

开关电源变压器设计

On-Bright Electronics (Shanghai) Co. Ltd

Oct. 2006

开关电源变压器设计

1. 前言
2. 变压器设计原则
3. 系统输入规格
4. 变压器设计步骤
5. 实例设计—12W Flyback变压器设计

1. 前言

反激变换器优点

- 电路结构简单
- 成本低廉
- 容易得到多路输出
- 应用广泛，比较适合100W以下的小功率电源

设计难点

- 变压器的工作模式随着输入电压及负载的变化而变化
- 低输入电压，满载条件下变压器工作在连续电流模式 (CCM)
- 高输入电压，轻载条件下变压器工作在非连续电流模式 (DCM)

2. 变压器设计原则

➤ 温 升

安规对变压器温升有严格的规定。Class A的绝对温度不超过90°C；Class B不能超过110°C。因此，温升在规定范围内，是我们设计变压器必须遵循的准则。

➤ 成 本

开关电源设计中，成本是主要的考虑因素，而变压器又是电源系统的重要组成部分，因此如何将变压器的价格，体积和品质最优化，是开关电源设计者努力的方向。

3. 系统输入规格

- 输入电压: $V_{acmin} \sim V_{acmax}$
- 输入频率: f_L
- 输出电压: V_o
- 输出电流: I_o
- 工作频率: f_s
- 输出功率: P_o
- 预估效率: η
- 输入功率: $P_{in}=P_o/\eta$
- 最大温升: 40°C

4. 变压器设计步骤

- 4.1 选择开关管和输出整流二极管
- 4.2 计算变压器匝比
- 4.3 确定最低输入电压和最大占空比
- 4.4 反激变换器的工作过程分析
- 4.5 计算初级临界电流均值和峰值
- 4.6 计算变压器初级电感量
- 4.7 选择变压器磁芯
- 4.8 计算变压器初级匝数、次级匝数和气隙长度
- 4.9 满载时峰值电流
- 4.10 最大工作磁芯密度 B_{max}
- 4.11 计算变压器初级电流、副边电流的有效值
- 4.12 计算原边绕组、副边绕组的线径，估算窗口占有率
- 4.13 计算绕组的铜损
- 4.14 变压器绕线结构及工艺

4. 变压器设计步骤

4.1 选择开关管和输出整流二极管

- 开关管MOSFET: 耐压值为 V_{mos}
- 输出二极管: 肖特基二极管

最大反向电压 V_D

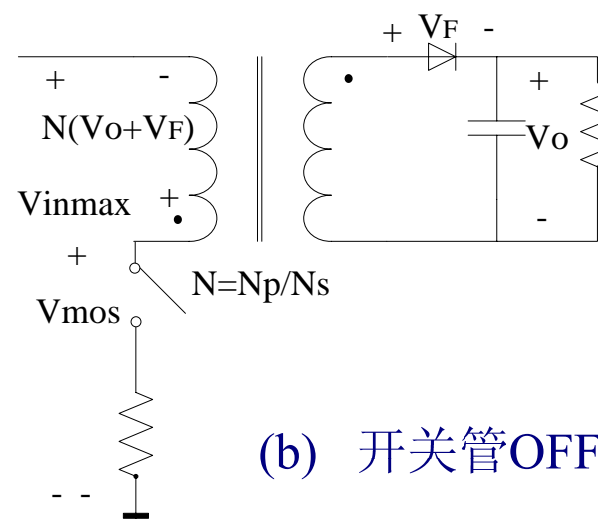
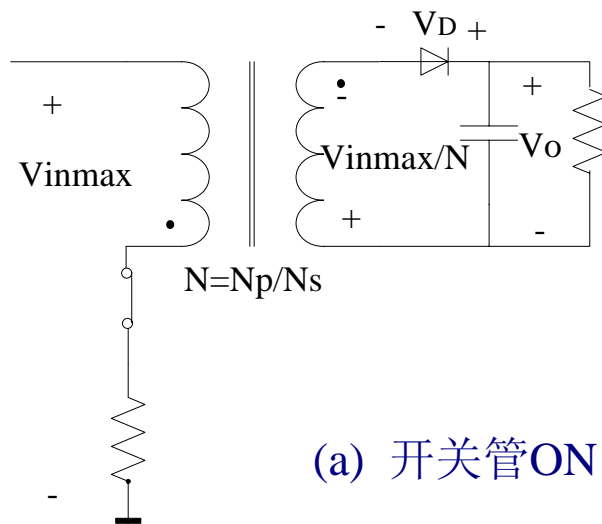
正向导通压降为 V_F

