

反激式开关电源变压器设计

学习培训教材



反激式开关电源变压器设计(2)

一、变压器的设计步骤和计算公式：

1.1 变压器的技术要求：

输入电压范围；
输出电压和电流值；
输出电压精度；
效率；
磁芯型号；
工作频率 f ；
最大导通占空比 D_{max} ；
最大工作磁通密度 B_{max} ；
其它要求。

1.2 估算输入功率，输出电压，输入电流和峰值电流：

1) 估算总的输出功率： $P_o = V_{o1} \times I_{o1} + V_{o2} \times I_{o2} \dots\dots$

2) 估算输入功率： $P_{in} = P_o /$

3) 计算最小和最大输入电流电压

$$V_{in(MIN)} = AC_{MIN} \times 1.414 (DCV)$$

$$V_{in(MAX)} = AC_{MAX} \times 1.414 (DCV)$$



反激式开关电源变压器设计(2)

4) 计算最小和最大输入电流

$$I_{in(MIN)} = \frac{P_{IN}}{V_{IN (MAX)}}$$

$$I_{in(MAX)} = \frac{P_{IN}}{V_{IN (MIN)}}$$

5) 估算峰值电流：

$$I_{PK} = \frac{K P_{OUT}}{V_{IN (MIN)}}$$

其中：K=1.4(Buck、推挽和全桥电路)

K=2.8(半桥和正激电路)

K=5.5(Boost, Buck-Boost 和反激电路)



反激式开关电源变压器设计(2)

1.3 确定磁芯尺寸

确定磁芯尺寸有两种形式，第一种按制造厂提供的图表，按各种磁芯可传递的能量来选择磁芯，例如下表：

表一 输出功率与大致磁芯尺寸的关系

输出功率/W	MPP环形 磁芯直径/ (in/mm)	E-E、E-L等磁芯 (每边)/(in/mm)
<5	0.65(16)	0.5(11)
<25	0.80(20)	1.1(30)
<50	1.1(30)	1.4(35)
<100	1.5(38)	1.8(47)
<250	2.0(51)	2.4(60)



反激式开关电源变压器设计(2)

第二种是计算方式，首先假定变压器是单绕组，每增加一个绕组并考虑安规要求，就需增加绕组面积和磁芯尺寸，用“窗口利用因数”来修整。单绕组电感磁芯尺寸按下式计算：

$$A_p = A_w A_e = \frac{0.68 P_{out} d_w \times 10^5}{B_{max} f}$$

式中：

d_w ----- 一次绕组导线截面积，单位为： cm^2 ；

B_{max} ----- 最大工作磁通密度，单位为T；

f ----- 工作频率，单位为Hz；

P_{out} ----- 变压器总输出功率，单位为W。

窗口利用因数按下表计算。



反激式开关电源变压器设计(2)

表二 变压器窗口利用因数

变压器情况	窗口
反激式变压器	1.1
一个二次绕组	1.2
两个或多个二次绕组	1.3
相互隔离的二次绕组	1.4
满足UL或CSA标准	1.1
满足IEC标准	1.2
法拉第屏屏蔽	1.1

用下式按变压器情况将各窗口利用因数综合起来

$$K_{net} = K_a \cdot K_b \dots$$

最后以下式可以估算出变压器磁芯尺寸

$$A'p = K_{net} \cdot A_p$$

按照上计算A'P值,加一定裕度,选取相适应的磁芯.



反激式开关电源变压器设计(2)

1.4 计算一次电感最小值 L_{pri}

$$L_{pri} = \frac{V_{in(min)} \cdot D_{max}}{I_{pk} f} \quad (H)$$

式中： f 单位为Hz

1.5 计算磁芯气隙 L_{gap}

$$L_{gap} = \frac{0.4 L_{pri} I_{pk} \cdot 10^8}{A_e B_{max}^2} \quad cm^2$$

其中： A_e = 磁芯有效截面积，单位为 cm^2

B_{max} = 单位为G；

L_{pri} = 单位为H。

按照计算的气隙量实测出磁芯的AL值。



反激式开关电源变压器设计(2)

