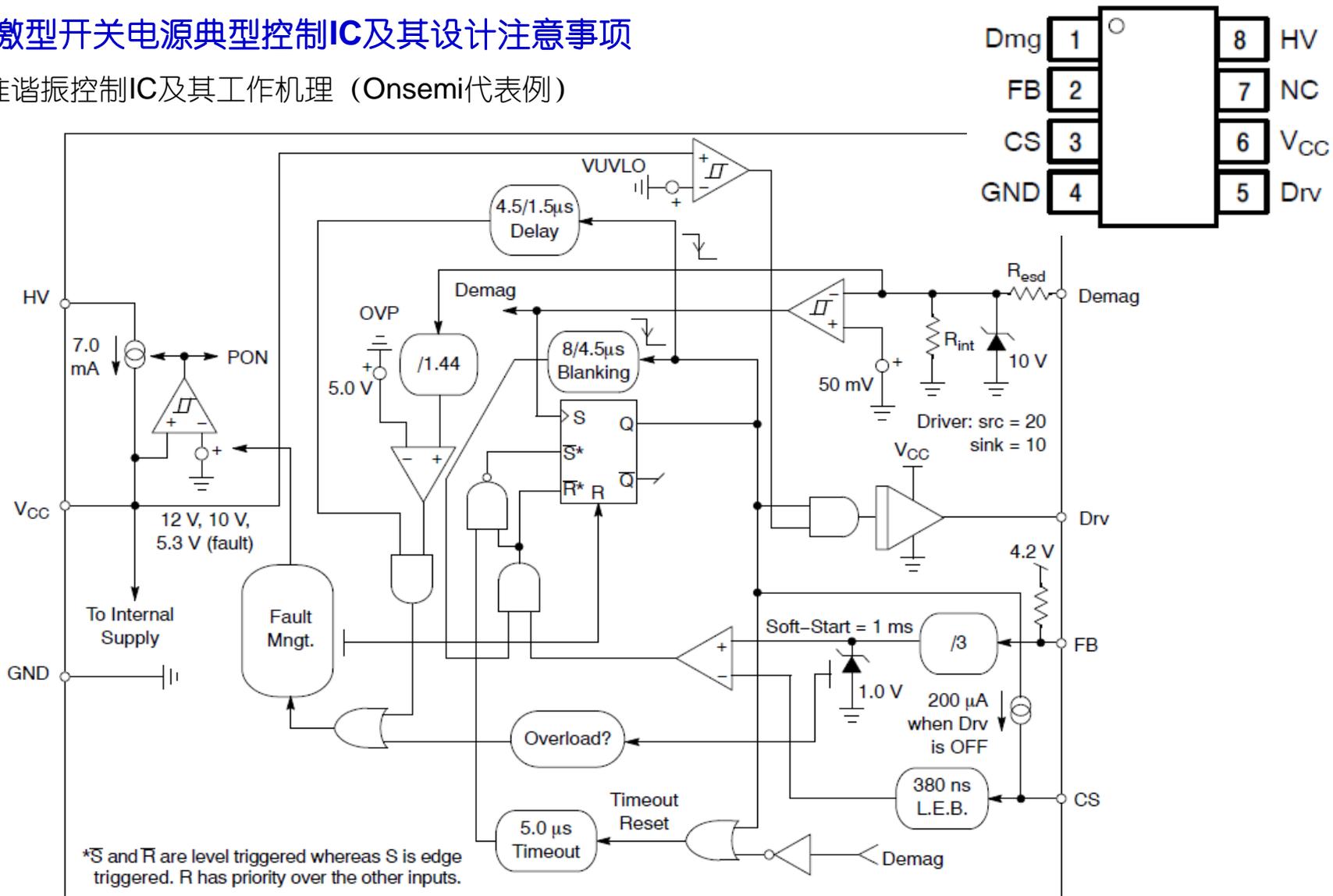
**High Performance  
Current Mode Controllers**





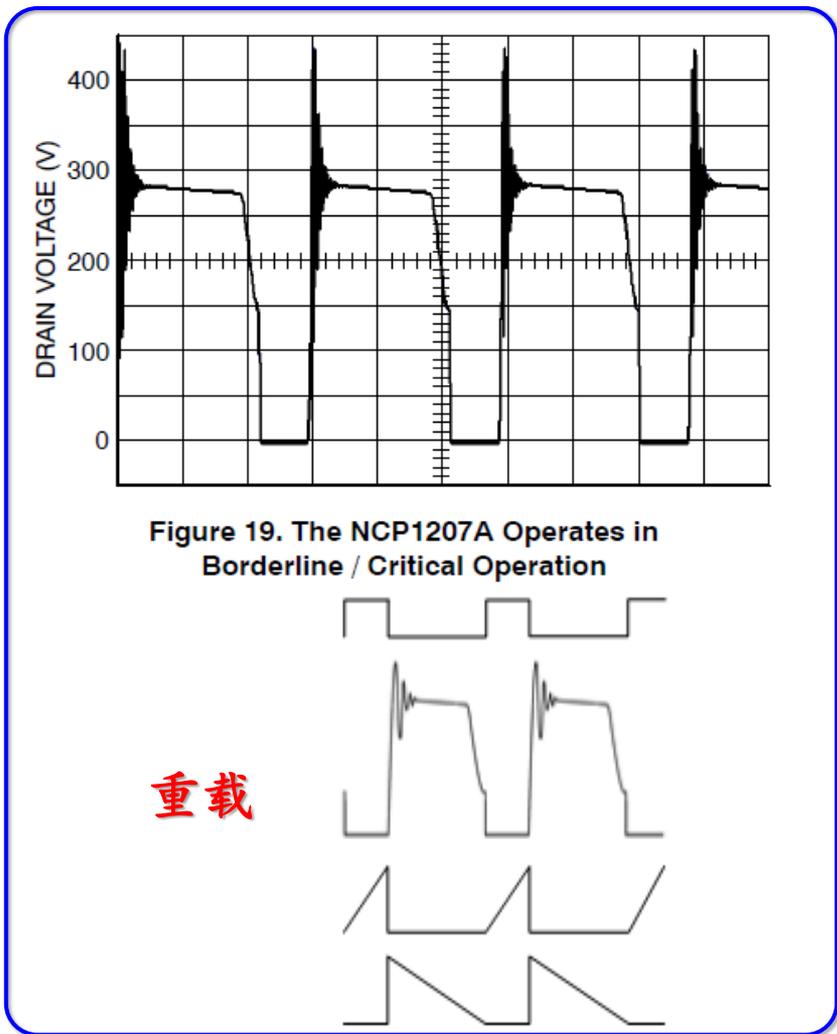
### 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项

#### b) 准谐振控制IC及其工作机理 (Onsemi代表例)

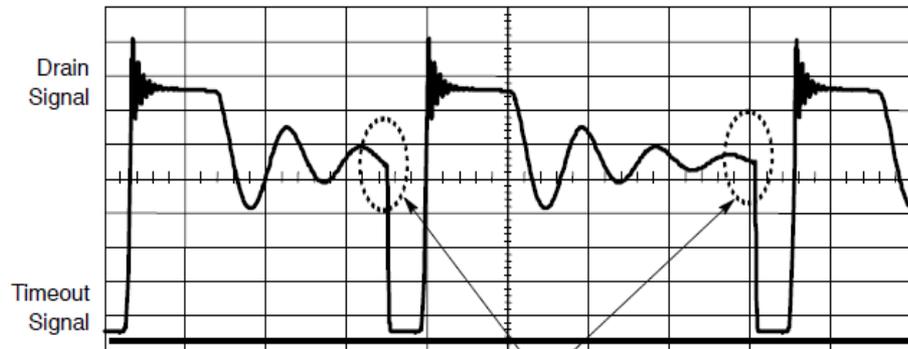


### 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项

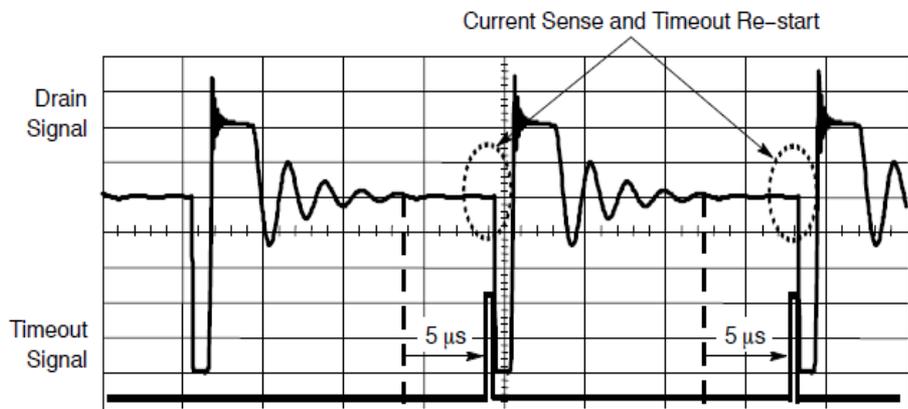
#### b) 准谐振控制IC及其工作机理 (Onsemi代表例)



#### 跳频工作



#### 轻载



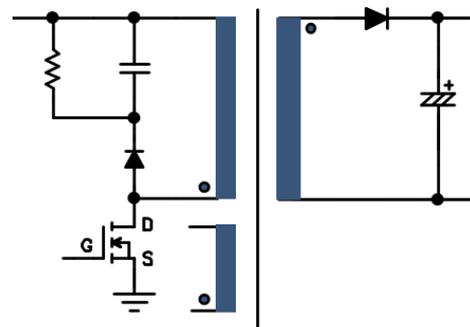
#### 极轻载

## 第一讲：反激开关电源基本原理和电路拓扑

- 1) 小功率AC/DC高频开关电源拓扑
- 2) 反激型AC/DC开关电源的基本工作原理
- 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项
  - a) 固定频率控制IC及其工作机理
  - b) 准谐振控制IC及其工作机理

## 第二讲：反激电源变压器的设计计算

- 1) 反激电源变压器用磁性材料
- 2) 变压器设计计算方法的掌握
  - a) CCM, DCM工作模式
  - b) CRM工作模式
  - c) 设计计算实例



## 第三讲：反激电源变压器设计软件应用说明

- 1) Flyback Transformer Wizard V1.0的功能介绍
- 2) Flyback Transformer Wizard V1.0的使用方法
- 3) 设计实例
- 4) 主电路元件选型方法及高品质设计评价技术初步

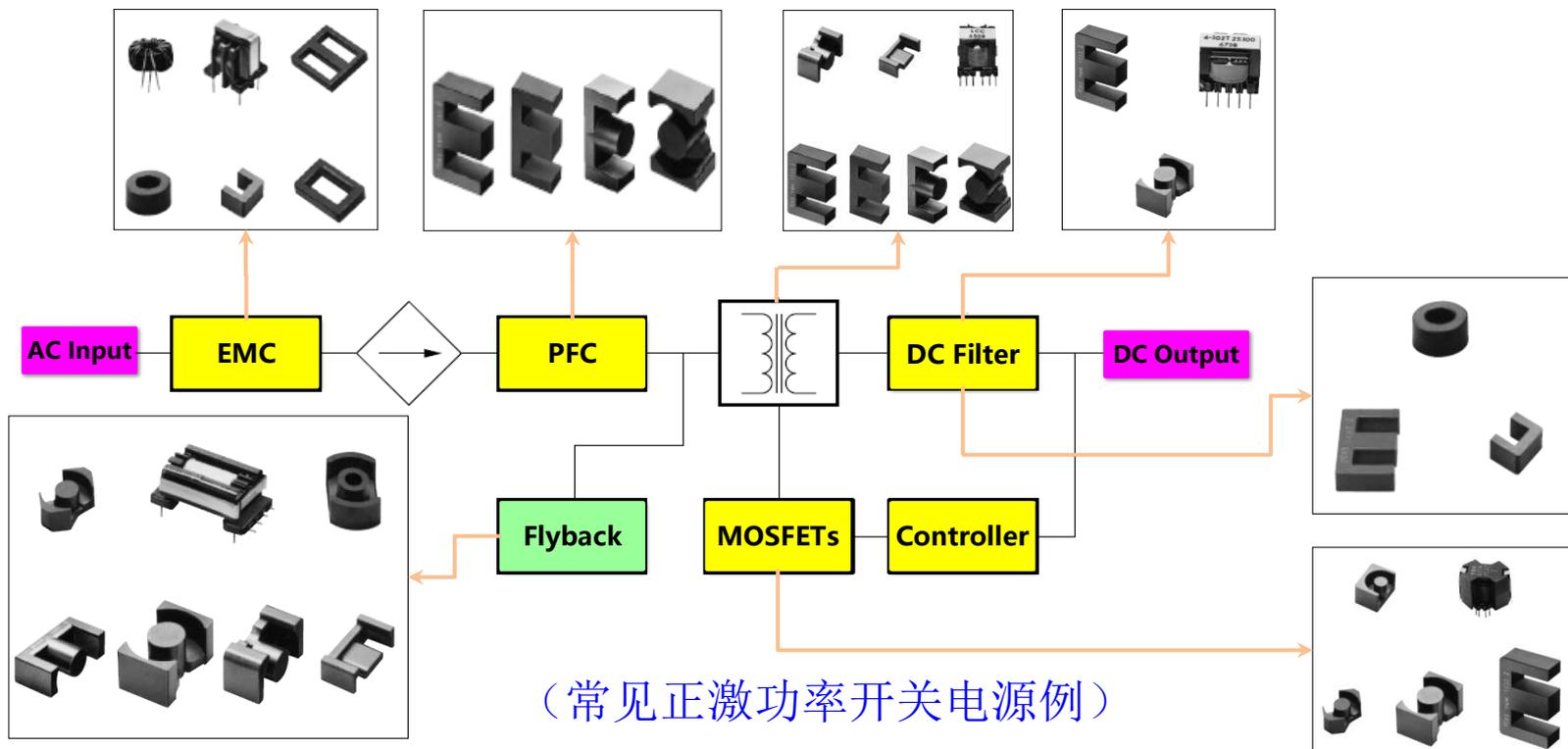
## 第四讲：变压器绕线工艺及设计书的作成

- 1) 反激电源变压器的排线及安规
- 2) 高频变压器设计文件的项目定义
- 3) 高频变压器设计文件的作成

## 第二讲：反激电源变压器的设计计算

- 1) 反激电源变压器用磁性材料
- 2) 变压器设计计算方法的掌握
  - a) CCM, DCM工作模式
  - b) CRM工作模式
  - c) 设计计算实例

