



南京航空航天大学

NAU UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

2017年4月15日

# 电源网中国工程师巡回培训会

南京航空航天大学 周洁敏

南京天丰大酒店

# 专题 LLC半桥谐振电感设计

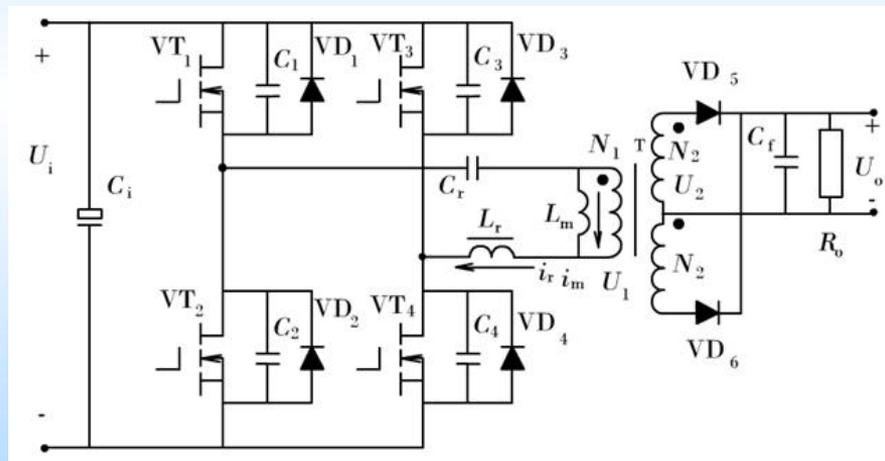
- 1、谐振变换器拓扑简介
- 2、对谐振电感的要求
- 3、适合做谐振电感的磁性材料
- 4、电感设计举例

## 1、谐振变换器拓扑简介

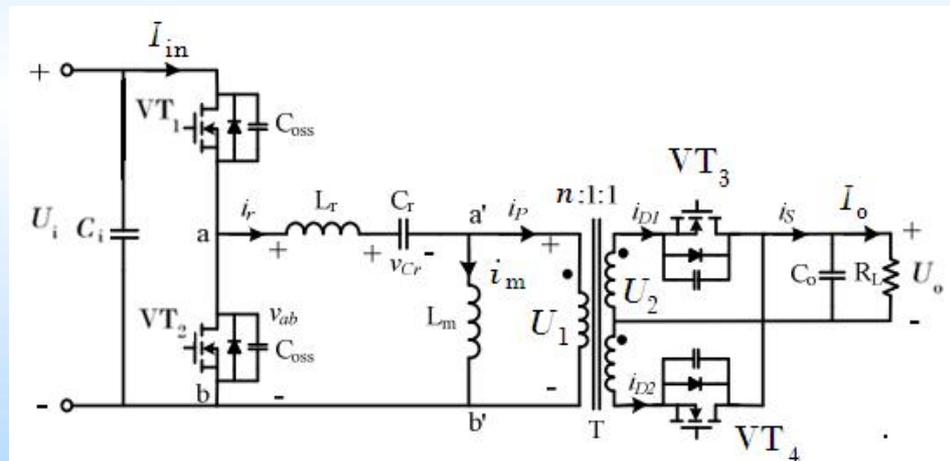
LLC谐振变换器近年来一直得到关注和长足的研究，对于中大功率场合则用半桥LLC变换器，大功率电源则用全桥LLC谐振变换器。

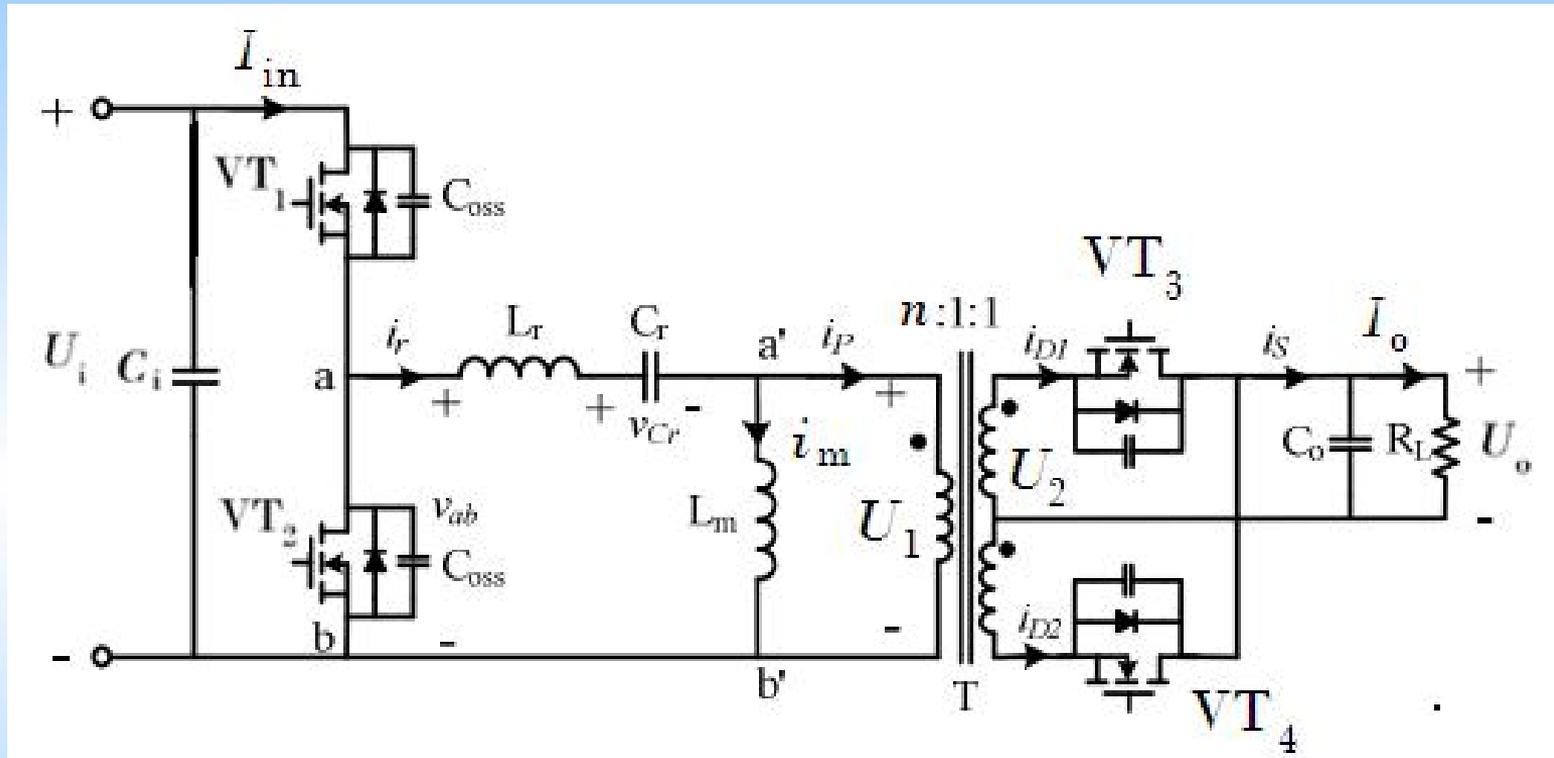
相同功率下，主电路是半桥和全桥的区别在于半桥电路的电压应力是全桥的一半，而电流应力是全桥电路的2倍。

# 全桥LLC谐振变换器



# 半桥LLC谐振变换器

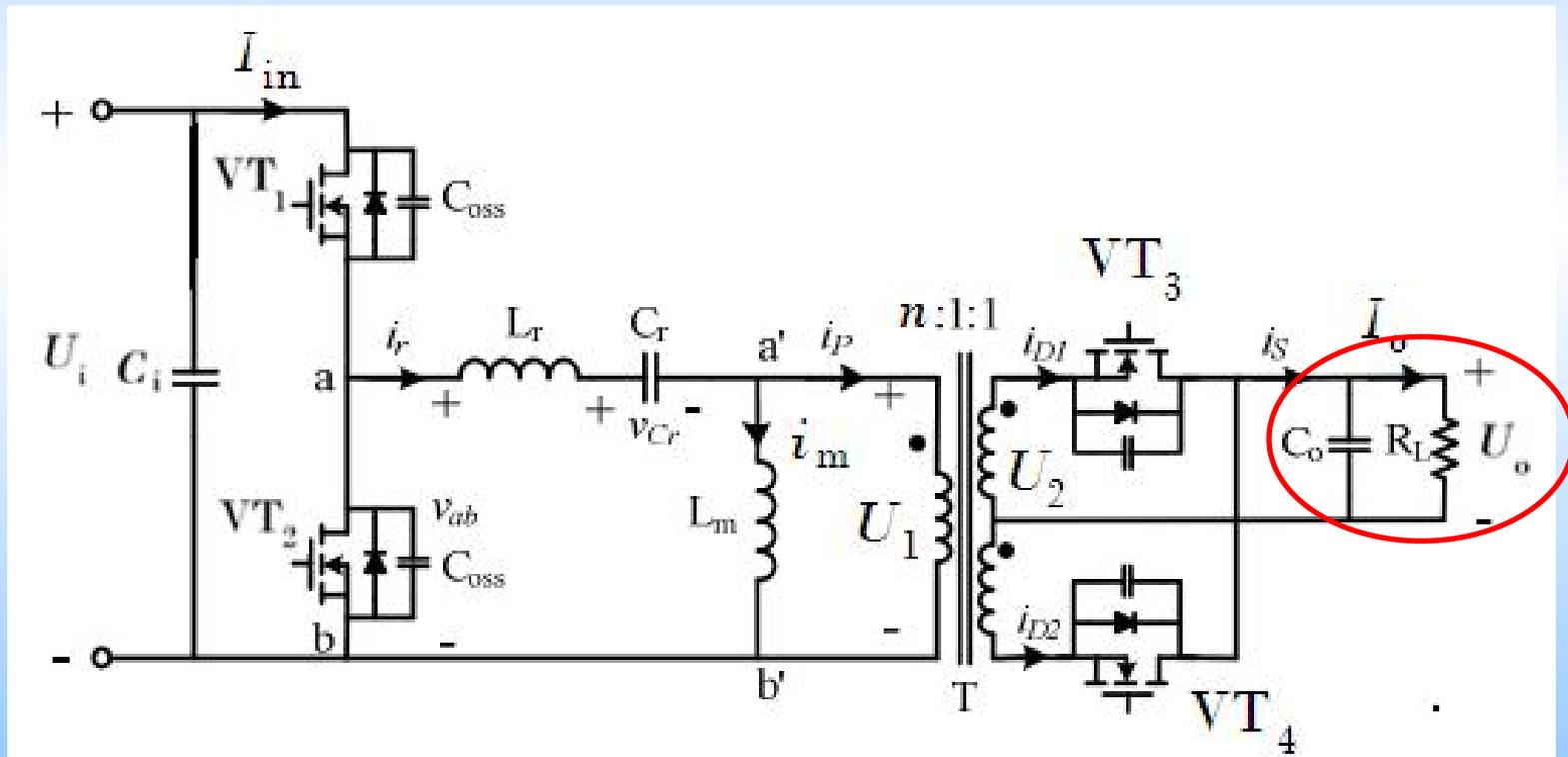




以半桥变换器的谐振电感为例进行分析

为分析方便起见，假设

- 1、输出电容很大
- 2、输出电压基本不变

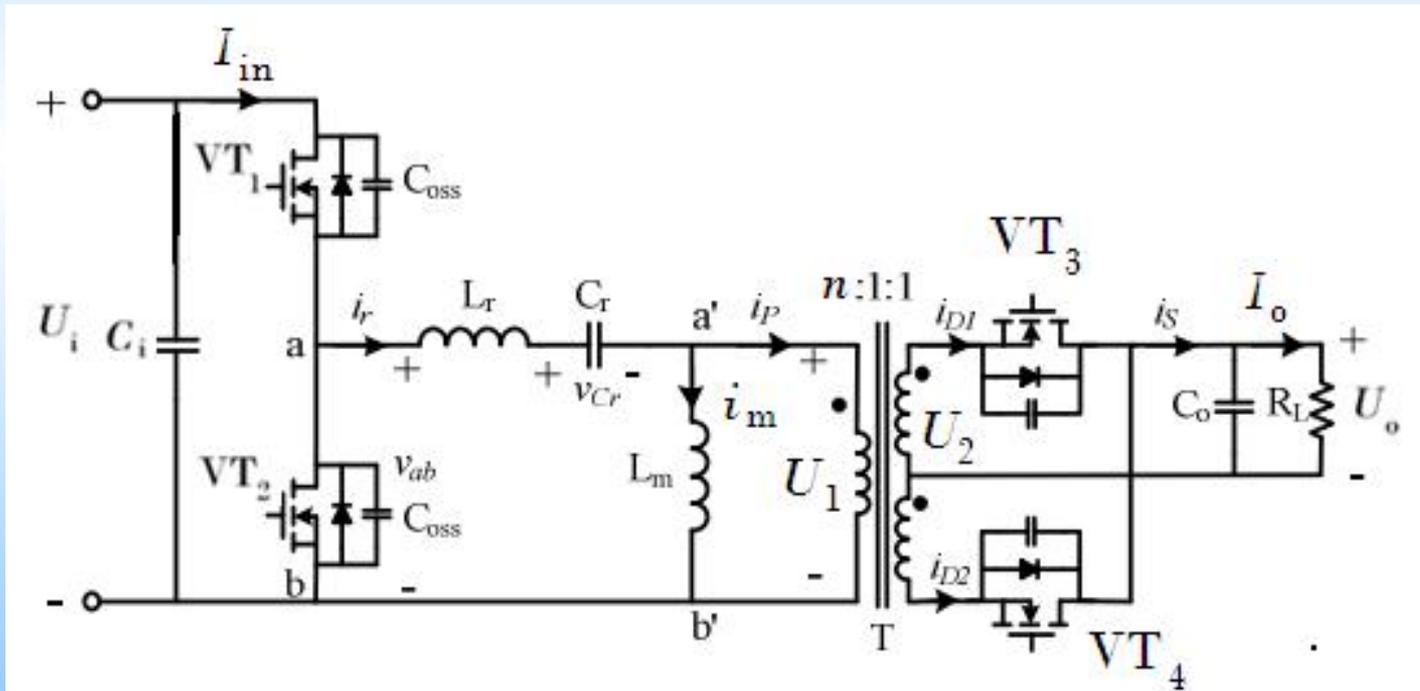


## 主要优点:

- 1、原边MOS管ZVS开通，副边管子ZCS关断；
- 2、电路结构简单，效率比较高；
- 3、高频和高功率密度；
- 4、电路的输入电压范围和输出功率范围比较大；
- 5、原边和副边管子上的电压应力比较低。