4. 变压器设计步骤

4.2 计算变压器匝比

考虑开关器件电压应力的余量(Typ.=20%)

- 开关ON $0.8 \cdot V_D > V_{in\max} / N + V_o$
- 开关OFF $0.8 \cdot V_{mos} > N \cdot (V_o + V_F) + V_{in\max}$
- 匝比 $N_{\min} < N < N_{\max}$

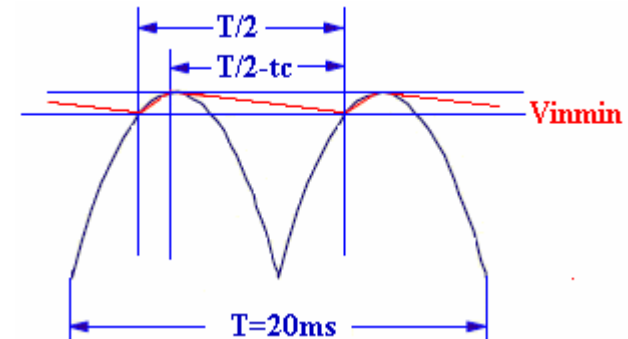


4. 变压器设计步骤

4.3 确定最低输入电压和最大占空比

- 输入滤波电容: $2\mu\text{F} \sim 3\mu\text{F}/\text{W}$
- 最低输入电压(假设 $t_c=3\text{ms}$)

$$V_{in\ min} = \sqrt{\left(\sqrt{2}V_{ac\ min}\right)^2 - \frac{2 \times P_{in} \left(\frac{T}{2} - t_c\right)}{C_{in}}}$$