### 反激电源变压器用磁性材料



## 反激电源变压器用磁性材料

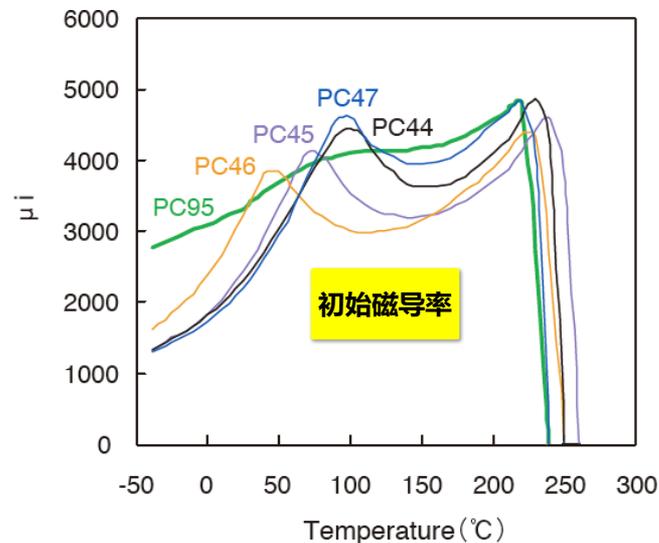
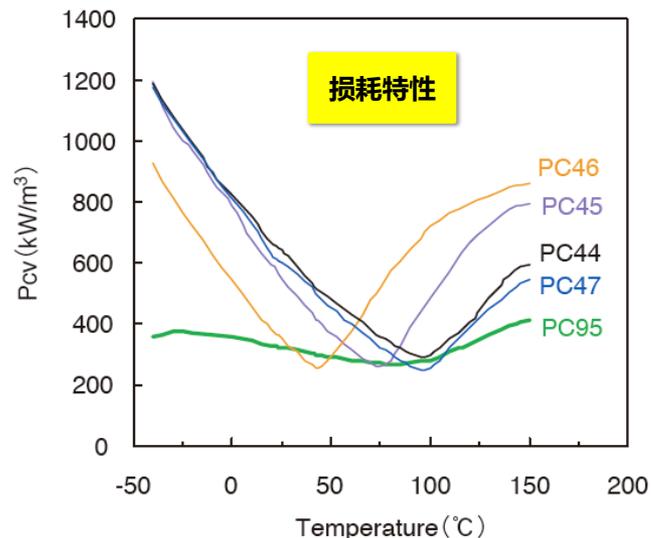
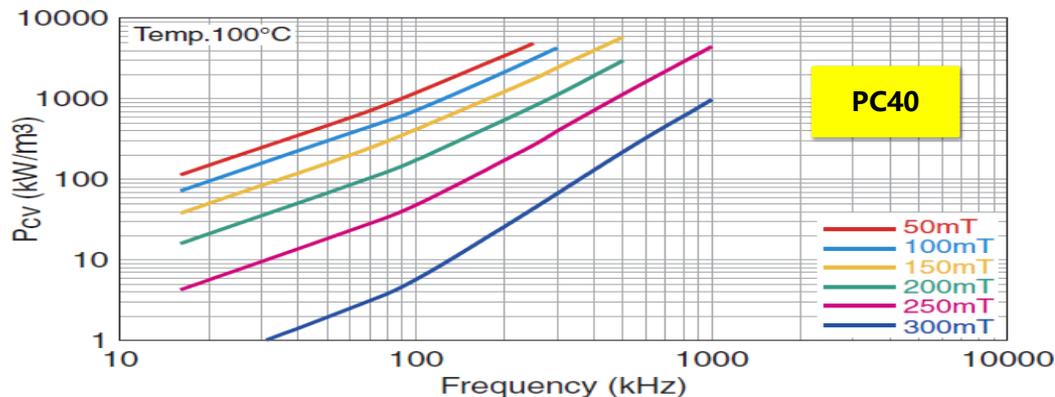
### ■ 材质特点

材质	初始磁导率 $\mu_i$	单位体积磁心损耗 (磁心损耗)* Pcv (kW/m <sup>3</sup> ) B=200mT 100kHz sine wave				饱和磁通密度* Bs (mT) H=1194A/m				剩余磁通密度* Br (mT) H=1194A/m				矫磁力* Hc (A/m) H=1194A/m				居里温度 Tc (°C)	容积密度* db (kg/m <sup>3</sup> ) ×10 <sup>3</sup>	体积电阻率* $\rho_v$ (Ω·m)
		25°C	60°C	100°C	120°C	25°C	60°C	100°C	120°C	25°C	60°C	100°C	120°C	25°C	60°C	100°C	120°C			
		PC47	2500±25%	600	400	250	360	530	480	420	390	180	100	60	60	13	9			
PC90	2200±25%	680	470	320	460	540	500	450	420	170	95	60	65	13	9	6.5	7	>250	4.9	4
PC95	3300±25%	350		290	350	530	480	410	380	85	70	60	55	9.5	7.5	6.5	6	>215	4.9	6

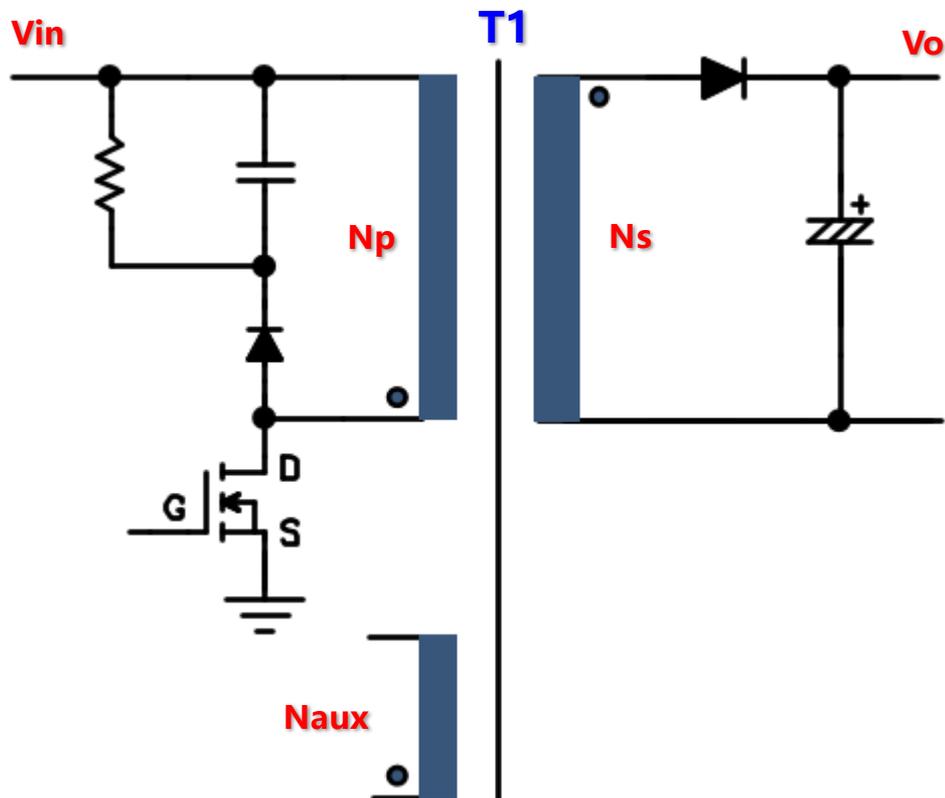
材质	初透磁率 $\mu_i$	居里温度 Tc (°C)	饱和磁通密度		剩余磁束密度 Br (mT)	饱和矫磁力 Hc (A/m)	磁心损耗			固有电阻 $\rho$ (Ω·m)	表观密度 dapp (kg/m <sup>3</sup> ) ×10 <sup>3</sup>	热膨胀系数 $\alpha$ (1/K) ×10 <sup>-6</sup>	导热系数 $\kappa$ (W/mK)	比热 Cp (J/kg·K)	抗折强度 $\delta b_3$ (N/m <sup>2</sup> ) ×10 <sup>7</sup>	杨氏系数 E (N/m <sup>2</sup> ) ×10 <sup>11</sup>	磁致伸缩常数 $\lambda_s$ ×10 <sup>-6</sup>
			Bs (mT)	H=1194A/m			Pcv (kW/m <sup>3</sup> ) B=200mT										
			23°C	100°C			23°C	23°C	90°C								
PE22	1800	>200	510	410	140	16	79	80	520	3.0	4.8	12	5	600	9	1.2	-0.6
PC40	2300	>200	500	380	125	15	64	70	420	6.5	4.8	12	5	600	9	1.2	-0.6
PE90	2200	>250	530	430	170	13	60	68	400	6.0	4.9	12	5	600	9	1.2	-0.6

## 反激电源变压器用磁性材料

Material			PC 95	PC 47	PC 44
$\mu i$		25°C	3300 +/- 25 %	2500 +/- 25 %	2400 +/- 25 %
Pcv kW/m <sup>3</sup> [B=200 mT]	100 kHz sine wave	25°C	350	600	600
		80°C	280	290	320
		100°C	290	250	300
		120°C	350	360	400
Bs mT [H=1194 A/m]		25°C	530	530	510
		60°C	480	480	450
		100°C	410	420	390
		120°C	380	390	350
Br mT		25°C	85	180	110
		60°C	70	100	70
		100°C	60	60	60
		120°C	55	60	55
Hc A/m		25°C	9.5	13.0	13.0
		60°C	7.5	9.0	9.0
		100°C	6.5	6.0	6.5
		120°C	6.0	7.0	6.0
Tc °Cmin			215	230	215
$\rho$ $\Omega \cdot m$		25°C	6.0	4.0	6.5
$\delta$ kg/m <sup>3</sup>			$4.9 \times 10^3$	$4.9 \times 10^3$	$4.8 \times 10^3$



变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)



通用原则

- 伏秒数相等原则 (磁平衡)
- T1 : 耦合式储能电感

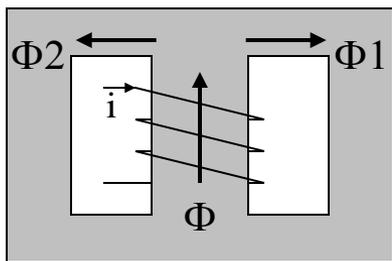
两种工作模式

- 固定频率 : CCM~DCM
- 准谐振模式 : CRM

工作模式选定法则

- 电气性能及功能
- 成本
- EMI
- 效率
- 尺寸最优化
- 设计习惯

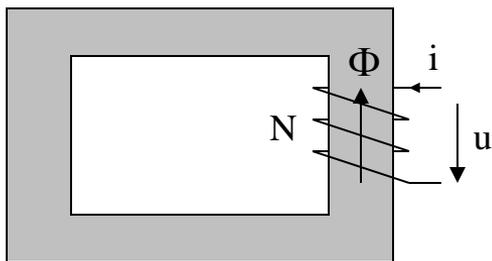
# 磁路基本定律



$$\sum \Phi = 0 \quad \text{对各个磁路节点}$$

磁通连续性定理

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$



$$u = \frac{d\psi}{dt} = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N \cdot A_e \cdot \frac{dB}{dt} \quad \text{对各个绕组}$$

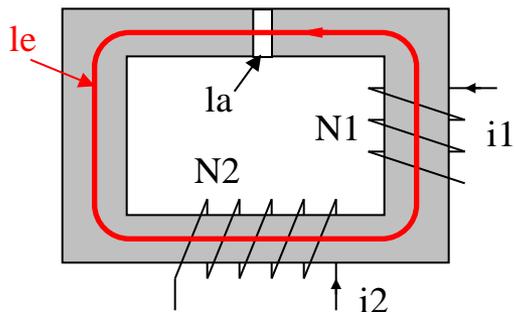
法拉第定律

$$\int_{t_0}^t u(t) dt = N \cdot A_e \cdot [B(t) - B(t_0)] = N \cdot A_e \cdot \Delta B |_{(t-t_0)}$$

$$\text{VoltSecond} = N \cdot A_e \cdot \Delta B$$



**伏秒相等原则**



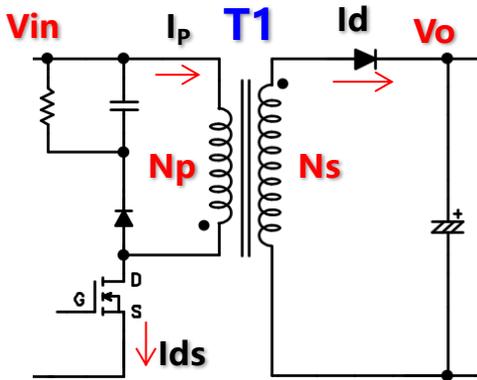
$$\sum i \cdot N = \sum U_m = \sum H \cdot l_e \quad \text{对各个磁回路}$$

安培环路定律

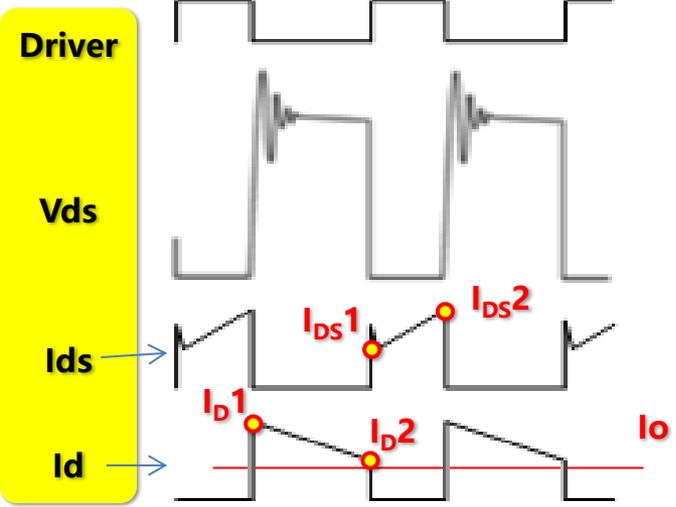
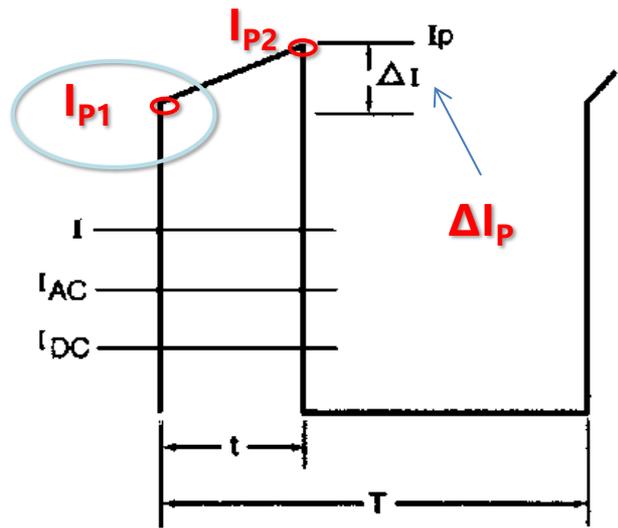
$$i_1 \cdot N_1 + i_2 \cdot N_2 = H_m \cdot l_m + H_a \cdot l_a$$

