



此培训资料来源于德州仪器（TI）和中国电源学会（世纪电源网）合作举办的“TI 现场培训”课程，世纪电源网同意在 TI 网站上分享这些文档。



中国电源学会专家委员会
电源学会磁技术专业委员会
深圳市科技专家协会、科技创新委员会

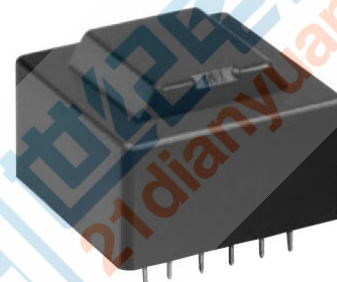
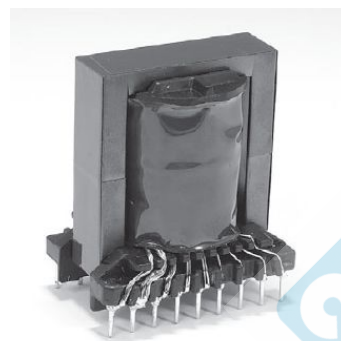
委员
委员
专家

邵革良

'2015/4/25

6小时精通反激电源及变压器设计

Advanced Magnetics Technology

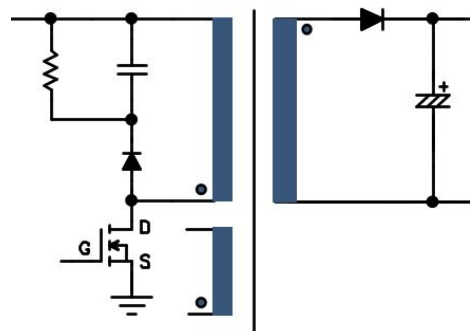


第一讲：反激开关电源基本原理和电路拓扑

- 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

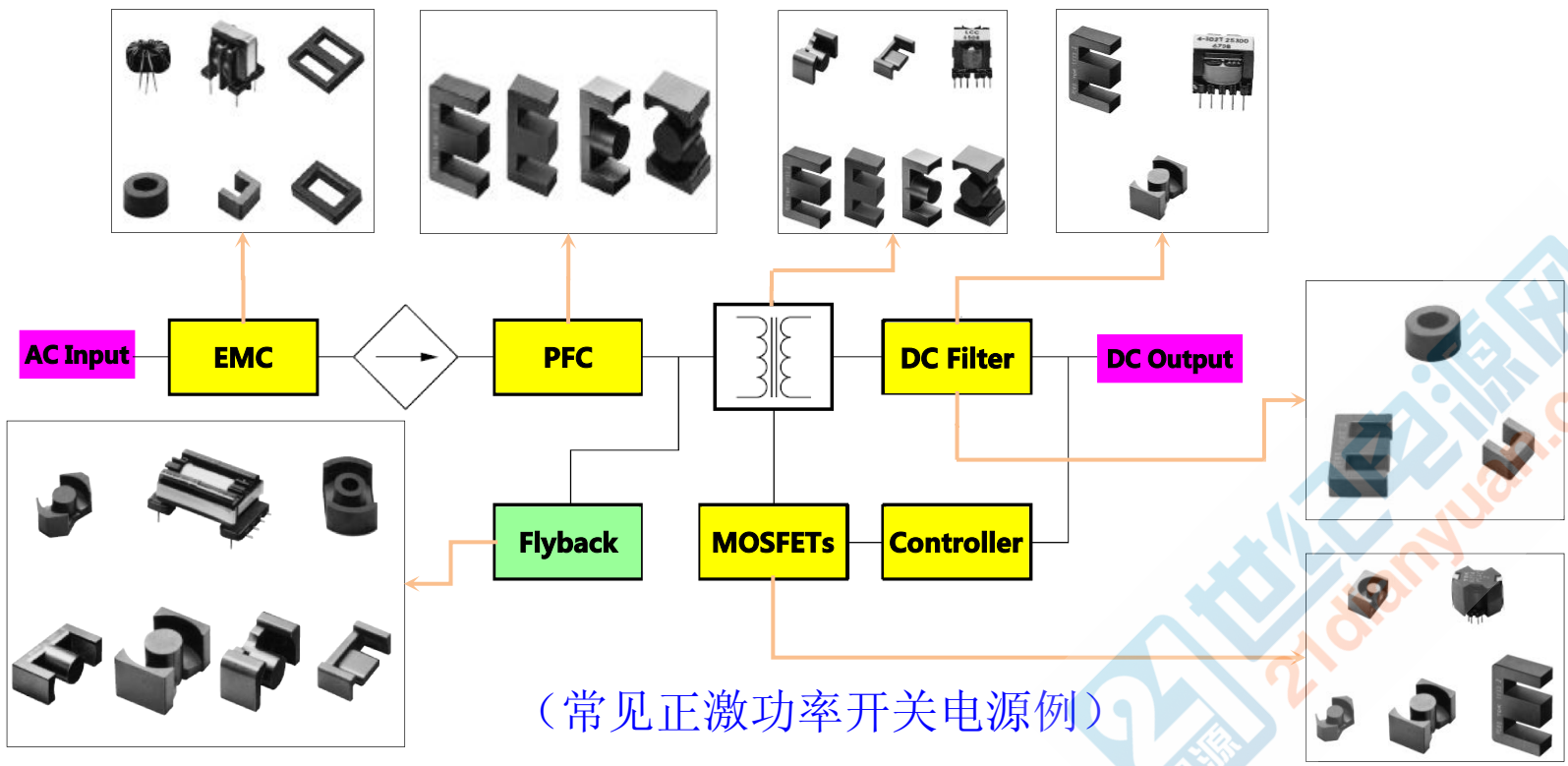
第四讲：变压器绕线工艺及设计书的作成

- 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

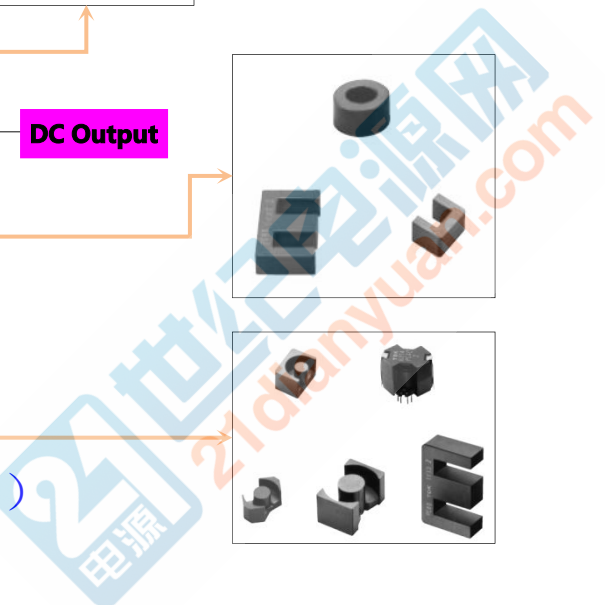
第二讲：反激电源变压器的设计计算

- 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



(常见正激功率开关电源例)