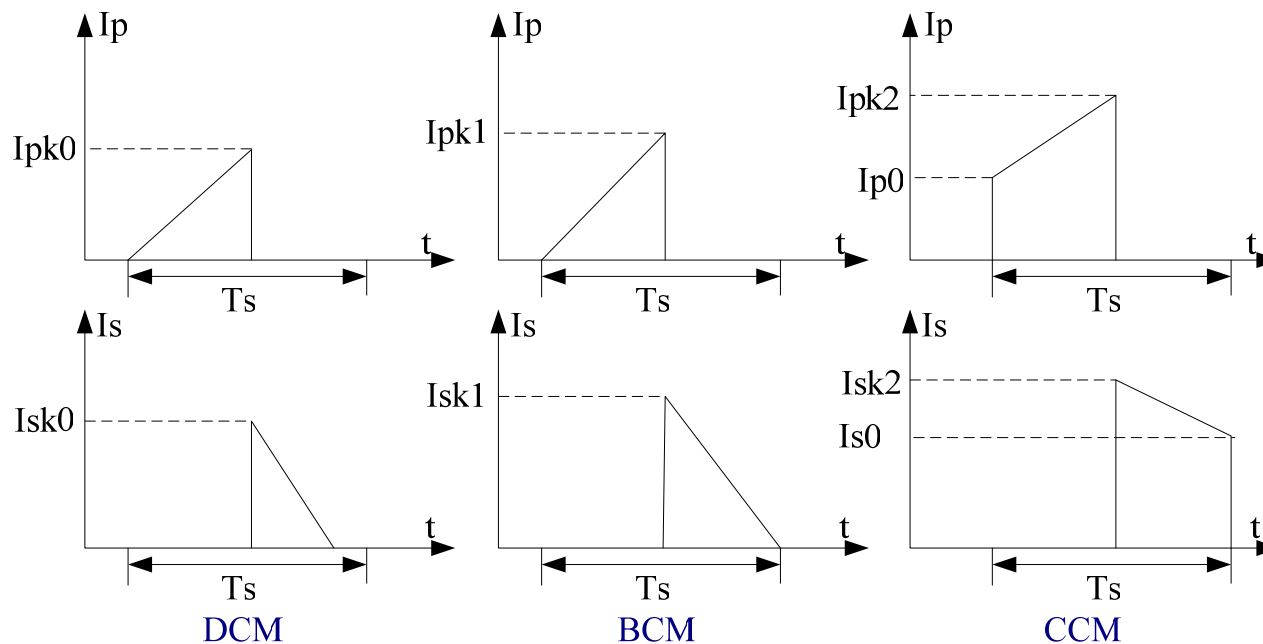
- 最低输入电压, 最大功率时, 占空比最大 D_{max}

$$D_{max} = \frac{N \cdot (V_o + V_F)}{N \cdot (V_o + V_F) + V_{in\ min}}$$

4. 变压器设计步骤

4.4 反激变换器的工作过程分析

- 低输入电压时，负载从轻载到重载，变压器经历从DCM → BCM → CCM的过程
- 高输入电压时，负载从轻载到重载，变压器一直工作在DCM



4. 变压器设计步骤

4.5 计算初级临界电流均值和峰值

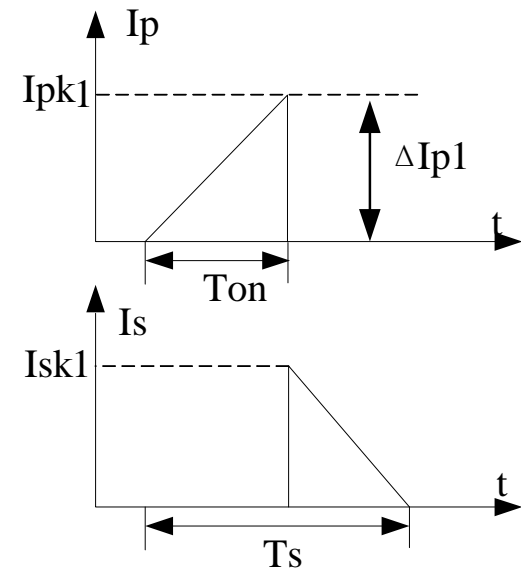
- 按照最小输入电压，最大输出功率(P_{omax})的条件计算
- $P_o = 1/3 P_{omax}$ 时，变换器工作在BCM
- $P_o < 1/3 P_{omax}$ 时，变换器工作在DCM
- $P_o > 1/3 P_{omax}$ 时，变换器工作在CCM

BCM模式下，最小输入电压时的平均输入电流

$$I_{in-avg} = \frac{\frac{1}{3} \cdot P_{in}}{V_{in \min}}$$

变压器初级临界电流峰值

$$\Delta I_{p1} = I_{pk1} = \frac{2 \times I_{in-avg}}{D_{\max}}$$



4. 变压器设计步骤

4.6 计算变压器初级电感量

- 最低输入电压，BCM条件下，最大导通时间

$$T_{on\ max} = \frac{1}{f_s} \times D_{\max}$$

- 变压器初级电感量

$$L_p = \frac{V_{in\ min} \times T_{on\ max}}{\Delta I_{p1}}$$

4. 变压器设计步骤

4.7 选择变压器磁芯

基于输出功率和开关频率计算面积乘积，根据面积乘积来选择磁芯

$$AP_p = \frac{P_o \times 10^6}{2 \times \eta \times K_o \times K_c \times f_s \times B_m \times j}$$