**摘自陈为老师讲义**

变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)



$$I_{rms}^2 = I_{DC}^2 + I_{AC}^2 \quad D = t/T$$



$$I_{DC} = (I_P - \Delta I/2)D$$

$$I_{AC} = (I_P - \Delta I/2)[D(1-D)]^{1/2}$$

$$I = (I_P - \Delta I/2)D^{1/2}$$

## 变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)

 Fixed Frequency :  $f_{sw}$ ,  $T$  ; Duty :  $D$ 

●  $V_{in} \times T_{on} = V_o \times T_{off}$  伏秒数相等

$$V_{in} \cdot D \cdot T = V_o \cdot (1-D) \cdot T$$

$$D = \frac{V_o}{V_{in} + V_o}$$

●  $P_o/\eta = \frac{1}{2}(I_{ds1}^2 - I_{ds2}^2) \times L_p \times f_{sw}$  储能原则

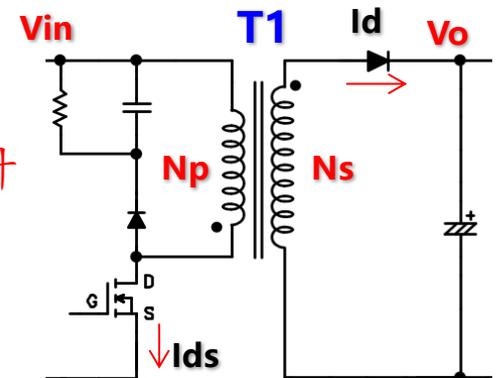
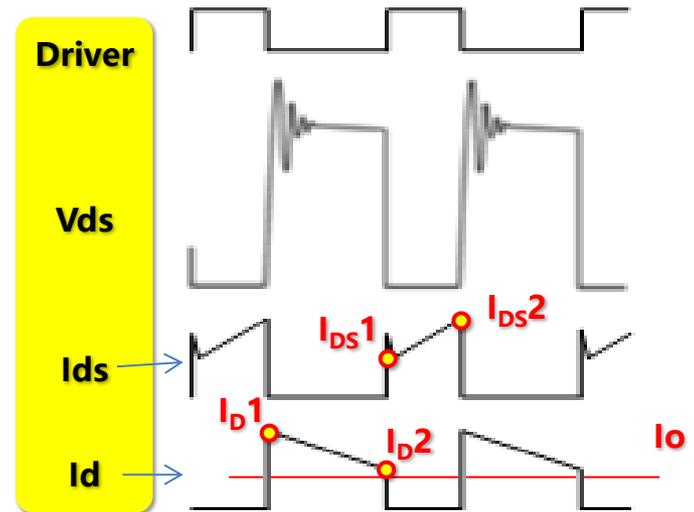
$$\frac{P_o}{\eta} = \frac{I_{ds1} + I_{ds2}}{2} \cdot \Delta I_{ds} \cdot L_p \cdot f_{sw} \rightarrow (I_{ds1} + I_{ds2}) \cdot \Delta I_{ds} \cdot f_{sw} = \frac{2P_o}{L_p \eta}$$

●  $P_o = V_o \times I_o$

●  $\Delta I_{ds} = V_{in}/L_p \times T_{on} \rightarrow = V_{in}/L_p \times D \times f_{sw}$  电感电流爬升

●  $I_o = (I_{d1} + I_{d2}) \times (1-D)/2$  梯形波平均值

$$\rightarrow = (I_{ds1} + I_{ds2}) \times (N_p/N_s) \times (1-D)/2$$



## 变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)

## 原副边变比 选取方法

$$V_C = \frac{V_O \cdot N_P}{N_S}$$

$$V_{ds} = V_{in} + V_C + \alpha(\text{spike})$$

$$N_P/N_S = f(V_{ds}, V_{in}, V_O, \alpha)$$

$$= \frac{V_{DS} - V_{in} - \alpha(\text{spike})}{V_O}$$

Example

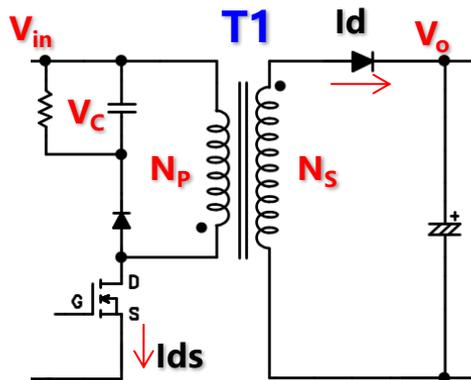
$$V_{ds} = 600 \times 90\% = 540V$$

$$\alpha(\text{spike}) = 50V$$

$$V_O = 24V$$

$$V_{inmax} = 264 \times \sqrt{2} = 373.3V$$

$$N_P/N_S = 4.8625$$



## 法拉第定理

$$E = N_P \cdot \frac{d\phi}{dt} = N_P \cdot A_e \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

$$E = L_P \frac{dI(L_P)}{dt} = L_P \frac{\Delta I_P}{\Delta t}$$

$$\Delta B = \frac{L_P \cdot \Delta I_P}{N_P \cdot A_e}$$

$$\frac{\Delta B}{B_1} = \frac{\Delta I_P}{I_{P1}}$$

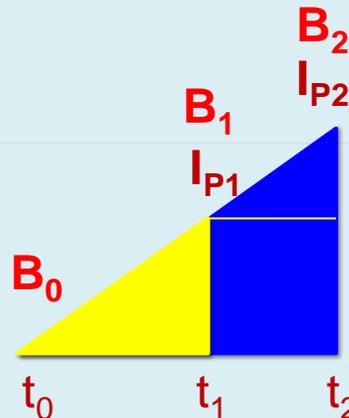
$$\frac{\Delta B}{B_2} = \frac{\Delta B}{B_{max}} = \frac{\Delta I_P}{I_{P2}}$$

## Np与磁芯的选取

Lp

## 电感量定义

$$= \mu_0 \cdot \mu_e \cdot \frac{A_e}{l_e} \cdot N_P^2 = AL \cdot N_P^2$$

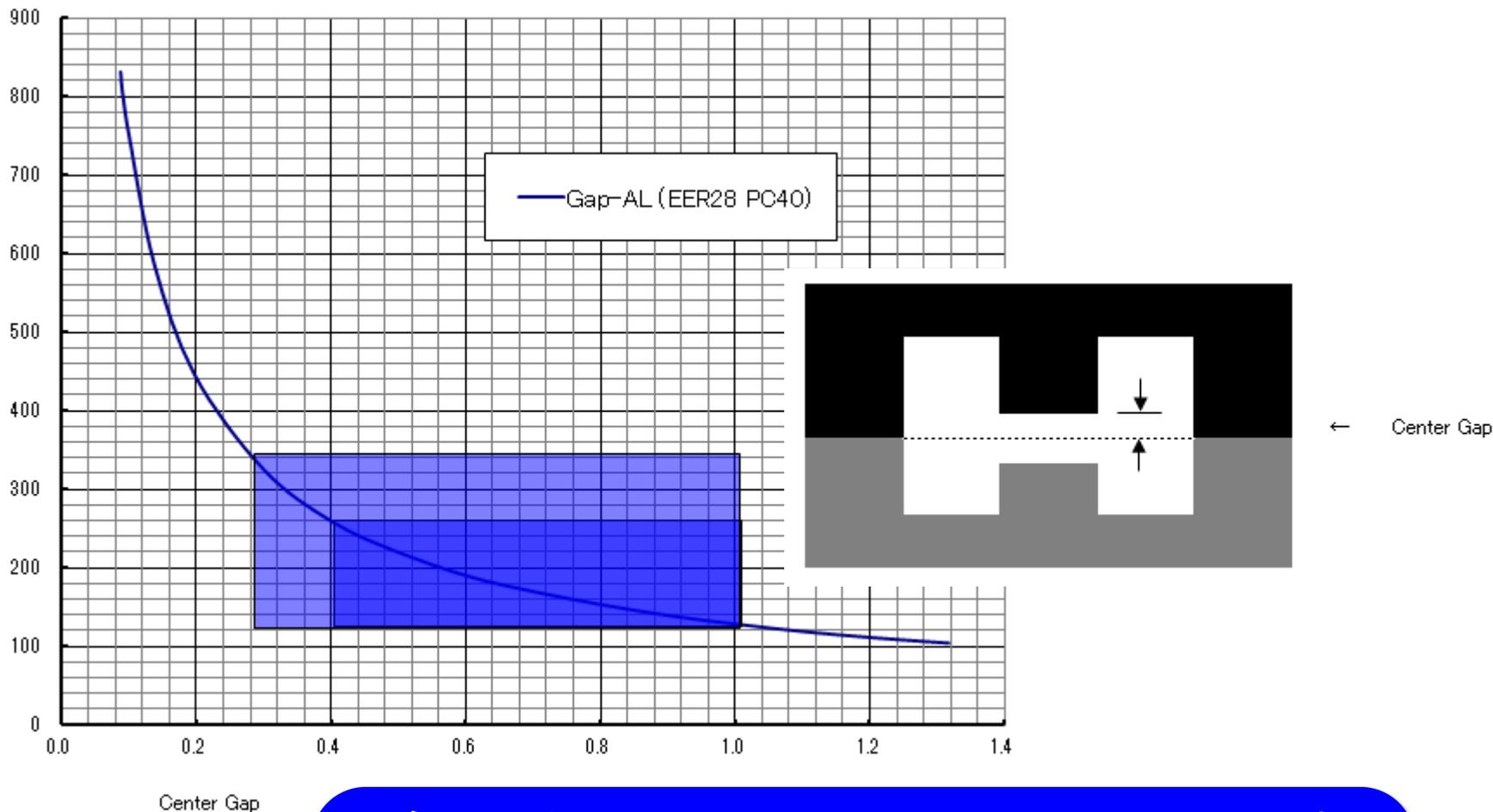


$$B_{max} \rightarrow 360mT$$

$$P_{core} = V \cdot P_{cv}$$

$$P_{cv} = K \cdot f_{sw}^\alpha \cdot \Delta B^\beta$$

变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)

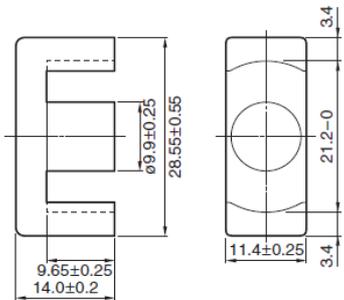


特定型号的磁芯：AL值vs气隙长度

## 变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)

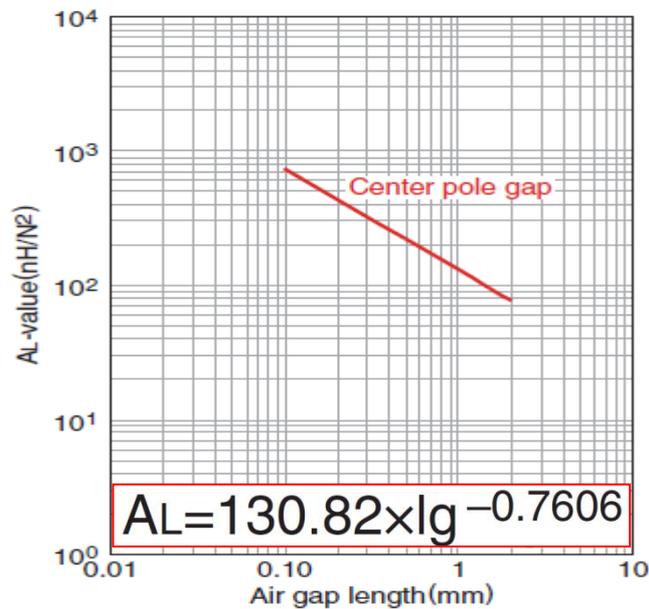
### PC95EER28-Z

### EER28-Z PC95磁芯为例-----应用讲解

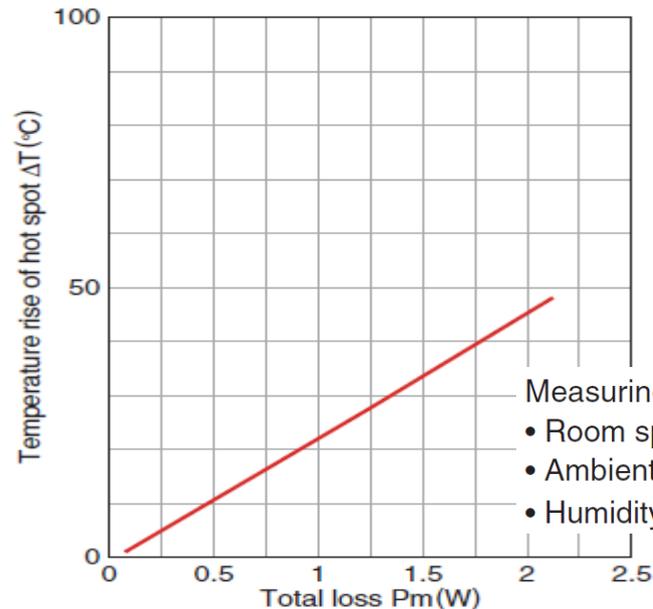


Effective parameter								Electrical characteristics					
Core factor	Effective magnetic path length $l_e$ (mm)	Effective cross-sectional area $A_e$ (mm <sup>2</sup> )	Effective core volume $V_e$ (mm <sup>3</sup> )	Cross-sectional center pole area $A_{cp}$ (mm <sup>2</sup> )	Minimum cross-sectional center pole area $A_{cp \text{ min.}}$ (mm <sup>2</sup> )	Cross-sectional winding area of core $A_{cw}$ (mm <sup>2</sup> )	Weight (g/set)	AL-value *		Core loss			
$C_1$ (mm <sup>-1</sup> )								(nH/N <sup>2</sup> ) 1kHz 0.5mA	100kHz 200mT	(W)max. 100kHz 200mT	25°C	80°C	120°C
0.78	64.0	82.1	5250	77.0	73.1	114	28	2870±25%	4000±25%	2.45	2.1	2.45	

AL-value vs. Air gap length (Typ.)



Temperature rise vs. Total loss (Typ.)



Measuring conditions

- Room space: approx. 400x300x 300cm
- Ambient temperature : 25°C
- Humidity: 45(%)RH.