反激电源变压器用磁性材料

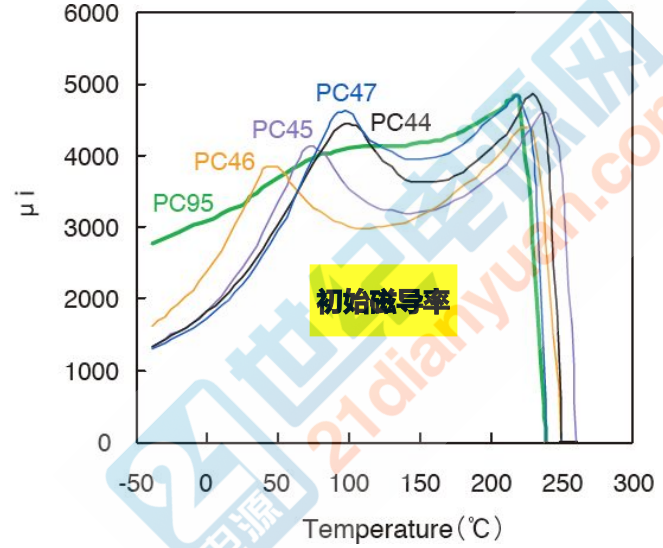
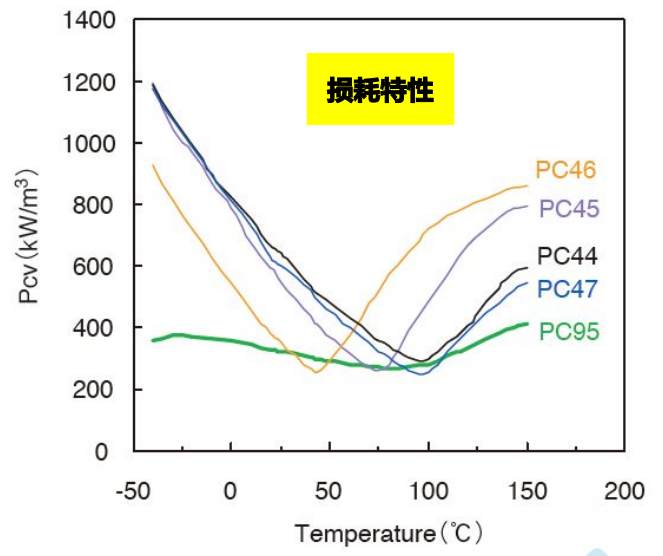
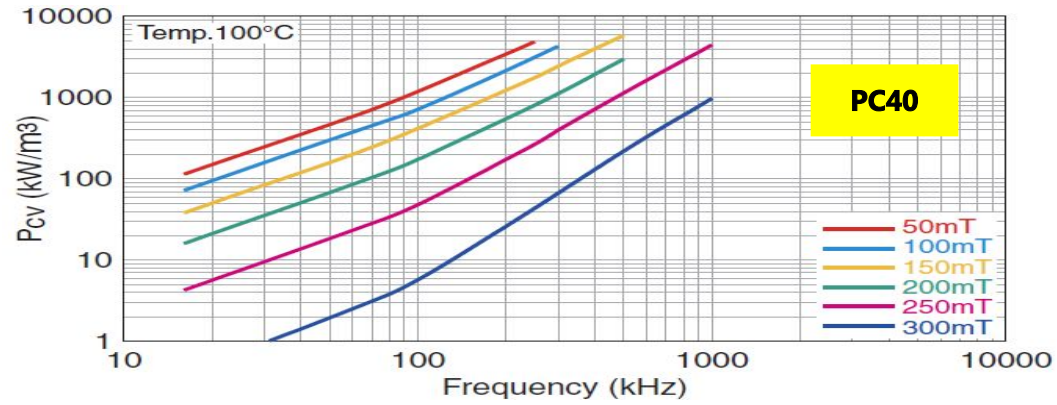
■ 材质特点

材质	初始磁导率 μ_i	单位体积磁心损耗 (磁心损耗)* Pcv (kW/m ³) 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 ³) ×10 ³	体积电阻率* ρ_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

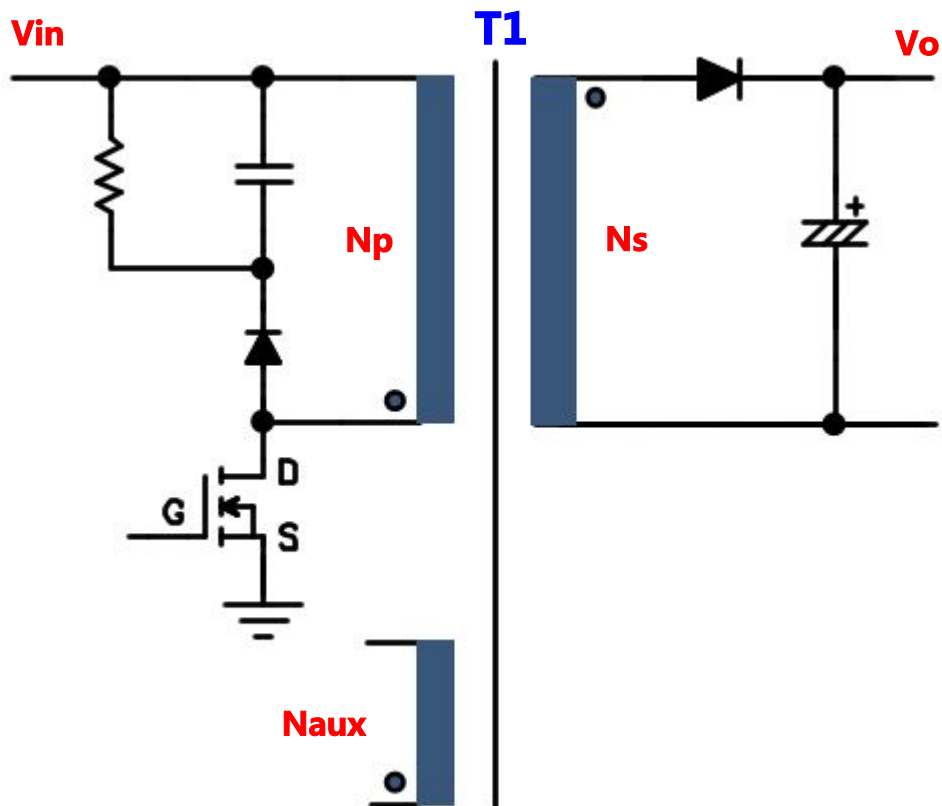
材质	初透磁率 μ_i	居里温度 Tc (°C)	饱和磁通密度		剩余磁束密度 Br (mT)	饱和矫磁力 Hc (A/m)	磁心损耗			固有电阻 ρ (Ω·m)	表观密度 dapp (kg/m ³) ×10 ³	热膨胀系数 α (1/K) ×10 ⁻⁶	导热系数 κ (W/mK)	比热 Cp (J/kg·K)	抗折强度 δb_3 (N/m ²) ×10 ⁷	杨氏系数 E (N/m ²) ×10 ¹¹	磁致伸缩常数 λ_s ×10 ⁻⁶
			Bs (mT)	H=1194A/m			Pcv (kW/m ³) B=200mT										
			23°C	100°C			23°C	90°C	100°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
μi		25°C	3300 +/- 25 %	2500 +/- 25 %	2400 +/- 25 %
Pcv kW/m ³ [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
ρ	$\Omega \cdot m$	25°C	6.0	4.0	6.5
δ	kg/m ³		4.9 x 10 ³	4.9 x 10 ³	4.8 x 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