- k_o 是窗口的铜填充系数；取 $k_o = 0.4$
- k_c 是磁芯填充系数；对于铁氧体磁芯取 $k_c = 1$
- B_m 是变压器工作磁通密度，取 $B_m \leq \frac{1}{2} B_{sat}$
- j 是电流密度，取 $j = 4.2A/mm^2$

考虑绕线空间，尽量选择窗口面积大的磁芯，查表选择 A_w 和 A_e

4. 变压器设计步骤

4.8 计算变压器初级、次级匝数、辅助绕组匝数和气隙长度

初级绕组的匝数

$$N_p = \frac{V_{in\ min} \times t_{on\ max}}{A_e \times B_m}$$

- 增加或者减小匝数只会分别引起磁芯损耗减小或增加
- 在100kHz条件下，损耗与 $B^{2.86}$ 成正比，匝数减小5%会使磁芯损耗增加15%

次级绕组匝数

$$N_s = N_p / N$$

辅助绕组匝数

$$N_{cc} = (V_{cc} + 1) \times N_s / (V_o + V_F)$$

气隙长度

$$l_g = \frac{0.4\pi \times A_e \times N^2}{L_p}$$

4. 变压器设计步骤

4.9 满载时峰值电流

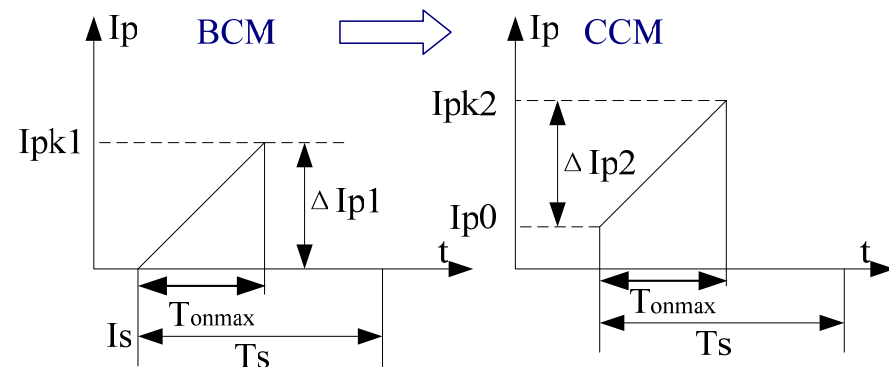
- CCM时， T_{onmax} 固定不变
- 输入电压不变，BCM的 T_{onmax} 等于CCM的 T_{onmax}

T_{onmax} 内，电感电流线形上升增量 $\Delta I_{p1} = \frac{V_{in\ min} \times T_{on\ max}}{L_p} = \Delta I_{p2}$

低输入电压，满载条件下 $P_o = \frac{1}{2} \times \eta \times L_p \times (I_{pk2}^2 - I_{p0}^2) \times f_s$

变压器初级峰值电流

$$I_{pk2} = \frac{P_o / \eta}{V_{in\ min} \times D_{max}} + \frac{\Delta I_{p2}}{2}$$



