

目 录

前言

第一单元 小功率电源变压器设计计算	1
1. 功率计算	3
2. 选取铁芯	3
3. 绕组匝数计算	4
4. 绕组电流计算	5
5. 绕组导线计算	6
6. 绕组结构计算	7
7. 铜、铁损耗计算	8
8. 温升计算	9
第二单元 中等功率变压器设计计算	37
1. 功率计算	37
2. 铁芯计算	38
3. 绕组匝数计算	40
4. 绕组电流计算	41
5. 绕组导线计算	41
6. 绕组结构计算	41
7. 铜、铁损耗计算	42
8. 温升计算	43
第三单元 滤波扼流圈设计计算	53
1. 铁芯截面积计算	53
2. 绕组匝数计算	54
3. 绕组导线计算	54
4. 绕组结构计算	54
5. 磁路气隙计算	54

第四单元 日光灯镇流器设计计算	58
1. 镇流器工作电压计算	58
2. 铁芯截面积计算	58
3. 绕组匝数计算	58
4. 绕组导线计算	59
5. 铁芯窗孔尺寸计算	59
6. 磁路气隙计算	59
第五单元 磁饱和稳压器设计计算	61
1. 三柱式磁饱和稳压器	61
2. 双柱式磁饱和稳压器	66
3. 壳式磁饱和稳压器	70
第六单元 磁饱和电抗器设计计算	75
1. 铁芯体积计算	76
2. 绕组匝数计算	78
3. 绕组导线计算	80
第七单元 电压互感器设计计算	88
1. 每匝电压计算	88
2. 铁芯截面积计算	89
3. 绕组匝数计算	90
4. 绕组电流计算	90
5. 绕组导线计算	91
6. 绕组导线电阻计算	91
7. 漏抗计算	91
8. 比差和相差计算	92
9. 误差率计算	93
第八单元 高频电源变压器设计计算	103
1. 变压器次级功率计算	103
2. 铁芯计算	104
3. 每匝感应电势计算	104
4. 绕组匝数计算	104
5. 绕组电流计算	105

6. 绕组导线计算	106
第九单元 高频电感线圈设计计算	122
1. 单层线圈的电感量计算	122
2. 多层线圈的电感量计算	122
第十单元 高漏抗变压器设计计算	124
1. 视在功率计算	126
2. 铁芯截面积计算	127
3. 绕组匝数计算	127
4. 绕组导线计算	127
5. 漏抗计算	128
6. 绕组导线直流电阻计算	128
7. 起始电流计算	128
第十一单元 充电电抗器设计计算	137
1. 铁芯体积计算	138
2. 绕组匝数计算	139
3. 绕组导线计算	139
4. 铜、铁损耗计算	140
5. 温升计算	141
第十二单元 晶体管直流变换器中的变压器设计计算	147
1. 功率计算	148
2. 铁芯计算	148
3. 绕组匝数计算	150
4. 绕组电流计算	150
5. 绕组导线计算	151
第十三单元 低频变压器设计计算	159
1. 铁芯截面积计算	159
2. 初、次级绕组匝数比计算	160
3. 每伏匝数计算	161
4. 初级绕组两端的音频电压计算	161
5. 绕组匝数计算	161
6. 绕组电流计算	162

7. 绕组导线计算	162
8. 校正磁感应强度	162
9. 漏感计算	163
第十四单元 脉冲变压器设计计算	170
1. 铁芯体积计算	170
2. 绕组匝数计算	173
3. 绕组电流计算	174
4. 绕组导线计算	175
5. 绕组结构计算	175
6. 损耗计算	175
7. 分布参数计算	177
8. 脉冲波形计算	179
9. 温升计算	180
第十五单元 微波电子管中控制磁场的设计计算	196
1. 轴向磁场结构计算	198
2. 螺旋管磁场结构计算	204

第一单元 小功率电源变压器设计计算

小功率电源变压器无论是在无线电专用设备中，还是在现代电子仪器设备中，或常见的家用电器中都已得到广泛应用。

这类变压器主要起变换电压和传输能量的作用。如供给整流电路所需的交流电压，电子管的灯丝电压或信号灯的电压等，如图 1-1 所示。

这类变压器常见的有：全密封式（见图 1-2a），半开放式（见图 1-2b），开放式（见图 1-2c）。

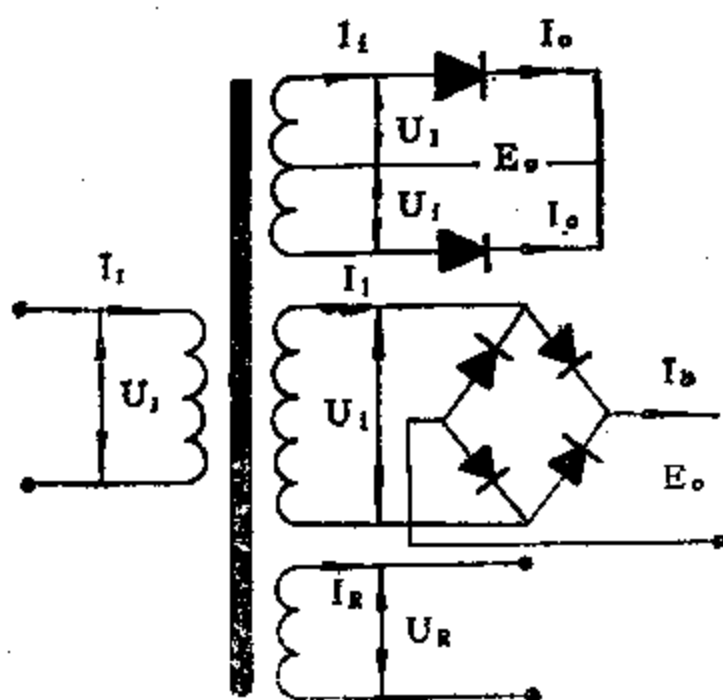


图 1-1

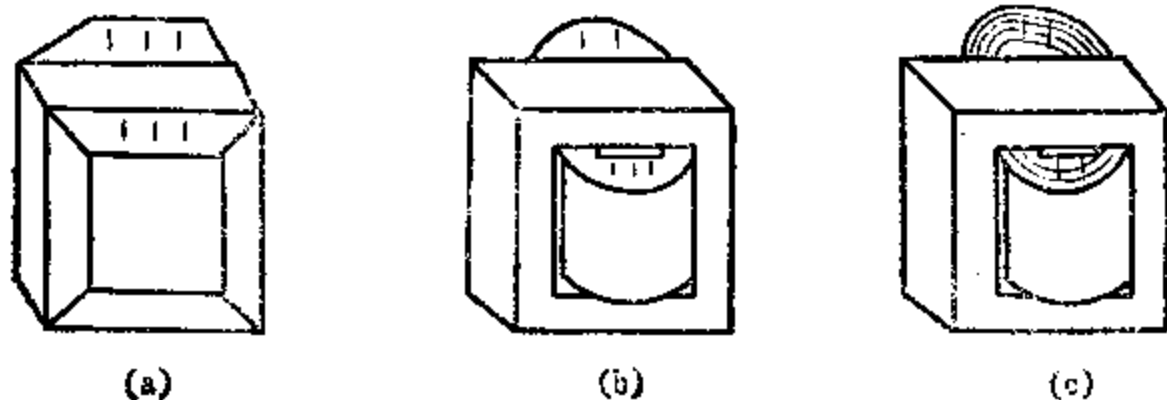


图 1-2

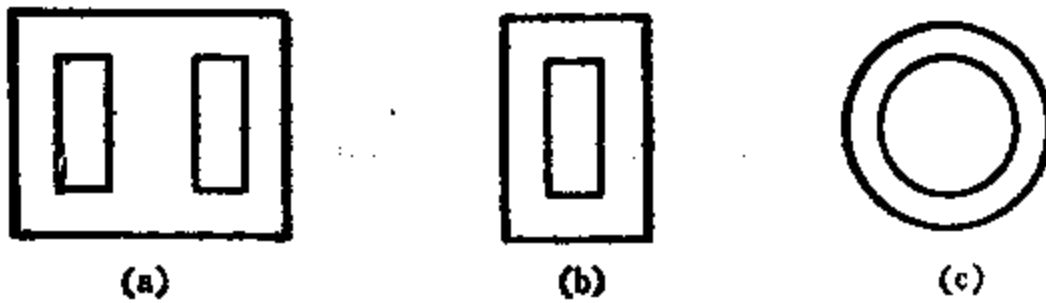


图1-3

所谓全密封式，主要是将变压器全部密封。半开放式，主要是将变压器的绕组密封，铁芯及其它附件裸露于空气中。开放式，无论是变压器的绕组、铁芯及其它附件均裸露于空气中。

一般根据它们的型式不同，其使用的场所也不同。如易燃、易爆、易腐的场所，如矿井、海洋、多用全密封式。在其它一般场所，多用开放式或半开放式。

这类变压器的铁芯型式有：E型铁芯（见图1-3a），C型铁芯（见图1-3b），环型铁芯（见图1-3c）。

在设计过程中，当变压器的容量相同，而其它技术条件也不变的情况下，采用不同型式的铁芯，就会得到不同的铁芯体积和重量。因为不同型式的铁芯宜于选用不同的铁芯材料，而不同的铁芯材料又具有不同的磁性能（指磁感应强度 B 和铁芯单位损耗 P_{e} 。单位“瓦/公斤”）。