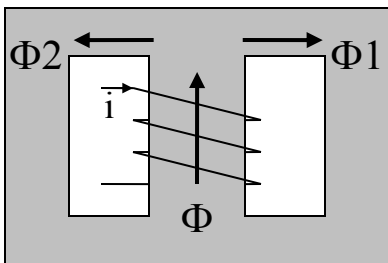
两种工作模式

- 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

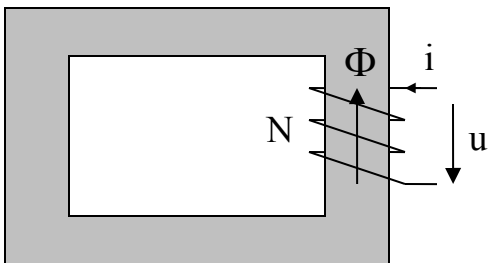
磁路基本定律



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

磁通连续性定理

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



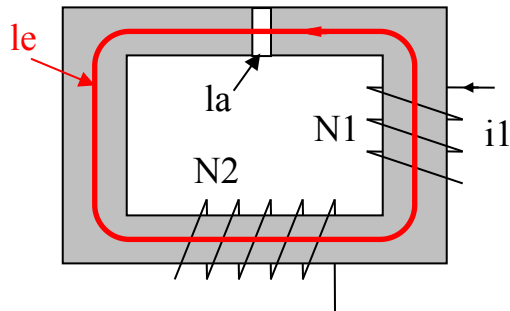
$$u = \frac{d\psi}{dt} = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N \cdot A_e \cdot \frac{dB}{dt} \quad \text{对各个绕组}$$

法拉第定律

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

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

伏秒相等原则



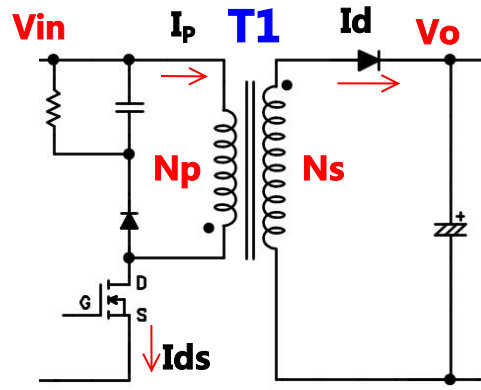
$$\sum i \cdot N = \sum U_m = \sum H \cdot l_e \quad \text{对各个磁回路}$$

安培环路定律

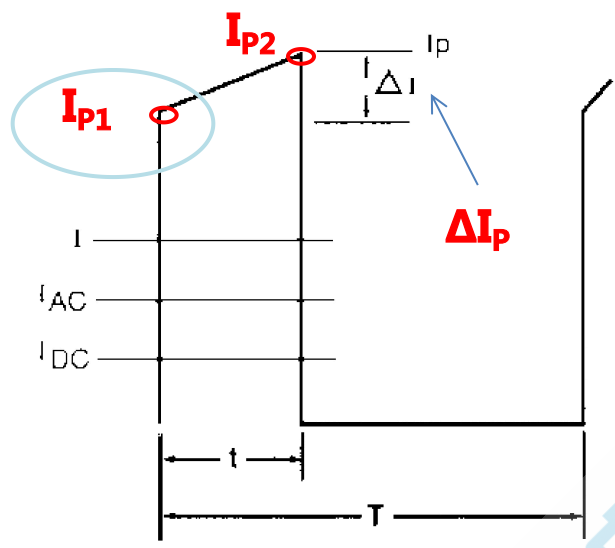
$$i_1 \cdot N_1 + i_2 \cdot N_2 = H_m \cdot l_m + H_a \cdot l_a$$

摘自陈为老师讲义

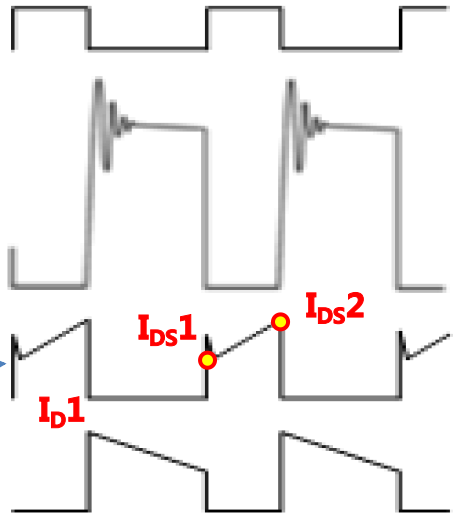
变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)



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



Driver
Vds
Ids



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

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

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

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

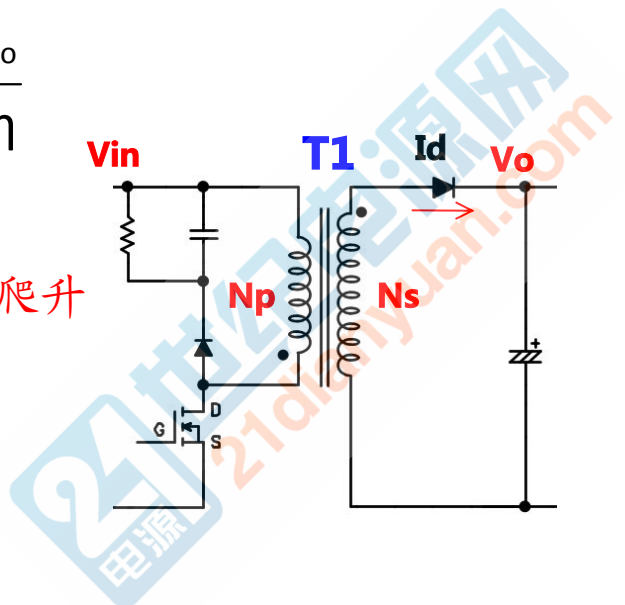
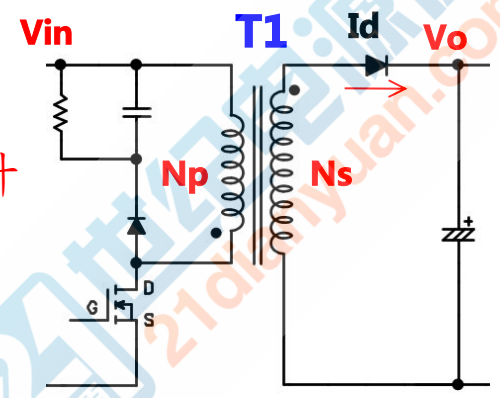
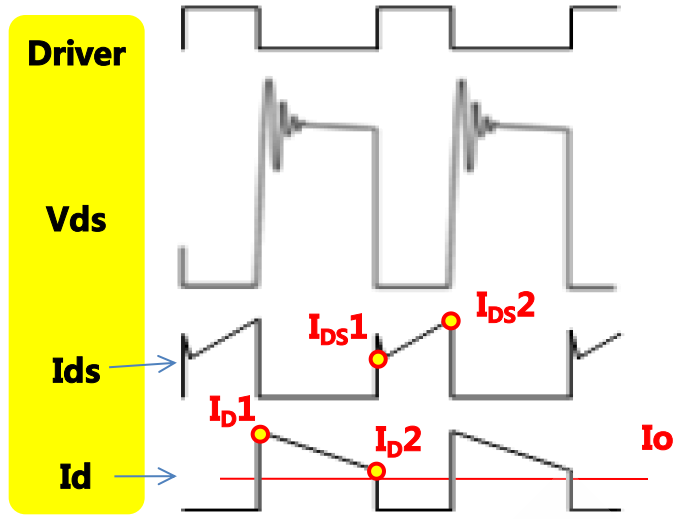
$$P_o/\eta = \frac{I_{ds1} + I_{ds2}}{2} \cdot \Delta I_{ds} \cdot L_p \cdot f_{sw} \rightarrow (I_{ds1} + I_{ds2}) \cdot \Delta I_{ds} \cdot f_{sw} = \frac{2P_o}{L_p \eta}$$