## 缺点:

- 1、短路时，原边电流比较高；
- 2、电路中的电流有效值比较高。



# 设计的基本要求

(1) 负载从满负载到空载变化时，都能实现ZVS (对MOS管而言，ZVS最好)，器件的开通损耗较小；

(2) 器件的关断电流，能控制在较小值，进而减小了器件关断损耗，副边二极管可实现ZCS，不存在反向恢复的问题，EMI小；

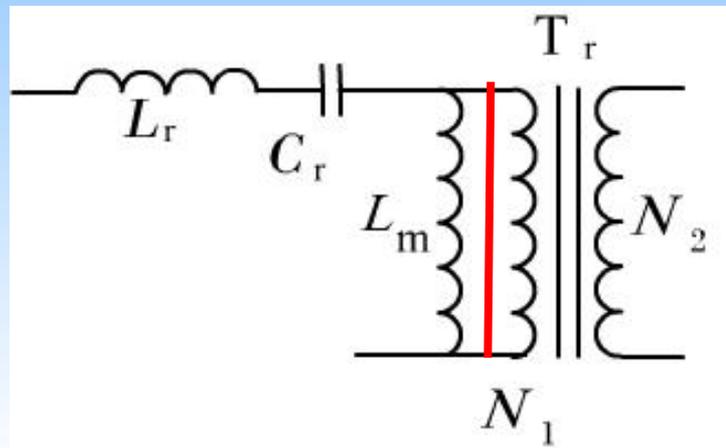
(3) 在输入电压变化范围较大时，仍能够实现输出电压的稳定调节。

## 串联谐振频率1

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

谐振电容  $C_r$

谐振电感  $L_r$



当主变压器的原边电压被输出电压钳位时。负载电流由副边绕组供电。变压器的激磁电感不参与谐振。

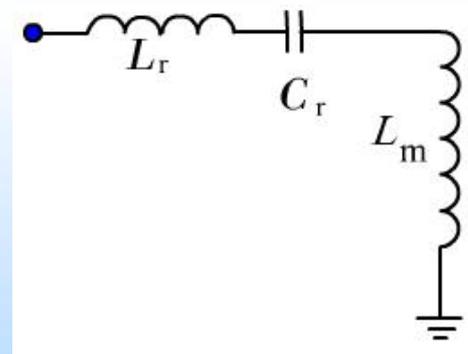
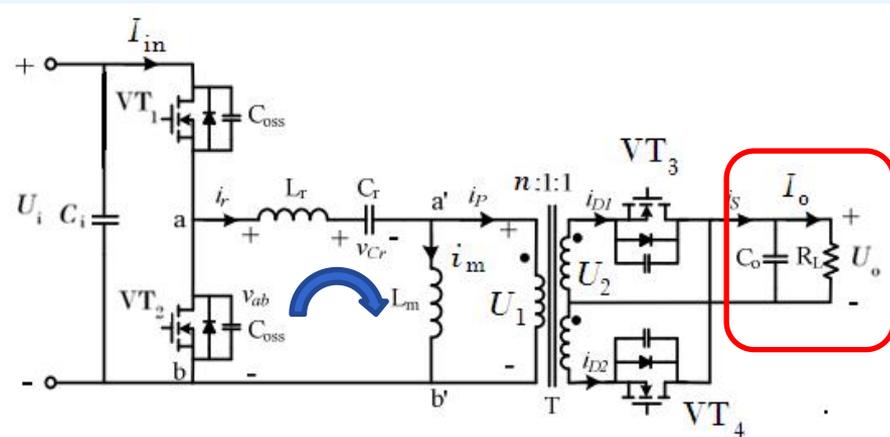
## 串联谐振频率2

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}}$$

其中：激磁电感  $L_m$

当  $i_{L_r} = i_{L_m}$  时

负载电流由滤波电容供电。变压器原副边没有电流流通



# LLC的工作频率 $f_s$ 有3种可能，即

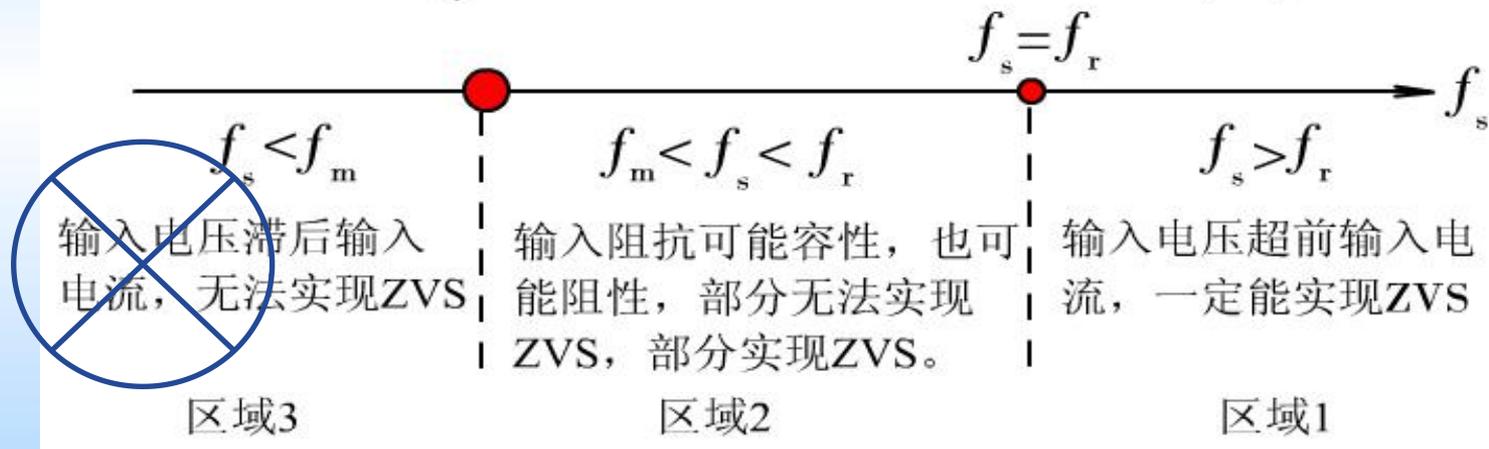
$$f_s < f_m$$

$$f_m < f_s < f_r$$

$$f_s > f_r$$

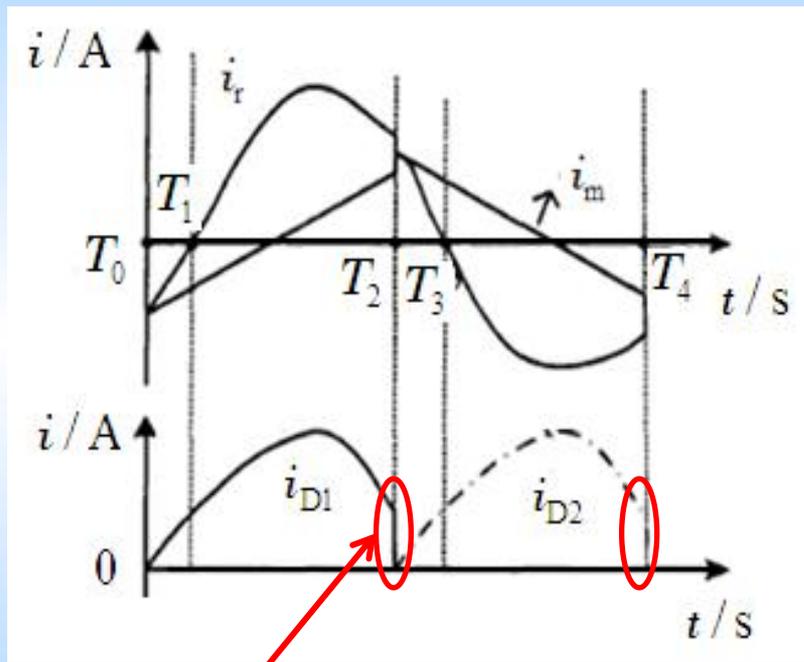
$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

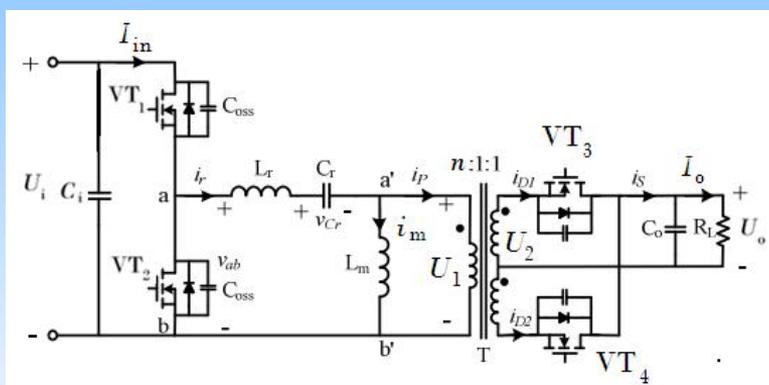


必须让其工作在区域1和区域2，绝对不能在区域3。

$$(1) f_s > f_r$$



副边整流二极管，无法实现零电流ZCS关断。

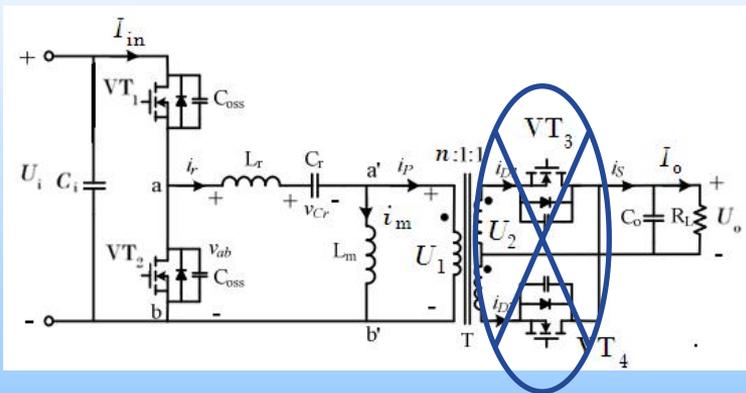
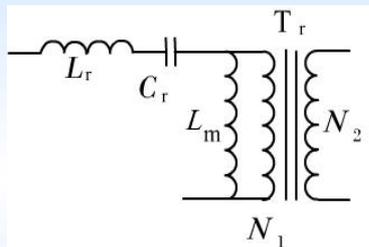