如E型铁芯宜于选用各向同性的热轧硅钢薄板或硅钢带料。而C型和环型铁芯宜于选用各向异性的硅钢薄板或硅钢带料。

前者的磁饱和和感应强度 B 可达14000高斯，而后者的磁饱和和感应强度 B 可达17000高斯。当两者的厚度相等时，后者的铁芯单位损耗 P_{e} 小于前者。

因此，当小功率电源变压器的技术条件相同的情况下，环型铁芯的体积和重量比C型铁芯小（环型铁芯的平均磁路长度最短），而C型铁芯的体积和重量比E型铁芯小。

但是，在具体选取小功率电源变压器铁芯时，还应根据设制

量的大小，以及手边具有的磁性材料种类，或现有的铁芯系列而定。如设制量小，且无现成的C型或环型系列铁芯，也无其它宜于选用的磁性材料，或只有E型系列铁芯，这时应就地取材，采用E型铁芯即可。

小功率电源变压器的设计计算步骤，大体分为功率计算、选取铁芯、绕组匝数计算、绕组电流计算、绕组导线计算、绕组结构计算、铜铁损耗计算和温升计算等八部分。

1. 功率计算

$$P_{\text{等效}} = P_{\text{纯阻}} + P_{\text{桥}} + P_{\text{全波}}$$

式中：

$P_{\text{纯阻}}$ 、 $P_{\text{桥}}$ 、 $P_{\text{全波}}$ 分别为

(a) 单相纯电阻负载的功率

$$P_{\text{纯阻}} = \sum U_R I_R$$

(b) 单相桥式整流各绕组的功率

$$P_{\text{桥}} = \sum U_K I_K$$

(c) 单相全波整流各绕组的功率

$$P_{\text{全}} = \sum U_i I_i$$

I_i 、 I_K ，是按整流器的负载特性（电阻、电容、电感）及整流电路特点而换算出的次级绕组中的热效应电流。其数值可根据整流电路各参数对照表 1-1 或 1-2 中的交直流电压及电流的近似值进行计算。

2. 选取铁芯

小功率变压器的铁芯，国内外已形成多种系列。在这些系列中，有的是以减轻重量为出发点的，有的是以降低成本为出发点的。

前者有C型铁芯和环型铁芯，后者有E型铁芯。同时，在E型铁芯系列中，也有上述两种情况。一般铁芯窗孔宽度大于轭片宽度的属前者，铁芯窗孔宽度小于轭片宽度的属后者。

这里，仅以GEIB型和CD型铁芯系列为例作参考，见表1-

3和表1-4。

依照铁芯系列，在设计计算小功率电源变压器时，对铁芯的结构尺寸，就毋须重新进行计算，只需算出变压器的容量大小，即可从表1-3或表1-4中查得所需要的铁芯型号和铁芯结构尺寸。

例如有一只小功率电源变压器的容量为90瓦。从表1-3中查得铁芯型号为GEIB30×30(铁芯选用D42硅钢片制成)，铁芯窗孔高度为5.3厘米，窗孔宽度为1.9厘米，铁芯截面积为3×3平方厘米。

同时，还可以从表1-4中查得铁芯的型号为CD16×32×50，铁芯窗孔高度为5厘米，铁芯窗孔宽度为2.5厘米，铁芯截面积为1.6×3.2平方厘米。

一般在计算过程中，无论是根据变压器的容量计算得到的铁芯结构尺寸也好，还是从铁芯系列中查得的铁芯结构尺寸也好，都只能作为下一步设计计算的参考，而不是一成不变的。

当铁芯的窗孔尺寸不能安置全部绕组时，应该进行调整。其调整的方法是，在绕组匝数、绕组导线、绕组结构计算无误的情况下，若铁芯窗孔安置绕组过紧时，可重选铁芯截面积或窗孔大一些的铁芯；反之，过松时，可重选小一些的铁芯。总之要调整到既能安置全部绕组，又不影响变压器的电气强度为止。

3. 绕组匝数计算

(1) 初级绕组每伏匝数计算

$$W_1 = \frac{10^8}{4.44fB \cdot S} \quad (\text{匝/伏})$$

(2) 次级绕组每伏匝数计算

$$W_2 = (1 + \Delta U\%) W_1 \quad (\text{匝/伏})$$

(3) 初级绕组匝数

$$N_1 = U_1 W_1 \quad (\text{匝})$$

(4) 次级绕组匝数

$$N_R = U_R W_2 \quad (\text{匝})$$

$$N_i = U_i W_2 \quad (\text{匝})$$

$$N_K = U_K W_2 \quad (\text{匝})$$

.....

.....

$$N_n = U_n W_2 \quad (\text{匝})$$

式中:

f ——电源频率(赫);

B ——铁芯磁感应强度(高斯), (参考磁化曲线 1-1)。

$\Delta U\%$ 从表1-23中查得。

4. 绕组电流计算

在小功率电源变压器的次级绕组中, 有的是供给整流电路所需的交流电压, 有的是供给电子管的灯丝电压, 因此, 对各绕组中的电流计算, 应根据不同的负载进行。特别是供给整流电路的绕组, 其电压、电流, 应按表 1-1 中或表 1-2 中的技术参数进行计算。

当次级绕组中的热效应电流算出来以后, 还要折算到初级绕组中去, 即 $I'_1 = nI_1$ 、 $I'_K = nI_K$ 、 $I'_R = nI_R$ nI_n , $n = N_2/N_1$ 。

然后, 再根据铁芯中的磁化电流 I_ϕ 、铁芯中的损耗电流 I_o , 算出初级绕组中的总电流 I_1 , 即

(1) 各次级绕组折合到初级的电流

$$I'_2 = I'_1 + I'_K + I'_R \quad (\text{安})$$

(2) 铁芯中的损耗电流

$$I_o = \frac{P_o(\text{铁芯损耗功率“瓦”})}{U_1} \quad (\text{安})$$

(3) 初级电流

$$I_1 = \sqrt{(I'_2 + I_o)^2 + I_\phi^2} \quad (\text{安})$$

式中:

P_c ——铁芯损耗功率 ($P_c = P_{co}G_o$)(瓦);

P_{co} ——铁芯单位损耗 (从曲线1-2或表1-9中查出) (瓦/公斤);

G_o ——铁芯重量 (从表1-3或表1-4中查出) (公斤或kg);

I_ϕ ——磁化电流 ($I_\phi = H_m L_{CT}/N_1$)(安);

H_m ——磁场强度 (从曲线1-1中查出) (安匝/厘米);

L_{CT} ——铁芯的平均磁路长 (从表1-3或表1-4查出)(厘米);

U_1 ——初级电压(伏)。

5. 绕组导线计算

(1) 初级绕组线径

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} \quad (\text{毫米})$$

(2) 次级绕组线径

$$d_R = 1.13 \sqrt{\frac{I_R}{j}} \quad (\text{毫米})$$

$$d_i = 1.13 \sqrt{\frac{I_i}{j}} \quad (\text{毫米})$$

$$d_K = 1.13 \sqrt{\frac{I_K}{j}} \quad (\text{毫米})$$

⋮
⋮

$$d_n = 1.13 \sqrt{\frac{I_n}{j}} \quad (\text{毫米})$$

式中:

j ——电流密度 (安/毫米²) (此值一般在1.8~3安/毫米²范围内选取。变压器容量大者取下限,容量小者取上限。若选用CD型铁芯,则 j 之

值可从表1-4中查出)。

6. 绕组结构计算

(1) 每层匝数

$$a = \frac{\text{绕线宽度 } L_0}{\text{带漆的导线直径 } d_m \times K_{\text{排}}}$$

(2) 层数

$$a' = \frac{\text{绕组匝数 } N}{a}$$

(3) 各绕组厚度 δ

$$\delta = K_{\text{叠}} a' (d_m + \text{层间绝缘厚度 } a_2) + \text{该绕组外包绝缘厚度 } a_1$$

式中:

$K_{\text{排}}$ 、 $K_{\text{叠}}$ ——排绕系数和叠绕系数(可从表1-10中查出)。

(4) 绕组总厚度 D_m

$$D_m = \text{底筒厚度 } \delta_{\text{底}} + \text{内层绝缘厚度 } a_1 + \text{各绕组厚度 } \delta$$

绕组厚度 D_m 之值, 不仅与绕组导线的粗细有关, 而且还与绕组的层间工作电压、组间工作电压, 以及绕组对地的工作电压所需的绝缘材料的厚度有关。

绕组绝缘材料应根据表1-11至表1-21中所提供的各种材料的机械性能和电气性能进行选取。

当绕组工作电压不高, 且绕组导线较粗时, 则绕组的绝缘应主要按机械强度的要求进行选取。

(5) 绕组平均匝长 (见图1-4)

$$L_{m.n} = 2(A_1 + B) + \pi A_2$$

$n = 1, 2, 3, \dots, n$ 绕组

(6) 绕组导线长度

$$L_1 = L_{m.n} \times N \times 10^{-3} \quad (\text{米}).$$

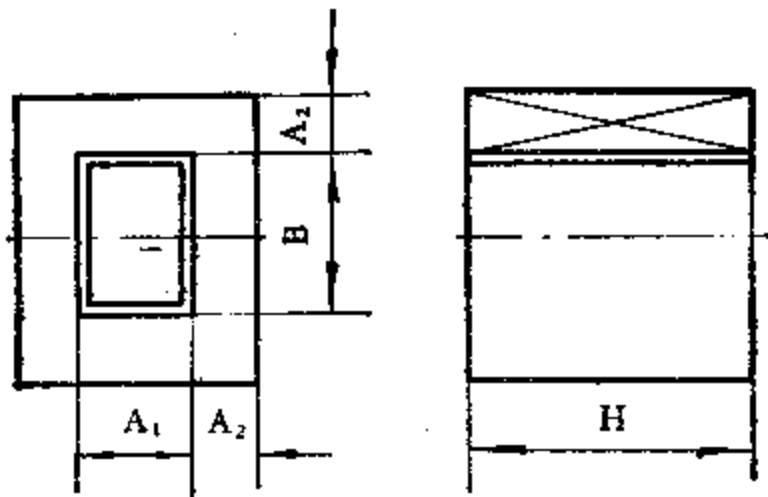


图1-4

(7) 绕组铜重

$$G_{m.n} = L_i R_g \times 10^{-3} \quad (\text{公斤})$$

(R_g 为导线每千米重量“公斤/千米”、见表1-5至表1-8)。

(8) 绕组热态电阻

$$R_n = K_T R_{n20} \quad (\text{欧})$$

式中:

K_T ——热态铜阻比冷态20℃时铜阻的放大倍数(见曲线1-3)。

$R_{n20} = L_i R_{20} \times 10^{-3}$ (R_{20} 为导线每千米的电阻值可从表1-5或至表1-8中查出)。

7. 铜、铁损耗计算

(1) 绕组铜耗

$$P_M = I_1^2 R_1 + I_R^2 R_R + I_2^2 R_2 + I_K^2 R_K \cdots \cdots I_n^2 R_n \quad (\text{瓦})$$

(2) 铁芯损耗

$$P_{Fe} = P_{co} G_o \quad (\text{瓦})$$

式中:

P_M ——绕组铜耗(瓦);

I_1 ——初级电流(安);

I_R ——纯电阻负载绕组中的电流(安);

- I_i ——全波整流绕组中的热效应电流(安);
- I_k ——桥式整流绕组中的热效应电流(安);
- R_R ——纯电阻负载绕组中的电阻(欧);
- R_i ——全波整流绕组中的电阻(欧);
- R_k ——桥式整流绕组中的电阻(欧)。

8. 温升计算

$$\Delta\tau = \frac{P}{\alpha \times F_0} = \frac{P_c + P_M}{\alpha \times F_0} \quad (^\circ\text{C})$$

式中:

$\alpha = 1.3 \times 10^{-3}$ 瓦/厘米², 为变压器在空气中的表面散热系数。

F_0 为变压器的散热面积(如选用标准系列铁芯, 可从表1-3或表1-4中查出)。(厘米²)

$\Delta\tau$ 之值加上变压器的工作环境工作温度, 不得超过所选用的绝缘材料的允许工作温度(见表1-22)。否则, 必须进行调整。当铁芯窗孔安置全部绕组有余时, 可降低电流密度 j 或降低磁感应强度 B , 再进行计算; 若铁芯窗孔难于安置全部绕组时, 即可另选大一些的铁芯进行计算, 直至调整到不超过所选用的绝缘材料的允许工作温度为限。

[例] 已知小功率电源变压器的技术条件为:

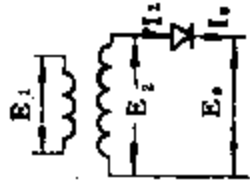
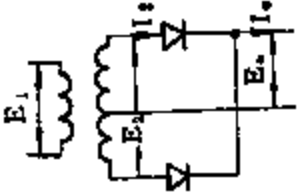
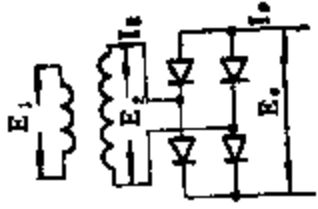
1. 电源电压220V;
2. 供桥式整流电路的绕组工作电压为260伏, 电流为0.2安培, 供电子管灯丝的绕组电压为6.3伏, 电流为3安培;
3. 电源频率为50赫;
4. 变压器温升为50 $^\circ\text{C}$;
5. 变压器环境工作温度为55 $^\circ\text{C}$;
6. 初次级绕组之间要求静电屏蔽。

具体计算步骤是:

1. 功率计算

表 1-1

整流电路各参数对照表

名称	单相半波	单相全波	单相桥式
接线图			
滤波负载性质	R	R	R
纹波基频f	L	L	L
最大纹波百分率	C	C	C
	f	2f	2f
	157%	67%	67%
次级电压有效值E2	2.22E0	1.11E0	1.11E0
次级电流有效值I2	1.57I0	0.707I0	I0
初级电流有效值I1	1.205nI0	1.118nI0	nI0
次级伏安P2	3.49P0	1.755P0	1.23P0
初级伏安P1	2.7P0	1.24P0	1.23P0
变压器	2.22E0	1.4E0	E0
	1.57I0	2.5I0	1.1I0
	1.205nI0	1.57nI0	1.41nI0
	3.49P0	3.5P0	2.22P0
	2.7P0	2.2P0	1.56P0

变 压 器	初级利用因素 K_1	0.37	0.45	0.45	0.806	0.9	0.64	0.813	0.9	0.64
	次级利用因素 K_2	0.287	0.45	0.45	0.57	0.637	0.45	0.813	0.9	0.64
整 流 元 件	阳极电流	$1.57I_0$	I_0	I_0	$0.79I_0$	$0.787I_0$	$1.11I_0$	$0.79I_0$	$0.707I_0$	$1.11I_0$
	反 峰 压		$3.14E_0$	$3.14E_0$		$3.14E_0$			$1.57E_0$	

E_0 直流电压 (伏)

I_0 直流电流 (安)

P_0 直流功率 (瓦)

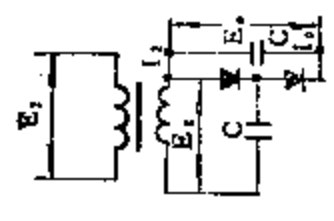
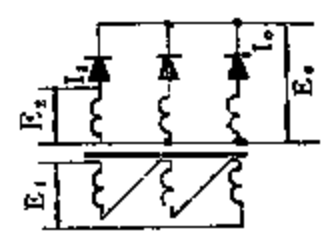
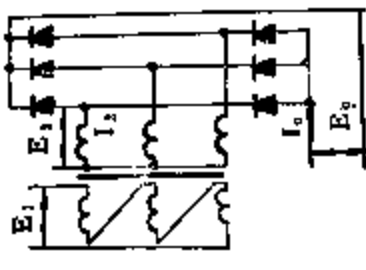
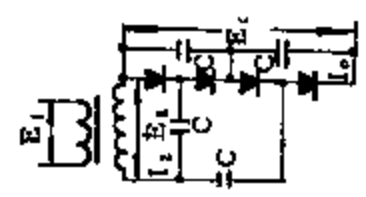
f 电源频率 (赫)

$\eta = \frac{E_2}{E_1}$ 变换系数

表中参数前面的系数均为经验估计值, 可供参考

表 1-2

整流电路各参数对照表

名称	倍压 (半波)	三相半波	三相全波	K倍压 (小电流)
接线图				
整流回路				
滤波负载性质	C	R	R	C
纹波基频f	2f	3f	6f	Kf
最大纹波百分率	67%	25%	5.7%	
次级电压有效值E2	0.8E0	0.856E0	0.578E0	1.2E0/K
次级电流有效值I2	3I0	0.59I0	0.875I0	1.5KI0
初级电流有效值I1	3nI0	0.59nI0	0.875nI0	1.5KI0
次级伏安P2	1.8P0	1.515P0	1.05P0	1.8P0
变压器				

变 压 器	初级伏安 P_1	$1.8P_0$	$1.515P_0$		$1.05P_0$	$1.8P_0$
	初级利用因素 K_1	0.555	0.66		0.951	0.555
	次级利用因素 K_2	0.555	0.66		0.951	0.555
整流元件	阳极电流	$3I_0$	$0.876I_0$		$0.58I_0$	$1.5KI_0$
	反 峰 压	$1.7E_0$	$2.12E_0$		$1.05E_0$	$3.4E_0/K$

E_0 直流电压 (伏)

I_0 直流电流 (安)

P_0 直流功率 (瓦)

f 电源频率 (赫)

$n = \frac{E_2}{E_1}$ 变换系数

表中参数前面的系数均为经验估计值, 可供参考

说 明

表 1-3

50Hz小功率变压

铁芯型号 中柱宽×叠厚 A×b (mm)	额定功率 (伏安)		铁窗尺寸		外型尺寸			铁芯截 面积 cm ²	磁路平 均长度 (cm)
	Ds10	D41 D42 D43	高 (h)	宽 (c)	长 (L)	厚 (b)	高 H		
GEIB16×16 ×24 ×32	6.8	5.8	28	10	56	16	48	2.33	9.03
	16.0	8.0				24		3.50	
	13.0	11.0				32		5.52	
GEIB19×19 ×28 ×38	11.0	10.0	33.5	12	67	19.0	67.5	3.29	10.73
	18.0	16.0				28.0		4.85	
	35.0	30.0				38.0		6.56	
GEIB22×22 ×33 ×44	30.0	26.0	39	14	78	22.0	67	4.4	12.44
	35.0	30.0				33.0		6.6	
	45.0	38.0				44.0		8.8	
GEIB26×26 ×39 ×52	57	50	47	17	94	26.0	81	6.15	14.7
	80	70				39.0		9.23	
	100	90				52.0		12.3	
GEIB30×30 ×45 ×50	100	90	53	19	106	30	91	8.2	16.9
	150	130				45		12.3	
	200	170				60		16.4	
GEIB35×35 ×52 ×70	200	170	61.6	22	123	35	106.5	11.1	19.75
	280	250				52		16.1	
	340	300				70		22.3	
GEIB40×40 ×60 ×80	340	300	72	26	144	40	124	14.6	23
	460	400				60		21.9	
	570	500				80		29.1	

器铁芯系列表

平均匝长 cm	铁芯重量 (kg)		近似叠 片数	散热面积 (F ₀) cm ²
	D310 0.35	D42 0.35		
9.6			48	96
11.6			68	120
12.8			92	141
11.6	0.409	0.393	54	150
13.4	0.602	0.579	80	170
15.4	0.815	0.784	108	195
13.6	0.641	0.617	62	205
15.8	0.96	0.926	94	235
18.0	1.28	1.23	126	265
16.4	1.10	1.06	74	295
19.0	1.66	1.60	112	340
21.6	2.2	2.12	148	385
18.8	1.62	1.56	86	375
21.8	2.41	2.34	128	435
24.8	3.23	3.11	172	495
22.0	2.55	2.45	100	510
25.4	3.78	3.64	148	586
28.6	5.10	3.64	200	670
24.0	4.02	3.87	114	695
28.0	6.03	5.80	172	805
32.0	8.0	7.70	228	910