● $P_o = V_o \times I_o$

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

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

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



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

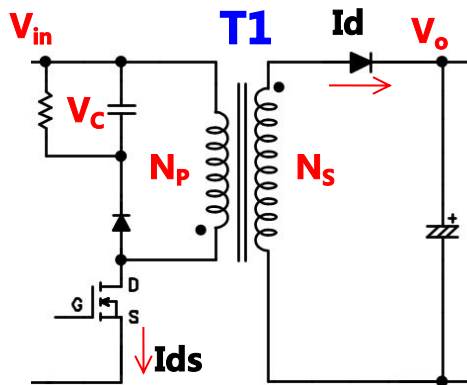
$$V_{ds} = 600 \times 90\% = 540V$$

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

$$V_O = 24V$$

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

$$N_P/N_S = 4.8625$$



法拉第定理

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

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

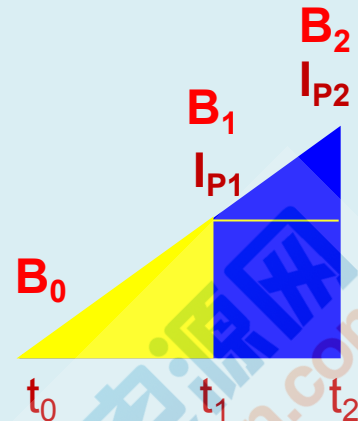
$$\Delta B = \frac{L_P \cdot \Delta I_P}{N_P \cdot A_e}$$

Np与磁芯的选取

Lp

电感量定义

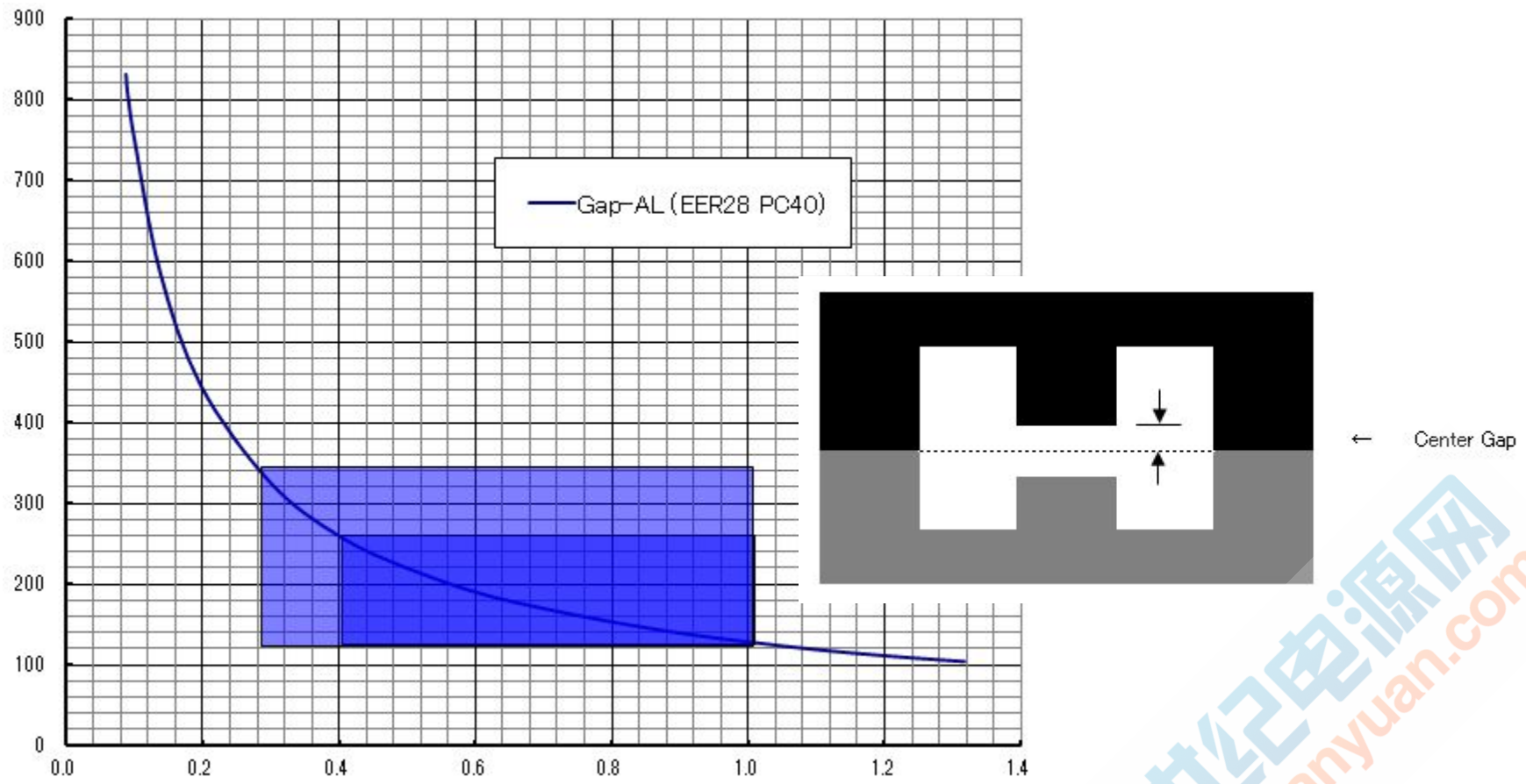
$$= \mu_0 \cdot \mu_e \cdot \frac{A_e}{l_e} \cdot N_P^2 = AL \cdot N_P^2$$



Bmax → 360mT



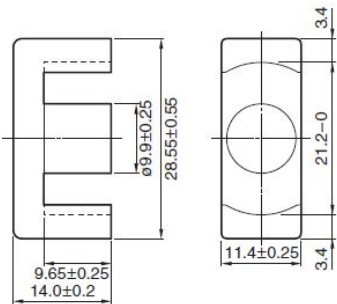
变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)



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)

