

摘要: 详细介绍了一个带有中间抽头高频大功率变压器设计过程和计算方法, 以及要注意问题。根据开关电源变换器性能指标设计出变压器经过在实际电路中测试和验证, 效率高、干扰小, 表现了优良电气特性。
关键词: 开关电源变压器; 磁芯选择; 磁感应强度; 趋肤效应; 中间抽头

0 引言

随着电子技术和信息技术飞速发展, 开关电源 SMPS (switch mode power supply) 作为各种电子设备、信息设备电源部分, 更加要求效率高、成本小、体积小、重量轻、具有可移动性和能够模块化。变压器作为开关电源必不可少磁性元件, 对其进行合理优化设计显得非常重要。在高频开关电源设计中, 真正难以把握是磁路部分设计, 开关电源变压器作为磁路部分核心元件, 不但需要满足上述要求, 还要求它性能高, 对外界干扰小。由于它复杂性, 对其设计一、两次往往不容易成功, 一般需要多次计算和反复试验。因此, 要提高设计效果, 设计者必须有较高理论知识和丰富实践经验。

1 开关电源变换器性能指标

开关电源变换器部分原理图如图 1 所示。

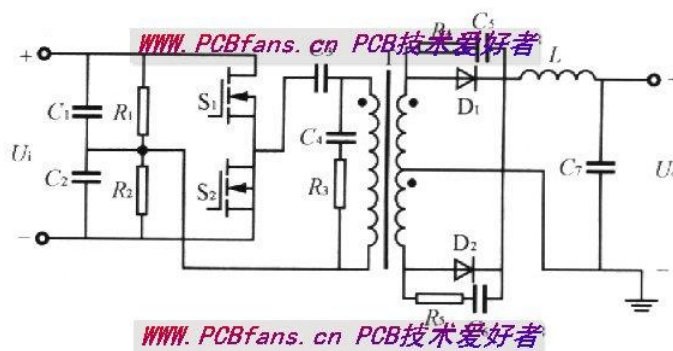


图 1 开关电源变换器原理图

PCBfans.cn 提示请看下图:

其主要技术参数如下:

电路形式 半桥式;

整流形式 全波整流;

工作频率 $f=38\text{kHz}$;

变换器输入直流电压 $U_i=310\text{V}$;

变换器输出直流电压 $U_b=14.7\text{V}$;

输出电流 $I_o=25\text{A}$;

工作脉冲占空度 $D=0.25\sim 0.85$;

转换效率 $\eta \geq 85\%$;

变压器允许温升 $\Delta \tau =50^\circ\text{C}$;

变换器散热方式 风冷;

工作环境温度 $t=45^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$ 。

2 变压器磁芯选择以及工作磁感应强度确定

2.1 变压器磁芯选择

目前, 高频开关电源变压器所用磁芯材料一般有铁氧体、坡莫合金材料、非晶合金和超微晶材料。这些材料中, 坡莫合金价格最高, 从降低电源产品成本方面来考虑不宜采用。非晶合金和超微晶材料饱和磁感应

强度虽然高，但在假定测试频率和整个磁通密度测试范围内，它们呈现铁损最高，因此，受到高功率密度和效率制约，它们也不宜采用。虽然铁氧体材料损耗比坡莫合金大些，饱和磁感应强度也比非晶合金和超微晶材料低，但铁氧体材料价格便宜，可以做成多种几何形状铁芯。对于大功率、低漏磁变压器设计，用 E-E 型铁氧体铁芯制成变压器是最符合其要求，而且 E-E 型铁芯很容易用铁氧体材料制作。所以，综合来考虑，变换器变压器磁芯选择功率铁氧体材料，E-E 型。

2.2 工作磁感应强度确定

工作磁感应强度 B_m 是开关电源变压器设计中一个重要指标，它与磁芯结构形式、材料性能、工作频率及输出功率因素有关。若工作磁感应强度选择太低，则变压器体积重量增加，匝数增加，分布参数性能恶化；若工作磁感应强度选择过高，则变压器温升高，磁芯容易饱和，工作状态不稳定。一般情况下，开关电源变压器 B_m 值应选在比饱和磁通密度 B_s 低一些，对于铁氧体材料，工作磁感应强度选取一般在 0.16T 到 0.3T 之间。在本设计中，根据特定工作频率、温升、工作环境等因素，把工作磁感应强度定在 0.2 T。

3 变压器主要设计参数计算

3.1 变压器计算功率

开关电源变压器工作时对磁芯所需功率容量即为变压器计算功率，其大小取决于变压器输出功率和整流电路形式。变换器输出电路为全波整流，因此

$$\begin{aligned}
 P_t &= P_o (\sqrt{2} + 1/\eta) \\
 &= U_o I_o (\sqrt{2} + 1/\eta) \\
 &= 14.7 \times 25 \times (\sqrt{2} + 1/85\%) \\
 &\approx 952 \text{ W}
 \end{aligned}$$

PCbfans.cn 提示请看下图：

式中： P_t 为变压器计算功率，单位为 W；

P_o 为变压器输出功率，单位为 W；

3.2 磁芯设计输出能力确定

磁芯材料确定后，磁芯面积乘积反映了变压器输出功率能力。其磁芯面积为

$$\begin{aligned}
 A_p &= A_c A_m \\
 \text{或 } A_p &= \left(\frac{P_t \times 10^4}{4B_m f K_w K_j} \right)^{1.16} \\
 &= \left(\frac{952 \times 10^4}{4 \times 0.2 \times 38 \times 10^3 \times 0.2 \times 531} \right)^{1.16} = 3.48 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