铁芯结构

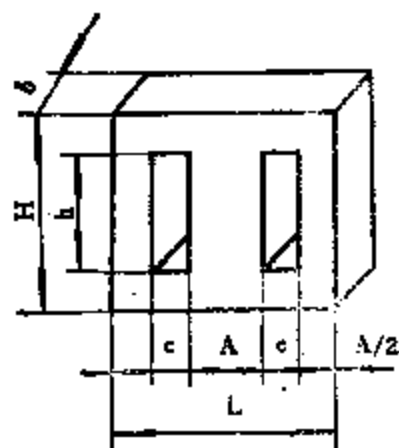


表 1-4

C型铁芯

铁芯型号及尺寸 铁芯柱宽×柱厚×窗高 $a \times b \times h$ (mm)	技 术 指 标							
	VA	P_2	η	B~ 仟高斯	B~ 负载 仟高斯	j_1	j_2	$\Delta\mu$ %
	伏安	瓦	P_2/P_1	斯	仟高斯	Δ/mm^2	Δ/mm^2	
CD10×12.5×20 ×25 ×32 ×40	2.1 2.54 3.26 4.0	1.1 1.47 2.1 2.7	0.75 0.772 0.795 0.807	16	15.2	1.94 1.8 1.67 1.6	13.5	10
CD12.5×16×25 ×32 ×40 ×50	7.1 9.05 11.5 14.6	4.9 6.7 8.85 11.5	0.82 0.833 0.84 0.85	16.5	15.16	2.1 2.04 1.98 1.98	1.81	10
CD12.5×25×30 ×40 ×50 ×60	19.8 27.7 35.5 42.4	15.8 22.8 29.8 35.7	0.851 0.858 0.865 0.867	17	16.15	2.37 2.3 2.28 2.28	2.22	10
CD16×32×40 ×50 ×65 ×80	74.0 97.0 131 164	63.5 84.0 114 143	0.873 0.878 0.882 0.884	17	16.15	2.93 2.91 2.90 2.89	2.87	10
CD20×40×50 ×60 ×80 ×100	206 238 313 380	180 210 279 342	0.883 0.89 0.90 0.905	17	16.2 16.3	3.35 3.15 2.85 2.70		9.56 6.33 8.43 8.0
CD25×50×50 ×80 ×100 ×120	450 539 637 765	409 487 584 707	0.915 0.923 0.926 0.93	17	16.4 16.5	2.8 2.6 2.42 2.32		6.6 6.18 5.8 5.46
CD32×64×80 ×100 ×130 ×160	963 1183 1466 1789	919 1106 1386 1686	0.94 0.945 0.95 0.953	17	16.6	2.25 2.10 1.95 1.84		4.4 3.85 3.55 3.46
CD40×80×100 ×120 ×160 ×200	2067 2410 3075 3700	1952 2278 2947 3652	0.958 0.96 0.964 0.965	17	16.8	1.83 1.72 1.59 1.5		3.67 2.5 2.28 2.17

系列表

绕组计算数据						温升计算参考		
初级匝数 220V	每伏匝数		底筒高 mm	底筒厚 mm	窗宽 mm	F_c	F_m	β
	初级	次级				cm ²	cm ²	F_c/F_m
5580	25.4	28	19	0.8	12.5	22.2	40.3	0.548
			24				47.8	0.484
			31				58	0.382
			39				69	0.318
3260	14.8	16.3	23.5	1	16	36.5	82.7	0.566
			30.5				75.4	0.47
			38.5				90	0.395
			48.5				108	0.328
2024	9.2	10.1	28.5	1	20	49.4	96.5	0.517
			38.5				118	0.418
			48.5				140	0.352
			58.5				163	0.303
1238	5.83	6.17	38.5	1	25	80	161	0.49
			48.5				190	0.42
			63.5				233	0.344
			78.5				276	0.29
782	3.6	3.96	48.5	1.2	32	126.6	258	0.476
		3.94	58.5				295	0.408
		3.91	78.5				367	0.344
		3.89	98.5				440	0.297
508	2.3	2.45	63	1.5	40	196	416	0.476
		2.44	78				485	0.408
		2.43	98				576	0.444
			118				667	0.407
310	1.405	1.46	78	1.7	50	321	655	0.49
		1.45	98				770	0.417
			128				943	0.34
			168				1114	0.288
198	0.9	0.93	93	2	64	506	1050	0.482
		0.96	118				1196	0.424
			158				1488	0.34
			198				1780	0.284

续表

铁芯型号及尺寸 铁芯柱宽×柱厚×窗高 a×b×h (mm)	铁 芯 数 据			铁 芯 结 构
	l _{CT}	G _C	S _C	
	cm	kg	cm ²	
CD10×12.5×20 ×25 ×32 ×40	9.38	0.0819	1.11	
	10.4	0.0905		
	11.8	0.103		
	13.4	0.118		
CD12.5×16×25 ×32 ×40 ×50	11.8	0.170	1.85	
	13.3	0.19		
	14.8	0.213		
	17.0	0.241		
CD12.5×25×30 ×40 ×50 ×60	13.6	0.306	2.88	
	15.8	0.350		
	17.6	0.394		
	19.8	0.438		
CD16×32×40 ×50 ×65 ×80	17.7	0.65	4.71	
	19.7	0.721		
	22.7	0.829		
	25.7	0.934		
CD20×40×50 ×60 ×80 ×100	22.4	1.28	7.36	
	24.4	1.38		
	28.4	1.61		
	32.4	1.84		
CD25×50×50 ×80 ×100 ×120	28.5	2.54	11.5	
	31.5	2.8		
	36.5	3.15		
	39.5	3.5		
CD32×64×80 ×100 ×130 ×160	35.7	5.18	18.84	
	39.7	5.76		
	45.7	6.61		
	51.7	7.47		
CD40×80×100 ×120 ×160 ×200	45	10.20	29.5	
	49.1	11.12		
	57.1	13.0		
	65	14.7		

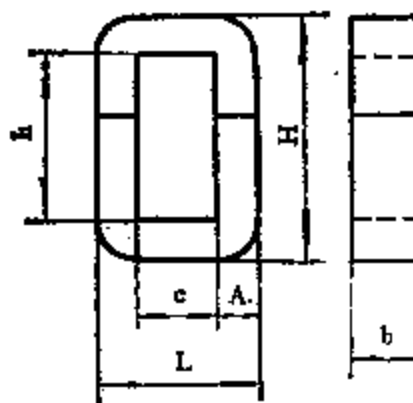


表1-5

国产漆包线规格表

型号及规格 QQ及QZ		铜芯截 面 积 mm ²	温度为 +20℃ 时直流 电 阻 欧/ 1000米	漆包线 重 量 (公斤) / 1000米	电 流 (安)				说 明
铜芯 直径 (d) mm	最大 外径 (dm) mm				3安/ mm ²	2.5安/ mm ²	2安/ mm ²	1.5安/ mm ²	
0.06	0.09	0.002827	6198	0.027	0.00845	0.00707	0.00565	0.00424	QQ 为 A 级; 工作温度 + 105℃ 无水解作 用。 QZ 为 B 级; 工作温度 + 130℃ 有水解作 用。
0.07	0.1	0.003848	4556	0.036	0.0115	0.00962	0.00770	0.00577	
0.08	0.11	0.005027	3487	0.047	0.0151	0.0126	0.0101	0.00755	
0.09	0.12	0.006362	2758	0.059	0.0191	0.0159	0.0127	0.00952	
0.10	0.13	0.007854	2237	0.073	0.0236	0.0196	0.0157	0.01278	
0.11	0.14	0.009498	1846	0.088	0.0285	0.0237	0.0190	0.0142	
0.12	0.15	0.01131	1551	0.104	0.0339	0.0283	0.0226	0.0170	
0.13	0.16	0.01327	1322	0.122	0.0398	0.0322	0.0265	0.0196	
0.14	0.17	0.01539	1139	0.142	0.0462	0.0385	0.0303	0.0233	
0.15	0.19	0.01767	993	0.162	0.0530	0.0442	0.0353	0.0266	
0.16	0.20	0.02011	872	0.182	0.0603	0.0503	0.0402	0.0301	
0.17	0.21	0.02270	773	0.203	0.0681	0.0568	0.0454	0.034	
0.18	0.22	0.02545	689	0.233	0.0764	0.0636	0.0509	0.0382	
0.19	0.23	0.02835	618	0.259	0.0851	0.0709	0.0567	0.0428	
0.20	0.24	0.03142	558	0.287	0.0943	0.0785	0.0628	0.0472	
0.21	0.25	0.03464	506	0.316	0.104	0.086	0.0689	0.0517	
0.23	0.26	0.04155	422	0.378	0.125	0.104	0.0831	0.0608	
0.25	0.30	0.04905	357	0.446	0.147	0.123	0.0982	0.0736	
0.27	0.32	0.05726	306	0.522	0.172	0.143	0.115	0.086	
0.29	0.34	0.06605	265	0.601	0.198	0.165	0.132	0.099	
0.31	0.36	0.07548	232	0.689	0.226	0.189	0.151	0.113	
0.33	0.38	0.08553	205	0.780	0.257	0.214	0.171	0.128	
0.35	0.41	0.09621	182	0.876	0.289	0.241	0.192	0.144	
0.38	0.44	0.1134	155	1.03	0.340	0.284	0.224	0.1697	
0.41	0.47	0.1320	133	1.20	0.396	0.330	0.264	0.198	
0.44	0.50	0.1521	115	1.38	0.456	0.380	0.304	0.227	