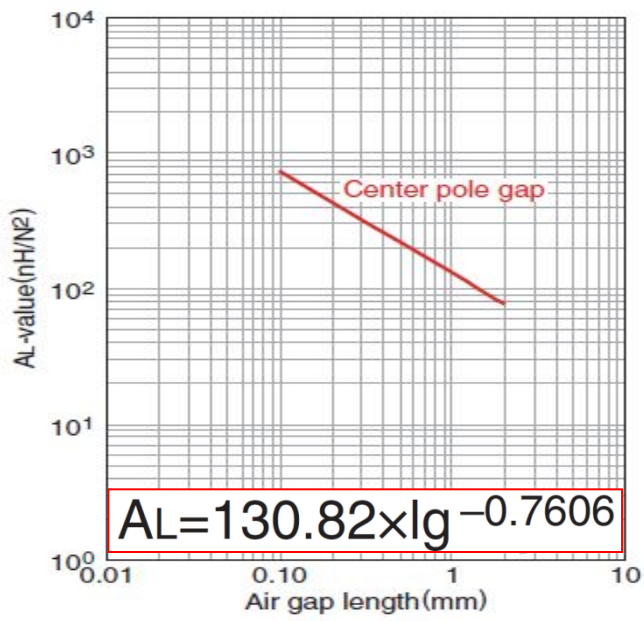
PC95EER28-Z



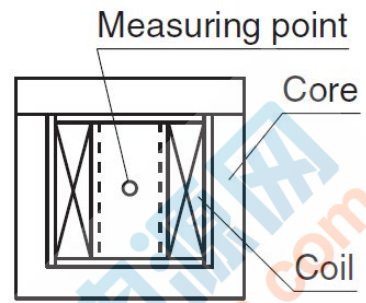
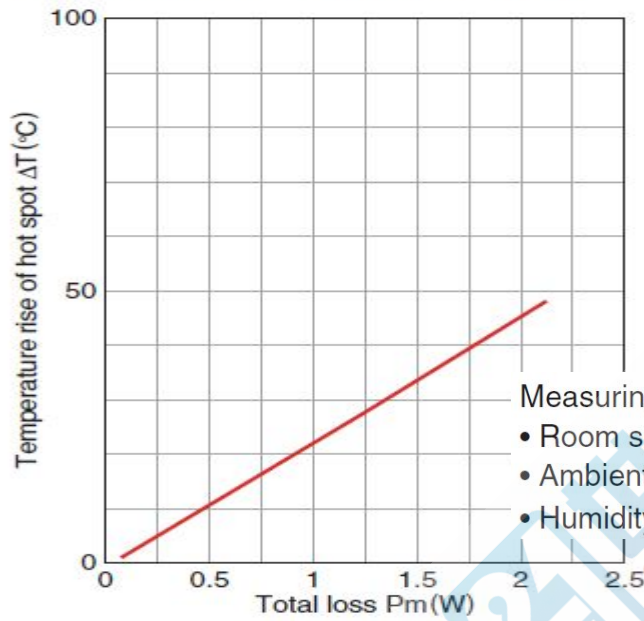
EER28-Z PC95磁芯为例-----应用讲解

Effective parameter								Electrical characteristics					
Core factor	Effective magnetic path length l_e (mm)	Effective cross-sectional area A_e (mm ²)	Effective core volume V_e (mm ³)	Cross-sectional center pole area A_{cp} (mm ²)	Minimum cross-sectional center pole area $A_{cp \text{ min.}}$ (mm ²)	Cross-sectional winding area of core A_{cw} (mm ²)	Weigh (g/set)	AL-value *		Core loss			
C_1 (mm ⁻¹)								(nH/N ²) 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	

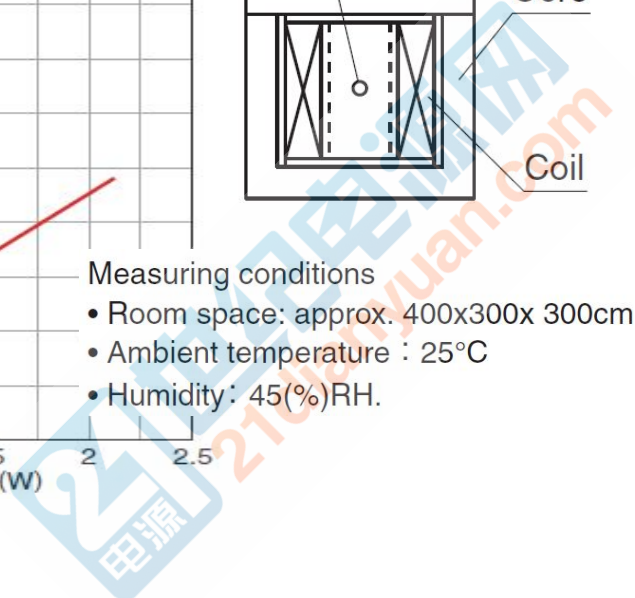
AL-value vs. Air gap length (Typ.)



Temperature rise vs. Total loss (Typ.)



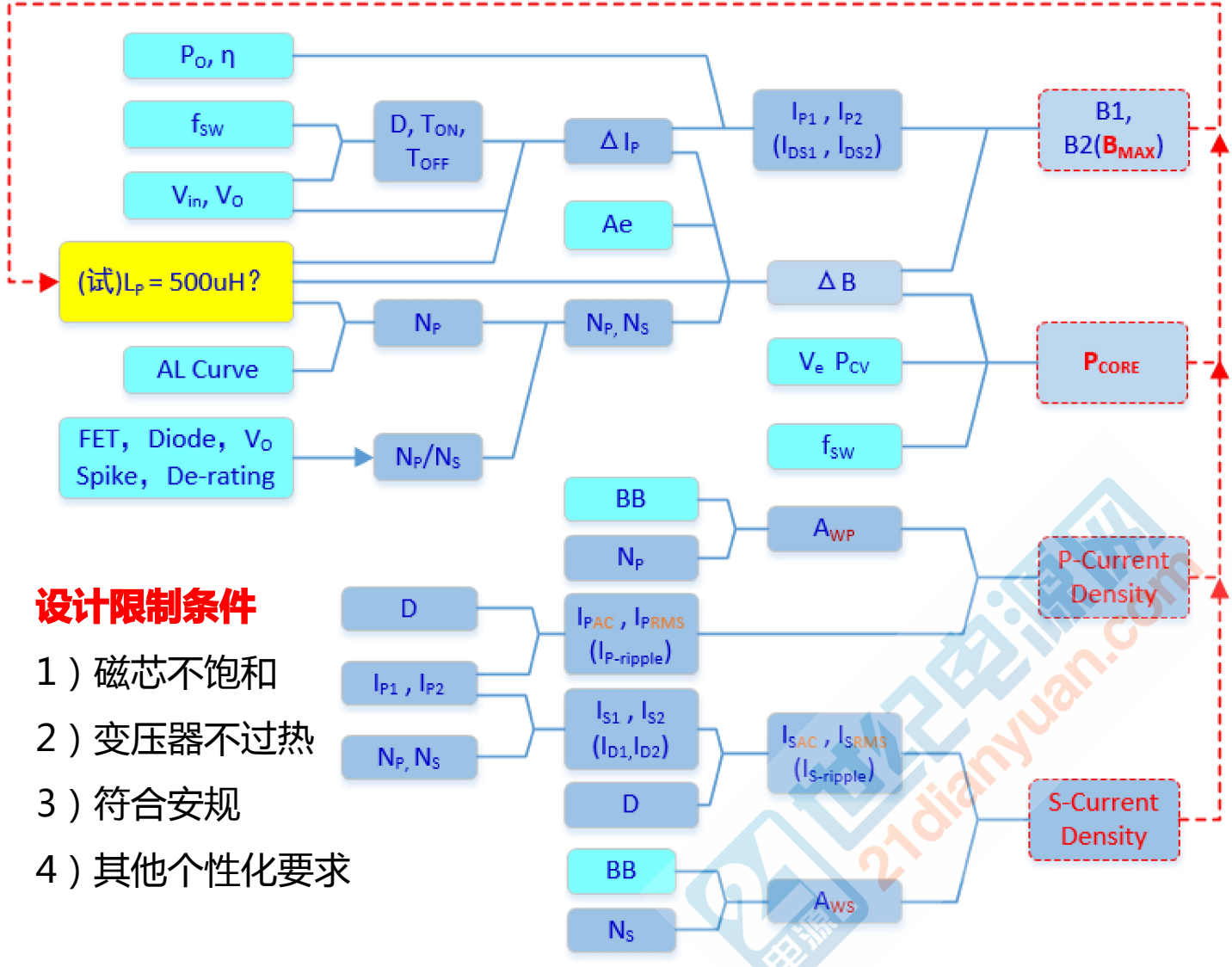
- Measuring conditions
- Room space: approx. 400x300x 300cm
 - Ambient temperature : 25°C
 - Humidity: 45(%)RH.