4. 变压器设计步骤

4.10 最大工作磁芯密度Bmax

$$B_{\max} = \frac{L_p \times I_{pk2}}{A_e \times N_p} < B_{sat}$$

如果 $B_{\max} < B_{sat}$ ，则证明所选择的磁芯通过，否则应重新选择

4. 变压器设计步骤

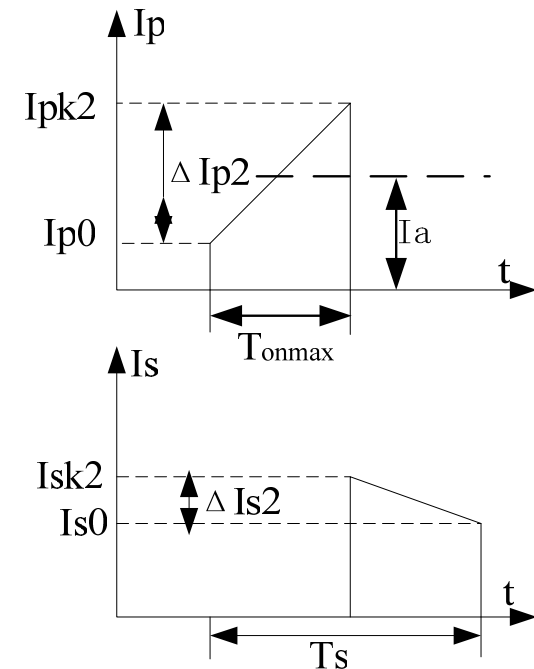
4.11 计算变压器初级电流、副边电流的有效值

梯形波电流的中值: $I_a = I_{pk} - \frac{\Delta I}{2}$

电流直流分量: $I_{dc} = D_{max} \times I_a$

电流有效值: $I_{prms} = I_a \sqrt{D_{max}}$

电流交流分量: $I_{ac} = I_a \sqrt{D_{max} (1 - D_{max})}$



4. 变压器设计步骤

4.12 计算原边绕组、副边绕组的线径，估算窗口占有率

- 导线的横截面积

自然冷却时，一般取电流密度 $j=4\text{A}/\text{mm}^2$ ：

初级绕组： $S_p=I_{prms}(\text{A})/4(\text{A}/\text{mm}^2)$

副边绕组： $S_s=I_{srms}(\text{A})/4(\text{A}/\text{mm}^2)$

- 线径及根数

集肤深度 $\delta = 6.61/\sqrt{f_s} \quad \text{cm}$

- 导线线径不超过集肤深度的2倍，若超过集肤深度，则需多股并绕
- 根据安规要求考虑加一定宽度的挡墙

- 窗口占有率 $k_0 A_w \geq N_p \times \pi \times R_p^2 + N_s \times \pi \times R_s^2 + N_{cc} \times \pi \times R_{cc}^2$

