

AC-DC 5W 磁参数计算

05/110S05

负责人:

审核:

批准:

日期:

大比特技术论坛
<http://bbs.big-bit.com>

第一部分 变压器的设计

一、变压器设计步骤:

由于 XRA05/110S05 是采用反激的电路拓扑结构,故变压器按反激变压器进行设计。具体步骤如下:

- 1、决定电源参数。
- 2、计算电路参数。
- 3、选择磁芯材料。
- 4、选择磁芯的形状和尺寸。
- 5、计算变压器匝数、有效气隙电感系数及气隙长度。
- 6、选择绕组线圈线径。
- 7、计算变压器损耗和温升。

下面就按上述步骤进行变压器的设计。

二、设计过程:

- 1、电源参数:(有些参数为指标给定,有些参数从资料查得)

最小交流输入电压值:	V _{acmin} =	85	V
最大交流输入电压值:	V _{acmax} =	265	V
电网频率:	F _L =	50 ~ 440	Hz
变压器工作频率:	F _s =	60000	Hz
输出电压:	V _o =	5.1	V
输出电流:	I _o =	1.0	A
输出功率:	P _o =	5.1	W
电源整机效率:	η ≥	0.75	
损耗分配因数:	Z=	0.5	
自供电电压:	V _b =	10	V
整流桥的导通时间:	t _c =	0.0032	S
输入电容容量:	C _{IN} =	10	uF
最大占空比:	D _{NAX} =	0.47	
电流比例因数:	K _{RP} =	0.65	
初、次级之间耐压:		≥ 2500	Vac

- 2、计算电路参数:

$$\text{最低直流输入电压: } V_{dc \min} = \sqrt{(2V_{ac \min}^2 - (\frac{2P_o(1/2f_L - t_c)}{\eta C_{IN}}))} = 72(V)$$

将相关参数代入上式: $V_{dcmin}=72(V)$

$$\text{最高直流输入电压: } V_{dcmax} = V_{acmax} \times \sqrt{2} = 375(V)$$

计算低端输入时:

$$\text{原边平均输入直流电流值: } I_{AVG} = \frac{P_o}{\eta V_{dcmin}} = 0.094(A)$$

$$\text{原边峰值电流: } I_p = \frac{I_{AVG}}{[1 - (K_{RP} / 2)] D_{MAX}} = 0.3(A)$$

$$\text{原边脉动电流: } I_R = I_p K_{RP} = 0.19(A)$$

$$\text{原边有效值电流: } I_{RMS} = \sqrt{D_{MAX} (I_p^2 - I_p I_R + \frac{I_R^2}{3})} = 0.14(A)$$

$$\text{变压器原边电感量: } L_p = \frac{P_o \times 10^6}{I_p^2 K_{RP} (1 - K_{RP} / 2) f_s} \times \frac{Z(1 - \eta) + \eta}{\eta} = 2.5(mH)$$

Z为损耗分配因数,如果Z=1.0表示所有损耗都在副边,如果Z=0表示所有的损耗都在原边,在这里取Z=0.5表示原副边都存在损耗。

3、选择磁芯材料:

铁氧体材料具有电阻率高,高频损耗小的特点,且有多种材料和磁芯规格满足各要求,加之价格较其它材料低廉,是目前在开关电源中应用最为广泛的材料。同时也有饱和磁感应比较低,材质脆,不耐冲击,温度性能差的缺点。

在此次设计中,采用的是用于开关电源变压器及传输高功率器件的MnZn功率铁氧体材料PC40,其初始磁导率为 $2300 \pm 25\%$,饱和磁通密度为 $510mT(25^\circ C)$ / $390mT(100^\circ C)$,居里温度为 $215^\circ C$ 。

选择磁芯材料为铁氧体,PC40。

4、选择磁芯的形状和尺寸:

在这里用面积乘积公式粗选变压器的磁芯形状和尺寸。具体公式如下:

反激变压器工作在第一象限,最高磁密应留有余度,故选取 $B_{MAX}=0.3T$,反激变压器的系数 $K_1=0.0085$ (K_1 是反激变压器在自然冷却的情况下,电流密度取 $420A/cm^2$ 时的经验值。)

$$AP = A_w A_c = \left[\frac{L_p I_o \times 1.2}{B_{MAX}} \cdot \frac{I_{RMS}}{K_1} \right]^{4/3} = 0.09cm^4$$