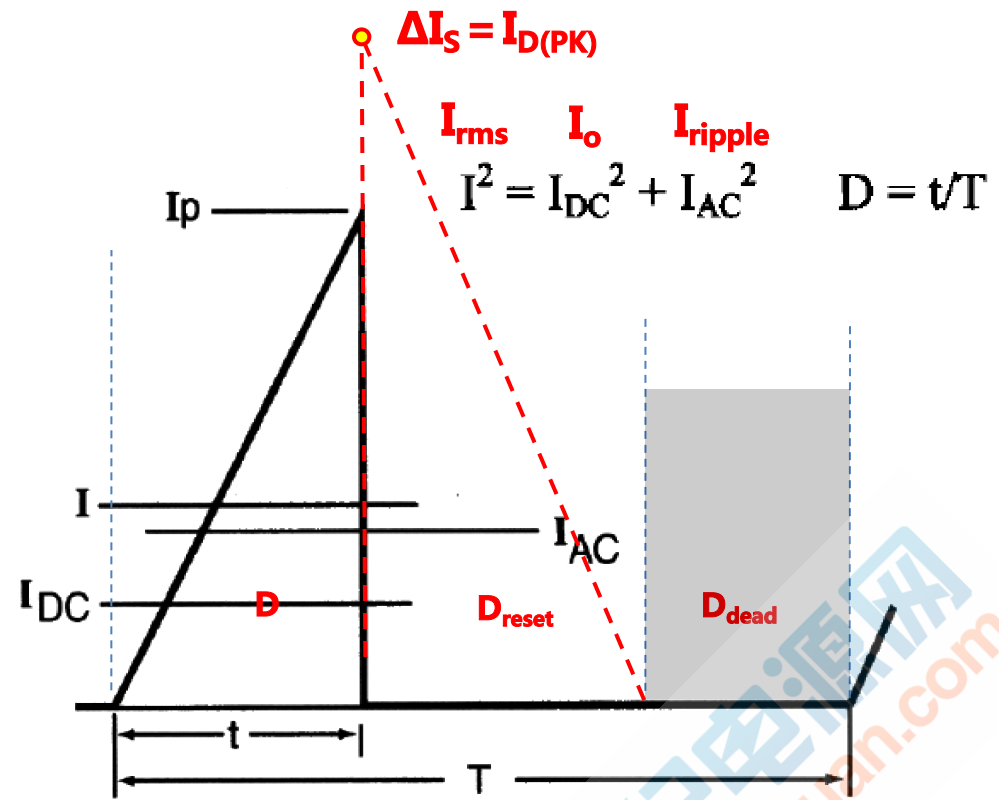
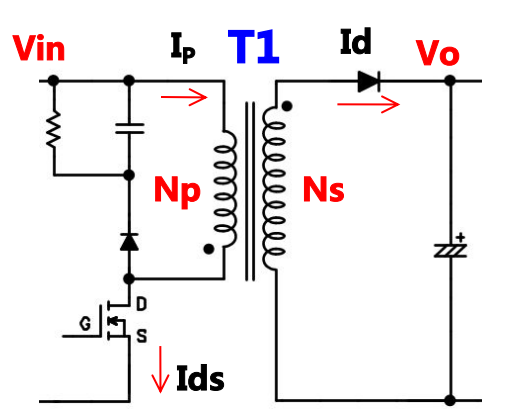
变压器设计计算方法的掌握 (固定频率CCM)

设计总结

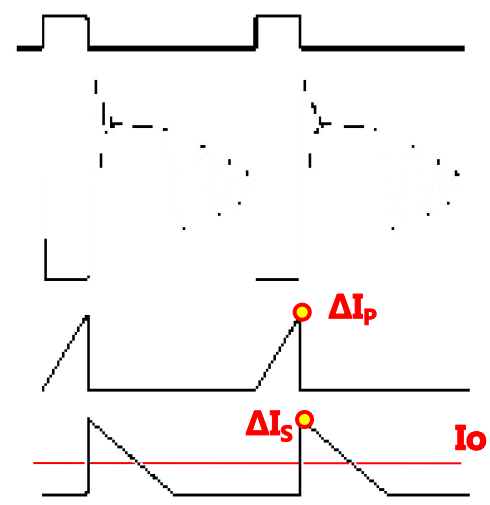
- 电源规格要求**
 f_{sw}, V_o, I_o, V_{in}
- 假定目标-磁芯**
 $V_e, A_e, A_{CW}, AL, P_{CV}, R_{\theta}, BB$
- 假定目标-器件**
 V_{DSS}, V_{RM}
De-rating, Spike
- 假定理想化条件**
 $V_F, P_{Snubber}=0$
 $\eta=0.88?$



变压器设计计算方法的掌握 (固定频率DCM)



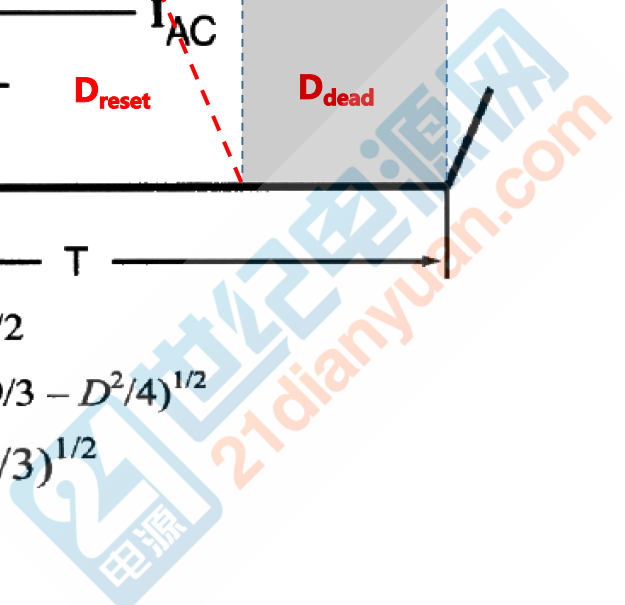
- Driver
- Vds
- Ids
- Id



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

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

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



变压器设计计算方法的掌握 (固定频率DCM)

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

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

● $P_o/\eta = \frac{1}{2} \times \Delta I_p^2 \times L_p \times f_{sw}$ 储能原则
 → $\Delta I_{ds} = \sqrt{2P_o/(L_p\eta f_{sw})}$