4. 变压器设计步骤

4.13 计算绕组的铜损

- 根据导线的电阻和集肤深度确定每个绕组的铜损耗
 - 总损耗一定要小于预算损耗
- 温升经验公式

$$\Delta T \approx \frac{800 \times P_{loss}}{34 \times \sqrt{A_e \times A_w}}$$

4. 变压器设计步骤

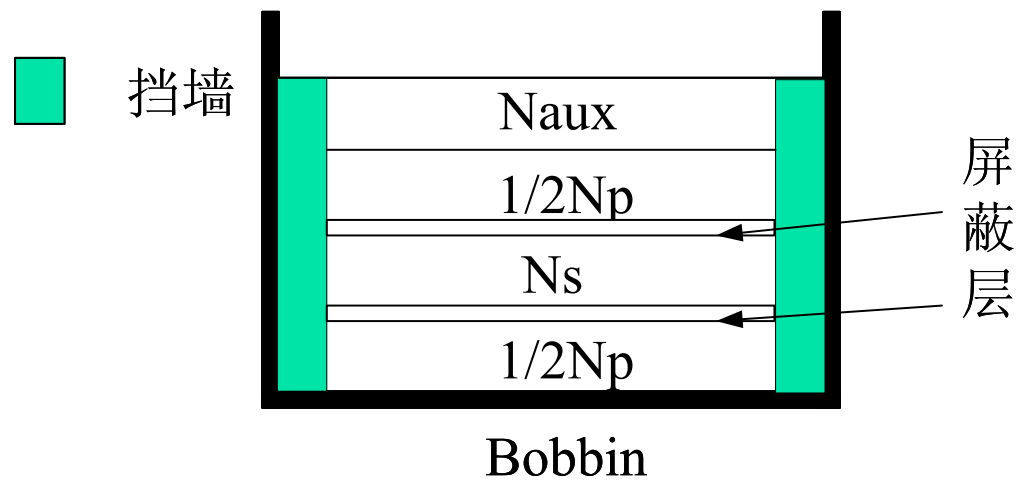
4.14 变压器绕线结构及工艺

- 骨架的选取

累计高度、宽度

- 绕法

初级和次级交错式(三明治)绕法：漏感小



5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.1 系统输入规格

- 输入电压：90Vac~265Vac
- 输入频率：50Hz
- 输出电压：12V
- 输出电流：1.0A
- 输出功率： $P_o=12W$
- 开关频率：50kHz
- 预估效率：0.75
- 输入最大功率： $P_{in}=16W$
- 变压器最大温升：40°C

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.2 开关管MOSFET和输出整流二极管

- 开关管MOSFET耐压： $V_{mos}=600V$
- 输出二极管：反向压降 $V_D=100V$
正向导通压降 $V_F=0.5V$

5.3 计算变压器匝比

$$0.8 \cdot V_D > V_{in\max} / N + V_o \Rightarrow 0.8 \times 100 > 375 / N + 12$$

$$0.8 \cdot V_{mos} > N \cdot (V_o + V_F) + V_{in\max} \Rightarrow 0.8 \times 600 > N \times (12 + 0.5) + 375$$

$$5.5 < N < 8.4$$

取 $N=6$

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.4 最低输入电压和最大占空比

➤ 选择 $C_{in}=22\mu F$

➤ 最低输入电压

$$V_{in\min} = \sqrt{\left(\sqrt{2}V_{ac\min}\right)^2 - \frac{2 \times P_{in} \left(\frac{T}{2} - t_c\right)}{C_{in}}} = \sqrt{127^2 - \frac{2 \times 16 \times 7 \times 10^{-3}}{22 \times 10^{-6}}} \approx 77V$$

➤ 最大占空比

$$D_{\max} = \frac{N \cdot (V_o + V_F)}{N \cdot (V_o + V_F) + V_{in\min}} = \frac{6 \times 12.5}{6 \times 12.5 + 77} = 0.49$$

5.5 计算初级临界电流均值和峰值

$$I_{in-avg} = \frac{\frac{1}{3} \cdot P_{in}}{V_{in\min}} = \frac{16}{3 \times 77} = 0.07A$$

$$\Delta I_{p1} = I_{pk1} = \frac{2 \times I_{in-avg}}{D_{\max}} = \frac{2 \times 0.07}{0.49} = 0.285A$$

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.6 最大导通时间和初级电感量

➤ 最大导通时间 $T_{on\max} = \frac{1}{f_s} \times D_{\max} = 9.8\mu s$

➤ 变压器初级电感量

$$L_p = \frac{V_{in\min} \times T_{on\max}}{\Delta I_{p1}} = \frac{77 \times 9.8 \times 10^{-6}}{0.285} \approx 2.7mH$$

5.7 变压器磁芯面积

$$AP_p = \frac{12 \times 10^6}{2 \times 0.75 \times 0.42 \times 50 \times 10^3 \times 1600 \times 4} = 0.066cm^2$$

(铁氧体磁芯 $B_{sat} = 3900G$, 取 $B_m = 1600G$)