## 变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)

### 设计总结

**电源规格要求**  
 $f_{sw}, V_o, I_o, V_{in}$

**假定目标-磁芯**  
 $V_e, A_e, A_{CW}, AL, P_{CV}, R_\theta, BB$

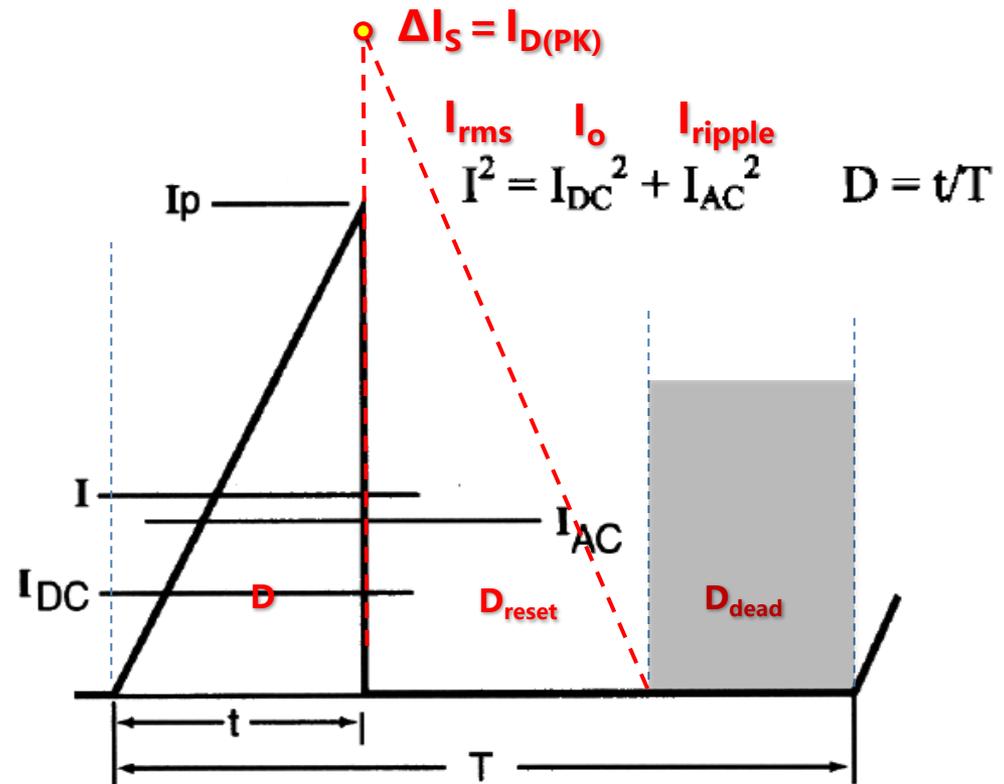
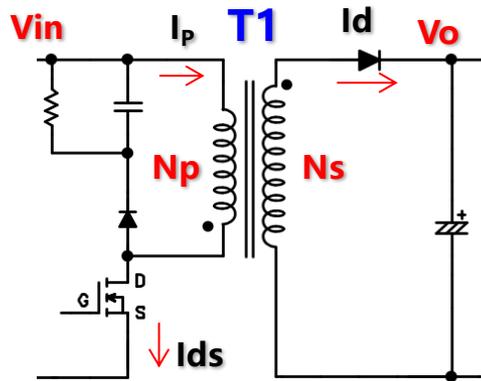
**假定目标-器件**  
 $V_{DSS}, V_{RM}$   
De-rating, Spike

**假定理想化条件**  
 $V_F, P_{Snubber}=0$   
 $\eta=0.88?$



- 设计限制条件**
- 1) 磁芯不饱和
  - 2) 变压器不过热
  - 3) 符合安规
  - 4) 其他个性化要求

变压器设计计算方法的掌握 (固定频率DCM)

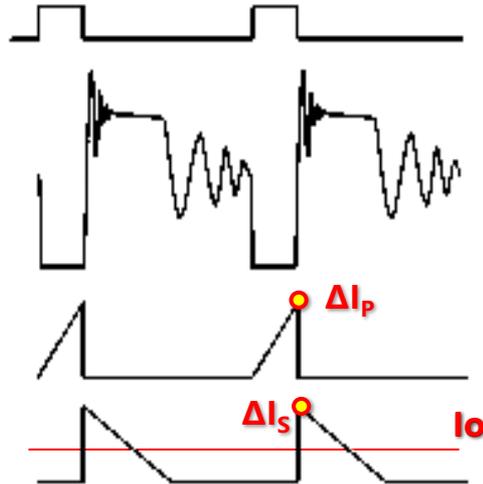


Driver

Vds

Ids

Id



$$I_{DC} = I_P D / 2$$

$$I_{AC} = I_P (D/3 - D^2/4)^{1/2}$$

$$I = I_P (D/3)^{1/2}$$

## 变压器设计计算方法的掌握 (固定频率DCM)

 Fixed Frequency :  $f_{sw}$ ,  $T$  ; Duty :  $D$ 

$$I_{DS1} = 0, I_{DS2} = \Delta I_P = I_{pk} \quad (\text{DCM, Fixed } f_{sw})$$

$$\bullet P_o/\eta = \frac{1}{2} \times \Delta I_P^2 \times L_P \times f_{sw} \quad \text{储能原则}$$

$$\rightarrow \Delta I_{ds} = \sqrt{2P_o/(L_P\eta f_{sw})}$$

$$\bullet L_S = L_P \times (N_S/N_P)^2 \quad \text{变压器原理}$$

$$\bullet \Delta I_P = V_{in}/L_P \times T_{on} \quad \text{电感充电上升} \quad \left. \begin{array}{l} D = ? \\ D_{reset} = ? \end{array} \right\}$$

$$\bullet \Delta I_S = V_O/L_S \times T_{reset} \quad \text{付边续流下降}$$

$$(T_{on} = D/f_{sw}, T_{reset} = D_{reset} \times T)$$

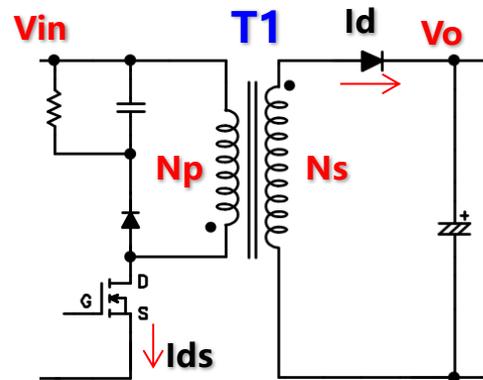
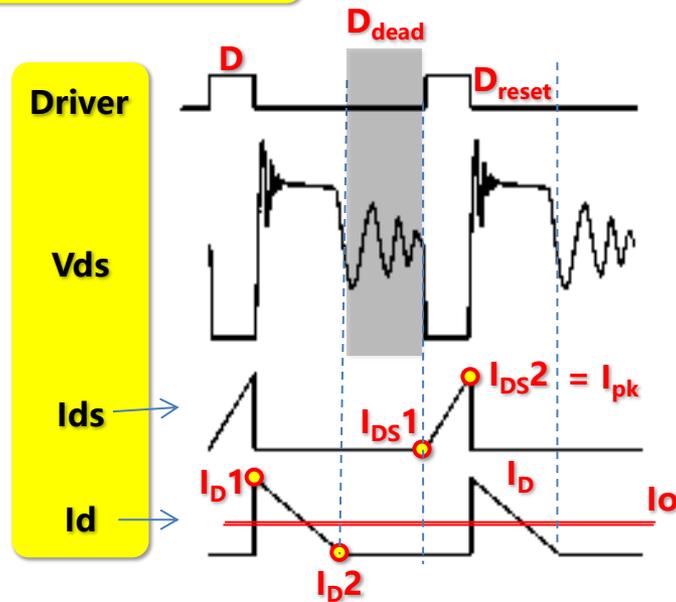
$$\bullet I_{PAC} = \Delta I_P \times (D/3 - D^2/4)^{0.5}$$

$$I_{PRMS} = \Delta I_P \times (D/3)^{0.5}$$

$$I_{SAC} = \Delta I_S \times (D_{reset}/3 - D_{reset}^2/4)^{0.5}$$

$$I_{SRMS} = \Delta I_P \times (D_{reset}/3)^{0.5}$$

三角波几何计算



## 变压器设计计算方法的掌握 (固定频率DCM)

## 原副边变比 选取方法

$$V_C = \frac{V_O \cdot N_P}{N_S}$$

$$V_{ds} = V_{in} + V_C + \alpha(\text{spike})$$

$$N_P/N_S = f(V_{ds}, V_{in}, V_O, \alpha)$$

$$= \frac{V_{DS} - V_{in} - \alpha(\text{spike})}{V_O}$$

Example

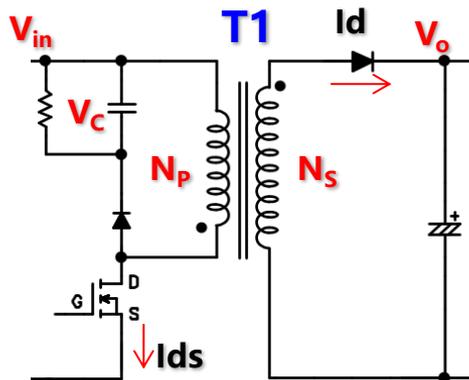
$$V_{ds} = 600 \times 90\% = 540V$$

$$\alpha(\text{spike}) = 50V$$

$$V_O = 24V$$

$$V_{inmax} = 264 \times \sqrt{2} = 373.3V$$

$$N_P/N_S = 4.8625$$



## Np与磁芯的选取

Lp

## 电感量定义

$$= \mu_0 \cdot \mu_e \cdot A_e / l_e \cdot N_P^2 = AL \cdot N_P^2$$

## 法拉第定理

$$E = N_P \cdot d\phi / dt = N_P \cdot A_e \cdot \Delta B / \Delta t$$

$$E = L_P \cdot di(L_P) / dt = L_P \Delta I_P / \Delta t$$

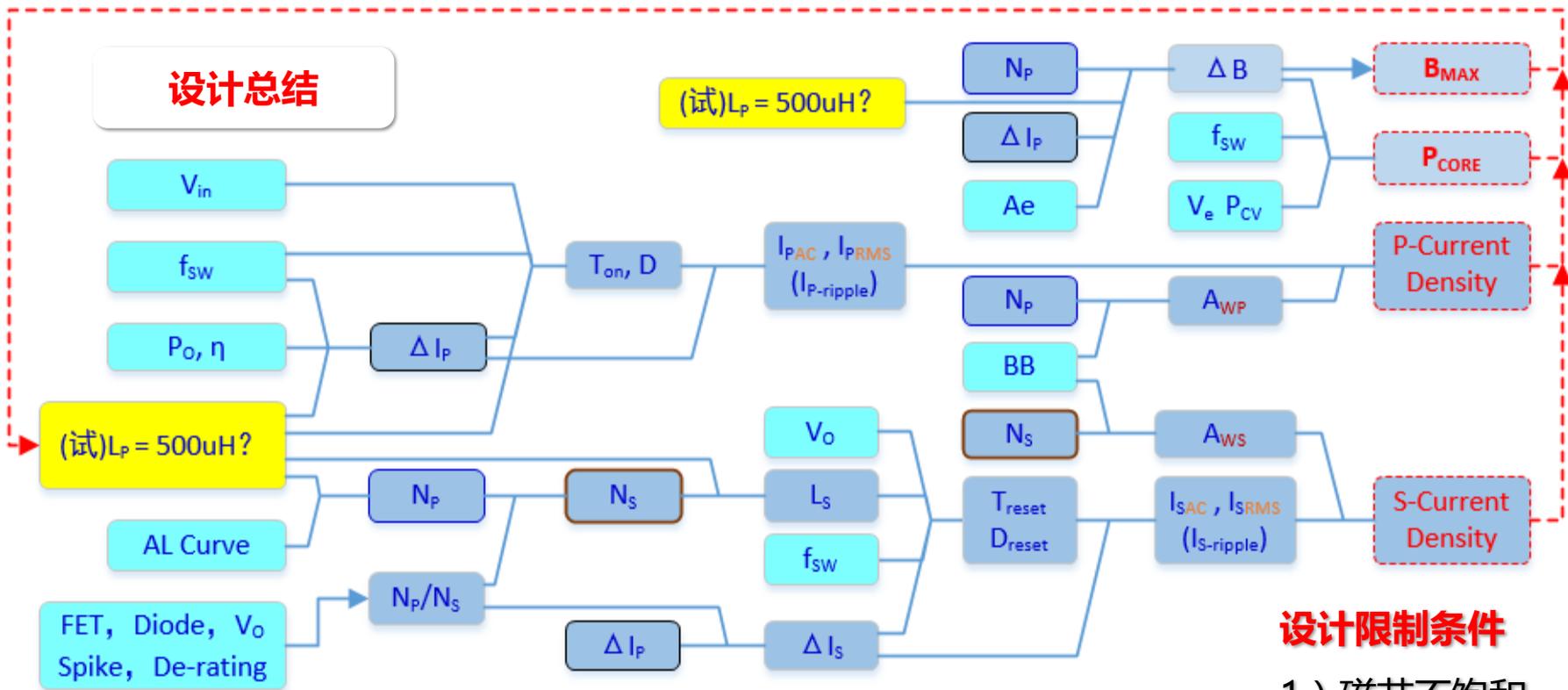
$$\Delta B = \frac{L_P \cdot \Delta I_P}{N_P \cdot A_e}$$

$$B_{max} < 360mT$$

$$P_{core} = V_e \cdot P_{cv}$$

$$P_{cv} = K \cdot f_{sw}^\alpha \cdot \Delta B^\beta$$

## 变压器设计计算方法的掌握 (固定频率DCM)



### 设计限制条件

- 1) 磁芯不饱和
- 2) 变压器不过热
- 3) 符合安规
- 4) 其他个性化要求

<b>电源规格要求</b>	<b>假定目标-磁芯</b>	<b>假定目标-器件</b>	<b>假定理想化条件</b>
$f_{sw}, V_o, I_o, V_{in}$	$V_e, A_e, A_{CW}, AL, P_{CV}, R_\theta, BB$	$V_{DSS}, V_{RM}$ De-rating, Spike	$V_F, P_{S\text{nubber}}=0$ $\eta=0.88?$

## 变压器设计计算方法的掌握 (CRM)

●  $P_o/\eta = \frac{1}{2} \times \Delta I_p^2 \times L_p \times f_{sw}$  储能原则

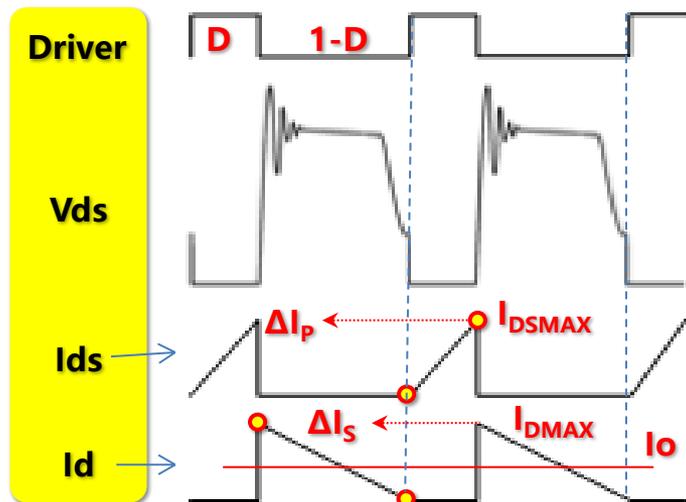
$\Delta I_{ds} = \sqrt{2P_o / (L_p \eta f_{sw})}$