输入阻抗是感性，原边功率管能实现ZVS，也即功率管开通前，其反并联续流二极管导通。

$$(2) f_m < f_s < f_r$$

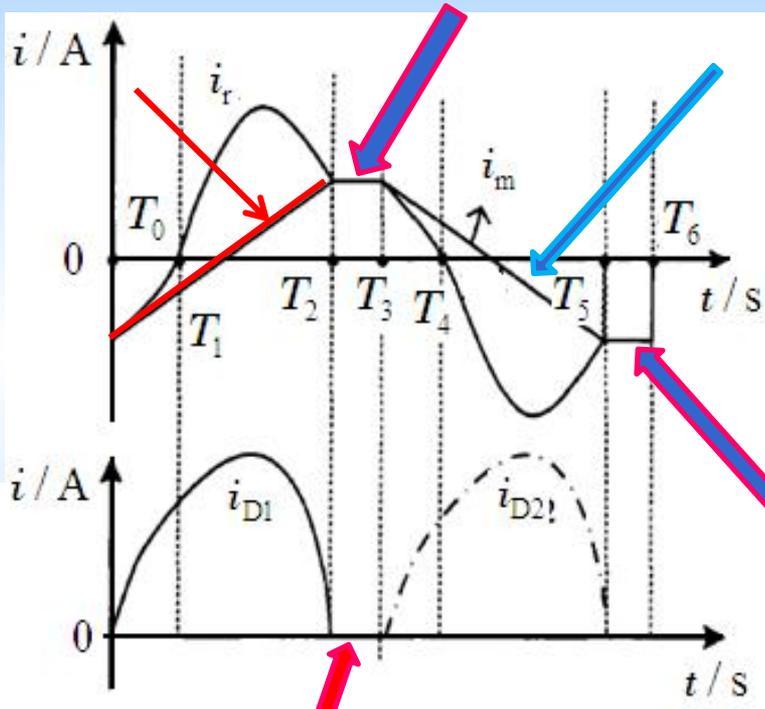
激磁电流  
线性增长

VT<sub>1</sub>ON



激磁电流等  
于谐振电流

$L_m$ 参与谐振

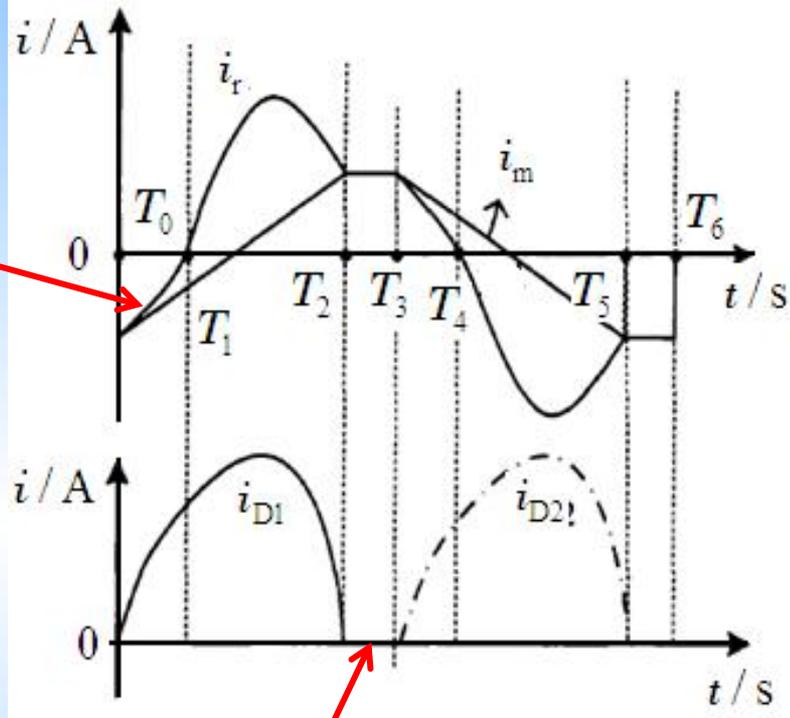


激磁电流  
反向线性  
增长

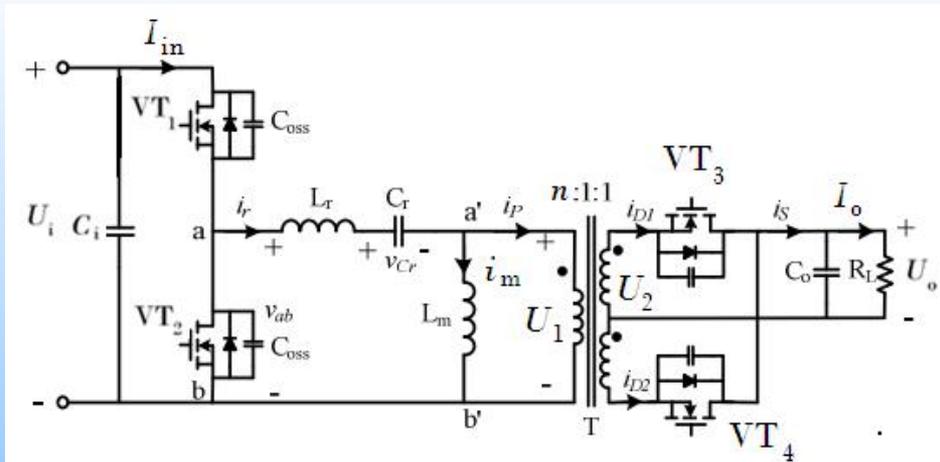
$L_m$ 参与  
谐振

副边两整流管均截止

输入阻抗是感性，原边功率管能实现ZVS，即功率开通前，其反并续流二极管导通。



副边的整流管能实现零电流ZCS关断。







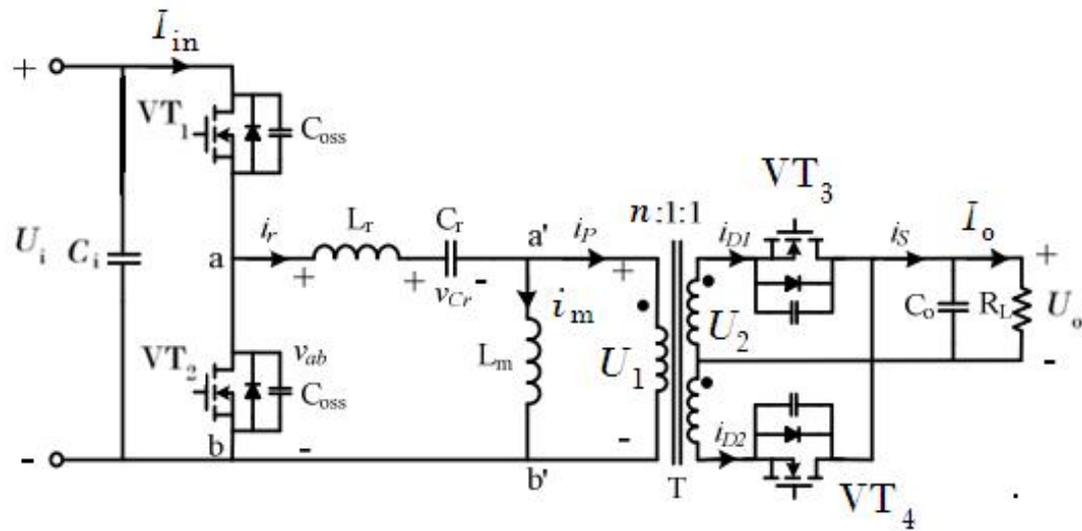
## 2、对谐振电感的要求

谐振频率由电容和电感确定的,即

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

特征阻抗:

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

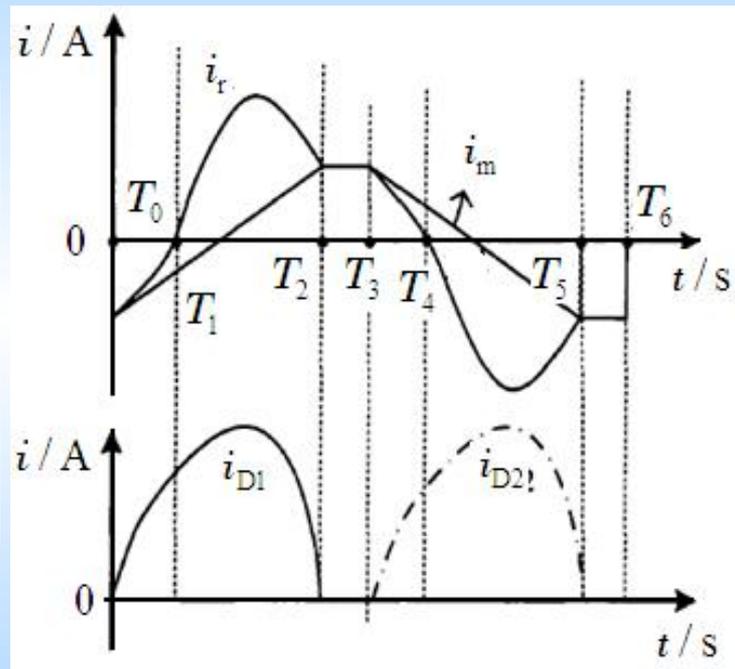
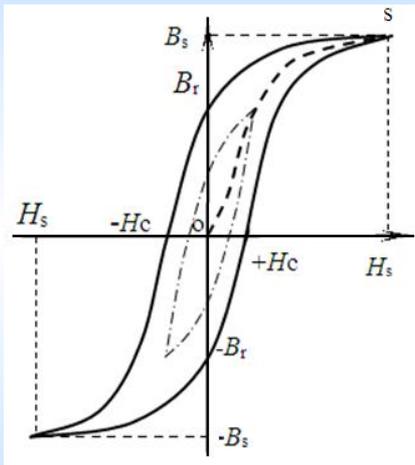


$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

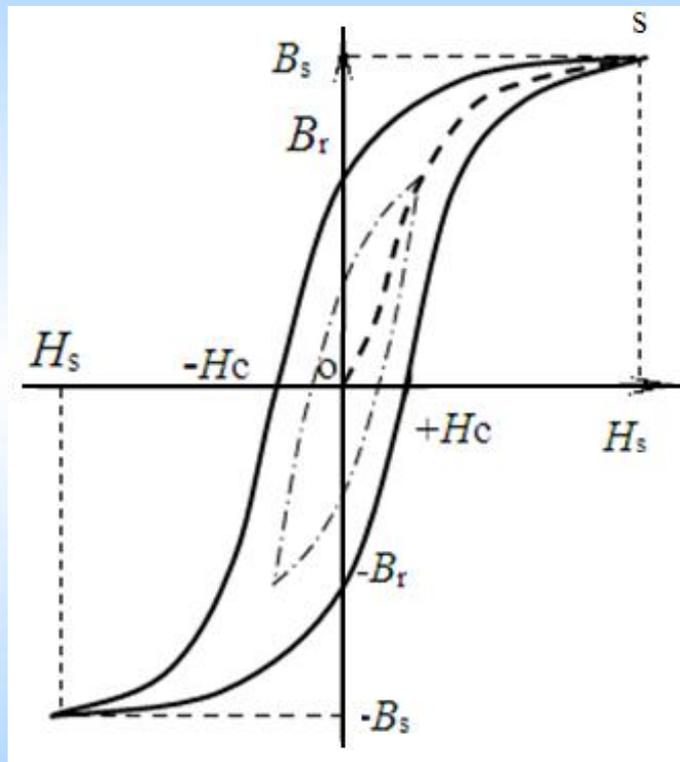
如果谐振电容 $C_r$ 过大，特征阻抗 $Z_r$ 小，则其上电压上升缓慢，谐振槽路的电流过大；如果谐振电感 $L_r$ 过大，则谐振支路电流较小，电流应力较小。

### 3、适合做谐振电感的磁性材料

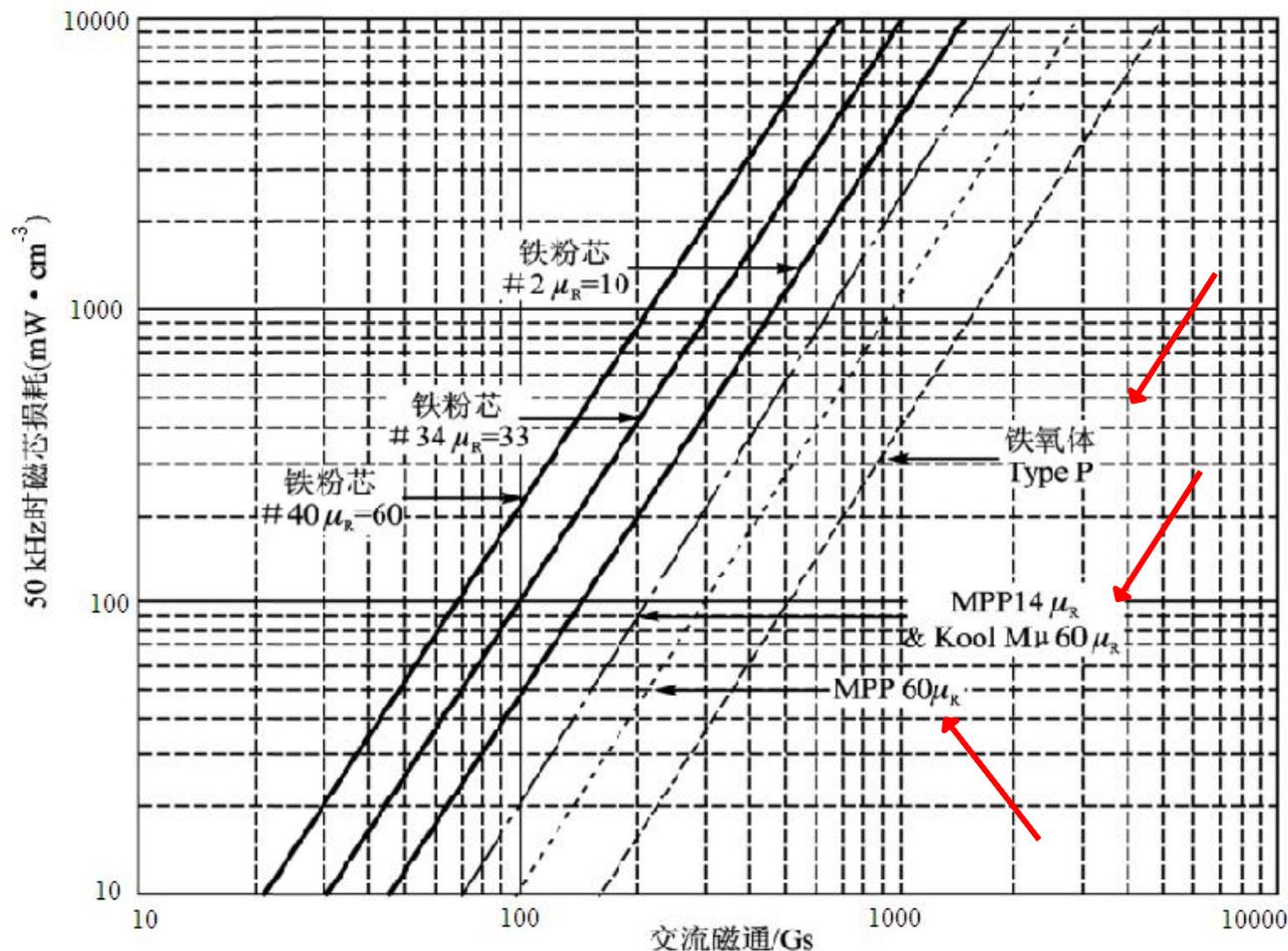
(1) 根据谐振电感中的电流波形可知磁芯工作在1,3象限。根据电路拓扑结构,谐振电感处于原边高交流应力下。