查表 EF20 $A_e = 0.335cm^2$, $A_w = 0.6048cm^2$

$$AP = A_w \times A_e = 0.202cm^2 > 0.066cm^2$$

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.10 变压器初级匝数、次级匝数、辅助绕组匝数和气隙长度

$$N_p = \frac{77 \times 9.8 \times 10^{-6}}{0.335 \times 1600} = 140.7 \quad \text{取 } N_p = 140T$$

$$N_s = 140 / 6 = 23.3T \quad \text{取 } N_s = 23T \quad N_{cc} = 19 \times 23 / 12.5 \approx 35T$$

$$l_g = \frac{0.4\pi \times 33.5 \times 140^2}{2.6} = 0.42mm$$

5.11 满载时峰值电流、最大工作磁通密度

$$I_{pk2} = \frac{P_o / \eta}{V_{in \min} \times D_{\max}} + \frac{\Delta I_p}{2} = \frac{16}{77 \times 0.49} + 0.14 = 0.56A$$

$$B_{\max} = \frac{L_p \times I_{pk2}}{A_e \times N_p} = \frac{2.6 \times 0.56}{33.5 \times 140} = 3100T < 3900T$$

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.12 变压器初级电流、副边电流的有效值

➤ 原边各电流

| | | | |
|-------|--------------------------|-------|---------------------------|
| 电流中值 | $I_{pa} = 0.42\text{A}$ | 电流有效值 | $I_{prms} = 0.29\text{A}$ |
| 电流直流值 | $I_{pdc} = 0.20\text{A}$ | 电流交流值 | $I_{pac} = 0.208\text{A}$ |

➤ 副边各电流

| | | | |
|-------|-------------------------|-------|---------------------------|
| 电流直流值 | $I_{sdc} = 1\text{A}$ | 电流有效值 | $I_{srms} = 1.38\text{A}$ |
| 电流中值 | $I_{sa} = 1.92\text{A}$ | 电流交流值 | $I_{ac} = 0.959\text{A}$ |

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.13 计算原边、副边绕组的线径，估算窗口占有率

- 线径及根数

集肤深度 $\delta = 6.61 / \sqrt{f_s} = 6.61 / \sqrt{50 \times 10^3} = 0.29 \text{cm}$

- 导线的横截面积

电流密度 $j = 4.2 \sim 5 \text{A/mm}^2$

初级绕组: $S_p = 0.068 \text{mm}^2 \rightarrow \Phi 0.25 \text{mm} \times 1P \rightarrow R_{DC} = 4.523 \text{m} \Omega / \text{cm} (100^\circ \text{C})$

副边绕组: $S_s = 0.328 \text{mm}^2 \rightarrow \Phi 0.40 \text{mm} \times 2P \rightarrow R_{DC} = 0.892 \text{m} \Omega / \text{cm} (100^\circ \text{C})$

Vcc绕组: $S_{cc} = 0.1 / 4.2 = 0.024 \text{mm}^2 \rightarrow \Phi 0.1 \text{mm} \times 2P$

- 窗口占有率

$$0.4 \times 60.48 \geq 140 \times \pi \times 0.125^2 + 23 \times \pi \times 0.2^2 + 35 \times \pi \times 0.08^2$$

$$24.2 \geq 13.6 \quad \text{OK}$$

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.14 计算绕组的铜损

- 平均匝长 $l_{av}=23.5\text{mm}$
- 各绕组绕线长度

| | |
|----|---------------------------------------|
| 原边 | $I_{NP}=140 \times 23.5=329\text{cm}$ |
| 副边 | $I_{NS}=23 \times 23.5=54.0\text{cm}$ |
- 各绕组直、交流电阻

| | | |
|----|------------------------|------------------------|
| 原边 | $R_{pdc}=1.45 \Omega$ | $R_{pac}=2.38 \Omega$ |
| 副边 | $R_{sdc}=0.024 \Omega$ | $R_{sac}=0.038 \Omega$ |

Vcc绕组 电流过小，忽略绕组损耗
- 各绕组损耗

$$\left. \begin{aligned} P_p &= I_{prms}^2 \times R_{pdc} + I_{pac}^2 \times R_{pac} = 0.22\text{W} \\ P_s &= I_{srms}^2 \times R_{sdc} + I_{sac}^2 \times R_{sac} = 0.08\text{W} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_{cu} = 0.30\text{W}$$