●  $L_s = L_p \times (N_s/N_p)^2$  变压器原理

●  $\Delta I_p = V_{in}/L_p \times T_{on}$  电感充电上升 }  $T_{on}=DT$   
 ●  $\Delta I_s = V_o/L_s \times T_{off}$  付边续流下降 }  $T_{off}=(1-D)T$

●  $V_{in} \times T_{on} = V_o \times T_{off}$  伏秒数相等

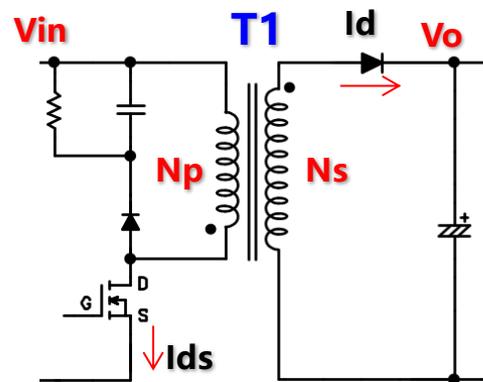
$V_{in} \cdot D \cdot T = V_o \cdot (1-D) \cdot T$



$D = \frac{V_o}{V_{in} + V_o}$       $T = \frac{2P_o}{\eta} \cdot \frac{L_p}{(V_{in}D)^2} = 1 / f_{sw}$

●  $I_{pAC} = \Delta I_p \times (D/3 - D^2/4)^{0.5}$   
 ●  $I_{pRMS} = \Delta I_p \times (D/3)^{0.5}$   
 ●  $I_{sAC} = \Delta I_s \times [(1-D)/3 - (1-D)^2/4]^{0.5}$   
 ●  $I_{sRMS} = \Delta I_s \times [(1-D)/3]^{0.5}$

} 三角波几何计算



## 变压器设计计算方法的掌握 (CRM)

### 原副边变比 选取方法

$$V_C = \frac{V_O \cdot N_P}{N_S}$$

$$V_{ds} = V_{in} + V_C + \alpha(\text{spike})$$

$$\boxed{N_P/N_S} = f(V_{ds}, V_{in}, V_O, \alpha)$$

$$= \frac{V_{DS} - V_{in} - \alpha(\text{spike})}{V_O}$$

Example

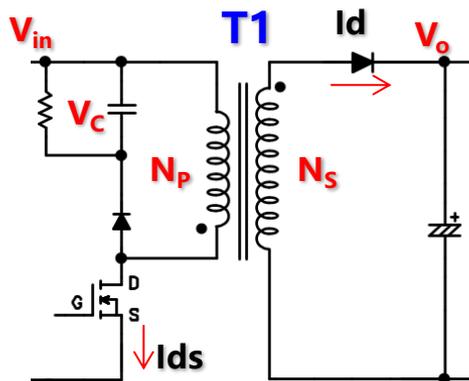
$$V_{ds} = 600 \times 90\% = 540V$$

$$\alpha(\text{spike}) = 50V$$

$$V_O = 24V$$

$$V_{inmax} = 264 \times \sqrt{2} = 373.3V$$

$$N_P/N_S = 4.8625$$



### Np与磁芯的选取

**L<sub>P</sub>**

**电感量定义**

$$= \mu_0 \cdot \mu_e \cdot A_e / l_e \cdot N_P^2 = AL \cdot \boxed{N_P^2}$$

**法拉第定理**

$$E = N_P \cdot \frac{d\phi}{dt} = N_P \cdot A_e \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

$$E = L_P \frac{dI(L_P)}{dt} = L_P \frac{\Delta I_P}{\Delta t}$$

$$\boxed{\Delta B} = \frac{L_P \cdot \Delta I_P}{N_P \cdot A_e}$$

**B<sub>max</sub> < 360mT**

**P<sub>core</sub> = V<sub>e</sub> • P<sub>CV</sub>**

$$P_{CV} = K \cdot \boxed{f_{SW}}^\alpha \cdot \boxed{\Delta B}^\beta$$

## 变压器设计计算方法的掌握 (CRM)

**设计总结**

**电源规格要求**  
 $V_o, I_o, V_{in}$

**假定目标-磁芯**  
 $V_e, A_e, A_{CW}, AL, P_{CV}, R_{\theta}, BB$

**假定目标-器件**  
 $V_{DSS}, V_{RM}$   
 De-rating, Spike

**假定理想化条件**  
 $V_F, P_{Snubber}=0, \eta=0.88?$



**设计限制条件**

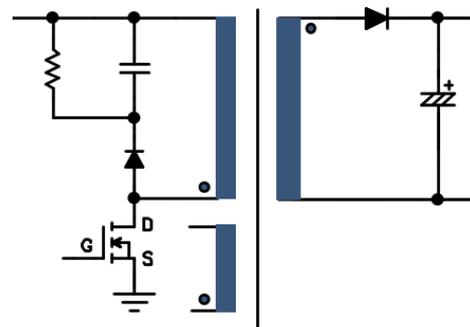
- 1) 磁芯不饱和
- 2) 变压器不过热
- 3) 符合安规
- 4) 其他个性化要求

## 第一讲：反激开关电源基本原理和电路拓扑

- 1) 小功率AC/DC高频开关电源拓扑
- 2) 反激型AC/DC开关电源的基本工作原理
- 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项
  - a) 固定频率控制IC及其工作机理
  - b) 准谐振控制IC及其工作机理

## 第二讲：反激电源变压器的设计计算

- 1) 反激电源变压器用磁性材料
- 2) 变压器设计计算方法的掌握
  - a) CCM, DCM工作模式
  - b) CRM工作模式
  - c) 设计计算实例



## 第三讲：反激电源变压器设计软件应用说明

- 1) Flyback Transformer Wizard V1.0的功能介绍
- 2) Flyback Transformer Wizard V1.0的使用方法
- 3) 设计实例
- 4) 主电路元件选型方法及高品质设计评价技术初步

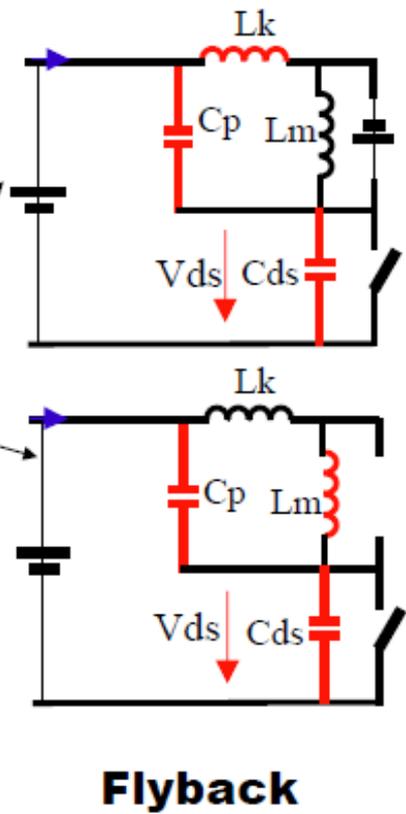
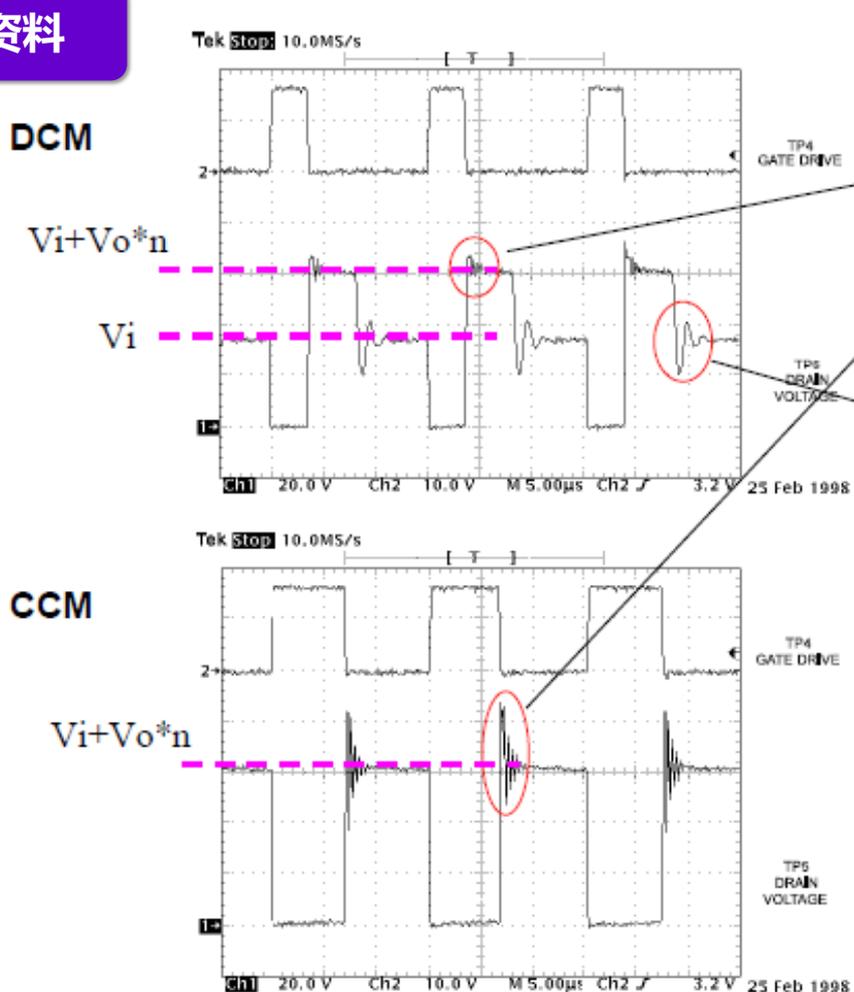
## 第四讲：变压器绕线工艺及设计书的作成

- 1) 反激电源变压器的排线及安规
- 2) 高频变压器设计文件的项目定义
- 3) 高频变压器设计文件的作成



# 影响电压/电流应力的分布参数

陈为老师资料



## Flyback Transformer Wizard V1.0的功能介绍

### 现场计算演示

计算软件 [21dianyuan.com](http://21dianyuan.com) 提供免费下载

Frequency (KHz)	Output Power		Rectify Diode			Core Information					Winding Turns		
	Vo	Io	VF	VR	Sparkle	Material	Size	Ae(mm <sup>2</sup> )	Ve(mm <sup>3</sup> )	Rth(°C/W)	Np	Ns	Lp
70	24.0V	1.46A	0.65V	150.0V	20%	PC40	EER28	82.1	5250	22.9	39T	9T	500uH

Input Voltage Range					Device Derating Ratio		Transformer Turns Trying Info.						
CL Point	Minimum	Rating	Max.Rating	Maximum	FET(600V)	Diode	Turn Ratio	Np	15T	16T	17T	18T	19T
HoldupTime	85Vac	100Vac	240Vac	264Vac	92%	85%	Np: Ns	Ns	4T	4T	4T	4T	4T
50V	100V	120V	339V	373V	552.2V	127.5V	4.333 : 1	Err.Range	13%	8%	2%	4%	10%

DC Input	Duty	T <sub>on</sub>	T <sub>Diode_on</sub>	Working Conditions in Core			Bobbin	FER28-PB20		Others				
				Bmax	ΔB	Ploss_Core		MarginTape	Pin Side	5.5mm	Period	Ls	AL (nH/N <sup>2</sup> )	Gap (mm)
50V	68.12%	9.73us	4.55us	0.241T	0.152T	0.11W	Wind.Space	8.0 mm						
100V	50.16%	7.17us	6.71us	0.224T	0.224T	0.30W	Windings	Total Lays	Wire Para.	Occupation	Max. Φ			
120V	41.80%	5.97us	6.71us	0.224T	0.224T	0.30W	P_Wire	6 Layers	1 para.	1.0 Np	φ 0.200	→	0.16U-2	
339V	14.78%	2.11us	6.71us	0.224T	0.224T	0.30W	S_Wire	2 Layers	1 para.	1.0 Np	φ 0.800	→	0.65U-2	
373V	13.44%	1.92us	6.71us	0.224T	0.224T	0.30W								

DC Input	Working Condition On Primary Coil								Working Condition On Secondary Coil					
	I1	I2	ΔI	Idc	Iac	Irms	Cur.Density	I1	I2	ΔI	Iac(Ripple)	Irms	Cur.Density	
50V	0.57A	1.54A	0.97A	0.72A	0.54A	0.90A	7.47A/mm <sup>2</sup>	6.68A	2.47A	4.22A	2.24A	2.67A	4.03A/mm <sup>2</sup>	
100V	0.00A	1.43A	1.43A	0.36A	0.46A	0.59A	4.86A/mm <sup>2</sup>	6.21A	0.00A	6.21A	1.98A	2.46A	3.70A/mm <sup>2</sup>	
120V	0.00A	1.43A	1.43A	0.30A	0.44A	0.54A	4.43A/mm <sup>2</sup>	6.21A	0.00A	6.21A	1.98A	2.46A	3.70A/mm <sup>2</sup>	
339V	0.00A	1.43A	1.43A	0.11A	0.30A	0.32A	2.64A/mm <sup>2</sup>	6.21A	0.00A	6.21A	1.98A	2.46A	3.70A/mm <sup>2</sup>	
373V	0.00A	1.43A	1.43A	0.10A	0.29A	0.30A	2.51A/mm <sup>2</sup>	6.21A	0.00A	6.21A	1.98A	2.46A	3.70A/mm <sup>2</sup>	