工作频率高或交流电流大时，磁通密度摆幅也更大，磁芯损耗占主要地位，成为限制磁性材料选择的绝对因素。



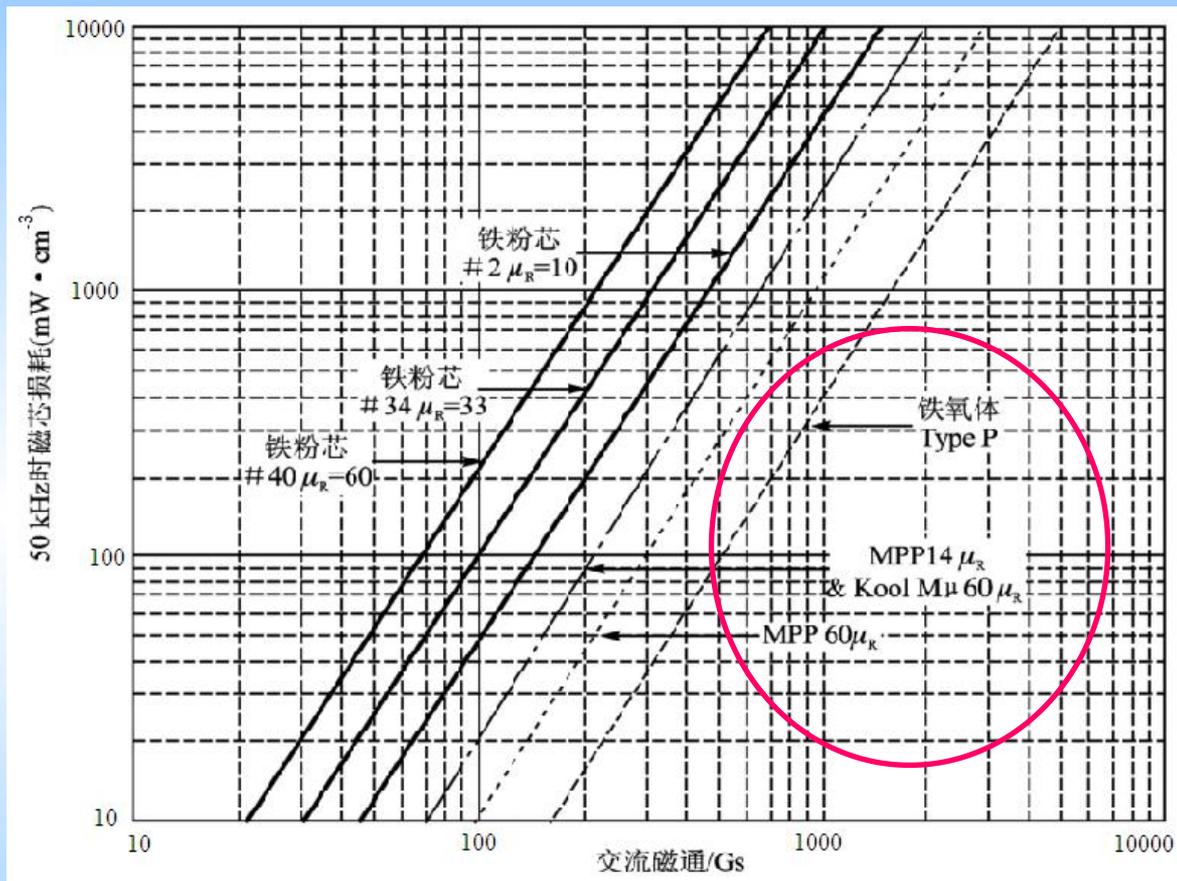
# 几种磁性材料的损耗比较



(2) 由于磁材料的磁导率会受到温度的影响。谐振电感又是电路中的主要参数，因此谐振电感对温度稳定性要求高。

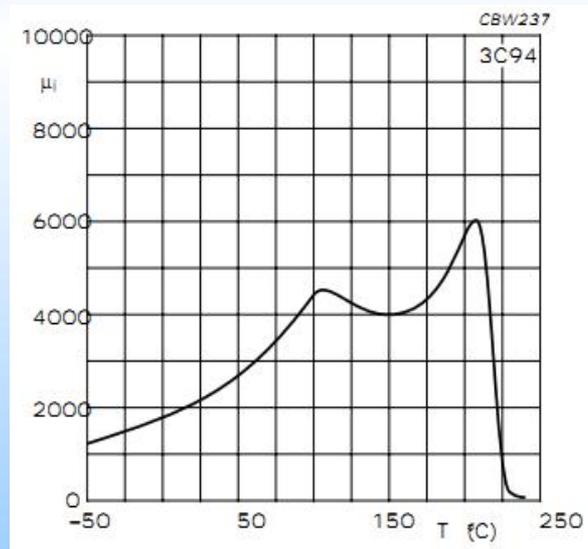
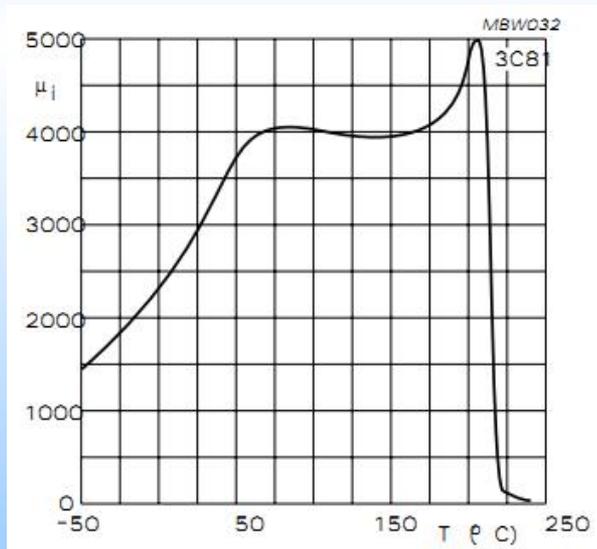
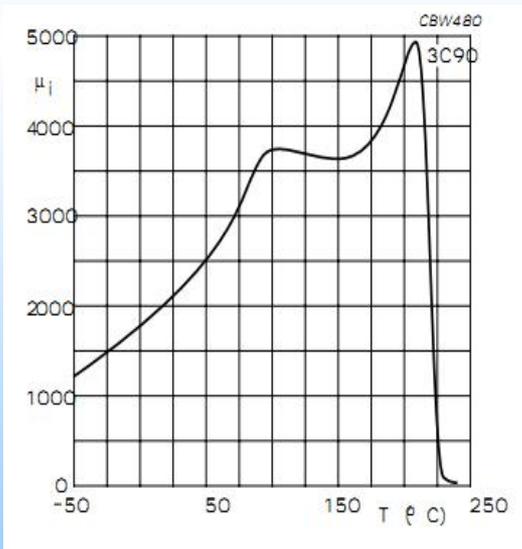
单纯从损耗看  
适合做谐振电  
感的材料有：

MPP、Kool M $\mu$   
和间隙铁氧体  
材料是优选。



但温度特性怎样？

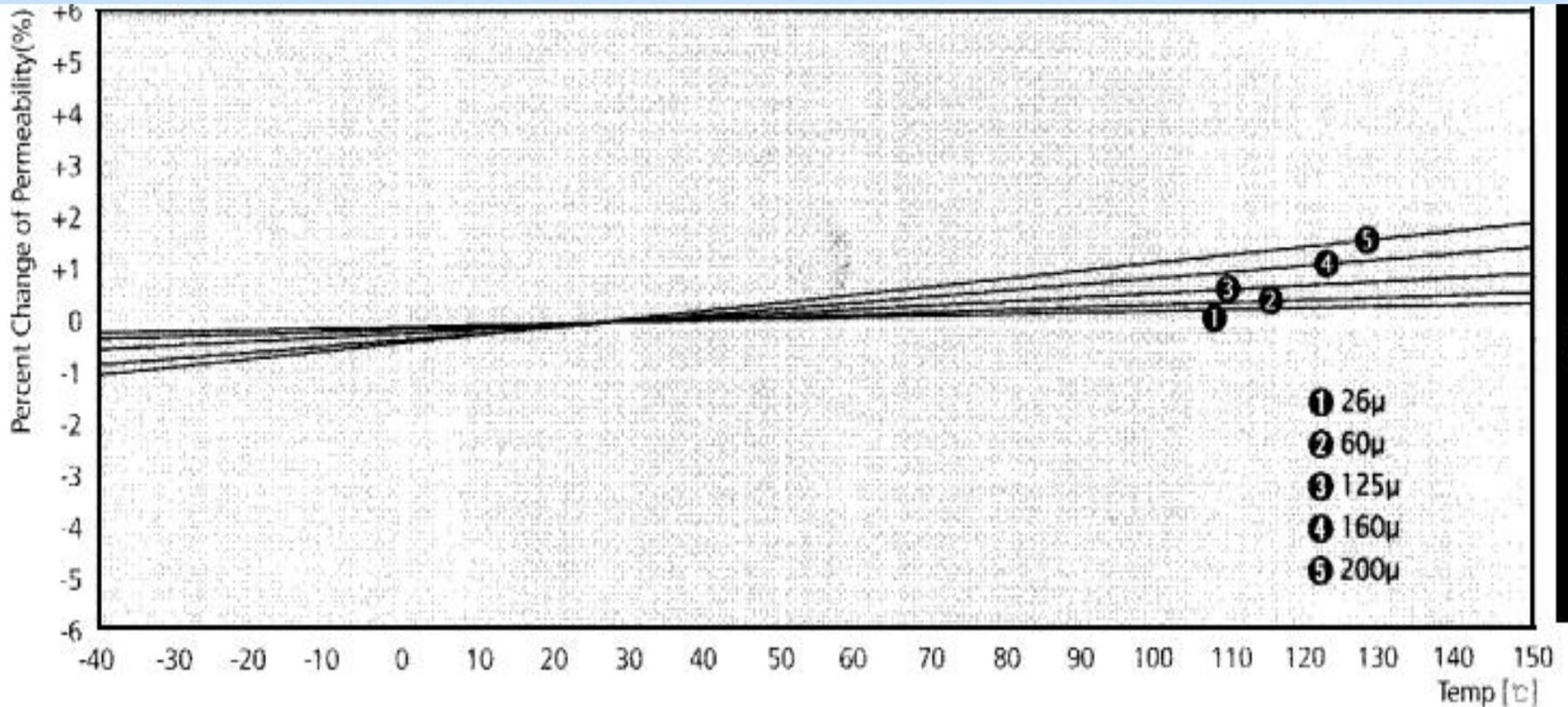
# 铁氧体材料磁导率随温度变化特性曲线



## 几种粉芯材料的温度稳定性

	钼坡莫 MPP	高磁通 High Flux	铁硅铝 Kool M $\mu$ <sup>®</sup>	铁硅 XF <sub>LUX</sub> <sup>®</sup>
磁导率	14-550	14-160	26-125	60
磁芯损耗	最低	中等	低	高
磁导率 - 直流偏置特性	更好	最好	好	最好
温度稳定性	最好	非常好	非常好	好
温度等级	可在 200°C 下连续工作	可在 200°C 下连续工作	可在 200°C 下连续工作	可在 200°C 下连续工作
饱和特性	软饱和	软饱和	软饱和	软饱和
镍含量	81%	50%	0%	0%
相对成本	高	中等	低	低