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.14 计算绕组的铜损

➤ 计算铁损

查磁芯损耗曲线，PC40在 $\Delta B=0.15T$ 时为 $80mW/cm^3$

铁损 $P_{Fe} = 80 \times 1.5 = 0.12W$

➤ 估算温升

总损耗 $P_{loss} = 0.12 + 0.30 = 0.42W$

经验公式

$$\Delta T \approx \frac{800 \times 0.42}{34 \times \sqrt{33.5 \times 60.48}} = 22^\circ C < 40^\circ C$$

设计OK

5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.15 变压器绕线结构及工艺

➤ 绕线宽度高度累计

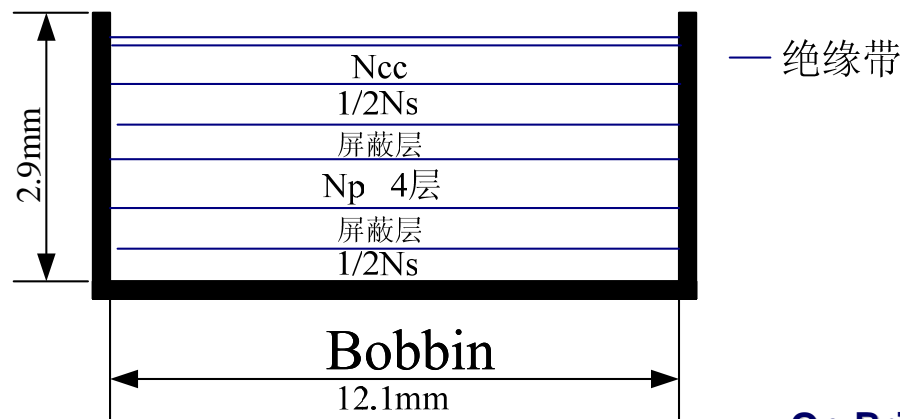
查EF20 Bobbin 绕线宽度 $W=12.1\text{mm}$ ，高度 $H=2.9\text{mm}$

0.25mm，最大外径0.275mm 每层35T， $W_1=9.62\text{mm}$

0.40mm，最大外径0.52mm 每层23T， $W_2=11.9\text{mm}$

0.10mm，最大外径0.13mm 每层35T， $W_3=9.1\text{mm}(0.1\text{mm} \times 2P)$

总高度 $=0.275 \times 4 + 0.52 \times 2 + 0.13 \times 3 + 0.03 \times 7 = 2.74\text{mm}$



5. 设计实例—12W开关电源变压器设计

5.15 变压器绕线结构及工艺

➤ 绕线结构 次级→初级→次级

| Step | Winding | Material | Start | Turns | Finish | Remark |
|------|---------|-----------------------------------|-------|-------|--------|---|
| 1 | N1 | Triple insulation, 0.40 Φ *1 | A | 23 | B | N1&N6 with TEFLON Tube,N2,N3,N4,N5 without TEFLON Tube. |
| 2 | TAPE | TAPE W=12mm (Y) | | 1 | | |
| 3 | N2 | 0.1 Φ *2 2UEW | 空 | 35 | 4 | |
| 4 | TAPE | TAPE W=12mm (Y) | | 1 | | |
| 5 | N3 | 0.25 Φ *1 2UEW | 1 | 140 | 2 | |
| 6 | TAPE | TAPE W=12mm (Y) | | 1 | | |
| 7 | N4 | 0.1 Φ *2 2UEW | 空 | 35 | 4 | |
| 8 | TAPE | TAPE W=12mm (Y) | | 1 | | |
| 9 | N5 | Triple insulation, 0.40 Φ *1 | A | 23 | B | |
| 10 | TAPE | TAPE W=12mm (Y) | | 1 | | |
| 11 | N6 | 0.1 Φ *2 2UEW | 3 | 35 | 4 | |
| 10 | TAPE | TAPE W=12mm (Y) | | 2 | | |