声明：本计算软件可供学习者免费使用，版权为著者邵革良所有，禁止任何形式商业传播

## Flyback Transformer Wizard V1.1的使用方法 [设计实例]

### 基本要求

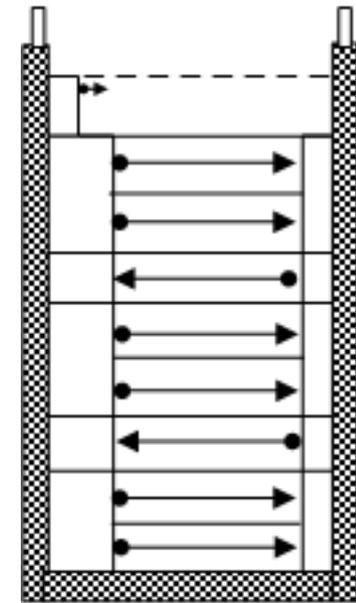
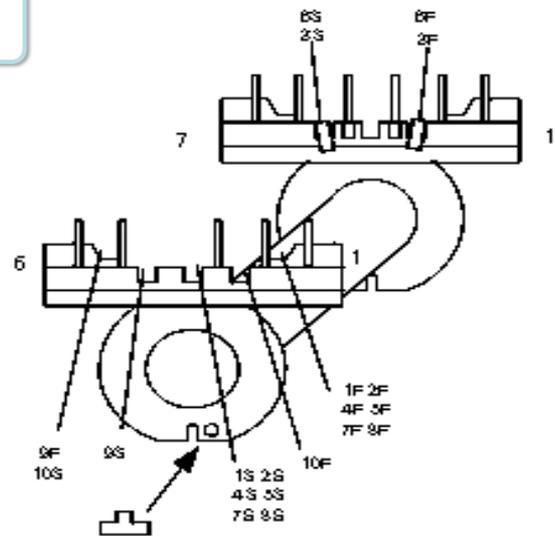
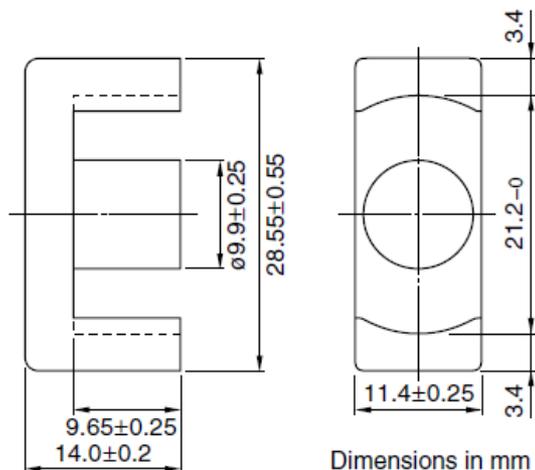
## 实例：24V/35W 70KHz固定频率设计

**输入电压：85~264Vac**  
**输出电压：24V±15% 35Wmax**  
**工作频率：70KHz**  
**MOS耐压：600V**  
**整流管耐压：150V**  
**电源效率：88% @100~240Vac**  
**铁氧体磁芯：EER28 PC40**  
**安规距离：5.5mm**

C1	mm <sup>-1</sup>	0.78
ℓ <sub>e</sub>	mm	64.0
A <sub>e</sub>	mm <sup>2</sup>	82.1
V <sub>e</sub>	mm <sup>3</sup>	5250
A <sub>cp</sub>	mm <sup>2</sup>	77.0
A <sub>cp min.</sub>	mm <sup>2</sup>	73.1
A <sub>cw</sub>	mm <sup>2</sup>	114
	g	28



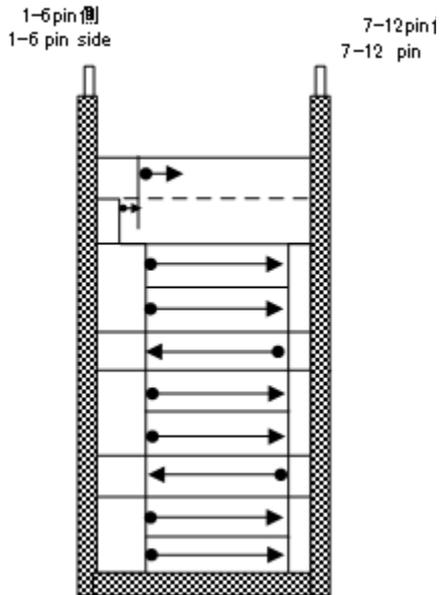
Microsoft Excel  
7-2003 Worksheet



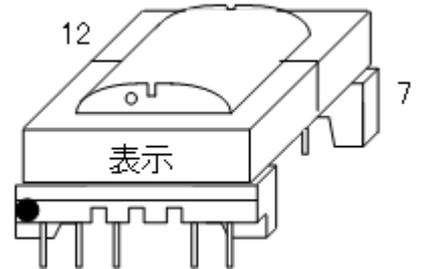
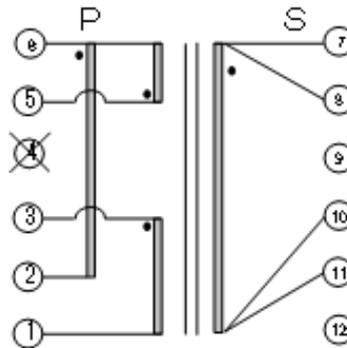
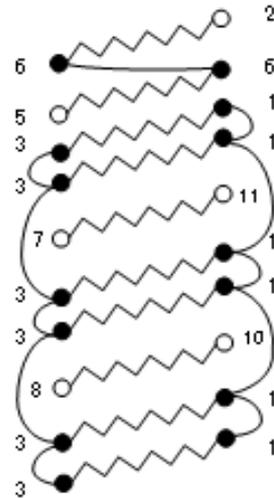
## Flyback Transformer Wizard V1.0的使用方法 [设计实例]

### 实例：24V/35W 70KHz固定频率设计

#### 变压器绕制



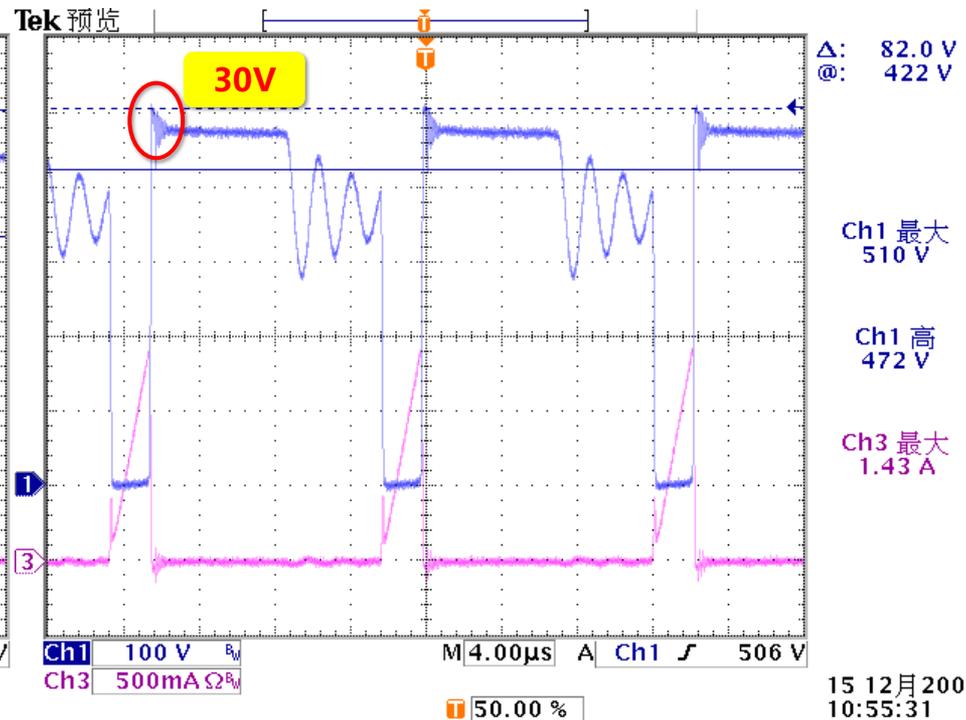
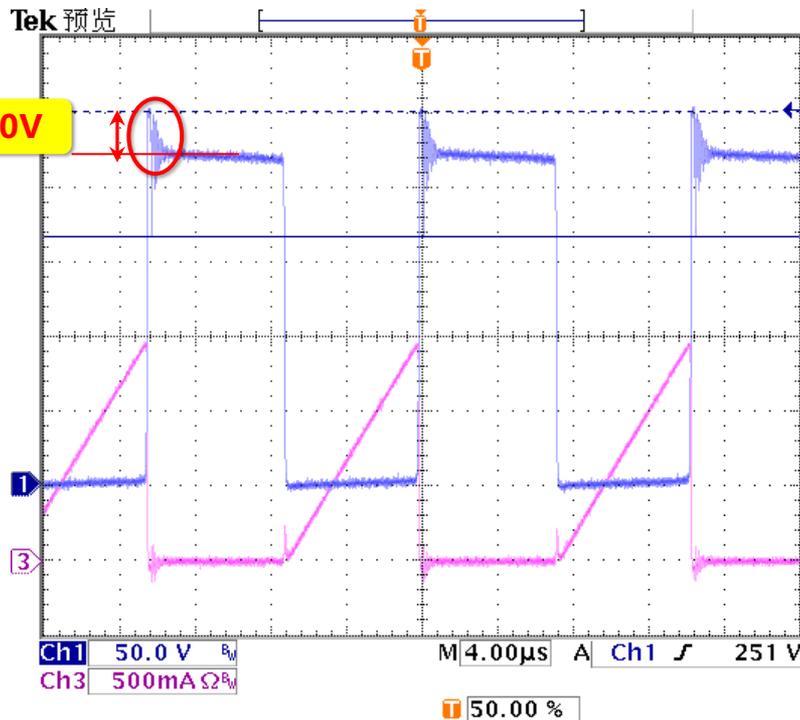
(16.5)025M3GRN	6		0.1U-2
NONE	11		0.1U-2
(16.5)025M1	1	39	0.16U-2
(10)025M1	1	39	0.16U-2
(16.5)025M3	1	9	0.65U-2
(16.5)025M3	1	39	0.16U-2
(10)025M1	1	39	0.16U-2
(16.5)025M3	1	9	0.65U-2
(16.5)025M3	1	39	0.16U-2
(10)025M1	1	39	0.16U-2
NONE	39		0.16U-2



## Flyback Transformer Wizard V1.0的使用方法 [设计实例]

实际工作波形

### 实例：24V/35W 70KHz固定频率设计



85Vac 24V/35W满载

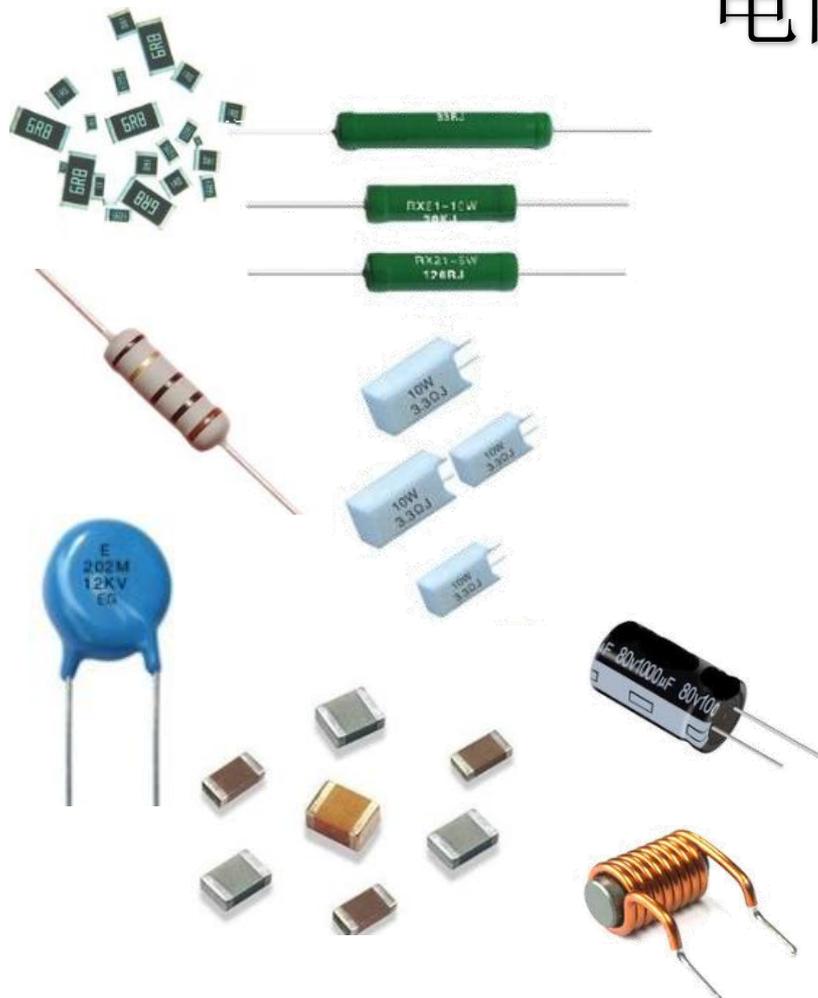
264Vac 24V/35W满载

## 主电路元件选型方法

常用电子元器件

# 电阻、电容、电感

材料特性与De-rating



品名	記号	V	A	W	°C
Transformer	T	----	----	----	0.9
Inductor	L	----	----	----	0.9
Diode	D	0.8	0.8	0.8	0.8
Zener	DZ	----	----	0.8	0.8
IC	IC	0.8	0.8	0.8	0.8
电解C	A	0.95	0.9	----	0.9
陶瓷C	C	0.8	----	----	0.95
X电容	X	1.09	----	----	0.95
电阻	R	0.8	----	0.5	0.8
热敏电阻	TH	----	0.8	----	0.9
压敏电阻	VS	0.9	----	----	0.9
连接器	CN	0.8	0.8	----	0.9

## 主电路元件选型方法

### 半导体元件

### 降额使用法则DERATING

名称	项目	记号	参照内容	降额率
晶体管类分立元件 三极管、MOSFET、IGBT	结温	Tj, Tch	额定值	0.8
	功率	Pd	额定值	0.9
	电压	VDS, VGS, VDG	额定值	0.8
	电流 (DC)	Ids, Ic, Ib	额定值	0.8
	电流 (Pluse)	Ids, Ic, Ib	额定值	0.8
	电流直流增幅率	hFE, CTR	最小值	0.9
内置电阻型晶体管	结温	Tj	额定值	0.8
	功率	Pd	额定值	0.8
	电源电压	Vcc	额定值	0.8
	输入电压	Vi	额定值	0.8
	OUT电子电流	Tc (DC)	额定值	0.8
集成电路	IC	Tc	附表1	附表1
可控硅类	结温	Tj	额定值	0.9
	导通电流有效值	Ion	额定值	0.8
	可重复峰值电压	Vpk	额定值	0.8
二极管类	结温	Tj	额定值	0.9
	功率	Pd	额定值	0.9
	电压 (反向峰值)	VR	额定值	0.9
稳压二极管类	结温	Tj	额定值	0.9
	功率	Pd	额定值	0.9
光电耦合器 (发光侧)	结温	Tj	额定值	0.8
	功率	Pd	额定值	0.9
光电耦合器 (感光侧)	按照输出类型的不同分别适用相关要求			
	传输比	CTR	最小值	0.8

## 开关电源的设计与测试要点

## Quality Cost Delivery

### 产品开发流程

- 设计构想
- 方案设计
- 方案评审
- 样机制作
- 制造审查
- 调试改进
- 设计验证**
- 首批试产
- PFMEA
- 品质审查
- 量产判定
- 首批量产
- 出货判定

### 设计验证 → 验证什么？

#### 运行条件

运行条件  
温度范围  
电压范围  
压力范围  
湿度范围  
振动范围  
功率范围  
公差范围  
安装方式  
.....