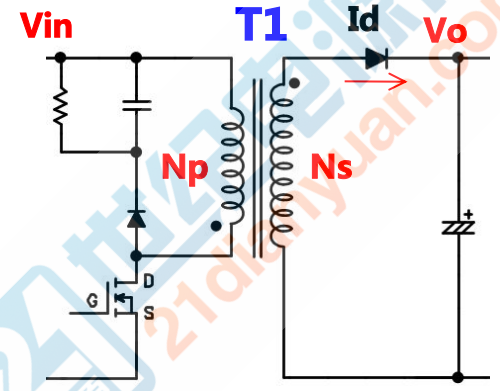
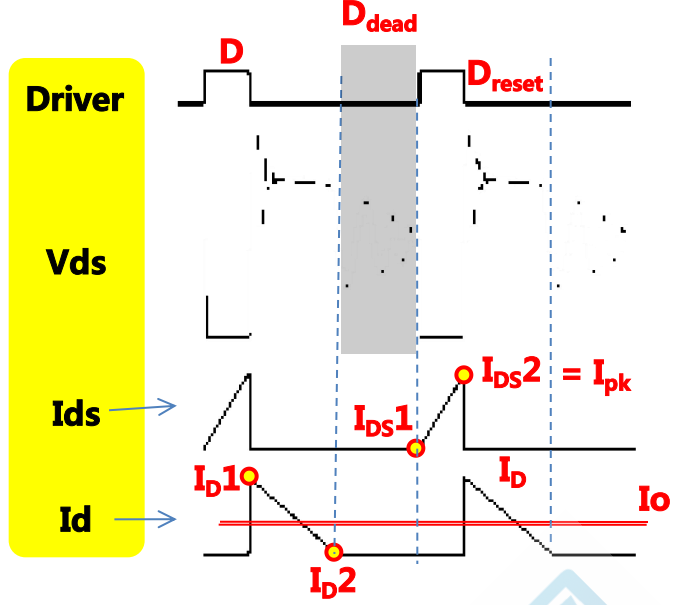
● $L_s = L_p \times (N_s/N_p)^2$ 变压器原理

● $\Delta I_p = V_{in}/L_p \times T_{on}$ 电感充电上升 } $D = ?$
 ● $\Delta I_s = V_o/L_s \times T_{reset}$ 付边续流下降 } $D_{reset} = ?$

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

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

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

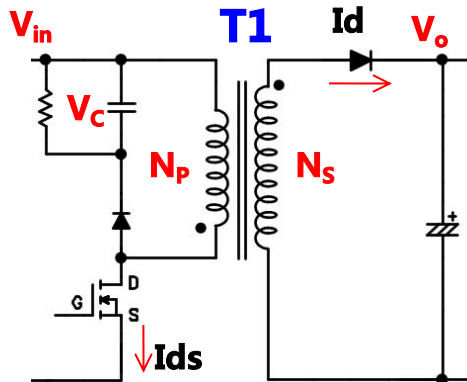
$$V_{ds} = 600 \times 90\% = 540V$$

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

$$V_O = 24V$$

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

$$N_P/N_S = 4.8625$$



Np与磁芯的选取

Lp

电感量定义

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

法拉第定理

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

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

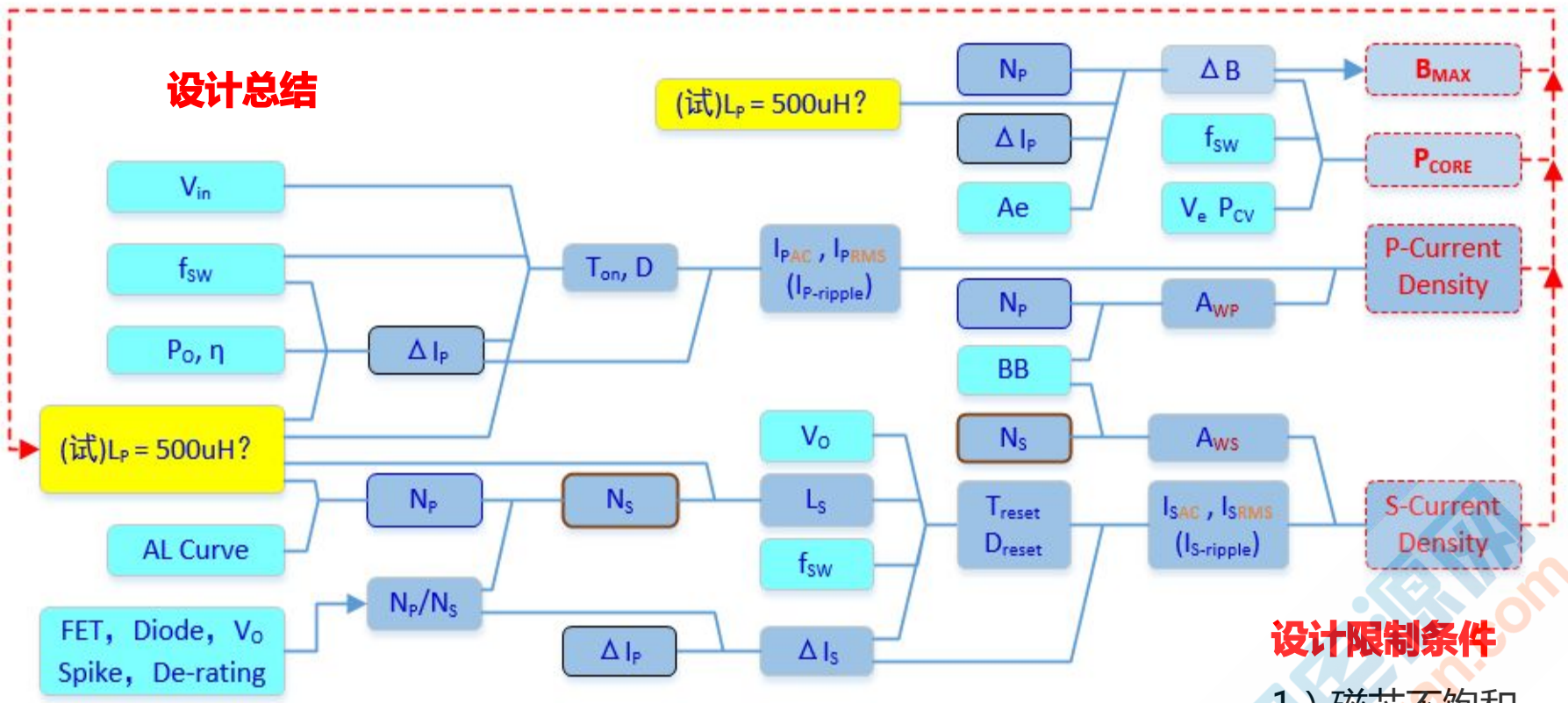
$$\Delta B = \frac{L_P \cdot \Delta I_P}{N_P \cdot A_e}$$

$$B_{max} < 360mT$$

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

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

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

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

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 } $T_{off} = (1-D)T$

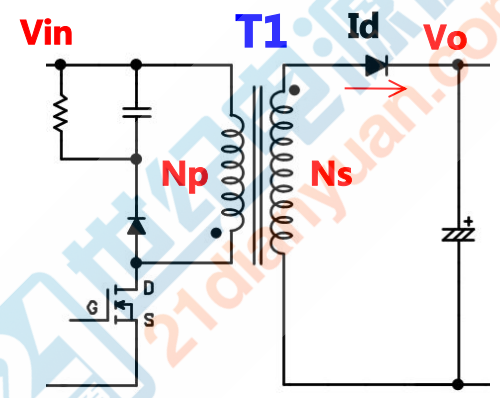
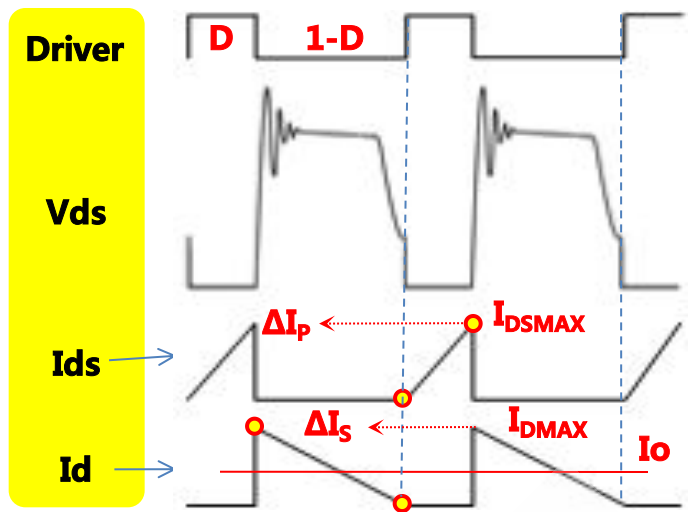
● $V_{in} \times T_{on} = V_o \times T_{off}$ 伏秒数相等