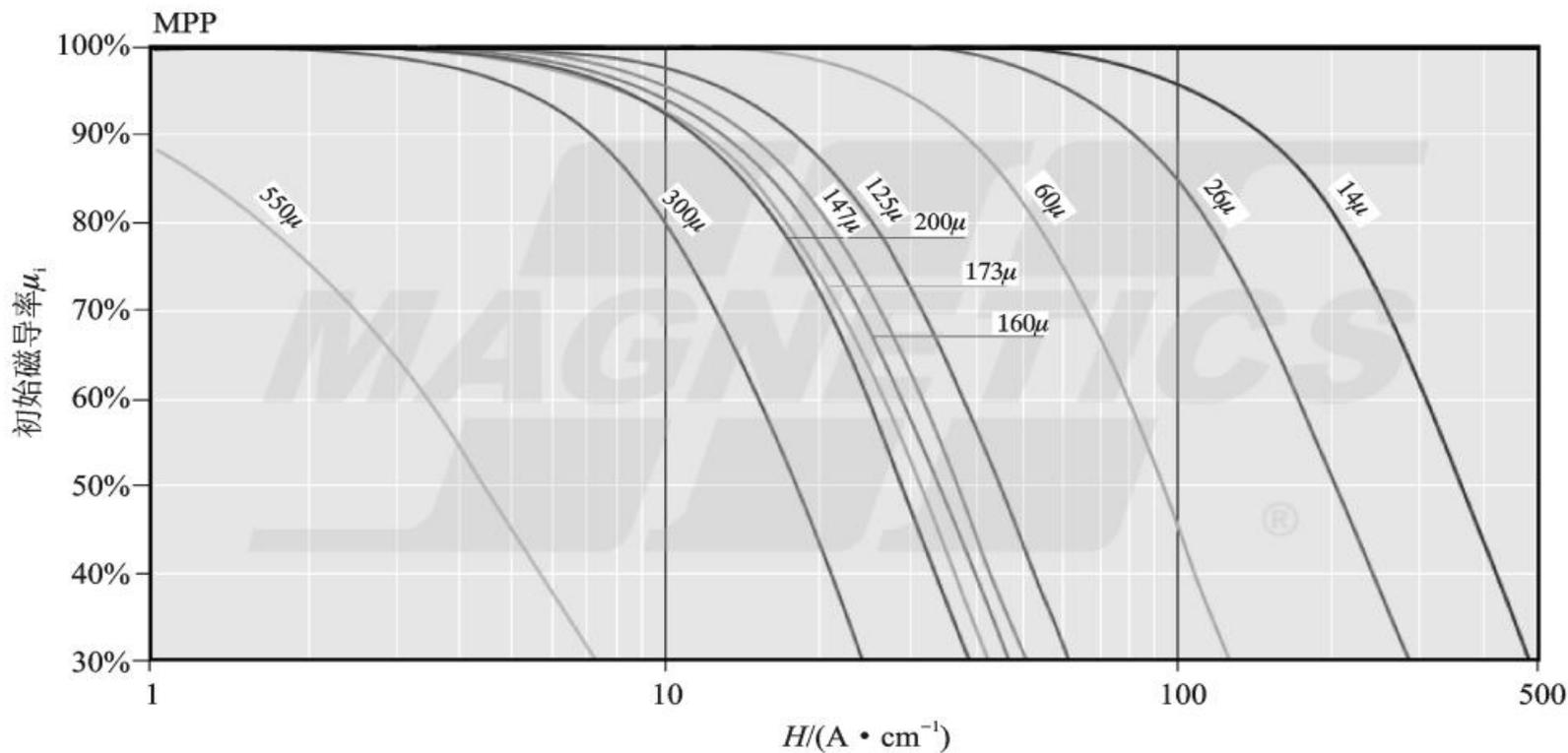
# 粉芯材料的磁导率与温度稳定性的关系



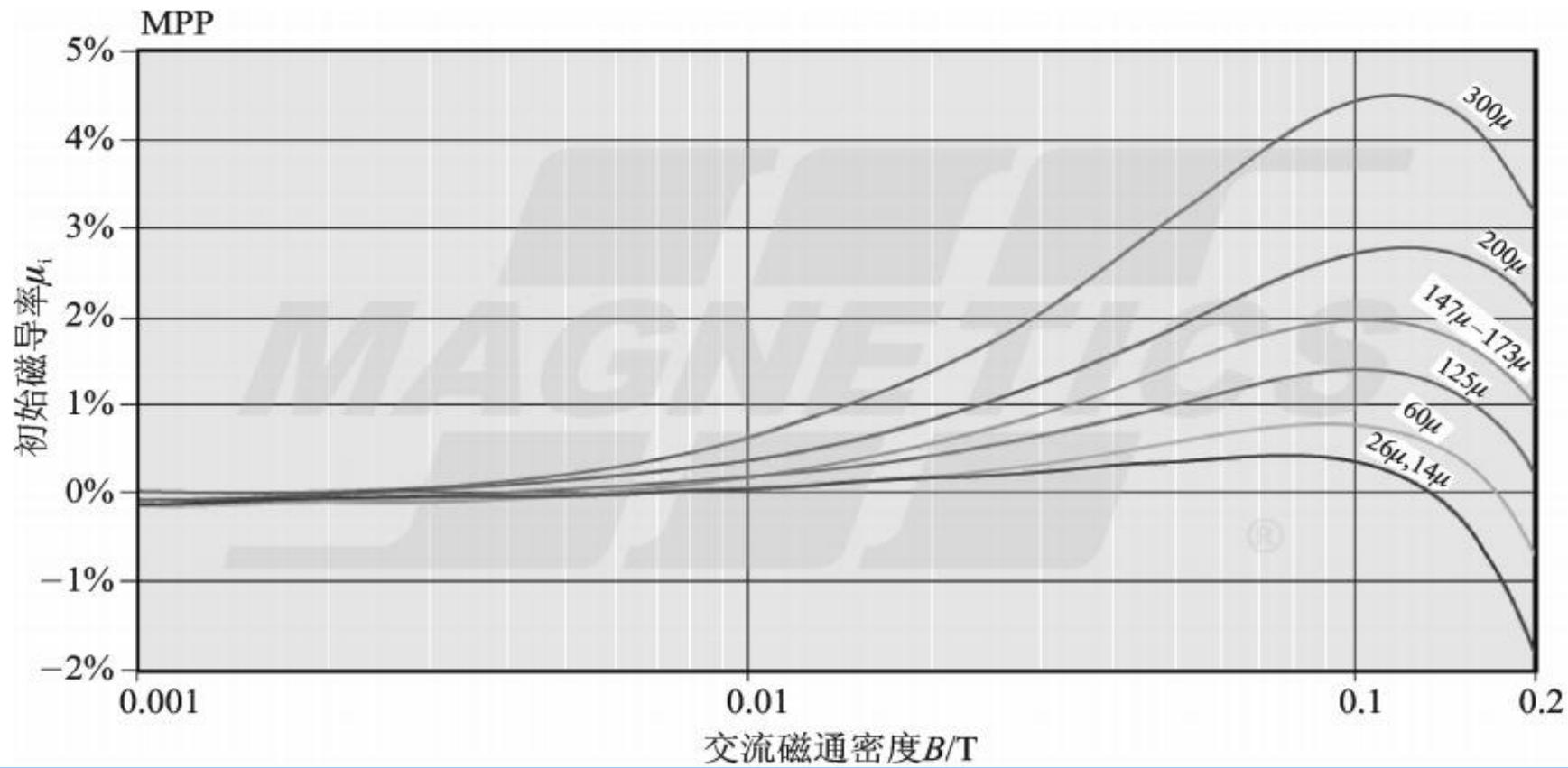
### (3) 磁导率与直流偏磁的关系及磁导率与交流磁通密度的关系

如果选择磁粉芯材料，则磁导率随着直流偏磁及交流磁通密度是如何变化的？

# 磁导率随着直流偏磁的变化特性



# 磁导率与交流磁通密度的关系



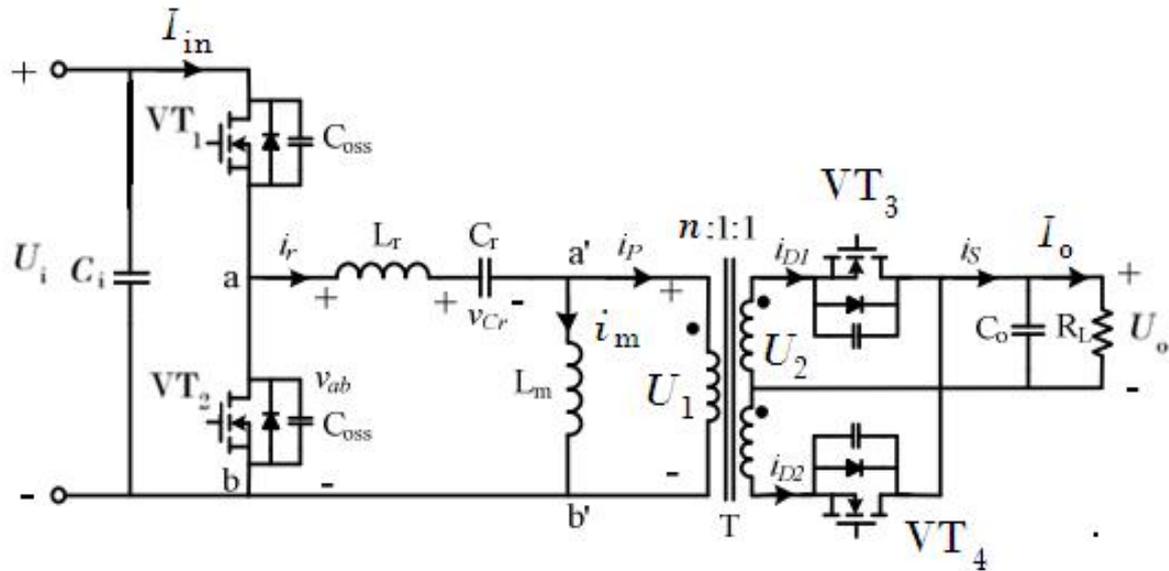
根据上述分析，可以选用MPP较低磁导率磁芯为谐振电感材料，但价格昂贵。

## 4、电感设计举例

### (1) LLC半桥变换器的设计要求

表1 LLC半桥变换器的设计要求

额定输入电压/V	400	最低输入电压/V	350
最高输入电压/V	420	额定输出电压/V	24
额定输出电流/A	10	额定负载电阻/ $\Omega$	2.4
原边开关管导通电阻/ $\Omega$	0.22	开关频率/kHz	100
副边开关管导通电阻/ $\Omega$	0.007	原边开关管等效电容/pF	250pF
谐振电感损耗/W	<1	允许温升/ $^{\circ}\text{C}$	40



VT<sub>1</sub>和VT<sub>2</sub>互补导通，各占50%。

★LLC主变压器变比的选取在最低输入电压下选取，则变比为

$$n = \frac{U_{i \min}}{4U_o} = \frac{350}{4 \times 24} = 8.75$$

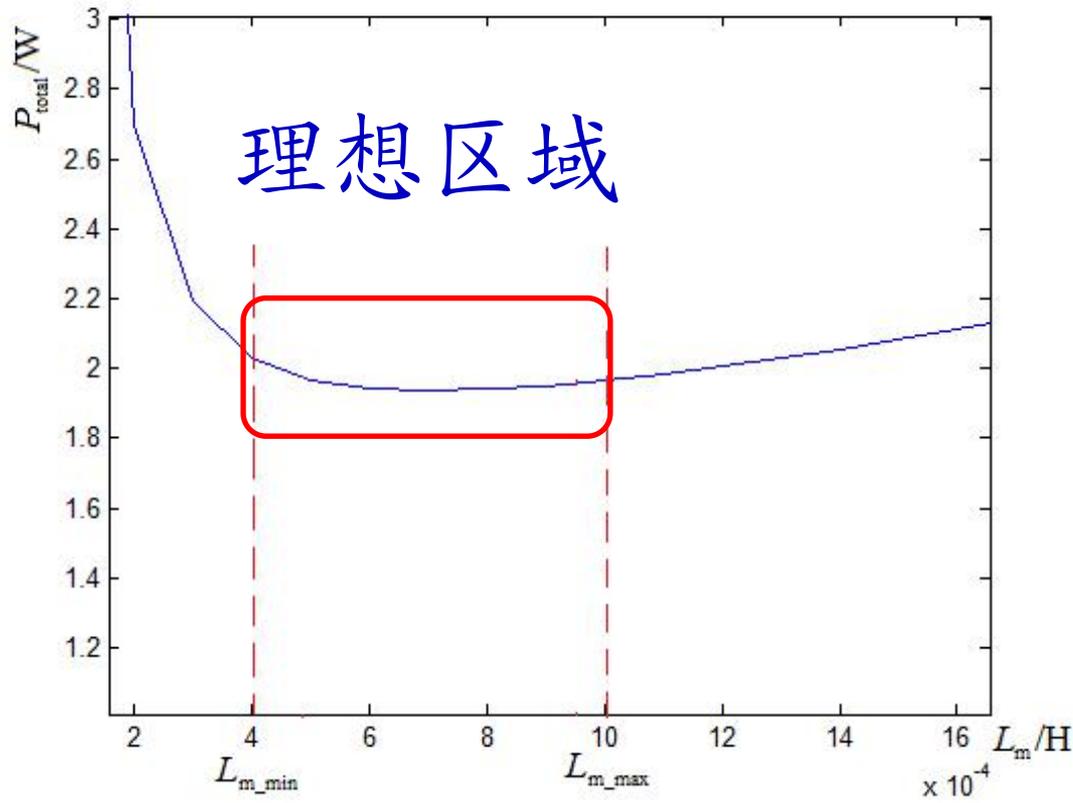
在进行损耗分析前，做一些定义

品质因数:  $Q = \frac{Z_r}{n^2 R_{\text{eq}}} = \frac{\pi^2}{8n^2 R_L} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$

电感系数:  $k_{Lm} = \frac{L_m}{L_r}$

归一化频率:  $k_f = \frac{f_s}{f_r}$

在已知电路其它参数的前提条件下，电路总损耗  
仅与主变压器的激磁电感 $L_m$ 有关



实际谐振频率选取常以损耗作为重要因素。

$$P_{\text{total}} = \left[ \frac{n^2 U_o^2 T_r^2 (2T - T_r)}{32 L_m^2 T} + \frac{\pi^2 I_o^2 T^2}{8 n^2 T_r^2} \right] (R_{P\_on} + 2R_{Lr} + 2R_{Tp}) \\ + \left[ \frac{(5\pi^2 - 48)n U_o^2 T_r^2}{96 \pi^2 L_m^2 T} + \frac{\pi^2 I_o^2 T^2}{8 T_r^2} \right] (R_{s\_on} + 2R_{Ts})$$

Referency: Jun Zhang, William G. Hurley Optimized Design of LLC Resonant Converters Incorporating Planar Magnetics. 978-1-4673-4355-8/13/\$31.00 ©2013 IEEE

# 增益分析

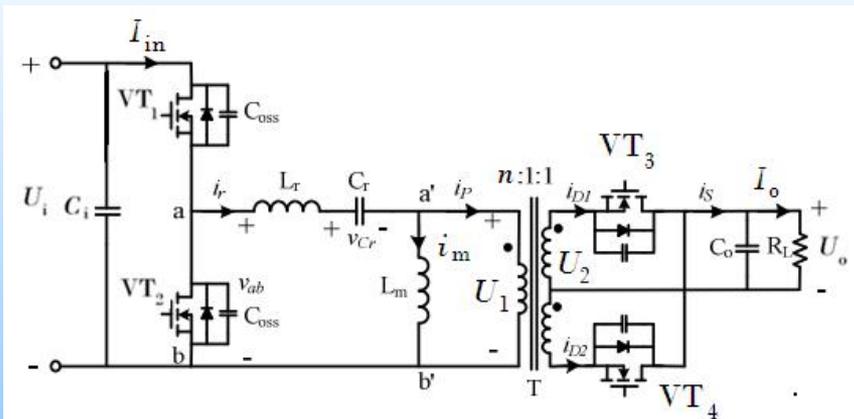
$$M = \frac{2nU_o}{U_i} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{1}{k_{Lm}} \left(1 - \frac{1}{k_f^2}\right)\right]^2 + \left[\left(k_f - \frac{1}{k_f}\right)Q\right]^2}}$$

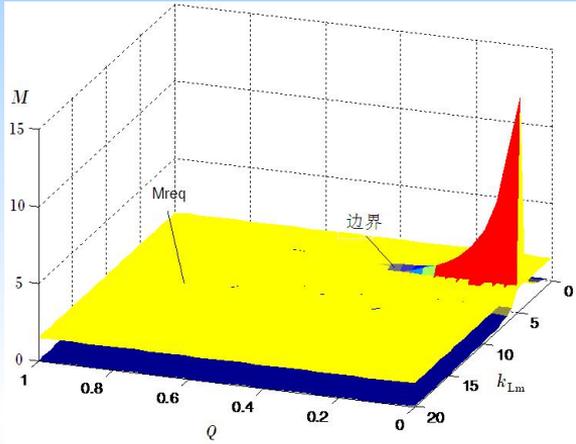
式中:

$$k_{Lm} = \frac{L_m}{L_r}$$

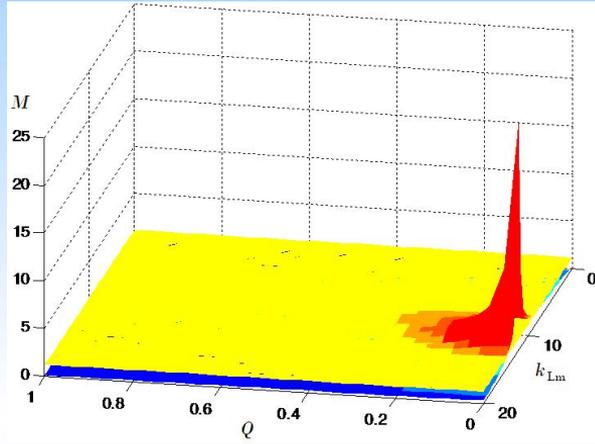
$$k_f = \frac{f_s}{f_r}$$

$$Q = \frac{Z_r}{n^2 R_{eq}} = \frac{\pi^2}{8n^2 R_L} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

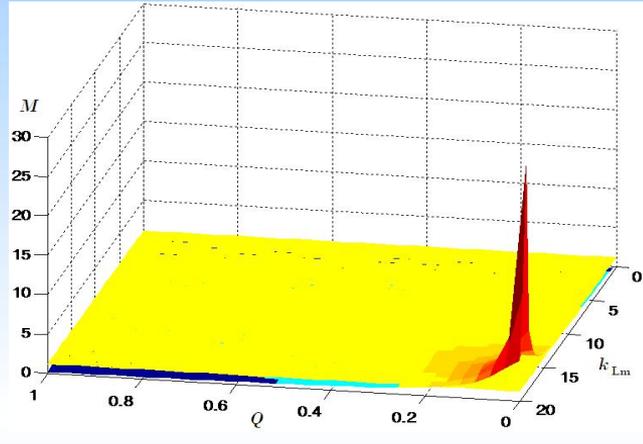




$$L_m = L_{m\_min}$$



$$L_m = 650\mu\text{H}$$



$$L_m = L_{m\_max}$$

激磁电感越大，增益越大。

实际的谐振频率选取受到增益、损耗等诸多因素的影响，可进行变换器的损耗分析和优化设计，获得归一化电感范围。

选取 品质因数

$$Q = \frac{\pi^2}{8n^2 R_L} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = 0.493$$

电感系数

$$k_{Lm} = \frac{L_m}{L_r} = 4.5$$

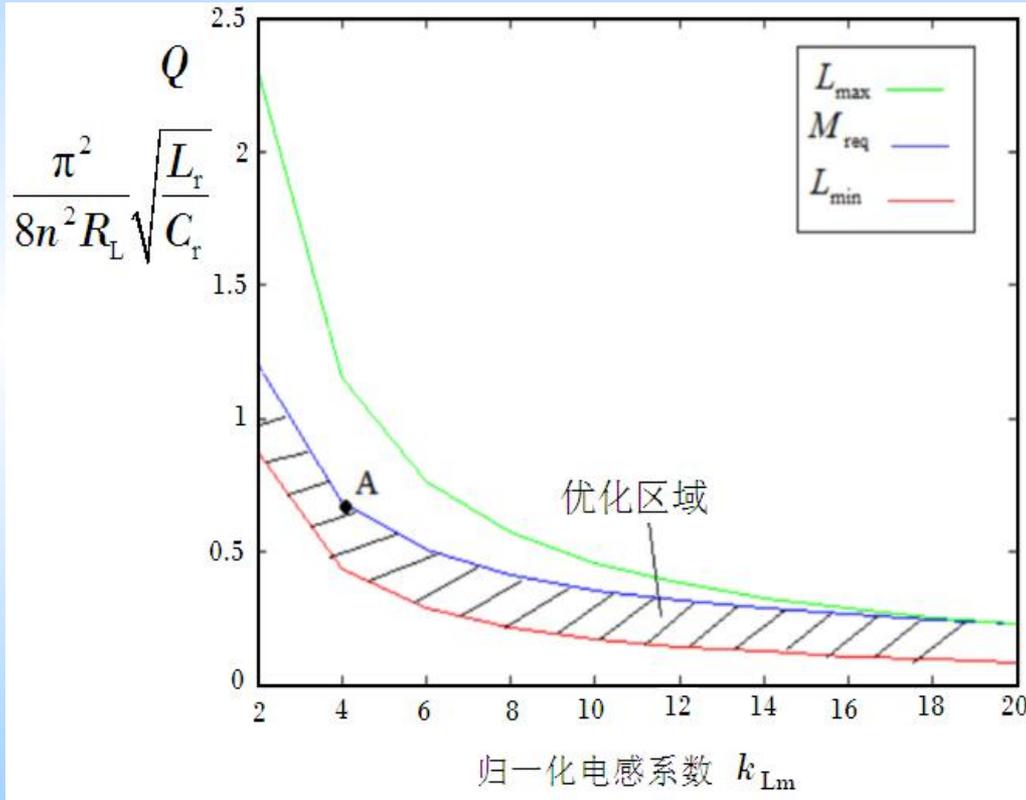
# 选取

## 品质因数

$$Q = \frac{\pi^2}{8n^2 R_L} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = 0.493$$