磁芯型号：查EPC磁芯系列—EPC19，磁芯参数为：

磁芯有效截面积:	$A_e =$	22.7	mm^2
磁芯窗口面积:	$A_w =$	50	mm^2
磁路长度:	$L_e =$	0.461	mm
无气隙电感系数:	$A_l =$	940	nH/T^2
磁芯体积:	$V_e =$	0.9	cm^3
骨架绕线宽度:	$B_w =$	11.9	mm

EPC磁芯主要为平面变压器设计的，具有中柱长，漏感小的特点。EPC19磁芯的AP值约为 0.11cm^4 ，稍大于计算所需的 $AP=0.09\text{cm}^4$ 。若再选用小一号的磁芯EFD15，其AP值约为 0.047cm^4 ，小于计算所需的 $AP=0.09\text{cm}^4$ ，不符合要求，故选用EPC19磁芯。

5、计算变压器各绕组匝数、有效气隙电感系数及气隙长度：

$$\text{原边绕组匝数: } N_p = \frac{I_p L_p}{A_e B_M} = 108(\text{T})$$

$$\text{副边绕组匝数: } N_s = N_p \times \frac{V_o + V_D}{V_{dc \min} - V_{DS}} \times \frac{1 - D_{MAX}}{D_{MAX}} = 10(\text{T})$$

上式中： V_D 为输出整流管正向压降，由于选用肖特基二极管，故其正向压降为 0.4V ， V_{DS} 是VIPer导通期间漏极-源极的平均电压值，主要与原边电流大小、导通时的漏源间电阻 $R_{DS(ON)}$ 、工作温度有关，在这里设为 5V 。

自供电匝数 N_B ：采用简单的半波整流电路，可依副边匝数的思路进行计算：

$$N_B = \frac{V_B + V_{BD}}{V_o + V_D} \times N_s = 19(\text{T})$$

V_{BD} 为自供电整流管正向压降，由于选用了普通硅二极管，故其正向压降为 0.7V 。

$$\text{有效气隙电感系数: } A_{LG} = 1000 \times \frac{L_p}{N_p^2} = 218.57(\text{nH}/\text{T}^2)$$

$$\text{无气隙时的相对磁导率: } \mu_r = \frac{A_E L_E}{0.4 \times \pi \times A_e \times 10} = 1520$$

$$\text{气隙长度: } L_g = \left[\frac{0.4 \times \pi \times N_p^2 \times A_e}{L_p \times 100} - \frac{L_E}{\mu_r} \right] \times 10 = 0.1(\text{mm})$$

6、选择绕组导线线径：

$$\text{变压器有效的骨架宽度: } BW_E = L_x \times [BW - (2 \times M)] = 31.6(\text{mm})$$

L_x 为原边绕组层数，在这里采用4层。

M为线圈每端需要的爬电距离，在这里取2mm。

$$\text{计算原边绕组导线允许的最大直径 (漆包线): } OD = \frac{BW_E}{N_P} = 0.29(\text{mm})$$

根据上述计算数据可采用裸线径DIA=0.23mm的漆包线绕置，其带漆皮外径为0.27mm，刚好4层可以绕下。

$$\text{根据所选线径计算原边绕组的电流密度: } J = \frac{4 \times I_{RMS}}{\pi \times DIA^2} = 3.44(\text{A})$$

$$\text{计算副边绕组导线允许的最大直径 (漆包线): } OD_S = \frac{BW_E - 2 \times M}{N_S} = 0.79(\text{mm})$$

根据上述计算数据可采用裸线径DIASS=0.72mm的漆包线绕置，但由于在温度100℃、工作频率为60KHz时铜线的集肤深度： $\Delta = \frac{7.6}{\sqrt{60000}} = 0.31(\text{mm})$ ，而0.72mm大于了2倍的集肤深度，使铜线的利用率降低，故采用两根0.35mm的漆包线并绕。

$$\text{副边峰值电流: } I_{SP} = I_P \times \frac{N_P}{N_S} = 3.22(\text{A})$$

$$\text{副边有效值电流: } I_{SRMS} = I_{SP} \times \sqrt{(1 - D_{MAX}) \left(\frac{K_{RP}^2}{3} - K_{RP} + 1 \right)} = 1.64(\text{A})$$

$$\text{根据所选线径计算副边电流容量: } J = \frac{4 \times I_{SRMS}}{\pi \times DIASS^2} = 8.53(\text{A})$$

自供电绕组线径：**由于自供电绕组的电流非常小只有5mA，因此对线径要求并不是很严格**，在这里主要考虑为便于与次级更好的耦合及机械强度，因此也采用裸线径为0.35mm的漆包线进行绕置，使其刚好一层绕下，减小与次级之间的漏感，保证短路时使自供电电压降低。