#### 异常状态

短路  
开路  
过载  
耐热  
耐寒  
冲击  
撞击  
误动作  
浪涌  
过流  
过压  
雷击  
.....

#### 可靠性

环境试验  
工作寿命  
MTBF  
失效率  
降额比率  
.....

#### 安全性

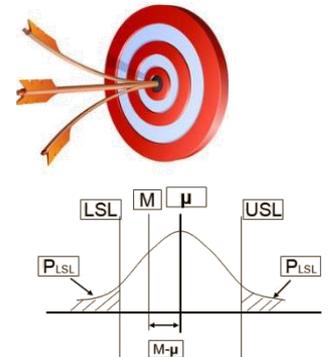
绝缘  
耐压  
过热  
DFMEA  
PFMEA  
.....

#### 环保性

Lead Free  
RoHS  
REACH  
噪音  
电磁兼容  
辐射.....

#### 批量性

cpk  
.....



## 开关电源的设计与测试要点

## Quality Cost Delivery

### 产品开发流程

设计构想

方案设计

方案评审

样机制作

制造审查

调试改进

设计验证

首批试产

PFMEA

品质审查

量产判定

首批量产

出货判定

### FMEA的重要性

### Failure Mode and Effects Analysis

失效模式与影响分析

FMEA = FMA (故障模式分析) + FEA (故障影响分析)

对产品的各种可能风险进行评价、分析、改善  
→ 消除风险、减小风险

DFMEA 设计FMEA

PFMEA 过程FMEA

EFMEA 设备FMEA

SFMEA 系统FMEA

## 开关电源的设计与测试要点

## Quality Cost Delivery

No.	評価項目	
1	静态电源调整率	重要項目 (黄颜色部分) 最小限度重要項目
2	静态负载调整率	最小限度重要項目
3	纹波噪音	
4	环境温度输出漂移	
5	稳压精度	
6	频率影响	
7	上电短时间漂移	
8	长时间漂移	
9	系统稳定性 (增益裕量)	
10	系统稳定性 (相角裕量)	
11	输入动态响应	
12	负载动态响应	最小限度重要項目
13	输出电压波形 (延迟时间)	
14	输出电压波形 (爬升时间)	最小限度重要項目
15	输出电压波形 (起动时间)	
16	输出电压波形 (保持时间)	
17	输出电压波形 (下降时间)	
18	输出电压可调范围	
19	输入浪涌电流	
20	输入漏电流	
21	输入电流	
22	输入功率	
23	效率	
24	功率因数 (高次谐波)	
25	过电流保护	最小限度重要項目
26	过电压保护	最小限度重要項目
27	EMI传导	
28	EMI辐射	
29	最低动作电压	
30	输出开始、输出停止电压	

31	容性负载起动试验	
32	绝缘阻抗	
33	耐压试验	
34	IEC雷击试验	
35	JEC雷击试验	
36	电源线脉冲群干扰	
37	信号线脉冲群干扰	
38	静电干扰试验 (误动作)	
39	静电干扰试验 (损坏)	
40	静电干扰试验 (EMC)	
41	使用耐热	最小限度重要項目
42	使用耐寒	
43	热起动	
44	冷起动	
45	极限耐热	
46	保管耐热	
47	保管耐寒	
48	温湿度循环	
49	流通过程的温湿度 (保管)	
50	MTBF	
51	串联运行	
52	串联运行误使用动作评价	
53	质量	
54	重要波形观测	最小限度重要項目
55	误用安全试验	
56	异常状态测试	
57	接地电阻测试	
58	温升测试	
59	使用寿命计算 (预期寿命)	最小限度重要項目
60	使用寿命计算 (保证寿命)	

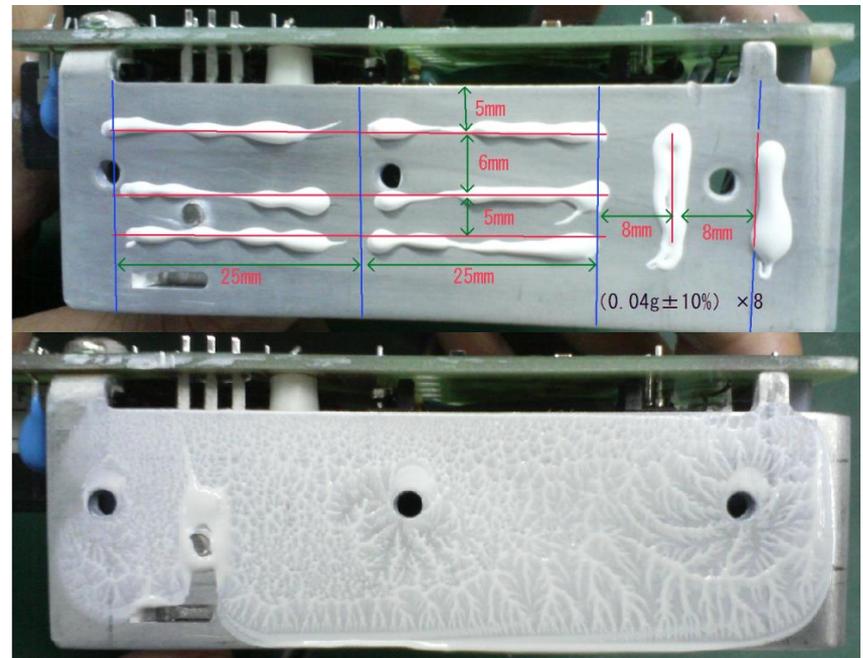
## 开关电源的设计与测试要点

## Quality Cost Delivery

61	过负荷安全试验	
62	输出短路	最小限度重要项目
63	散热构造仕样	
64	元件的降额使用率	最小限度重要项目
65	耐振动 (10~55Hz)	
66	耐振动 (10~150Hz 0.75mm/100m/s <sup>2</sup> )	
67	耐振动 (0.35mm/50m/s <sup>2</sup> 10扫描)	
68	耐冲击 (误动作冲击)	
69	耐冲击 (牢固性冲击)	
70	包装跌落	
71	无包装跌落	
72	接线端子强度试验	
73	端子盖开合强度仕样	
74	安装强度试验	
75	共模干扰试验	
76	噪音测试	
77	强电场干扰试验 (EMC)	
78	强磁场感染试验	
79	断电开关机试验	最小限度重要项目
80	快速脉冲群干扰试验 (EMC)	
81	传导注入干扰试验 (EMC)	
82	输出回路传导干扰	
83	电压跌落试验	最小限度重要项目
84	不连续电压冲击	最小限度重要项目
85	热冲击试验	
86	线路板焊锡耐久性试验 (1000次)	
87	防锈能力	
88	高温通电寿命	
89	并联误动作的评价	
90	电容器残留能量的限制	

91	长期低电压试验
92	螺丝端子扭力强度试验
93	异常电压输入试验
94	输入电压相位开关机试验
95	逆变器噪音干扰试验
96	过负荷开关机试验
97	接触性保护限度试验

### 电源设计与验证技术

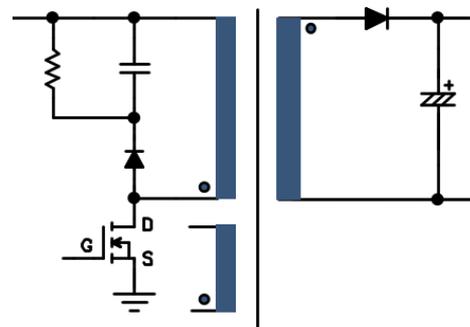


## 第一讲：反激开关电源基本原理和电路拓扑

- 1) 小功率AC/DC高频开关电源拓扑
- 2) 反激型AC/DC开关电源的基本工作原理
- 3) 反激型开关电源典型控制IC及其设计注意事项
  - a) 固定频率控制IC及其工作机理
  - b) 准谐振控制IC及其工作机理

## 第二讲：反激电源变压器的设计计算

- 1) 反激电源变压器用磁性材料
- 2) 变压器设计计算方法的掌握
  - a) CCM, DCM工作模式
  - b) CRM工作模式
  - c) 设计计算实例



## 第三讲：反激电源变压器设计软件应用说明

- 1) Flyback Transformer Wizard V1.0的功能介绍
- 2) Flyback Transformer Wizard V1.0的使用方法
- 3) 设计实例
- 4) 主电路元件选型方法及高品质设计评价技术初步

## 第四讲：变压器绕线工艺及设计书的作成

- 1) 反激电源变压器的排线及安规
- 2) 高频变压器设计文件的项目定义
- 3) 高频变压器设计文件的作成

## 反激电源变压器的排线及安规

安规距离确定

### 空间距离 Clearances

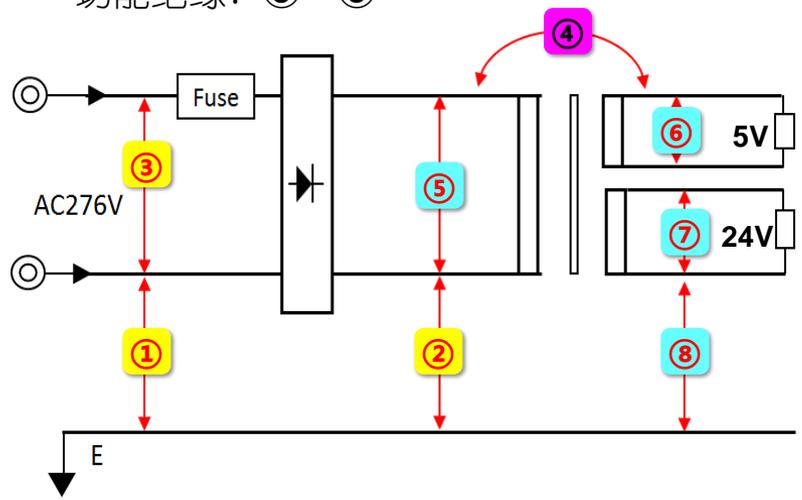
- 1) 污染度  
1, 2, 3 Class
- 2) 过电压类型  
设备CLASS I ~ IV
- 3) 基础绝缘: ①~③  
强化绝缘: ④  
功能绝缘: ⑤~⑧

	额定脉冲电压 kV			
	过电压类型			
类型	I	II	III	IV
用途分类	绝缘变压器	IT设备	固定设备	进线口
电压有效值				
50	0.33	0.5	0.8	1.5
100	0.5	0.8	1.5	2.5
150	0.8	1.5	2.5	4
300	1.5	2.5	4	6
600	2.5	4	6	8

### 沿面距离 Creepage Distances

Material Group I 600 = CTI (comparative tracking index)  
 Material Group II 400 = CTI < 600  
 Material Group IIIa 175 = CTI < 400  
 Material Group IIIb 100 = CTI < 175

CTI	I	II	IIIa	IIIb
600	600	400~600	175~400	100~175



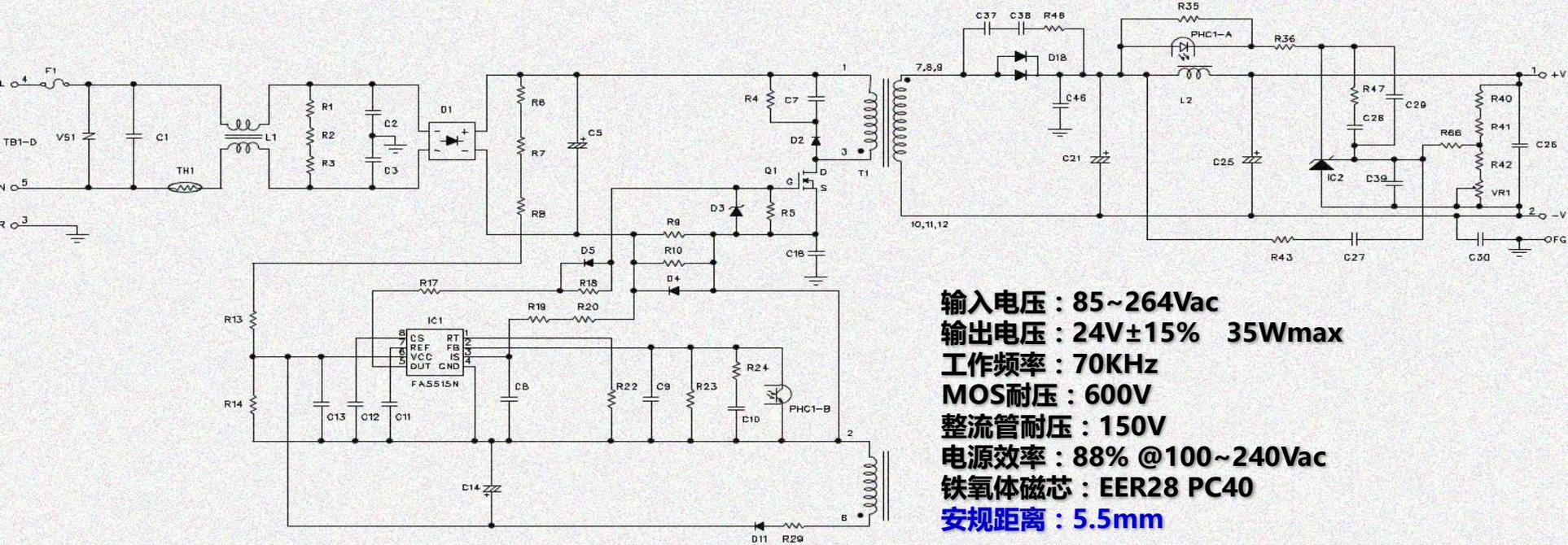
脉冲电压 KV	污染度II
	空间距离mm
0.33 *	0.2
0.4	
0.5 *	
0.6	
0.8 *	
1.0	
1.2	0.25
1.5 *	0.5
2	1
2.5 *	1.5
3	2
4 *	3
5	4
6 *	5.5
8 *	8
10	11

\* 规定的额定值

额定绝缘电压	Creepage Distance		
	Pollution Degree 2		
	Material Group		
	I	II	IIIa,b
125	0.75	1.05	1.5
160	0.8	1.1	1.6
200	1	1.4	2
250	1.25	1.8	2.5
320	1.6	2.2	3.2
400	2	2.8	4
500	2.5	3.6	5
630	3.2	4.5	6.3
800	4	5.6	8
1000	5	7.1	10