表1-6

国产漆包线规格表

型号及规格 QQ及QZ		铜芯截 面 积 mm ²	温度为 +20℃ 时直流 电 阻 欧/ 1000米	漆包线 重 量 (公斤)	电 流 (安)				说 明
铜芯 直径 (d) mm	最大 外径 (dm) mm				3安/ mm ²	2.5安/ mm ²	2安/ mm ²	1.5安/ mm ²	
0.47	0.53	0.1735	101	1.57	0.521	0.434	0.347	0.260	
0.49	0.55	0.1886	93	1.71	0.566	0.472	0.377	0.283	
0.51	0.58	0.2049	85.9	1.86	0.613	0.511	0.409	0.307	
0.53	0.60	0.2206	79.5	2.00	0.662	0.552	0.441	0.331	
0.55	0.62	0.2376	73.7	2.16	0.713	0.594	0.475	0.354	
0.57	0.64	0.2552	68.7	2.3	0.766	0.638	0.510	0.383	
0.59	0.66	0.2734	64.1	2.48	0.820	0.684	0.547	0.410	
0.62	0.69	0.3019	58	2.73	0.906	0.755	0.604	0.478	
0.64	0.72	0.3217	54.5	2.91	0.985	0.804	0.643	0.482	
0.67	0.75	0.3526	49.7	3.19	1.06	0.882	0.705	0.527	
0.69	0.77	0.3739	46.9	3.38	1.12	0.935	0.748	0.56	
0.72	0.80	0.4072	43.0	3.67	1.22	1.02	0.814	0.61	
0.77	0.86	0.4650	41.6	4.21	1.40	1.16	0.931	0.690	
0.80	0.89	0.5027	34.8	4.55	1.51	1.26	1.010	0.753	
0.83	0.92	0.5411	32.4	4.89	1.61	1.35	1.080	0.811	
0.86	0.95	0.5809	30.1	5.25	1.74	1.45	1.160	0.887	
0.90	0.99	0.6362	27.5	5.74	1.91	1.59	1.27	0.994	
0.93	1.02	0.6793	25.8	6.13	2.04	1.70	1.36	1.017	
0.96	1.05	0.7238	24.2	6.53	2.17	1.81	1.45	0.083	
1.00	1.11	0.7864	22.4	7.10	2.36	1.96	1.57	1.178	
1.04	1.15	0.8495	20.6	7.64	2.55	2.12	1.70	1.272	
1.08	1.19	0.9181	19.1	8.27	2.75	2.29	1.83	1.372	
1.12	1.23	0.9852	17.8	8.86	2.95	2.46	1.97	1.45	
1.16	1.27	1.057	16.6	9.53	3.17	2.64	2.11	1.62	
1.20	1.31	1.131	15.5	10.2	3.34	2.83	2.26	1.7	
1.25	1.36	1.227	14.3	11.1	3.63	3.07	2.45	1.84	

表1-7

国产漆包线规格表

型号及规格 QQ及QZ		铜芯截 面 积 mm ²	温度为 +20℃ 时直流 电 阻 欧/ 1000米	漆包线 重 量 (公斤) / 1000米	电 流 (安)				说 明
铜芯 直径 (d) mm	最大 外径 dm mm				3安/ mm ²	2.5安/ mm ²	2安/ mm ²	1.5安/ mm ²	
1.30	1.41	1.327	13.2	11.9	3.98	3.32	2.65	1.99	
1.35	1.46	1.431	12.3	12.9	4.29	3.38	2.86	2.14	
1.40	1.51	1.539	11.3	13.9	4.62	3.85	3.08	2.30	
1.45	1.56	1.651	10.6	14.9	4.95	4.19	3.30	2.47	
1.50	1.61	1.767	9.93	16.9	5.30	4.47	3.53	2.75	
1.56	1.67	1.911	9.17	17.2	5.73	4.78	3.82	2.975	
1.62	1.73	2.081	8.50	18.5	6.16	5.15	4.12	3.090	
1.68	1.79	2.217	7.91	19.9	6.65	5.54	4.43	3.320	
1.74	1.85	2.378	7.37	21.4	7.13	5.95	4.76	3.670	
1.81	1.93	2.573	6.81	23.1	7.72	6.43	5.15	3.860	
1.88	2.00	2.776	6.31	24.9	8.33	6.94	5.55	4.170	
1.95	2.07	2.987	5.87	26.8	8.96	7.46	5.97	4.49	
2.02	2.14	3.205	5.47	28.9	9.62	8.01	6.41	4.82	
2.10	2.23	3.464	5.06	31.1	10.4	8.66	6.93	5.20	
2.26	2.39	4.012	4.37	36.2	12.0	10.0	8.02	6.00	
2.44	2.57	4.676	3.75	42.2	14.0	11.69	9.35	7.13	

表1-8

几种纱包圆线及扁线规格表

型号及规格 ME型双纱包线		铜芯截 面 积 mm ²	温度为 +20℃ 时直流 电 阻 欧/ 1000米	纱包线 重 量 (公斤)	电 流 (安)				说 明
铜芯直径 (d) mm	最大外径 dm mm				3安/ mm ²	2.5安/ mm ²	2安/ mm ²	1.5安/ mm ²	
1.68	1.98	2.217	7.91	19.9	6.65	5.54	4.43	3.33	
1.74	2.04	2.378	7.37	21.4	7.13	5.95	4.76	3.57	
1.88	2.11	2.776	6.91	24.9	8.33	6.94	5.55	4.17	
1.95	2.18	2.987	6.87	26.8	8.96	7.47	5.97	4.49	
2.02	2.25	3.205	6.47	28.9	9.62	8.01	6.41	4.81	
2.10	2.32	3.484	5.06	31.1	10.4	8.66	6.93	5.32	
2.28	2.4	4.012	4.37	38.2	12.0	10.03	8.02	6	
2.44	2.62	4.876	3.75	42.2	14.0	11.69	9.35	7	
2.63	2.8	5.41	3.23	49.8	16.9	13.80	10.9	8.13	
2.83	2.98	6.3	2.78	57.6	18.0	15.7	12.6	9.45	
3.05	3.19	7.31	2.4	66.7	21.9	18.3	14.6	11.1	
3.28	3.42	8.45	2.07	77.1	25.4	21.1	16.9	12.64	
3.53	3.65	9.75	1.78	89.1	29.3	24.4	19.5	17.6	
3.80	3.90	11.35	1.64	103.1	34.0	28.4	22.7	17.0	
MEB双纱包扁线a×b									
2.83×5.5	3.16×5.88	15.55	1.19	137	45.5	38.8	31.1	23.8	
2.8×6.4	3.16×6.73	18.1	1.02	159.2	54.1	46.1	36.1	27.2	
3×6.0	3.33×6.33	18.0	1.03	158.3	54.0	44.9	36.0	27.0	
3.28×6.4	2.63×6.73	21.0	0.882	185.0	63.0	52.3	42.0	31.5	
3.28×8.0	3.61×8.33	26.24	0.75	231.3	79.0	58.0	52.8	39.3	
3.53×8.0	3.86×8.33	28.4	0.655	249	84.5	70.5	58.2	42.7	
3.05×12.5	3.38×12.83	38.1	0.487	332	114.0	95.0	76.0	57.1	
3.6×10.8	4.13×11.13	41.04	0.45	362	122.5	102.2	82.1	61.6	
4.1×10.9	4.43×10.33	41.0	0.45	361	122.5	102.2	82.1	61.5	
4.7×10.0	5.03×10.33	47.0	0.402	413	140.5	117.5	94.0	70.5	

$$P_{\text{等效}} = U_K I_K + U_R I_R = 260 \times 0.2 + 6.3 \times 3 \\ = 70.9 \quad (\text{瓦})$$

2. 选取铁芯

表1-9

几种常用硅钢片性能表

磁感应 (仟高斯)			牌 号	损 耗 (瓦/公斤)		激磁伏安 (伏安/公斤) B=17仟高斯	产 地
B ₁₀	B ₂₅	B ₅₀		P _{10/50}	P _{17/50}		
18.2	18.9	19.5	Z ₁₀ 0.35	0.42	1.4	6.6	日本
18.0	18.8	19.4	Z ₁₁ 0.35	0.46	1.55	7.4	日本
17.9	18.7	19.2	Z ₁₂ 0.35	0.50	1.65	8.6	日本
			M5	0.46	1.49		法国
			M6	0.559	1.84		法国
15.7	17	18	D310 0.35	0.9	2.9	44.5	国产
16.5	18	18.7	D320 0.35	0.8	2.6	22.0	国产
17.0	18.5	19.0	D330 0.35	0.7	2.3	25.7	国产
17.0	18.5	19.0	D340 0.35	0.6	2.0		国产

表1-10

排叠绕系数表

导线直径 (mm)	排绕系数 K _排	叠绕系数 K _叠
0.07~0.1	1.15	1.2
0.11~0.15	1.1	1.15
0.16~0.69	1.05	1.15
0.62以上	1.05	1.15

表1-11

从机械强度选择导线材料表

导线直径(mm)	0.07~0.08	0.10~0.5	0.6~0.8	0.9~1.2	1.3~2
绝缘厚度(mm)	0.03	0.05~0.08	0.08~0.12	0.12	0.12~0.24
端空距离(mm)	1~1.5	2	2~2.5	>3	>3

铁芯选用D42, 0.35mm的材料。根据P_{等效}之值, 从表1—3中, 以略大于P_{等效}之值的一格查得铁芯型号为GEIB 26×52, 铁芯窗孔高度为4.7厘米, 铁芯窗孔宽度为1.7厘米, 铁芯截面积为S_c=2.6×5.2平方厘米, 磁路平均长度为L_{CT}=14.7厘米, 铁芯重量G_c=2.12kg, 散热面积F_o=385平方厘米。

3. 绕组匝数计算

从曲线1—1中查得铁芯磁感应强度 B=13000 高斯, 磁场强

表1-12 常用材料在不同温度的起始电晕电压值(V)