## 电感系数

$$k_{Lm} = \frac{L_m}{L_r} = 4.5$$



考虑到空载和谐振支路的峰值电流

变压器激磁电感为

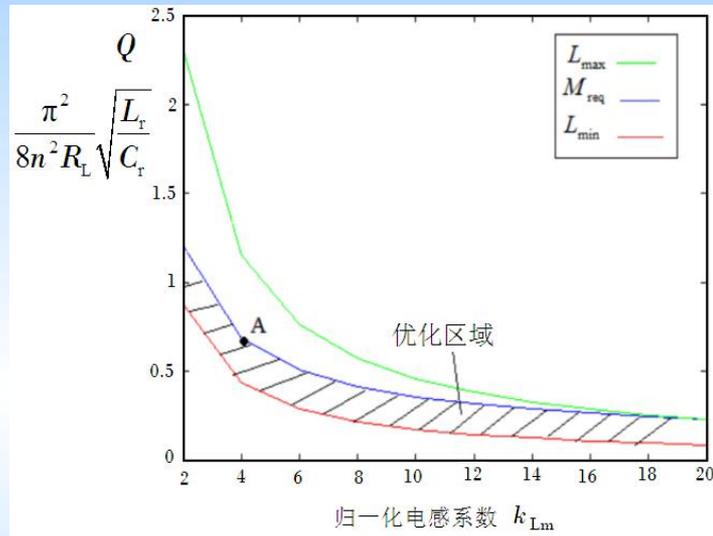
$$L_m = 480\mu\text{H}$$

谐振电感为

$$L_r = L_m / k_{Lm} = 480 / 4.5 = 106\mu\text{H}$$

谐振电容

$$C_r = \left( \frac{\pi^2}{8n^2 R_L k_y} \right)^2 L_r = \left( \frac{3.14^2}{8 \times 8.75^2 \times 2.4 \times 0.493} \right)^2 \times 106 \times 10^{-6} = 19.6\text{nF}$$



考虑到空载和谐振支路的峰值电流

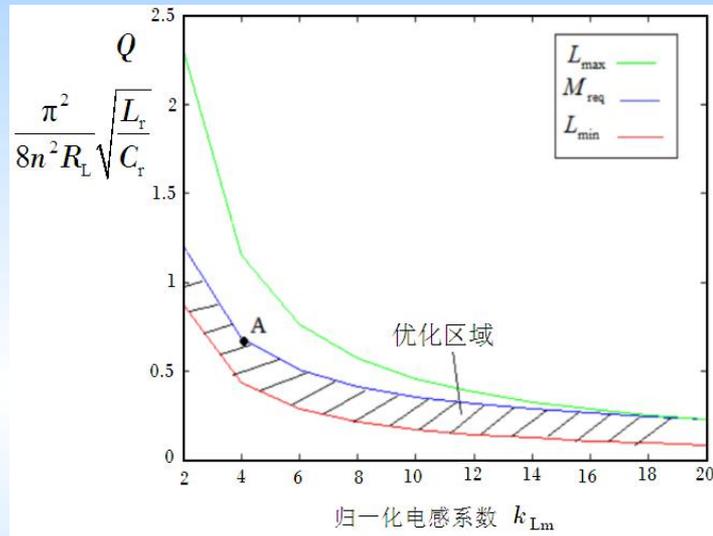
变压器激磁电感为

$$L_m = 480\mu\text{H}$$

谐振电感总值为

$$L_{rt} = L_m / k_{Lm} = 480 / 4.5 = 106\mu\text{H}$$

需要说明的是谐振电感包含了变压器漏感，  
如果漏感不足，则需要专门的谐振电感。



## 谐振频率1

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{rt}C_r}} = \frac{1}{2 \times 3.14\sqrt{106 \times 20 \times 10^{-6-9}}} = \frac{10^8}{6.28 \times 145.6} = 109\text{kHz}$$

$$T_r = 9.2\mu\text{s}$$

## 谐振频率2

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{rt} + L_m)C_r}} = \frac{1}{2 \times 3.14\sqrt{(106 + 480) \times 20 \times 10^{-6-9}}} = \frac{10^8}{6.28 \times 342.3} = 46.5\text{kHz}$$

特征阻抗

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_{rt}}{C_r}} = \sqrt{\frac{106 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-9}}} = 0.73 \cdot 10^2 = 73\Omega$$

归一化频率

$$k_f = \frac{f_s}{f_r} = \frac{100}{109} = 0.92$$

谐振支路的峰值电流

$$I_{rP} = \sqrt{\left(\frac{\pi I_o}{2nk_f}\right)^2 + \left(\frac{nU_o}{4f_r L_m}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{3.14 \times 10}{2 \times 8.75 \times 0.92}\right)^2 + \left(\frac{8.75 \times 24}{4 \times 109 \times 10^3 \times 480 \times 10^{-6}}\right)^2} = 2.19\text{A}$$

谐振支路电流有效值为

$$\begin{aligned} I_{r\_rms} &= \sqrt{I_m^2 + \left(\frac{I_o}{n}\right)^2} = \sqrt{\frac{n^2 U_o^2 T_r^2 (2T - T_r)}{32 L_m^2 T} + \frac{\pi^2 I_o^2 T^2}{8 n^2 T_r^2}} \\ &= \sqrt{\frac{8.75^2 \times 24^2 \times (9.2 \times 10^{-6})^2 \times (20 - 9.2) \times 10^{-6}}{32 \times (480 \times 10^{-6})^2 \times 10 \times 10^{-6}} + \frac{3.14^2 \times 10^2 \times (10 \times 10^{-6})^2}{8 \times 8.75^2 \times (9.2 \times 10^{-6})^2}} \\ &= \sqrt{\frac{8.75^2 \times 24^2 \times 9.2^2 \times 10.8}{32 \times 480^2 \times 10} + \frac{3.14^2 \times 10^2 \times 10^2}{8 \times 8.75^2 \times 9.2^2}} = \sqrt{0.547 + 1.902} = 1.56\text{A} \end{aligned}$$

用于计算导线直径

## (2) 采用MPP粉芯进行电感设计

谐振电感参数影响电路性能，需要温度稳定性好和磁化稳定性好，由于承受高交流应力，磁芯损耗和线圈损耗都希望很低。

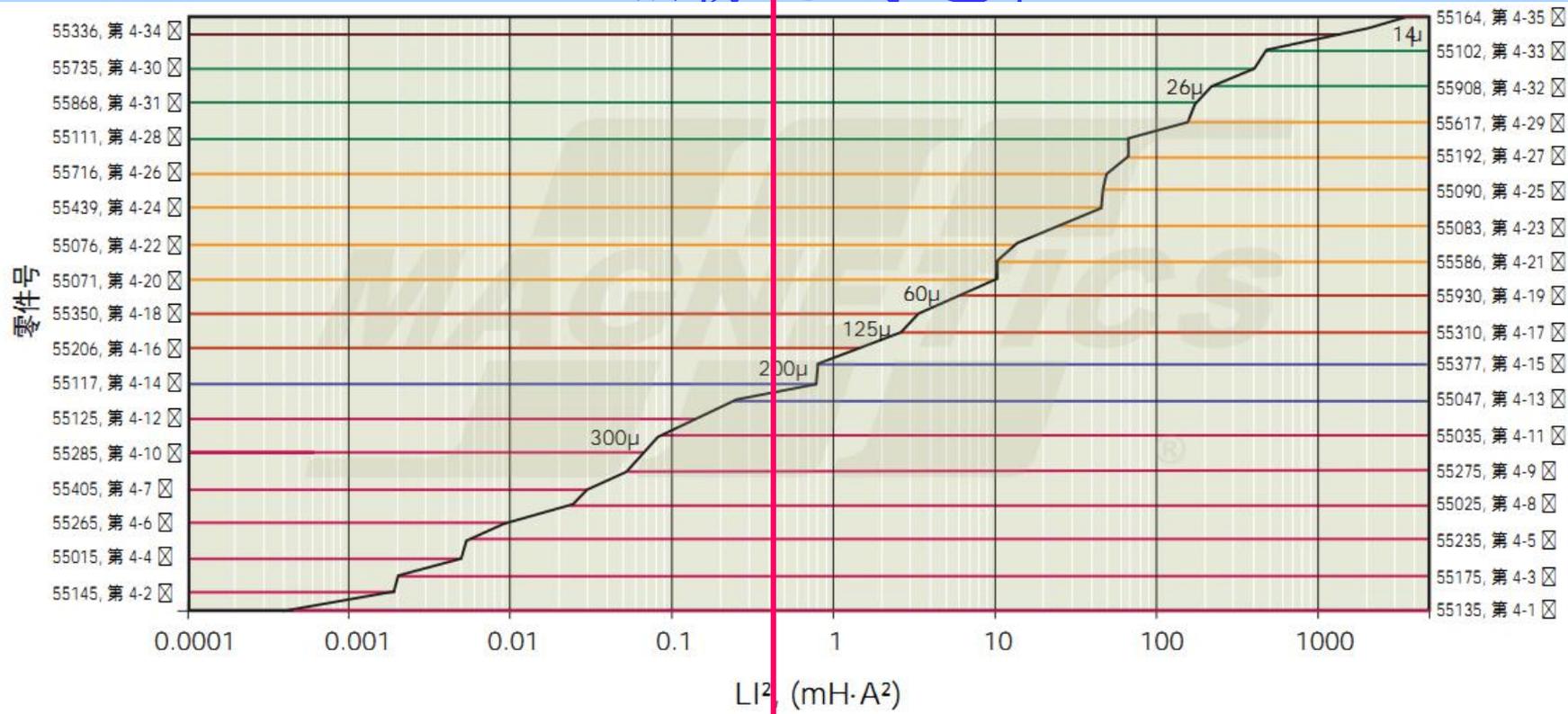
## ★粗选磁芯尺寸

设需要的谐振电感量为  $L_r = 50\mu\text{H}$

计算电感需要的最大储能

$$W = L_r I_{rp}^2 = 50 \times 10^{-6} \times 2.19^2 = 0.24 \text{mH} \cdot \text{A}^2$$

# MPP磁粉芯的选取

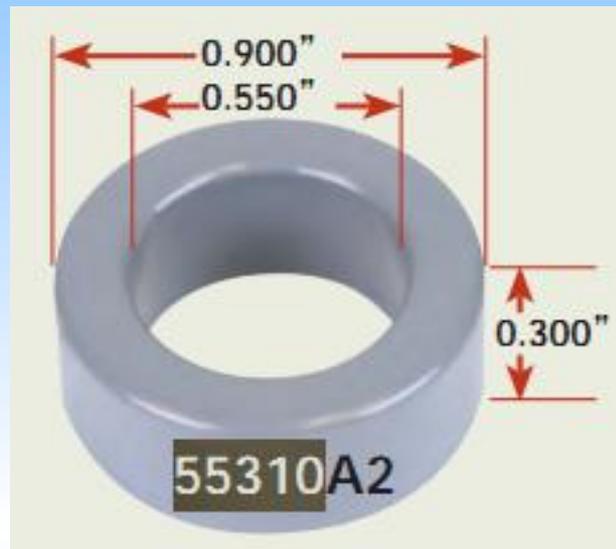


考虑到直流磁化和交流磁化下磁导率均会下降，故选择磁导率低一级的磁芯。如图125 $\mu$ 这种牌号的磁芯

# 最接近的磁芯是55310

## 22.9 mm 外径

磁芯尺寸	外径(最大)	内径(最小)	高度(最大)
涂层前 (标称)	22.9 mm/0.900 in	14.0 mm/0.550 in	7.62 mm/0.300 in
涂塑后 (限定)	23.7 mm/0.930 in	13.3 mm/0.525 in	8.39 mm/0.330 in



磁导率 ( $\mu$ )	$A_L \pm 8\%$	零件号			
		MPP	High Flux	Kool M $\mu$ <sup>®</sup>	XFlux <sup>®</sup>
14	9.9	55313	58313	-	-
26	19	55312	58312	77312	-
40	29	-	-	77316	-
60	43	55059	58059	77059	78059
75	54	-	-	77315	-
90	65	-	-	77314	-
125	90	55310	58310	77310	-
147	106	55309	58309	-	-
160	115	55308	58308	-	-
173	124	55304	-	-	-
200	144	55307	-	-	-
300	216	55305	-	-	-
550	396	55306	-	-	-

## 55310的磁导率和电感因数

1000匝电感因数:

$$A_L = 90(1 \pm 8\%) \times 10^{-6} \text{ mH}$$

求匝数:

$$N = \sqrt{\frac{L_r}{A_L}} = \sqrt{\frac{50 \times 10^{-6}}{90 \times 0.92 \times 10^{-6} \times 10^{-3}}} = \sqrt{604} = 24.6$$

# ★计算磁通密度

## 谐振电感电流峰值

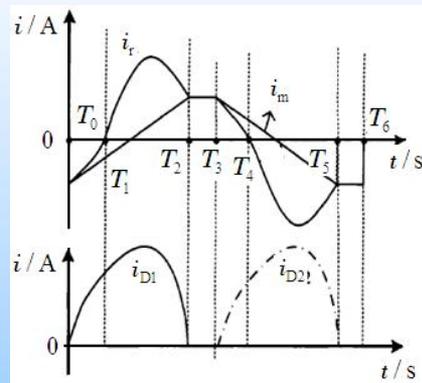
$$I_{rP} = 2.19A$$

$$H_p = \frac{0.4\pi NI_{rP}}{l_c} = \frac{0.4 \times 3.14 \times 25 \times 2.19}{5.67} = 12.10Oe$$