1.6 计算一次绕组所需的最大匝数 N_{pri}

$$N_{pri} = \sqrt{\frac{L_{pri}}{AL}}$$

1.7 计算二次主绕组（输出功率最大的绕组）所需匝数 N_{s1}

$$N_{s1} = \frac{N_{pri} (V_{o1} + V_{D1}) (1 - D_{max})}{V_{in(min)} D_{max}} \quad (\text{匝})$$

1.8 计算二次其它绕组所需匝数 N_{sn}

$$N_{sn} = \frac{(V_{on} + V_{Dn}) N_{s1}}{V_{o1} + V_{D1}} \quad (\text{匝})$$



反激式开关电源变压器设计(2)

1.9 检查相应输出端的电压误差

$$V_{sn}\% = \left(\frac{N's_n - V_{sn}}{N_{sn}} \right) \times 100\%$$

式中：

- $V_{sn}\%$ —— 相应输出电压精度%；
- V_{sn} —— 相应输出电压值；
- N_{sn} —— 计算的相应输出电压匝数；
- $N's_n$ —— 选取的整数相应输出电压匝数。

如果输出电压不能满足规定的精度，可以将主输出绕组 N_{s1} 增加一匝，再计算相应输出绕组匝数，看能否满足相应精度，如果这样修改结果仍不满足要求，只可回到开始阶段，增加一次绕组匝数，重新计算一次绕组匝数，直到满足要求为止，但是增加一次绕组匝数，会使变压器工作磁通密度向小的方向调整，这可能造成在较低输入电压时，输出无法达到额定的电压，所以在变压器设计时要适当的处理好输出电压精度和额定输出电压值的关系。



反激式开关电源变压器设计(2)

1.10 计算和选取绕组导线线径 绕组导线线径按下式计算

$$d_{wn} = 1.13 \sqrt{\frac{I_n}{J}} \quad (\text{mm})$$

式中： d_{wn} —— 相应绕组线径，单位为mm；
 I_n —— 相应绕组额定电流，单位为A；
 J —— 电流密度，单位为A/mm²，一般取3-10A/mm²

选取各绕组线径后，按下式计算在开关工作频率时导线的趋肤深度，如果导线线径超过趋肤深度，应选用导线截面积相近的多股线绕制。

$$S = \frac{66.1}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm})$$

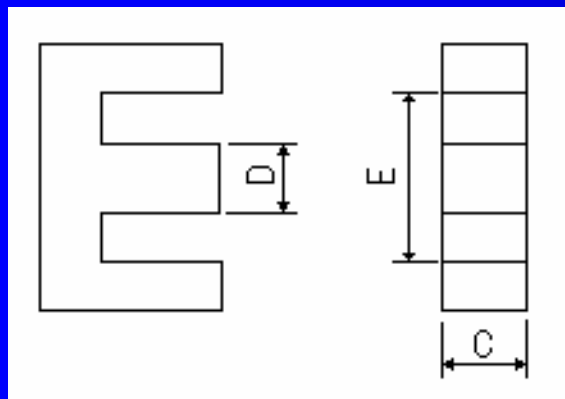
式中： S —— 导线趋肤深度，单位为：mm；
 f —— 开关工作频率，单位为Hz.



反激式开关电源变压器设计(2)

1.11 计算变压器铜损

- 1) 按照选取的磁芯，估算出变压器平均绕组长度MLT。
例如对EE型磁芯MLT估算方法如下：



$$MLT = E + D + (E - D) + 2C = 2E + 2C$$

其它型号磁芯估算MLT可依此方法类推。

- 2) 按下试计算各绕组铜损

$$P_{cun} = (N_n * MLT * R_n) I_n^2$$

- 式中：P_{cun} —— 第n绕组铜损，单位为瓦
 N_n —— 第n绕组匝数，单位为匝
 MLT —— 平均绕组长度，单位为m
 R_n —— 第n绕组导线每米长电阻，单位为 Ω；
 I_n² —— 第n绕组额定电流，单位为A；
 n —— 绕组序号，n=1,2,3.....