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

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

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

} 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

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

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

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

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

Example

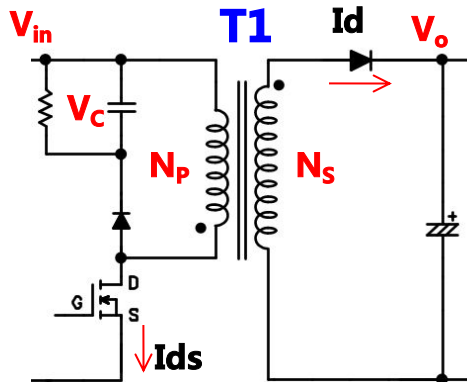
$$V_{ds} = 600 \times 90\% = 540V$$

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

$$V_O = 24V$$

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

$$N_P/N_S = 4.8625$$



Np与磁芯的选取

Lp

电感量定义

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

法拉第定理

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

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

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

$$B_{max} < 360mT$$

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

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

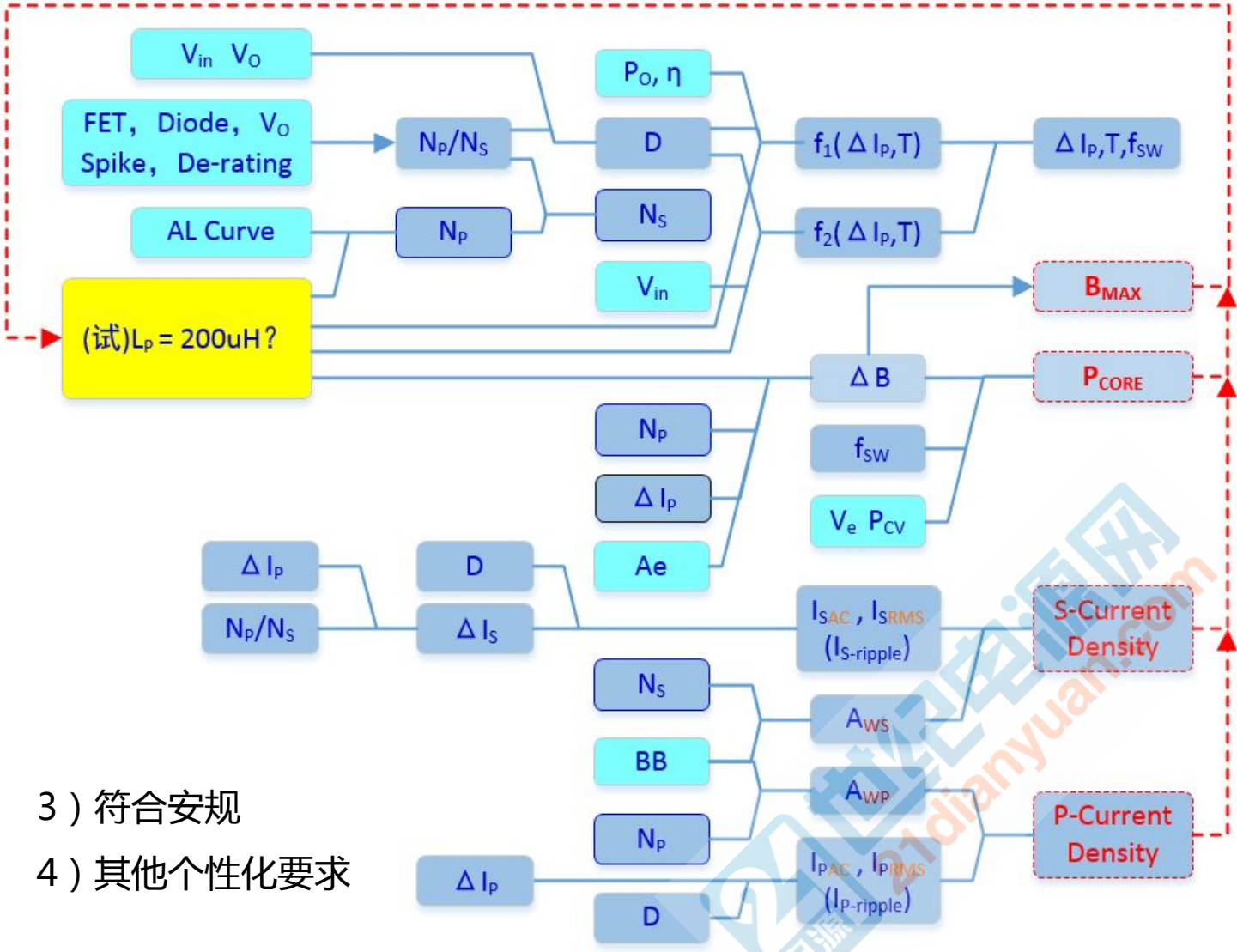
变压器设计计算方法的掌握 (CRM)

设计总结

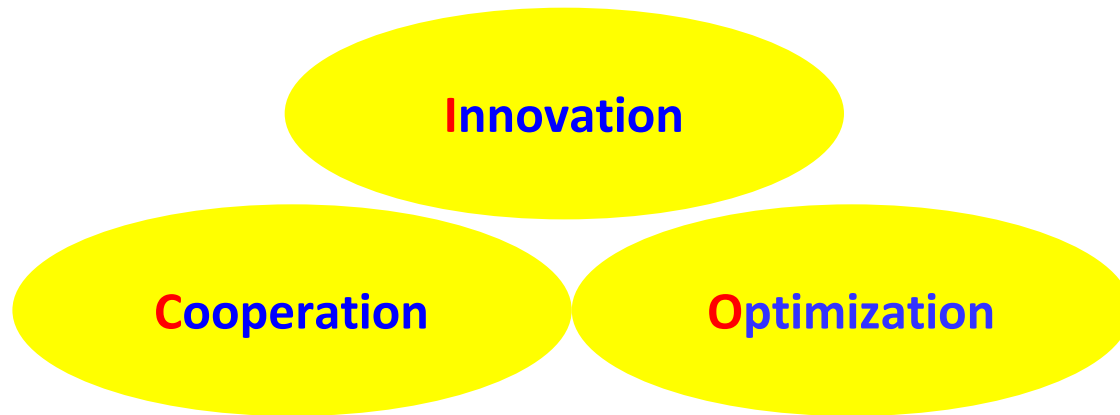
- 电源规格要求**
 V_o, I_o, V_{in}
- 假定目标-磁芯**
 $V_e, A_e, A_{CW}, AL, P_{CV}, R_{\theta}, BB$
- 假定目标-器件**
 V_{DSS}, V_{RM}
De-rating, Spike
- 假定理想化条件**
 $V_F, P_{Snubber}=0$
 $\eta=0.88?$

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



Change the World (Q&A)



Thank you !