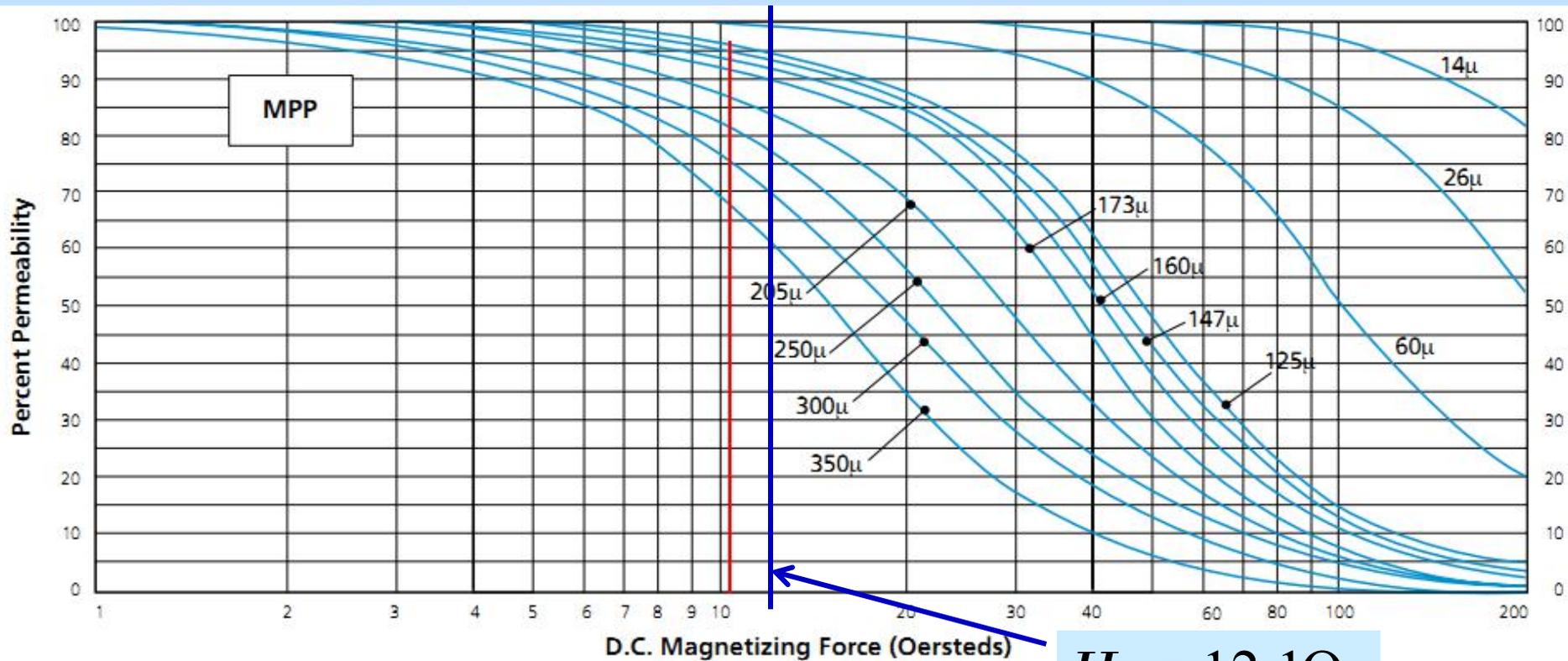
$$B_p = \mu H_p = 125 \times 12.1 = 1516Gs$$

### 物理特性

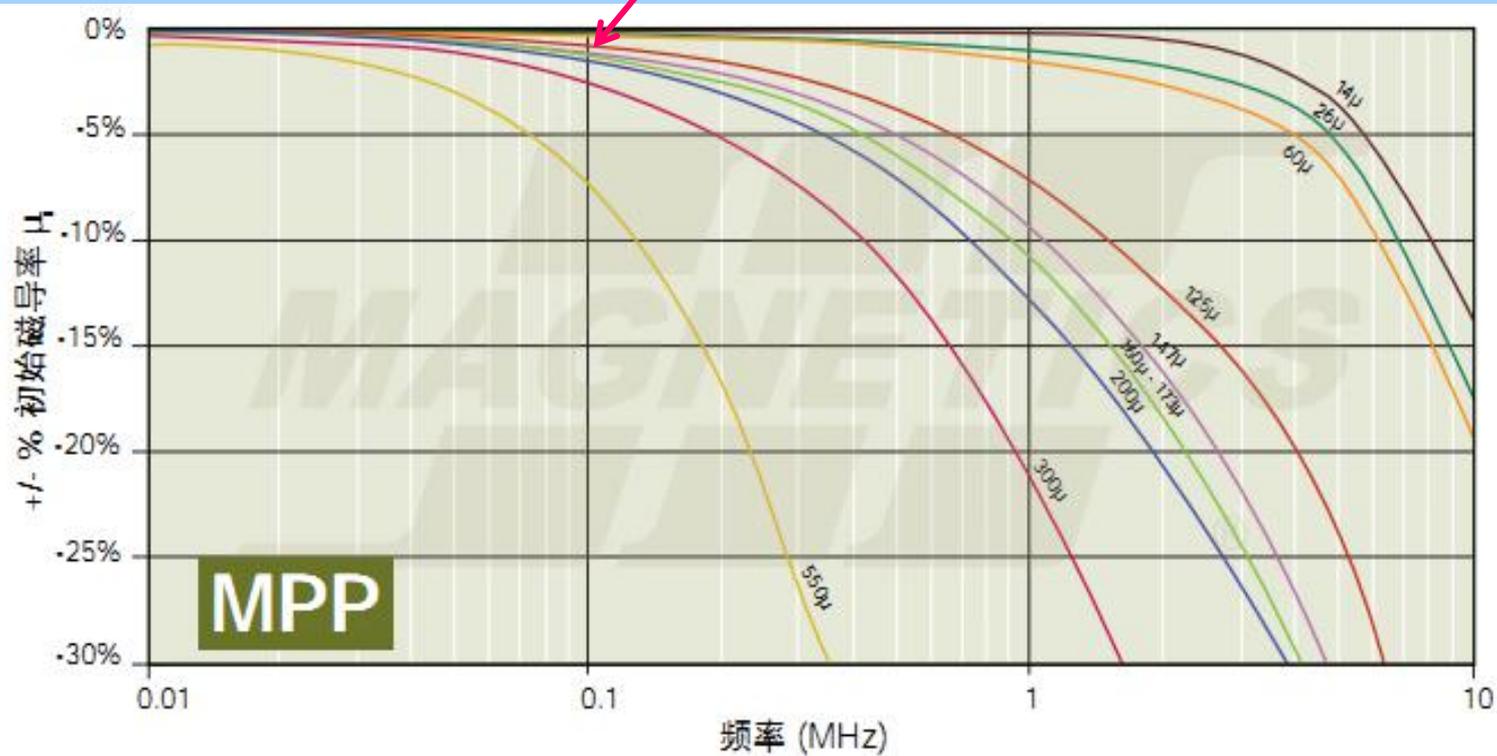
窗口面积	139 mm <sup>2</sup>
截面积	31.7 mm <sup>2</sup>
路径长度	56.7 mm
体积	1,800 mm <sup>3</sup>
重量 - MPP	16 g
重量 - High Flux	15 g
重量 - Kool M $\mu$ <sup>®</sup>	12 g
重量 - XF <sub>LUX</sub> <sup>®</sup>	13 g
面积乘积	4,430 mm <sup>4</sup>



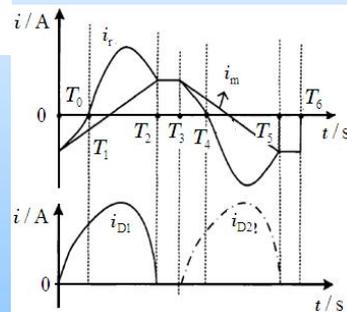
峰值电流时电感量将下降，通常磁导率下降到80%是允许的，否则要更换磁导率更低的磁芯。

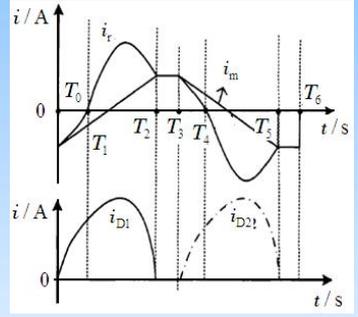
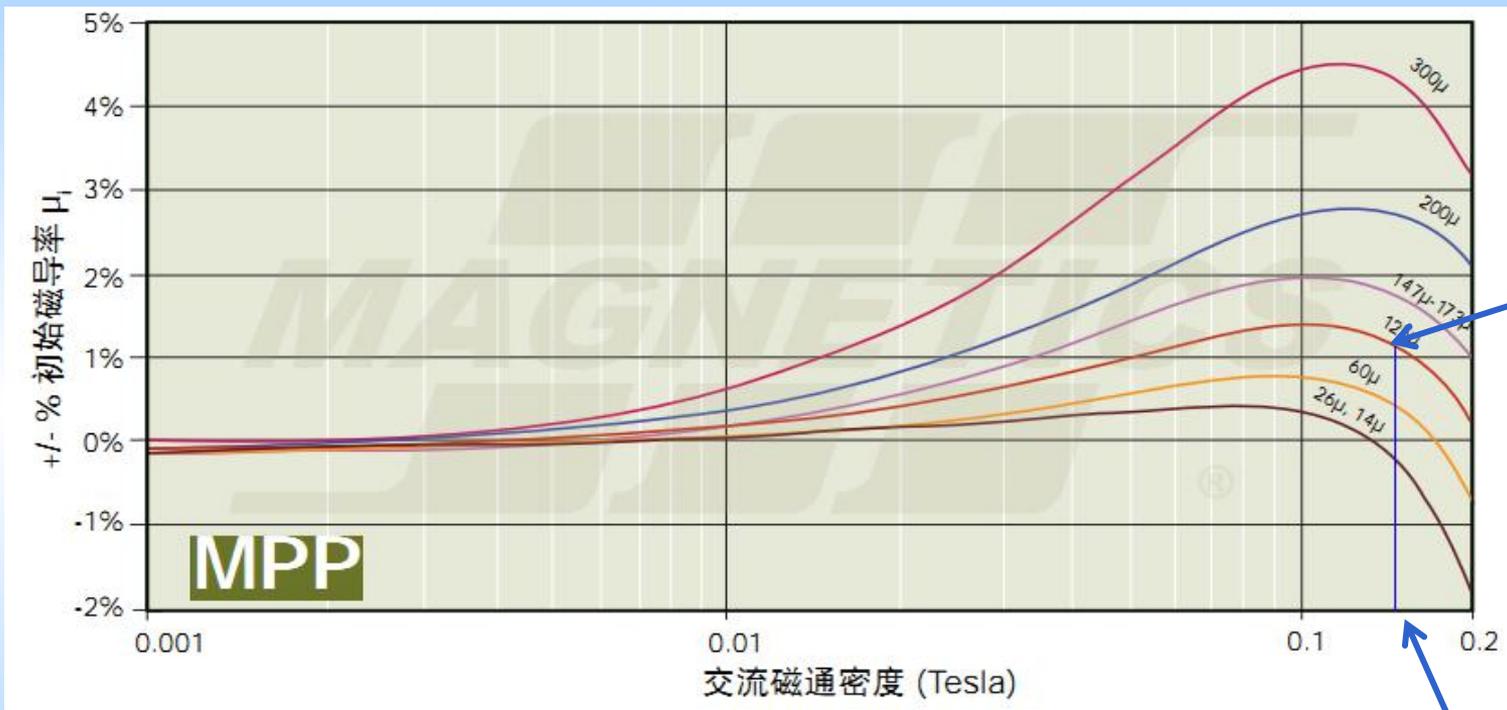


$$H_p = 12.10e$$



磁导率随工作频率的变化：  
100kHz时，变化率为1.2%。





磁导率随交流磁通密度的变化: 1.2%

$$B_p = 1516Gs$$

## 磁芯损耗分析

磁芯损耗由于材料中磁场强度的变化产生,磁芯损耗密度( $P_{cV}$ )是交流磁通摆动( $\frac{1}{2} \Delta B=B_p$ )的半值和频率( $f$ )的函数。