反激式开关电源变压器设计(2)

3) 按下式计算变压器铜损

$$P_{cu} = p_{cu} n$$

1.12 计算变压器铁损 P_c

变压器铁损可根据选取的磁芯型号、材质、按照变压器工作频率和磁通密度从磁芯手册中查得。

1.13 验证变压器损耗是否符合设计要求

根据变压器规定的效率 按下式计算变压器的损耗值：

$$P_T = P_{in} - P_0 = P_0 / \eta - P_0$$

若 $P_T > (P_{cu} + P_c)$ ，变压器设计合格，如果计算的 $(P_{cu} + P_c)$ 值大于 P_T 值，这时就要依情况调整绕组导线线径或改变磁芯尺寸或材质，以满足变压器的损耗符合要求。



反激式开关电源变压器设计(2)

2. 设计例

2.1 变压器技术指标

输入电压：AC90—240V ， 50/60Hz

输出：DC+5V，额定电流1A，最小电流0.75A

DC+12V，额定电流1A，最小电流100mA

DC-12V，额定电流1A，最小电流100mA

DC+24V，额定电流1A，最小电流0.25A

DC+12V，偏置电流100mA

输出电压精度：+5V，+12V：最大+/-5%

+24V：最大+/-10%

效率： $\eta=80\%$

工作频率：50KHz

工作磁通密度： $B_{max}=2000G$

安规：VDE



反激式开关电源变压器设计(2)

2.2 估算输入功率、输入电压、输入电流和峰值电流

1) 输出功率： $P_o=5V*1A+2*12V*1A+24V*1.5A=65W$

2) 输入功率： $P_{in}=P_o/\eta=65W/0.8=81.25W$

3) 最低输入电压： $V_{in(min)}=AC90V*1.414=DC127V$

4) 最高输入电压： $V_{in(max)}=AC240V*1.414=DC340V$

5) 最大平均输入电流：

$$I_{in(max)}=P_{in}/V_{in(min)}=81.25W/DC127V=DC0.64A$$

6) 最小平均输入电流：

$$I_{in(min)}=P_{in}/V_{in(max)}=81.25W/DC340V=DC0.24A$$

7) 峰值电流： $I_{pk}=5.5P_o/V_{in(min)}=5.5*65W/127V=2.81A$

2.3 确定磁芯型号尺寸

按照表1，65W可选用每边约35mm的EE35/35/10材料为PC30磁芯

磁芯 $A_e=100mm^2$ ， $A_{cw}=188mm^2$ ， $W=40.6g$

2.4 计算一次电感最小值 L_{pri}

$$L_{pri} = \frac{V_{in(min)} \cdot D_{max}}{I_{pk} \cdot f} = \frac{127 \cdot 0.5}{2.81 \cdot 50 \cdot 10^3} = 452 \cdot 10^{-6} H = 452 \mu H$$

此处选 $D_{max}=0.5$



反激式开关电源变压器设计(2)

2.5 计算磁芯气隙Lgap值

$$L_{gap} = \frac{0.4 L_{pri} I_{pk}^2 \cdot 10^8}{A_e B_{max}^2} = \frac{0.4 * 452 * 10^{-6} * 2.81 * 10^8}{1 * (2000)^2} = 0.04 \text{cm} = 0.4 \text{mm}$$

查表, EE35/35/10 AL=120uH/N² Lgap约为0.5mm

2.6 计算一次绕组最大匝数Npri

$$N_{pri} = \sqrt{\frac{L_{pri}}{AL}} = \sqrt{\frac{452 * 10^{-6}}{120 * 10^{-9}}} = 61.4 \text{匝} \quad \text{取} N_{pri} = 62 \text{匝}$$

2.7 计算二次主绕组匝数Ns1 (Ns1为DC+5V绕组)

$$N_{s1} = \frac{N_{pri} (V_{o1} + V_D) (1 - D_{max})}{V_{in}(min) D_{max}} = \frac{62 * (5 + 0.7) * (1 - 0.5)}{127 * 0.5} = 2.78 \text{匝}$$