PCbfans.cn 提示请看下图：

式中： A_p 为磁芯截面积乘积，单位为 cm^4 ；

A_c 为磁芯截面积，单位为 cm^2 ；

A_m 为磁芯窗口截面积，单位为 cm^2 ；

B_m 为磁芯工作磁感应强度，单位为 T；

K_w 为窗口占空系数取 0.2；

K_j 为电流密度系数(温升为 50°C 时，E 形磁芯取 534)。

3.3 磁芯实际输出能力

在磁芯工作状态确定后，选择磁芯结构参数应稍大于 A_p 值。因为该变压器散热方式是风扇冷却，磁芯实际

输出能力至少应大于设计输出能力 10%，若散热方式是自动冷却，则要求实际输出能力比设计输出能力大更多。查相关手册，找到符合本设计要求 E 型磁芯规格为 E42C，尺寸为 a=4.2 cm，b=2.11 cm，c=2 cm，d=1.2 cm，e=2.95 cm，f=1.53 cm。

其实际输出能力为

$$A_p' = k A_c A_m$$

$$= kcd(e-d)f = 0.6 \times 2 \times 1.2 \times (2.95 - 1.2) \times 1.53$$

$$= 3.9 \text{ cm}^4,$$

PCBfans.cn 提示请看下图：

由此可见， A_p' 大于 $A_p(1 + 10\%) = 3.48 \times (1 + 10\%) = 3.83 \text{ cm}^4$ ，因此，所选磁芯符合要求。

式中：k 为铁占空系数，取 k=0.6。

3.4 绕组匝数计算

因为变换器电路形式为半桥式，所以变压器初级电压 $U_p = U_i / 2 = 310 / 2 = 155 \text{ V}$ 。在该变换器中满载电流 25 A 比较大，整流管和滤波电感上压降不可忽视，本变换器所用整流二极管压降在 25A 电流下约为 2.5V，滤波电感直流压降取 0.5V；另外，变换器满载工作时会把电压拉低，为避免把工作脉冲占空比拉到最大时电压电流仍然达不到要求，变压器次级电压要有一定裕度，一般取变换器输出电压 30%；所以，变压器次级电压 $U_s = 147.25 \text{ V} \times 30\% = 22.11 \text{ V}$ 。

3.4.1 初级绕组匝数 N_1

$$N_1 = \frac{U_p T_{on}}{2 B_m A_c} \times 10^{-2} = \frac{U_p T_{on}}{2 B_m kcd} \times 10^{-2}$$

$$= \frac{155 \times 13}{2 \times 0.2 \times 0.6 \times 2 \times 1.2} \times 10^{-2} \approx 35 \text{ 匝}$$

3.4.2 次级绕组匝数 N_2

$$N_2 = U_s N_1 / U_p = (22.11 \times 35) / 155 \approx 5 \text{ 匝}$$

式中： T_{on} 为初级输入脉冲电压宽度，单位为 μs 。

取占空度 $D=0.5$ ， $T_{on} = D/f = 13 \mu\text{s}$ 。

3.5 导线线径计算

绕组导线大小根据变压器各绕组工作电流和电流密度来确定。另外，若变压器工作频率超过 20 kHz，还需要考虑电流趋肤效应影响，导线直径应小于两倍穿透深度。频率为 38 kHz 时铜导线趋肤深度 $\Delta \approx 0.41 \text{ mm}$ ，因此，所取导线直径应小于 0.82 mm。

3.5.1 电流密度

$$J = K_f A_p^{-0.14} \times 10^{-2} = 534 \times 3.48^{-0.14} \times 10^{-2} = 4.48 \text{ A/mm}^2$$

3.5.2 初级绕组所需导线截面积

$$S_{m1} = N_2 I_o / (N_1 J) = (5 \times 25) / (35 \times 4.48) = 0.797 \text{ mm}^2。$$

PCBfans.cn 提示请看下图：

用线径是 0.8mm，截面积是 0.5mm² 圆铜线两根并绕。

3.5.3 截面积

因为本变压器次级是带中间抽头输出，计算导线截面积时， I_o 需乘以 0.707 校正系数。因此，次级绕组所需导线截面积为

$$S_{m2} = 0.707 I_o / J = (0.707 \times 25) / 4.48 = 3.945 \text{ mm}^2。$$

用线径是 0.8mm，截面积是 0.5mm² 圆铜线 8 根，分两组，每组 4 根并绕，然后两组并接。

4 线圈绕制

因为变换器用是中间抽头变压器，功率较大，宜采用三明治绕法。三明治绕法是中间初级绕组，两边次级绕组，或中间次，两边初。这种绕法会对变压器温度有很大帮助，且磁力线在变压器中分布较均匀，所以绕组耦合较均匀，漏感少，对外界干扰小，对纹波影响较小。本变压器初级绕组绕在中间，次级是中间抽头输出，共有 4 个绕组，各 2 个绕组绕在初级两边。

5 结语

实验证明，该高频大功率变压器满载工作时转换效率达到 95.5%，磁芯温度 58℃。工作稳定可靠，噪声很小，对外界干扰小，表现了优良电气特性。

设计中，在最大输出功率时，磁芯中磁感应强度不应达到饱和，以免在大信号时产生失真。

该变压器工作频率为 38 kHz，由于工作频率较高，趋肤效应影响比较大，因此，在设计时应注意选择导线线径，避免由于趋肤效应引起有效面积减少。