7、计算变压器损耗和温升

变压器的损耗主要由线圈损耗及磁芯损耗两部分组成，下面分别计算：

1) 线圈损耗：

$$\text{原边直流电阻: } R_{dc1} = \rho * \frac{l}{A} = 1.993(\Omega)$$

ρ 为 100℃铜的电阻率为 $2.3 \times 10^{-6}(\Omega \cdot \text{cm})$ ； l 为原边绕组的线圈长度，实测为 360cm；

A 为原边 0.23mm 漆包线的截面积。

$$\text{原边直流损耗: } P_{dc1} = I_{AVG}^2 * R_{dc1} = 0.0177(\text{W})$$

$$\text{原边导线厚度与集肤深度的比值: } Q = \frac{0.83d\sqrt{d/s}}{\Delta} = 0.5678$$

d为原边漆包线直径0.23mm, s为导线中心距0.27mm, Δ 为集肤深度0.31mm。

原边交流电阻与直流电阻比: 由于原边采用包绕法, 故原边绕组层数可按两层考虑, 根据上式所求的Q值, 查得 $Fr = Rac1/Rdc1 \approx 1$ 。

$$\text{原边交流电阻: } Rac1 = Rdc1 \times Fr = 1.993(\Omega)$$

$$\text{原边交流电流分量有效值: } I_{ac1} = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_{AVG}^2} = 0.107(A)$$

$$\text{原边交流电损耗: } Pac1 = I_{ac1}^2 * Rac1 = 0.0229(W)$$

$$\text{原边绕组线圈总损耗: } P1 = Pdc1 + Pac1 = 0.04(W)$$

$$\text{副边直流电阻: } Rdc2 = \rho * \frac{l}{A} = 0.04(\Omega)$$

ρ 为100°C铜的电阻率为 $2.3 \times 10^{-6} (\Omega \cdot \text{cm})$; l 为副边绕组的线圈长度, 实测为80cm; A 为副边两根0.38mm漆包线的截面积。

$$\text{副边直流损耗: } Pdc2 = I_o^2 * Rdc2 = 0.039(W)$$

$$\text{副边导线厚度与集肤深度的比值: } Q = \frac{0.83d\sqrt{d/s}}{\Delta} = 0.865$$

d为副边漆包线直径0.35mm, s为导线中心距0.41mm, Δ 为集肤深度0.31mm。

副边交流电阻与直流电阻比: 副边绕组层数为一层, 根据上式所求的Q值, 查得 $Fr = Rac1/Rdc1 \approx 1.1$ 。

$$\text{副边交流电阻: } Rac2 = Rdc2 \times Fr = 0.0434(\Omega)$$

$$\text{副边交流电流分量有效值: } I_{ac2} = \sqrt{I_{SRMS}^2 - I_o^2} = 1.3(A)$$

$$\text{副边交流电损耗: } Pac2 = I_{ac2}^2 * Rac2 = 0.073(W)$$

$$\text{副边绕组线圈总损耗: } P2 = Pdc2 + Pac2 = 0.113(W)$$

$$\text{总的线圈损耗: } Pw = P1 + P2 = 0.153(W)$$

2) 磁芯损耗:

$$\text{峰值磁通密度摆幅: } \Delta B = \frac{B_{MAX} K_{RP}}{2} = 0.1(T)$$

$$\text{磁芯损耗: } Pc = Pcv \times Ve = 0.003(W)$$

P_{cv} 为磁芯功率损耗，由峰值磁通密度摆幅、工作频率60KHz及工作温度100℃可在厂家手册上查出其损耗约为30 mw/cm³。

V_e 为EPC19的体积0.105 cm³。

变压器总的损耗： $P = P_w + P_c = 0.156(W)$

变压器热阻： $R_{th} = \frac{36}{A_w} = 72(°C/W)$

变压器最大温升： $\Delta T = R_{th} \times P = 11.27(°C/W)$

总结：通过上述计算可知，当环境温度为85℃时，变压器最高温度在96℃左右，符合磁芯的最佳工作温度。同时采用包绕法使得漏感仅为70uH(1KHz时)/15uH(100KHz时)，小于3%，效果较理想。

《参考文献》

- 1、《现代高频开关电源实用技术》 刘胜利 编著 电子工业出版社 2001年
- 2、《开关电源中磁性元器件》 赵修科 主编 南京航空航天大学自动化学院 2004年
- 3、《TDK 磁材手册》 日本 TDK 公司 2005年