## 磁芯损耗分析

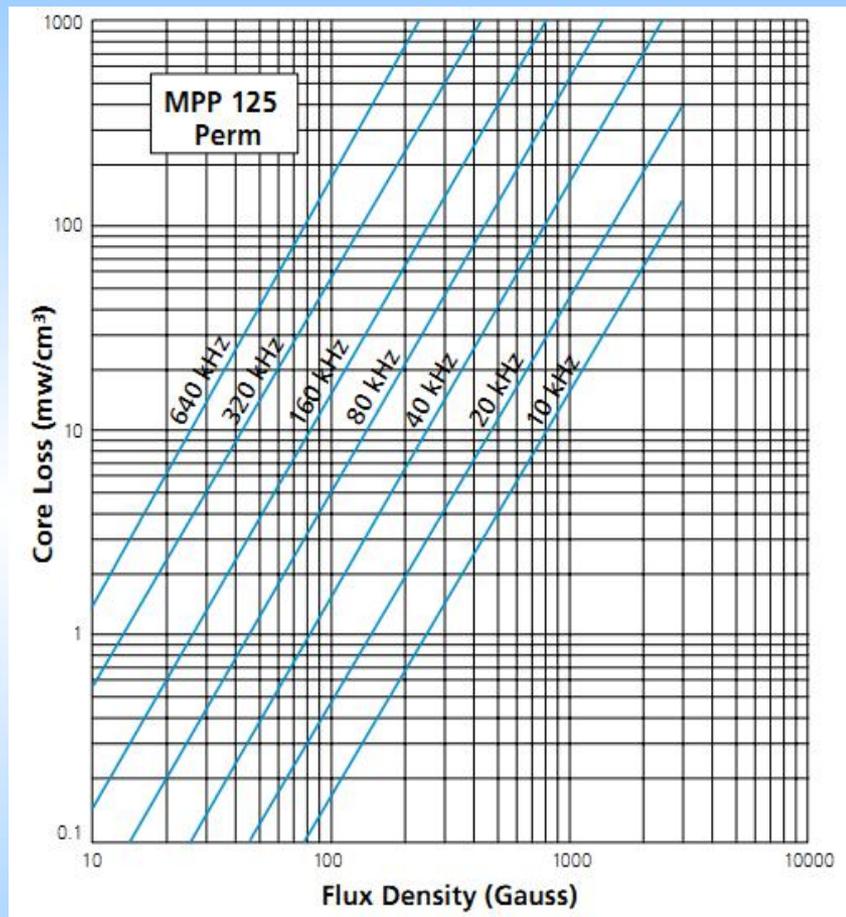
磁芯损耗密度  $P_{cV} = aB_p^b f^c$

式中a, b, c是由曲线契合度决定的常数

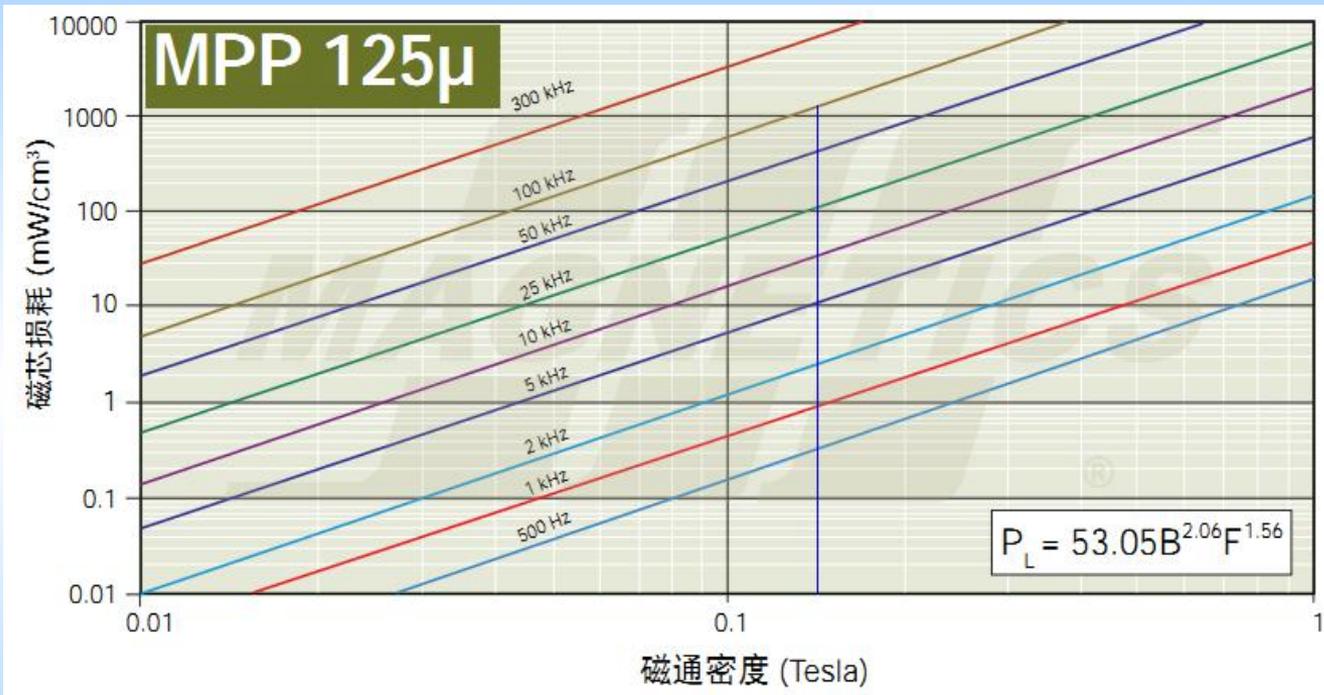
交流磁通摆幅的一半  $B_p = \frac{\Delta B}{2} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2}$

$P_{cV}$  的常用单位为mW/cm<sup>3</sup>;  $B_p$ 为T,  
 $f$ 为(kHz)。

为了方便起见厂家把损耗特性曲线做好，直接查找。



ARNOLD公司的产品手册



物理特性	
窗口面积	139 mm <sup>2</sup>
截面积	31.7 mm <sup>2</sup>
路径长度	56.7 mm
体积	1,800 mm <sup>3</sup>
重量 - MPP	16 g
重量 - High Flux	15 g
重量 - Kool Mμ <sup>®</sup>	12 g
重量 - XF <sub>LUX</sub> <sup>®</sup>	13 g
面积乘积	4,430 mm <sup>4</sup>

$$P_c = P_{cV} \times V_c = 1200 \times 1800 (\text{mW}/\text{cm}^3 \times \text{mm}^3) = 2.16 \text{ W}$$

# ★计算导线尺寸

取电流密度  $j = 5\text{A/mm}^2$

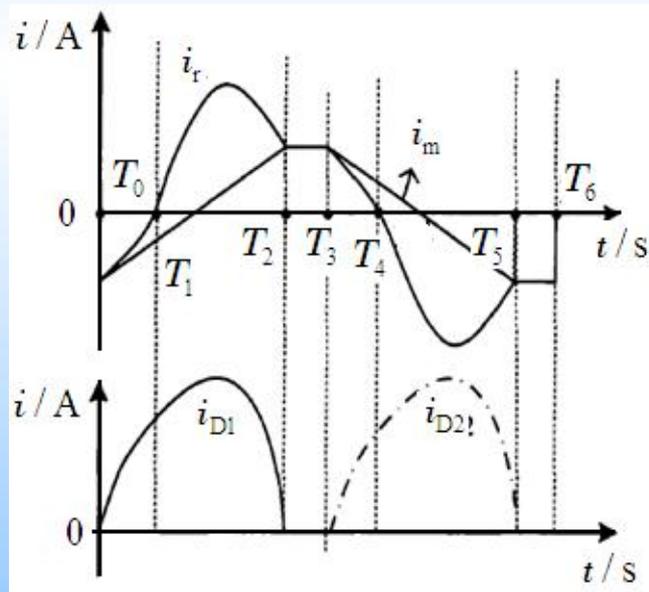
导线所需截面积

$$A_{\text{Cu}} = \frac{I_{r,\text{rms}}}{j} = \frac{1.56}{5\text{A/mm}^2} = 0.312\text{mm}^2$$

100°C, 100kHz集肤深度

$$\Delta = \frac{7.65}{\sqrt{100000}} = 0.024\text{cm} = 0.24\text{mm}$$

说明：由于谐振电感中流过高频交流，不同于直流滤波电感。



## ★计算导线尺寸

导线直径不大于2倍集肤深度，裸直径

$$d = 0.45\text{mm}$$

带外皮直径  $d' = 0.51\text{mm}$

单股导线截面积  $A_{\text{Cun}} = 0.159\text{mm}^2$

采用多股导线绞绕，导线的股数

$$N_n = 0.312 / 0.159 = 2$$

55310磁芯，求第1层  
可绕制的最大匝数。

$$N_1 = \frac{\pi(d_{in} - 2d')}{2d'} = \frac{3.14 \times (13.3 - 2 \times 0.51)}{2 \times 0.51} = 37.8$$

只需要绕**25**匝，一层能绕下

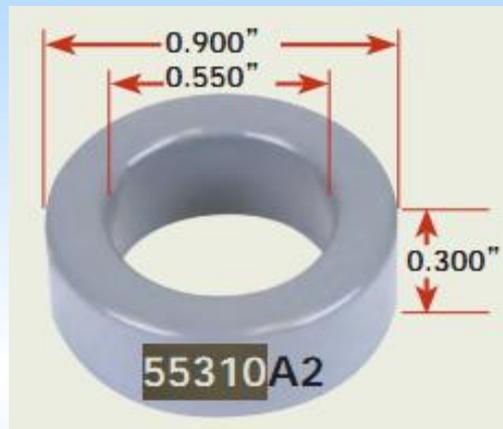
## 22.9 mm 外径

磁芯尺寸	外径(最大)	内径(最小)	高度(最大)
涂层前 (标称)	22.9 mm/0.900 in	14.0 mm/0.550 in	7.62 mm/0.300 in
涂塑后 (限定)	23.7 mm/0.930 in	13.3 mm/0.525 in	8.39 mm/0.330 in



# 55310

绕组匝长度（每匝） * 参考普通绕组数据页	
绕组因子	线长/匝 (mm)
0%	27.0
20%	30.5
25%	31.3
30%	32.0
35%	33.1
40%	33.9
45%	34.9
50%	35.9
60%	38.0
70%	40.4



绕组因子与填充系数有关：单层小于35%，  
满填充35-45%，高填充，65%。

25匝长度  $l_{25} = Nl_{av} = 25 \times 33.1 = 828\text{mm}$

20°C，直径0.45导线的单位长度电阻

$$r = 0.11\Omega\text{m}^{-1}$$

$$R_{\text{dc}25} = 0.11\Omega \cdot \text{m}^{-1} \times 828\text{mm} = 0.091\Omega$$

$$R_{\text{dc}100^\circ\text{C}} = 1.34 \times 0.091 = 0.12\Omega$$

## ★求交流电阻和交流损耗

铜层系数

$$F_l = N_1 d / d' = 25 \times 0.45 / 0.51 = 22$$

圆导线的有效高度

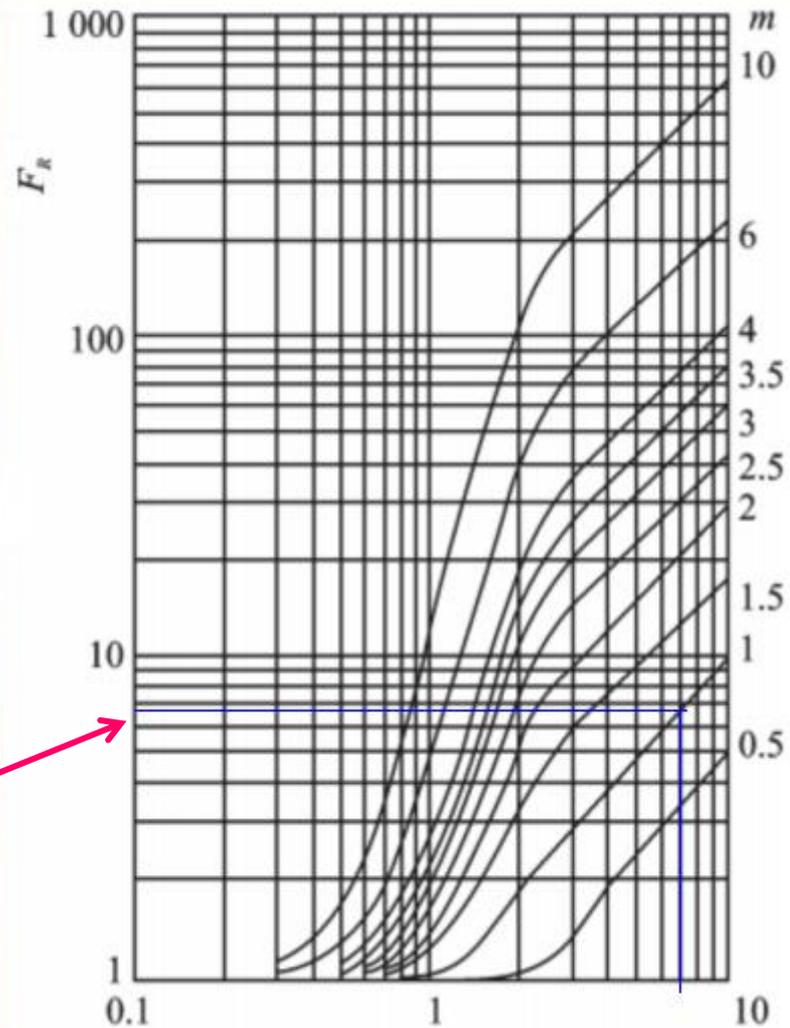
$$h = 0.83d\sqrt{d / d'} = 0.83 \times 0.45 \times \sqrt{0.45 / 0.51} = 0.35$$

等效铜层厚度

$$Q = \frac{h\sqrt{F_l}}{\Delta} = \frac{0.35 \times \sqrt{22}}{0.23} = 7.1$$

$$R_{ac} = 6.8 \times 0.12 = 0.83\Omega$$

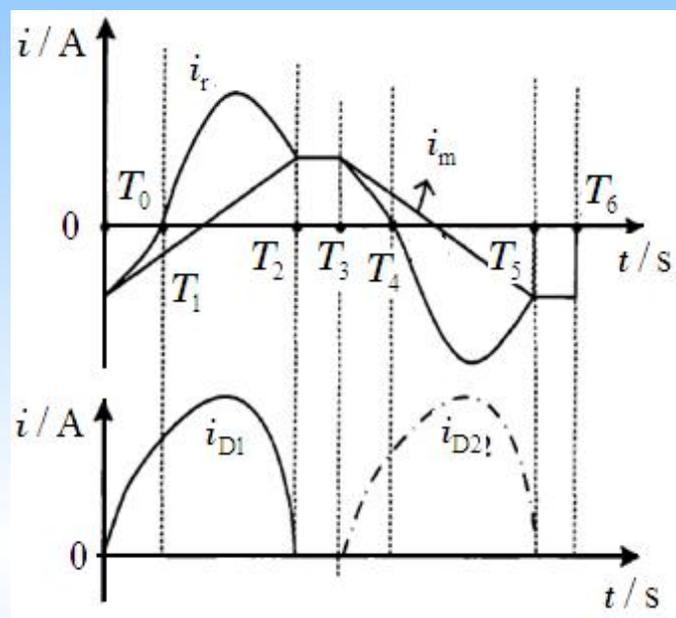
$$F_R = 6.8$$



## 线圈损耗计算

$$P_{dc} = I_{dc}^2 R_{dc}$$

直流损耗可以忽略  
主要是交流损耗



$$P_{ac} = I_{ac}^2 R_{ac} = I_{r\_rms}^2 R_{ac} = 1.56^2 \times 0.83 = 2.02 \text{ W}$$

总损耗  $P = P_c + P_w = 2.16 + 2.02 \approx 4.18 \text{ W}$

谐振电感损耗：磁芯损耗和线圈损耗同样重要

# 温升计算

磁性元件中的热量消耗来自于交流铜损和交流磁芯损耗。热损耗和温升 ( $\Delta T$ ) 由多种因素引起，因此没有精确计算  $\Delta T$  值的简便方法。但通过下述公式，可有效地估算无空气对流状况下的  $\Delta T$ 。

$$\Delta T = \left( \frac{P_t}{A_s} \right)^{0.833}$$

功率单位mW，表面积单位cm<sup>2</sup>

# 温升计算

表面积	
未绕线磁芯	1,570 mm <sup>2</sup>
40% 绕组因子	2,380 mm <sup>2</sup>

$$\Delta T = \left( \frac{P_t}{A_s} \right)^{0.833} = \left( \frac{4180}{23.80} \right)^{0.833} = 175.6^{0.833} = 74^\circ C$$

功率单位mW，表面积单位cm<sup>2</sup>

# 小结

- 1、谐振电感处于高交流应力下。
- 2、线圈直流电阻损耗可以不计，但交流损耗比较大，因此不同于直流滤波电感。交流电阻计算时必须考虑集肤效应的影响。
- 3、直流滤波电感的磁芯损耗较小（饱和限制磁芯选择），而谐振电感磁芯工作在1，3象限，磁芯损耗也大，既要考虑饱和问题，也要考虑损耗问题。

## 小结

4、谐振电感的参数对电路的工作点影响大，因此除了考虑损耗问题外，必须考虑温度稳定性的影响。通常选用MPP，但价格高，也可以选择kool mu，但温度特性差些。

5、设计时采用高u值材料容易出现磁导率受直流磁化和高频影响而下降，一般允许下降80%左右，为此可以选取低一个u值的材料进行计算。

6、温升受很多因素的影响，在没有对流的条件下工作常采用经验公式计算。  
温升是磁元件设计根本，且不可忽略。

谢谢大家！