材 料 性 能	层 数														
	1		2		3		5		7		9		12		
温度℃	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	
电缆纸 0.12	最小值	640	600	880	810	1300	1000	1960	1700	2350	2000	2580	2400	3600	3400
	平均值	680	630	1000	850	1400	1120	2000	1800	2450	2200	2900	2800	3600	3400
电缆纸 0.08	最小值	580	480	800	690	1050	850	1680	1350	2100	1700	2650	2200	3200	2500
	平均值	600	530	890	780	1200	940	1800	1450	2260	1830	2700	2250	3350	2700
电话纸 0.05	最小值	510	380	700	520	900	630	1400	810						
	平均值	530	410	700	550	960	650	1550	900						
聚酯薄膜 0.05	最小值	450	500	650	680	980	700	1180	1000	1440	1450	1950	1650	2100	1900
	平均值	550	510	760	720	1050	800	1280	1100	1650	1480	1950	1760	2200	1900
醇酸玻璃布 0.13	最小值	600	420	820	510	1200	610	1700	720	2000	800	2250	1200	2750	1450
	平均值	620	440	900	550	1270	670	1760	750	2100	1000	2300	1300	2800	1450

表1-13 常用材料在不同温度时的击穿电压值(V)表

材 料	层 数	1		2		3		5		7		9		12	
		温度℃		温度℃		温度℃		温度℃		温度℃		温度℃		温度℃	
		25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130	25	120 ~130
电缆纸 0.12	最小值	1200	950	3100	2450	5200	3800	8000	6000	10000	6500	14000	7500	19000	11500
	平均值	1800	1280	3600	2800	6000	4100	10000	6700	12000	8000	15000	9700	20000	12200
电缆纸 0.08	最小值	650	600	1600	1600	2800	2600	5600	4800	8000	6000	11000	8000	15000	11000
	平均值	850	720	2000	1870	3200	3100	6600	5400	9400	6800	12000	8700	15500	11700
电话纸 0.05	最小值	600	500	4200	2700	6800	4800	12000	8000						
	平均值	1300	980	4200	2900	7300	5000	12200	8700						
聚酯薄膜 0.05	最小值	5500	3700	9000	7000	11500	9000	18000	13000	25000	18000				
	平均值	8000	4000	4800	7000	12000	11000	20000	15800	27500	21000				
醇酸玻璃布 0.13	最小值	4600	2500	9000	5400	13000	6500	19000	8000	21000	10000	26000	12000	35000	14000
	平均值	4800	3100	9900	5600	14000	6700	19800	8100	22000	11000	28000	12500	35000	15000

表1-14 电缆纸乙酰化处理后的性能 (乙酰化纸) (浸3404漆)

出发点	层数	项目						
		1	2	3	5	7	9	12
从击穿电压出发	平均击穿电压 (130℃)	1100V	4000V	7000V	11000V			
	K个别点	1.1	2	1.7	1.56			
	K电场时间	3	3	3	3			
	K机械应力	1.1	1.1	1.1	1.1			
	K ₁	3.64	6.6	5.6	5.15			
	选用 K ₁ 工作电压	6 220V	7 570V	7 1000V	7 1570V			
从电晕电压出发	平均起晕电压 (130℃)	720V	1050V	1450V	2250V	3000V	3800V	4800V
	K个别点	1.06	1.05	1.13	1.13	1.06	1.09	1.03
	K样品	1.07	1.26	1.43	1.64	1.58	1.54	1.42
	K测量	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
	K ₂	1.28	1.47	1.63	1.95	1.97	1.88	1.64
	选用 K ₂ 工作电压	1.6 460V	1.7 620V	1.7 850V	2 1120V	2 1500V	2 1900V	1.7 2830V
最后选用工作电压	220V	550V	850V	1100V	1500V	1900V	2800V	

度H=6.6安匝/厘米, 则

(1) 初级绕组每伏匝数

$$W_1 = \frac{10^8}{4.44 \times 50 \times 13000 \times 12.3} = 2.82 \text{ (匝/伏)}$$

(2) 次级绕组每伏匝数

$$W_2 = (1 + \Delta U\%) W_1 \text{ (}\Delta U\% \text{从表1-23中查得3\%)} \\ = (1 + 0.03) \times 2.82 = 2.9$$

(3) 初级绕组匝数

$$N_1 = U_1 W_1 = 220 \times 2.82 = 620 \text{ (匝)}$$

(4) 次级绕组匝数

表1-15 电缆纸0.08mm (浸3404漆) 的性能表

层数	项 目	层数						
		1	2	3	5	7	9	12
从击穿电压出发	平均击穿电压 (120℃)	720V	1870V	3140V	5400V	6800V	8700V	11700V
	K个别点	1.2	1.17	1.19	1.12	1.13	1.09	1.06
	K电场时	3	3	3	3	3	3	3
	K机械应力	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	K ₂	3.95	3.85	3.9	3.7	3.75	3.7	3.5
	选用 K ₂	5	5	5	5	5	5	5
	工作电压	144V	375V	630V	1030V	1340V	1750V	2300V
从电晕电压出发	平均起晕电压 (120℃)	530V	730V	950V	1450V	1350V	2250V	2700V
	K个别点	1.1	1.06	1.2	1.07	1.07	1.02	1.08
	K样品	1.07	1.12	1.43	1.64	1.58	1.54	1.42
	K测量	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
	K ₂	1.32	1.34	1.9	1.98	1.9	1.76	1.72
	选用 K ₂	1.5	1.5	1.9	2	2	2	2
	工作电压	350V	480V	500V	725V	915V	1125V	1350V
最后选用工作电压	150V	350V	500V	700V	800V	1100V	1300V	

$$N_R = U_R W_2 = 6.3 \times 2.9 = 18.27 \quad (\text{取} 19 \text{匝})$$

$$N_K = U_K W_2 = 260 \times 2.9 = 754 \quad (\text{匝})$$

4. 绕组电流计算

(1) 各次级绕组中的电流折合到初级的电流

$$\begin{aligned} I'_2 &= n I_K + n I_R \\ &= \frac{U_K}{U_1} I_K + \frac{U_R}{U_1} I_R = \frac{260}{220} 0.2 + \frac{6.3}{220} \times 3 \\ &= 0.322 \quad (\text{安}) \end{aligned}$$

(2) 初级电流, 未算初级电流之前, 先从单位损耗曲线1—2中查得D42的单位损耗 $P_{co} = 1.64$ 瓦/kg, 再依前面查出的铁

表1-16

电缆纸0.12毫米(浸3404漆)的性能表

出发点	层数 项 目	层数						
		1	2	3	6	7	9	12
从击穿电压出发	平均击穿电压 (120℃)	1280V	2600V	4100V	6700V	8000V	9700V	12200V
	K个别点	1.35	1.08	1.08	1.12	1.23	1.07	1.05
	K时间	3	3	3	3	3	3	3
	K机械应力	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	K ₁	4.46	3.6	3.6	3.7	4.06	3.55	3.46
	选用 K ₁	6	5	5	5	5	5	5
	工作电压	200V	500V	800V	1200	1600V	2000V	2500V
从电晕电压出发	平均起晕电压 (120℃)	630V	850V	1120V	1800	2200V	2800V	3400V
	K个别点	1.05	1.06	1.12	1.06	1.1	1.17	1
	K样品	1.07	1.25	1.43	1.64	1.58	1.54	1.42
	K测量	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
	K ₂	1.26	1.5	1.7	1.96	1.96	2	1.56
	选用 K ₂	1.5	1.8	2	2	2	2	1.7
	工作电压	420V	470V	550V	900V	1100V	1400V	2000V
最后选用工作电压	200V	450V	550V	900V	1100V	1400V	2000V	

芯重量 $G_c=2.12\text{kg}$ ，磁路平均长度 $L_{CT}=14.7$ 厘米及磁场强度 $H=6.6$ 安匝/厘米，计算出铁芯的磁化电流 $I_0=HL_{CT}/N_1=6.6\times 14.7/220=0.156$ 安培，铁芯损耗电流 $I_c=P_{co}G_c/U_1=1.64\times 2.12/220=0.016$ 安培。由此可得初级电流：

$$I_1=\sqrt{(I_0+I_c)^2+I_0^2}=\sqrt{(0.322+0.016)^2+0.156^2}$$

$$=\sqrt{0.114+0.024}=0.372\text{ (安培)}$$

5. 绕组导线计算

(1) 初级绕组线径

$$d_1=1.13\sqrt{\frac{I_1}{j}}\quad (j\text{取}2.5\text{安培/毫米}^2)$$

则 $d_1=1.13\sqrt{\frac{0.372}{2.5}}=0.4358\text{ (毫米)}$

表1-17

三种绝缘材料性能表

材料名称	性能		起晕电压(伏)		击穿电压(伏)		绝缘电阻(MΩ)		电寿命	tgδ
	温度 °C		25	120~130	25	120~130	>10 ⁵	120~130	25	25
电缆纸0.12×2			1000	850	3600	2600	>10 ⁵	2×10 ⁴	长	0.005
聚脂薄膜0.05×2			760	720	9800	7600	>10 ⁵	4×10 ⁴	短	0.002
醇酸玻璃布0.13×2			900	550	9900	5600	>10 ⁵	600	较长	0.02

三种绝缘材料的其他性能

材料名称	性能		机械强度	耐折次数	吸水性	水介稳性	静电感应	耐热寿命	耐热等级	成本
	单位		kg/毫米 ²	次	%					
电缆纸0.12毫米			3~5	500	10%	有	无	短	E	1.7
聚脂薄膜0.05毫米			13~18	1500~2000	0.5%	有	有	较长	B	130
醇酸玻璃布0.13毫米			2~4	~	3%	无	有	长	B	28

上式算得的绕组导线，应靠近标准线规选用。从国产漆包线规表1-5中查得 $d_1=0.44$ 厘米，带漆导线直径 $d_{1m}=0.5$ 毫米，即用 $d_1=0.44$ 毫米的QQ型或QZ型漆包线。