取Ns1=3匝

此处整流二极管压降V_D=0.7V



反激式开关电源变压器设计(2)

2.8 计算其它次级绕组匝数

$$N_{sn} = \frac{(V_{on} + V_{Dn}) N_{s1}}{V_{O1} + V_{D1}}$$

+12V $N_{sn} = \frac{(12 + 0.7) * 3}{5 + 0.7} = 6.68 \text{匝}$ 取7匝

+24V $N_{s24} = \frac{(24 + 0.7) * 3}{5 + 0.7} = 13 \text{匝}$ 取13匝



反激式开关电源变压器设计(2)

2.9 检查相应输出端电压误差

$$V_{sn}\% = \left(\frac{V_{sn}}{N_{sn}} * N_s'n - V_{sn} \right) / V_{sn} * 100\%$$

$$+12V \quad V_{S12}\% = \left(\frac{12}{6.68} * 7 - 12 \right) / 12 * 100\% = 4.79\%$$

$$+24V \quad V_{S24}\% = \left(\frac{24}{13} * 13 - 24 \right) / 24 * 100\% = 0\%$$

电压误差均符合要求。

2.10 计算和选取绕组导线线径

$$d_{wn} = 1.13 \sqrt{\frac{I_n}{J}}$$



反激式开关电源变压器设计(2)

计算趋肤深度

$$S = \frac{66.1}{\sqrt{f}} = \frac{66.1}{\sqrt{50 \times 10^3}} = 0.29 \text{ mm}$$

一次绕组：dwp = $1.13 \sqrt{\frac{0.64}{3}} = 0.52$ 取0.5mm

二次绕组：+5V dwn1 = $1.13 \sqrt{\frac{1}{3}} = 0.65$ 取0.5mm 6股

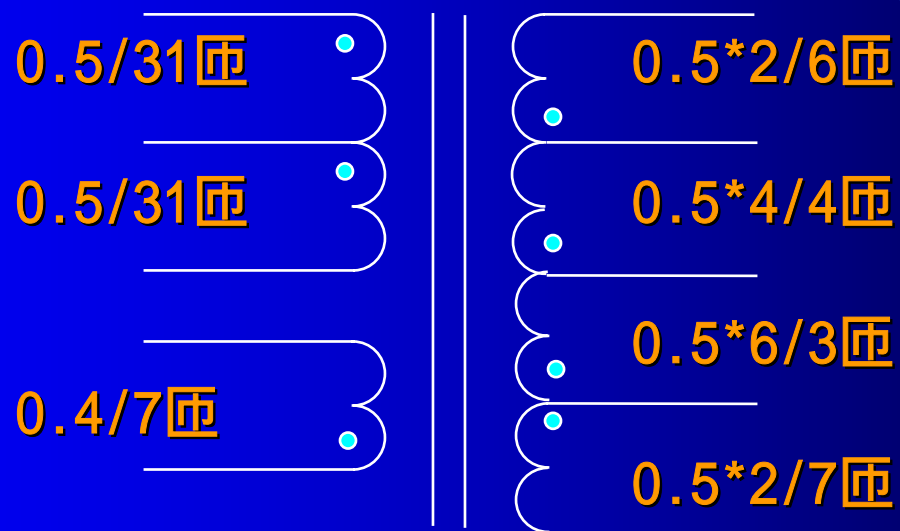
+12V,	0.5,	4股
-12V,	0.5,	2股
+24V,	0.5,	2股
偏置,	0.4,	单股



反激式开关电源变压器设计(2)

变压器绕组结构的设计

变压器线路图如下：





反激式开关电源变压器设计(2)