## 设计实例

## 反激电源变压器的排线及安规



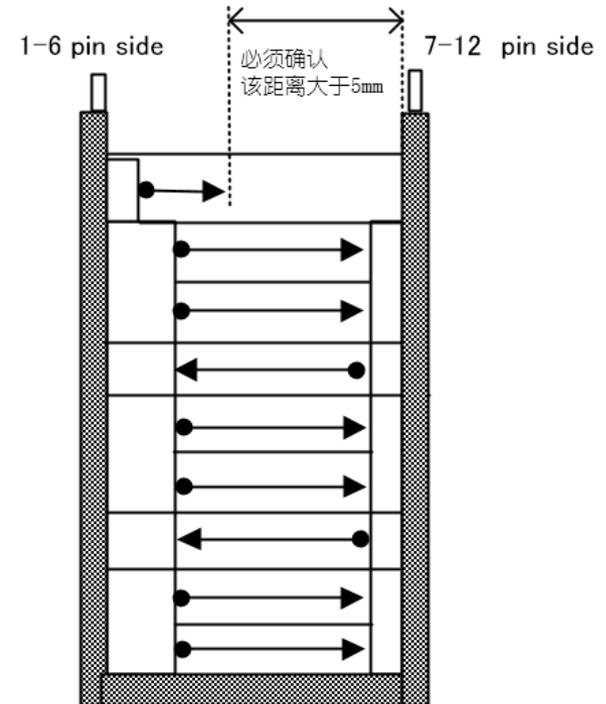
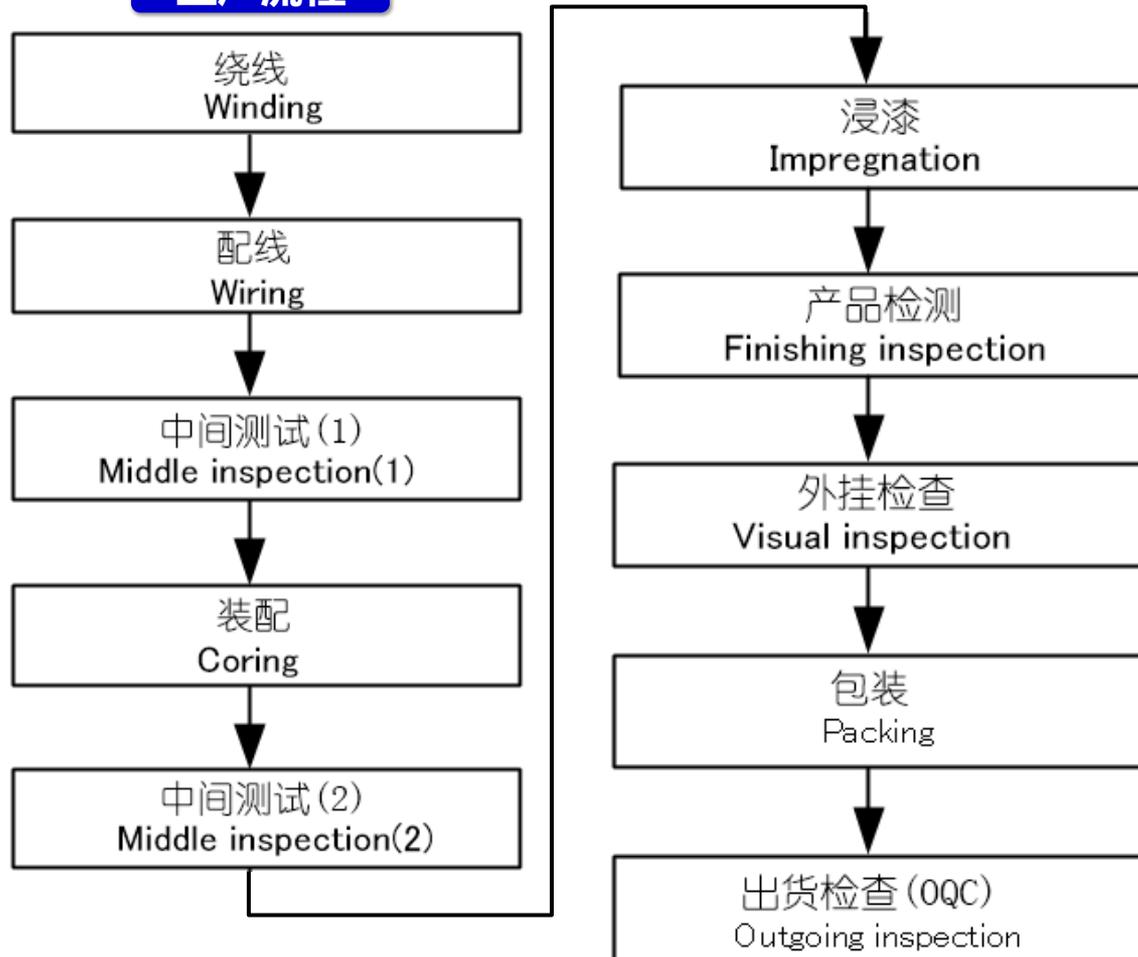
**输入电压：85~264Vac**  
**输出电压：24V±15% 35Wmax**  
**工作频率：70KHz**  
**MOS耐压：600V**  
**整流管耐压：150V**  
**电源效率：88% @100~240Vac**  
**铁氧体磁芯：EER28 PC40**  
**安规距离：5.5mm**

适用安规 对象内容	UL508	IEC60950		EN50178		结论	
	沿面·空间距离	沿面距离	空间距离	沿面距离 (rms)	空间距离	沿面距离	空间距离
1次 - 1次	2.4+0.5	2.5+0.5	2+0.5	2.4+0.5	1.1(340v)+0.5	2.9	3
1次整流前后	-	-	-	0.9+0.1(340V)	0.89+0.5	1	1.4
1次整流后	-	-	-	0.9+0.1(367V)	0.89(590V)+0.5	1	1.4
1次 - 2次	3.0(300V) : 2.4(240V)	5.0+0.5	4.5 +0.5	2.8+0.5	5.5(291V)+0.5	3.3	6
1次 - FG	2.4+0.5	2.5+0.5	-	1.4+0.5	3.0(291V)+0.5	1.9	3.5
2次 - FG	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1	1

## 设计实例

## 高频变压器设计文件的作成

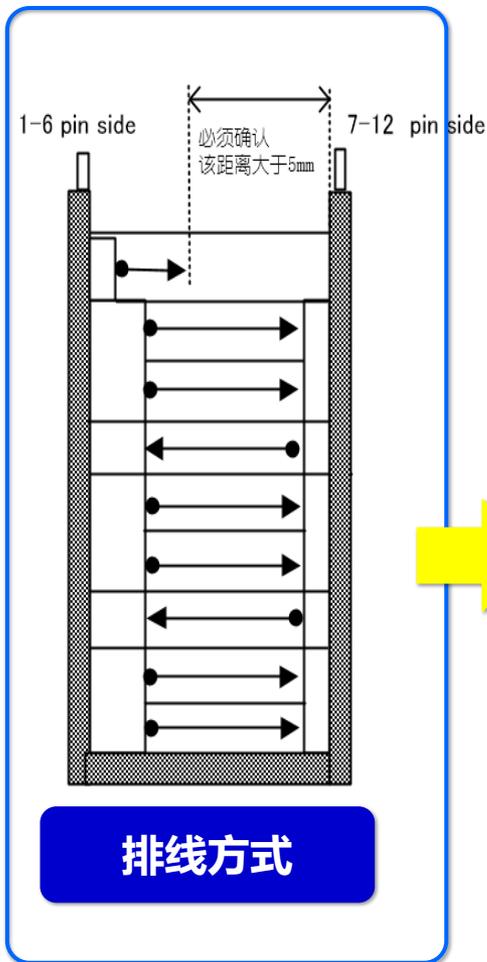
### 生产流程



### 排线方式

## 设计实例

## 高频变压器设计文件的作成



**绕线信息**

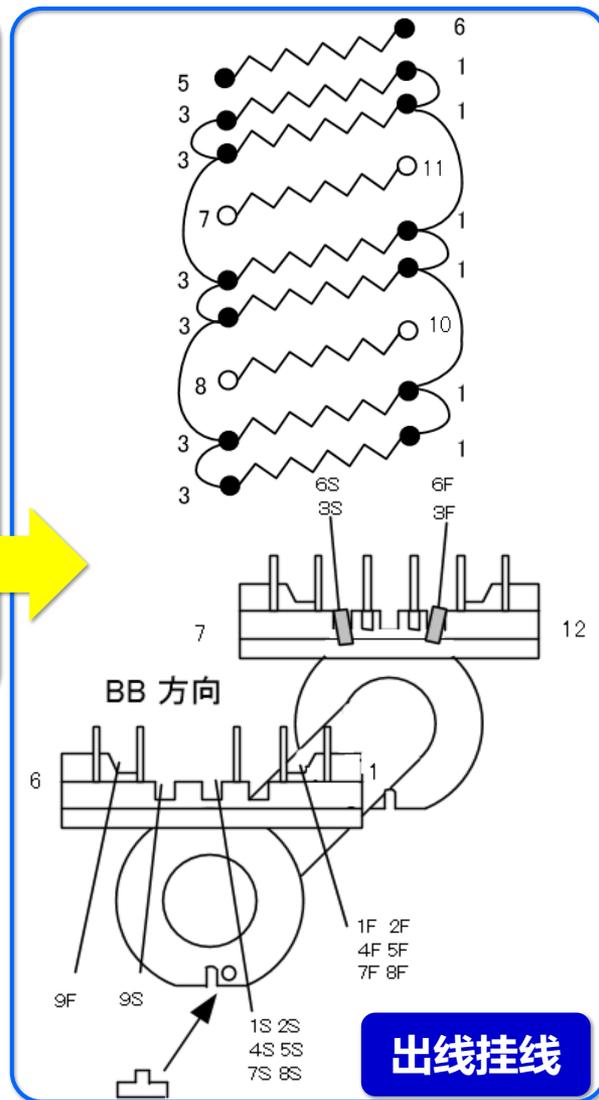
挡墙胶带

1~6pin侧 (5.5)WF2902

7~12pin侧 (3)WF2902

※ (3)WF2902

(16.5)025M3GRN	1※	11	0.1U-2	1/66
(16.5)025M1	1	39	0.16U-2	1/39
(10)025M1	1	39	0.16U-2	1/39
(16.5)025M3	1	9	0.65U-2	1/10
(16.5)025M3	1	39	0.16U-2	1/39
(10)025M1	1	39	0.16U-2	1/39
(16.5)025M3	1	9	0.65U-2	1/10
(16.5)025M3	1	39	0.16U-2	1/39
(10)025M1	1	39	0.16U-2	1/39
NONE			0.16U-2	1/39



**变压器设计书**

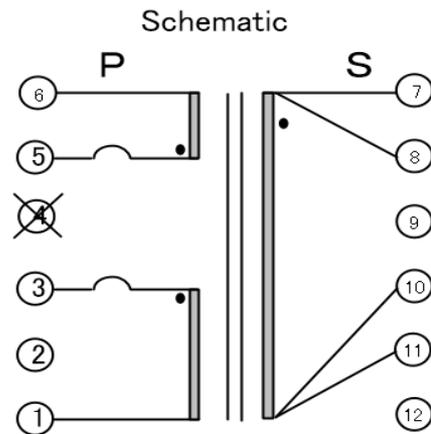
**关键内容 (三要素)**

**清晰描述**

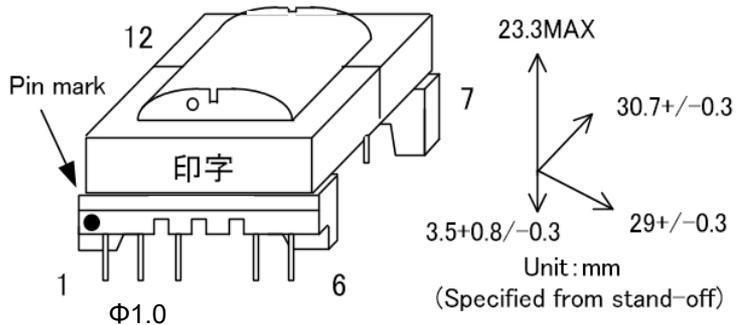
## 设计实例

## 高频变压器设计文件的作成

### 检测检查项目

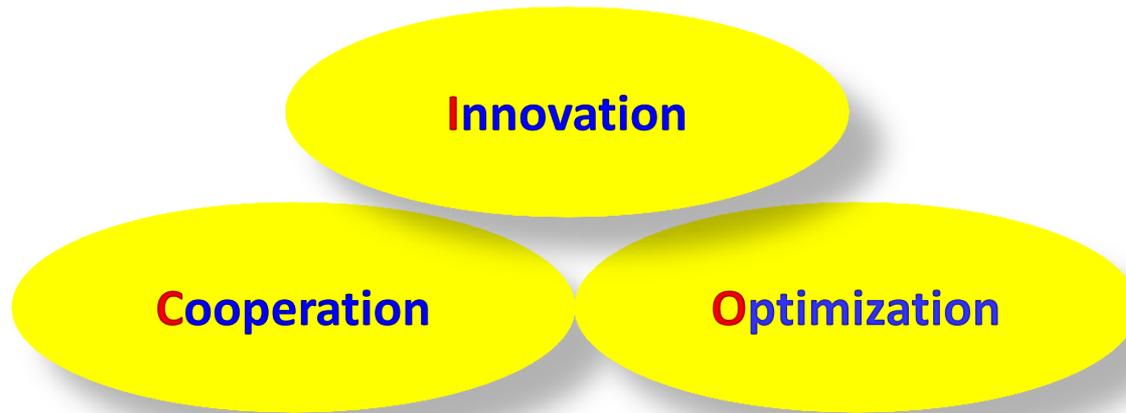


Bottom View



Item	Specification	Test pins	Test condition
Inductance (Series Circuit)	500 $\mu$ H +/- 10%	1-3	IDC=0A 1KHz 1V Set up voltage on a screen of HP4284A or equivalent LCR meter.
Leakage Inductance	20 $\mu$ H Max.	1-3	IDC=0A 1KHz 1V (7,8,10,11 short) Set up voltage on a screen of HP4284A or equivalent LCR meter.
Insulation resistance	100M $\Omega$ Min.	P-S P,S-C	DC500V
Impulse	+/-15% of standard wave.	1-3	1.2KV0-p 5 pulses.
HI-POT Test	No breakdown is available.		Cut off current 2mA
		P-S	AC 3.6KV 2sec
		P,S-C	AC 1.8KV 2sec
DCR (Reference)	0.27 $\Omega$ +10/-10%	1-3	at 25 $^{\circ}$ C
	0.880 $\Omega$ +10/-10%	2-6	
	1.6 $\Omega$ +10/-10%	5-6	
	12.8m $\Omega$ +10/-10%	7,8-10,11	
※Turns ratio (Reference)	1:0.154	1-3: 2-6	10KHz, No Gap Core
	1:0.282	1-3: 5-6	
	1:0.231	1-3: 7,8-10,11	

# Change the World (Q&A)



# Thank you !