(2) 次级绕组线径：根据初级绕组导线计算后的查表法，次级绕组导线可直接依据次级电流 $I_K=0.2$ 安培，电流密度 $j=2.5$ 安培/毫米²，从表1-5中查得 $d_K=0.33$ 毫米，带漆导线直径 $d_{Km}=0.38$ 毫米。又根据 $I_R=3$ 安培， $j=2.5$ 安培/毫米²，从表1-6中查得 $d_R=1.25$ 毫米，带漆导线直径 $d_{Rm}=1.36$ 毫米。

6. 绕组总结构计算

变压器绕组多在骨架上绕制，未绕制之前，必须先确定绕组绕线长度及骨架的有关绕线参数。因此，这里假定骨架高度小于铁芯窗孔高度1毫米、骨架边墙板厚度为1.5毫米，骨架内墙板厚度为1.0毫米。这样，绕组的绕线宽度 $L_0=47-1-3=43$ 毫米。

表1-18

聚脂薄膜(0.05mm)的性能表

出发点	层数 项目	1	2	3	5	7	9	12
		从击穿电压出发	平均击穿电压 (130℃)	4000V	7600V	11000V	15600V	21000V
	K个别点	1.18	1.09	1.22	1.15	1.16		
	K电均时	5	5	5	5	5		
	K机械应力	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08		
	K ₁	0.4	5.9	6.6	6.2	6.3		
	选用 K ₁	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0		
	工作电压	470V	1080V	1570V	2220V	3000V		
从电晕电压出发	平均起晕电压 (130℃)	510V	720V	800V	1100V	1480V	1760V	1900V
	K个别点	1.12	1.05	1.32	1.16	1.12	1.11	1.17
	K样品	1.0	1.09	1.11	1.25	1.33	1.28	1.32
	K测量	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
	K ₂	1.25	1.3	1.65	1.65	1.65	1.68	1.72
	选用 K ₂	1.50	1.7	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9
	工作电压	340V	420V	450V	610V	820V	920V	1000V
	最后选用工作电压	200V	350V	450V	600V	800V	900V	1000V

下面即可进行绕组结构计算:

(1) 每层匝数

初级绕组每层匝数:

$$a_1 = \frac{\text{绕线宽度 } L_0}{d_{1m} K_{\text{排}}} = \frac{43}{0.5 \times 1.05} = 81 \quad (\text{匝/层})$$

次级绕组每层匝数:

$$a_K = \frac{L_0}{d_{Km} K_{\text{排}}} = \frac{43}{0.38 \times 1.05} = 107 \quad (\text{匝/层})$$

$$a_R = \frac{L_0}{d_{Rm} K_{\text{排}}} = \frac{43}{1.36 \times 1.05} = 30 \quad (\text{匝/层})$$

(式中K_排从表1-10中查出)

表1-19

电缆纸与醇酸玻璃布组合后的性能表

出发点	项 目	层 数			
		0.13×1+	0.13×2+	0.13×3+	0.13×5+
		0.12×1	0.12×1	0.12×2	0.12×4
从击穿电压出发	平均击穿电压 (120℃)	3700V	5100V	7100V	11000V
	K个别点	1.06	1.02	1.01	1
	K电场时	3.5	3.5	3.5	3.5
	K机械应力	1.2	1.2	1.2	1.2
	K ₁	4.5	4.3	4.3	4.2
	选用 K ₁	5	5	5	5
	工作电压	710V	1020V	1420V	2200
从电晕电压出发	平均起晕电压 (120℃)	640V	690V	1200V	1940V
	K个别点	1.03	1.05	1.04	1.02
	K样品	1.07	1.17	1.34	1.4
	K测量	1.12	1.12	1.12	1.12
	K ₂	1.24	1.38	1.56	1.59
	选用 K ₂	1.5	1.5	1.7	1.7
	工作电压	425V	480V	710V	1140V
最后选用工作电压		300V	450V	700V	1100V

表1-20

各种绝缘材料的工作电压表

材料名称	电容器纸	电话纸	电话纸	电缆纸	电缆纸	电缆纸	聚脂薄膜
厚度(mm)	0.03	0.06	0.05×2	0.08	0.08×2	0.12	0.05
工作电压(伏)	60	100	200	150	300	200	200

(2) 层数

初级绕组层数:

$$a_1' = \frac{N_1}{a_1} = \frac{620}{81} = 7.65 \text{层} \quad (\text{取整数}8\text{层})$$

次级绕组层数:

表 1-21

螺钉或焊片间距离		3mm	5mm	10mm	15mm
工作电压		250V	550V	1100V	1600V
试验电压		2KV	2.1KV	3.2KV	4.2KV
常态	击穿电压 (500mmHg)	6KV	6.8KV	6.1KV	9.2KV
极限情况下	低气压 (350mmHg)	4.3KV	4.9KV	6.6KV	7.4KV
	高温 (+130℃)	0.82	0.82	0.82	0.77
	高温 (相*95±3%)	0.73	0.69	0.89	—
	综合结果	2.58KV	2.84KV	4.6KV	5.7KV
螺钉或焊片间距离		20mm	30mm	40mm	备注
工作电压		2000V	2600V	3000V	表示击穿电压 变化的百分率
试验电压		5KV	6.2KV	7KV	
常态	穿击电压 (500mmHg)	12KV	15.5KV	19.5KV	
极限情况下	低气压 (350mmHg)	8.5KV	10.6KV	13KV	
	高温 (+130℃)	0.785	0.81	0.88	
	高温 (相*95±3%)	—	—	—	
	综合结果	6.7KV	8.9KV	11.2KV	

* 为相对湿度

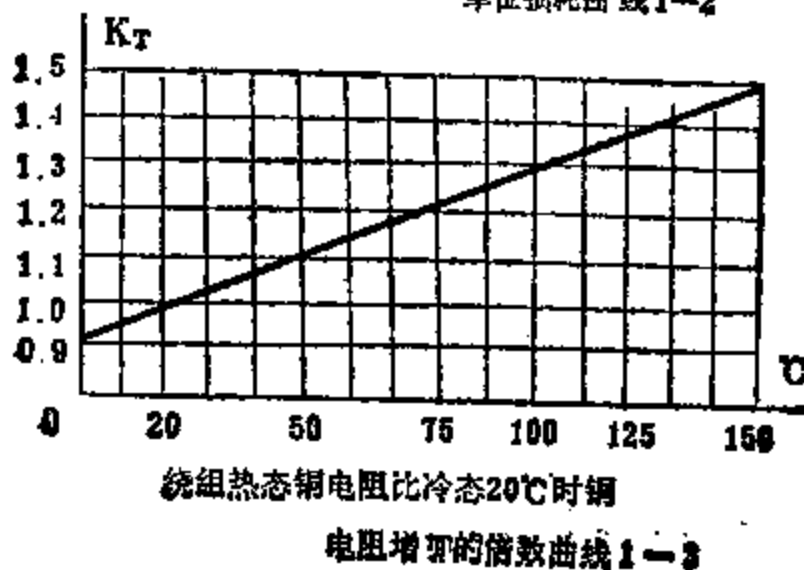
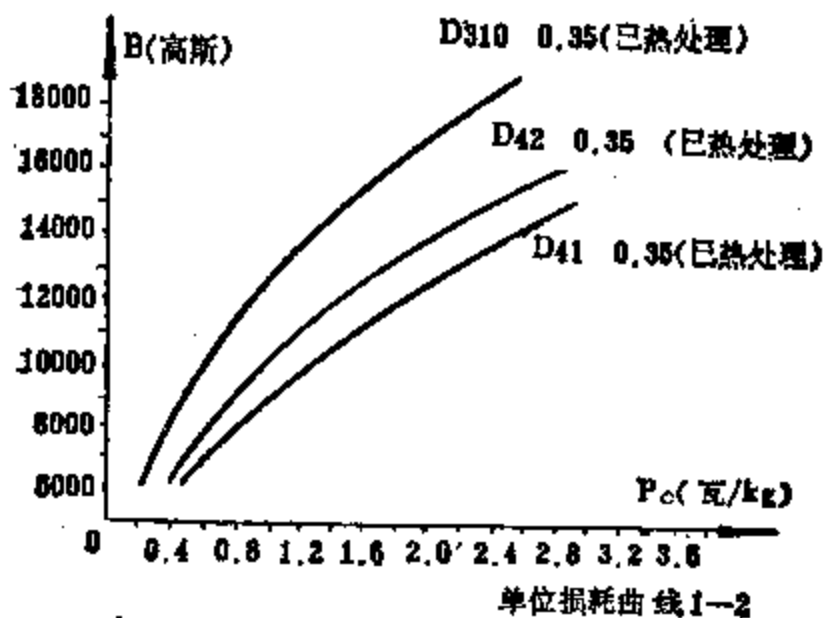
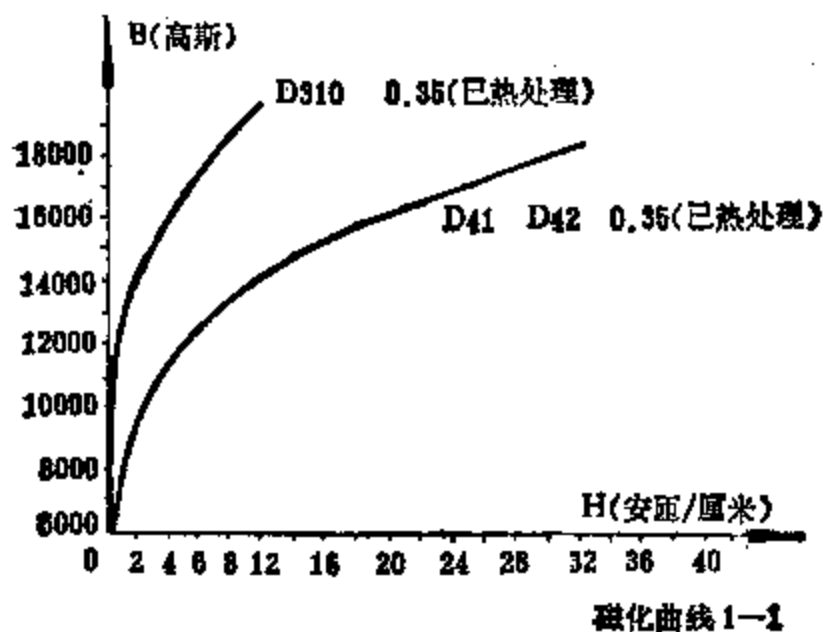
表 1-22