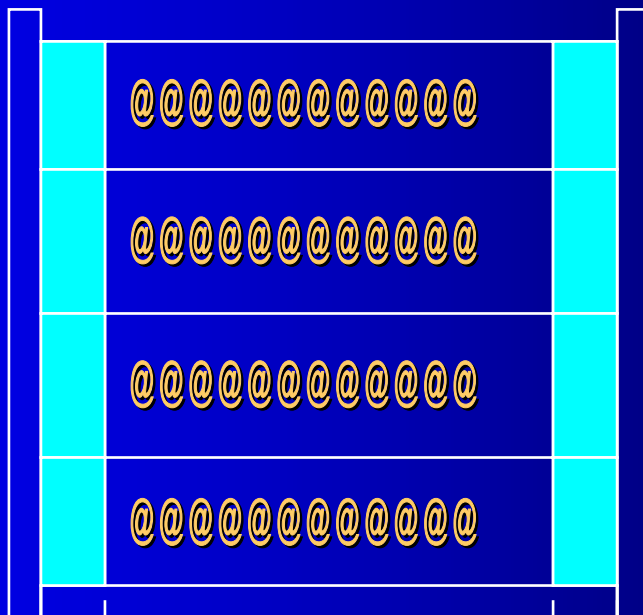
变压器绕制结构如下：

0.06/3层

0.06/3层

0.06/3层

0.06/3层



偏置绕组

1/2一次绕组

二次绕组

1/2一次绕组

3mm

3mm



反激式开关电源变压器设计(2)

2.11 计算变压器损耗

1) 铜损 : $P_{cu} = NnV \cdot MLT \cdot R_n \cdot I_n^2$

$$MLT = 2E + 2C = 2 \cdot 25.27 + 2 \cdot 9.35 = 69.24 \text{mm}$$

初级铜损 : $P_{cuP} = (62 \cdot 69.24 \cdot 10^{-3} \cdot 0.085) \cdot 0.64^2 = 0.15 \text{W} \quad 149 \text{W}$

次级铜损 : $P_{cu+5V} = (3 \cdot 69.24 \cdot 10^{-3} \cdot 0.085 / 6)^2 = 0.026 \text{W} \quad 0.07 \text{W}$

$$P_{cu+12V} = (4 \cdot 69.24 \cdot 10^{-3} \cdot 0.085 / 4)^2 = 0.024 \text{W} \quad 0.06 \text{W}$$

$$P_{cu+24V} = (6 \cdot 69.24 \cdot 10^{-3} \cdot 0.085 / 2)^2 = 0.018 \text{W} \quad 0.05 \text{W}$$

$$P_{cu-12V} = (7 \cdot 69.24 \cdot 10^{-3} \cdot 0.085 / 2)^2 = 0.021 \text{W} \quad 0.06 \text{W}$$

总铜损 : $P_{cu} = 0.15 + 0.026 + 0.024 + 0.018 + 0.021 = 0.239 \text{W}$

2) 铁损 : PC30磁芯在50KHz, 2000G时损耗=250mw/cm³=52mw/g

$$P_c = \frac{250 \cdot 10^{-3} \cdot 40.6}{4.8} = 2.1 \text{W}$$

4.8

3) 变压器总损耗 $P_{DT} = P_{cu} + P_c = 0.239 + 2.1 = 2.339 = 2.34 \text{W}$



反激式开关电源变压器设计(2)

4) 开关电源总损耗估算：

基于MOSFET的反激式变换器的经验方法，开关电源损耗的35%是由MOSFET产生，60%号整流部分产生，其余是变压器的损耗。
效率为80%时，本开关电源总损耗为16.25W.

a. MOSFET: $P_{DM} = 16.25W * 0.35 = 5.7W$

b. 整流部分： $P_{D+5V} = (5/65) (16.25W) (0.6) = 0.75W$

$$P_{D+12V} = (12 * 2 / 65) (16.25W) (0.6) = 3.6W$$

$$P_{D+24V} = (24 / 65) (16.25W) (0.6) = 3.6W$$

c. 变压器部分： $P_{DT} = P_{CU} + P_C = 2.339W$

开关电源总损耗 $P_D = 5.7 + 0.75 + 3.6 + 3.6 + 2.34 = 15.72W$ 低于规定的16.25W, 变压器设计合格。



反激式开关电源变压器设计(2)

~~~~~END~~~~~

本课程讲解完毕，进入自由提问阶段

\*\*\*谢谢\*\*\*