各种材料的温度等级表

绝缘等级	Y	A	E	B	F	H	C
工作温度℃	90	105	120	130	155	180	180以上

表 1-23

P (伏安)	30~50	50~100	100~250	250~500以上
$\Delta U/V(\%)$	5	3	2.5	2



$$a'_K = \frac{N_K}{a_K} = \frac{754}{107} \approx 7 \quad (\text{层})$$

$$a'_R = \frac{N_R}{a_R} = \frac{19}{30} = 0.63 \quad (\text{取整数1层})$$

(3) 绕组厚度：由于绕组工作电压不高，一般绕组层间绝缘材料的厚度多从导线所需的机械强度进行选取。因此，从表1-11中查得层间绝缘材料厚度为：对 N_1 和 N_K 绕组为0.08毫米厚的电缆纸一层；对 N_R 绕组为0.12毫米厚的电缆纸一层。

因绕组间、绕组对地间的绝缘没作具体要求，为了用料方便和不影响绕组的电气强度，在初级绕组绕好后外包同样厚度的电缆纸三层，然后再包一层0.1毫米厚的铜皮作静电隔离，并在静电隔离外，以及次级绕组间或次级绕组对地间的绝缘，也选用同样厚度的电缆纸三层。

如对绕组绝缘有具体要求，则可按表1-12至表1-21中所提供的数据进行选取。

(a) 初级绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta_1 &= a'_1 K_{\text{叠}} (d_{1m} + 0.08) + 0.08 \times 3 + 0.1 + 0.08 \times 3 \\ &= 8 \times 1.15 (0.5 + 0.08) + 0.24 + 0.1 + 0.24 \\ &= 5.9 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

(b) 次级绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta_K &= a'_K K_{\text{叠}} (d_{Km} + 0.08) + 0.08 \times 3 \\ &= 7 \times 1.15 (0.38 + 0.08) + 0.24 \\ &= 3.94 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_R &= a'_R K_{\text{叠}} (d_{Rm} + 0) + 0.08 \times 3 \\ &= 1 \times 1.15 \times 1.36 + 0.24 \\ &= 1.8 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

($K_{\text{叠}}$ 从表1-10中查出)

(4) 绕组总厚度

$$D_m = \delta_1 + \delta_K + \delta_R$$

$$= 5.9 + 3.94 + 1.8$$

$$= 11.64 \text{ (毫米)}$$

D_m 之值未能超过铁芯窗孔宽度17毫米，因此设计可取。

(5) 绕组平均匝长 (参考图1—4)

初数绕组平均匝长:

$$L_m = 2(26 + 52 + 2) + 3.14 \times 5.9$$

$$= 178.53 \text{ (毫米)}$$

次级绕组平均匝长:

$$L_{mK} = 2(37.8 + 63.8) + 3.14 \times 3.943$$

$$= 215.6 \text{ (毫米)}$$

$$L_{mR} = 2(39.6 + 65.6) + 3.14 \times 1.8$$

$$= 216.1 \text{ (毫米)}$$

(6) 绕组铜重: 从表1-5至表1-6中, 分别查得初级导线每千米铜重为1.38公斤, 次级 d_1 每千米铜重为0.78公斤, d_R 每千米铜重为11.3公斤。则

初级绕组铜重:

$$G_M = l_m N_1 1.38 \times 10^{-3}$$

$$= 178.53 \times 620 \times 1.38 \times 10^{-3}$$

$$= 0.153 \text{ (公斤)}$$

次级绕组铜重:

$$G_K = L_K N_K \times 0.78 \times 10^{-3}$$

$$= 215.6 \times 754 \times 0.78 \times 10^{-3}$$

$$= 0.1270 \text{ (公斤)}$$

$$G_R = l_R N_R \times 11.3 \times 10^{-3}$$

$$= 216.1 \times 19 \times 11.3 \times 10^{-3}$$

$$= 0.464 \text{ (公斤)}$$

(7) 绕组热态电阻: 从表1-5至表1-6中, 分别查得绕组导线在20℃时每千米的直流电阻为: 初级导线的 $R_{20℃} = 115$ 欧; 次级导线的 $R_{K20℃} = 205$ 欧、 $R_{R20℃} = 14.3$ 欧。再从曲线1—3中查得

75℃时的 $K_T=1.15$ (本题环境温度55℃, 此处以高于此数计算)。这样绕组热态电阻分别为:

初级绕组热态电阻:

$$\begin{aligned} R_m &= K_T R_{m20^\circ\text{C}} \times 10^{-6} L_m \times N_1 \\ &= 1.15 \times 178.53 \times 620 \times 115 \times 10^{-6} \\ &= 14.64 \text{ (欧)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_K &= K_T L_{mK} N_K R_{K20^\circ\text{C}} \times 10^{-6} \\ &= 1.15 \times 215.6 \times 754 \times 205 \times 10^{-6} \\ &= 38.3 \text{ (欧)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_R &= K_T L_{mR} N_R R_{R20^\circ\text{C}} \times 10^{-6} \\ &= 1.15 \times 216.1 \times 19 \times 14.3 \times 10^{-6} \\ &= 0.0675 \text{ (欧)} \end{aligned}$$

7. 铜、铁损耗计算

(1) 铜耗计算

$$\begin{aligned} P_m &= I_1^2 R_m + I_K^2 R_K + I_R^2 R_R \\ &= 0.372^2 \times 14.64 + 0.2^2 \times 38.3 + 3^2 \times 0.0675 \\ &= 2.026 + 1.53 + 0.6075 \\ &= 4.164 \text{ (瓦)} \end{aligned}$$

(2) 铁芯损耗

$$\begin{aligned} P_c &= P_{c0} G_0 \\ &= 1.64 \times 2.12 = 3.48 \text{ (瓦)} \end{aligned}$$

8. 温升计算

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= \frac{P}{\alpha F_0} = \frac{P_m + P_c}{\alpha F_0} \\ &= \frac{4.164 + 3.48}{1.3 \times 10^{-2} \times 385} = \frac{7.644}{500.5 \times 10^{-5}} \\ &= 15.3 \text{ (℃)} \end{aligned}$$

$\Delta\tau$ 之值未能超过给定条件的50℃, 因此本设计可取。

第二单元 中等功率变压器设计计算

中等功率变压器的容量，一般在数千伏安至数十千伏安左右。它常有单相和多相之分。这里仅以单相和三相为例加以介绍，如图2-1。

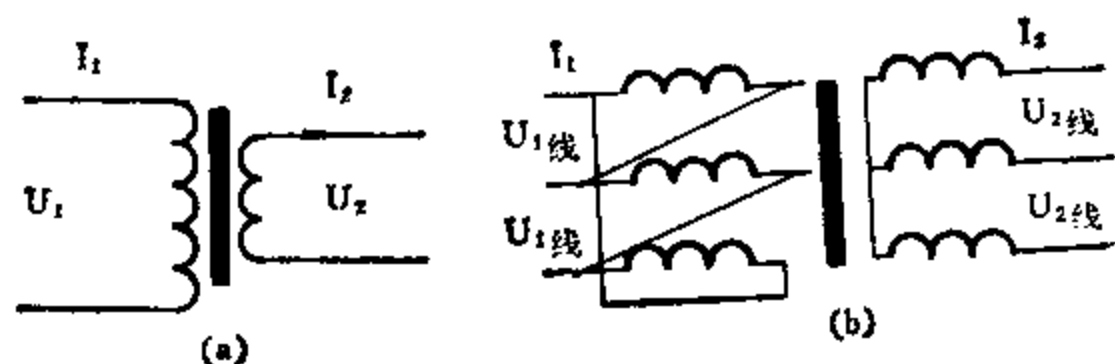


图2-1
变压器原理图

这类变压器在无线电工程系统中，以及各类标准或非标准专用设备中都已得到广泛应用。它在机体中，如同小功率电源变压器一样，主要起变换电压和传输能量的作用。

这类变压器的铁芯，目前国内尚无通用的标准铁芯系列。因此，在确定铁芯时，只能根据给定的技术条件重新进行计算。

这类变压器的设计计算步骤大体同小功率电源变压器相似。

1. 功率计算

单相变压器功率（见图2-1a）

$$P_1 = U_1 I_1 \quad (\text{瓦})$$

三相变压器功率（见图2-1b）

$$P_1 = \sqrt{3} U_{1\text{线}} I_{1\text{线}} \quad (\text{瓦})$$

式中，

P_1 ——变压器输出功率 (瓦);

U_1 、 I_1 ——单相变压器输出电压和电流的有效值, 其单位分别为(伏、安);

$U_{2\text{线}}$ 、 $I_{2\text{线}}$ ——三相变压器的线电压和线电流(指输出的有效值), 其单位分别为(伏、安)。

2. 铁芯计算

(1) 铁芯直径

$$D_c = K \sqrt{P_{\text{柱}}} \quad (\text{厘米})$$

(2) 铁芯截面积

$$S_c = 0.785 K_0 D_c^2 \quad (\text{厘米}^2)$$

式中:

K ——材料有关的系数(见表2-1);

K_0 ——铁芯填充系数(见表2-2);

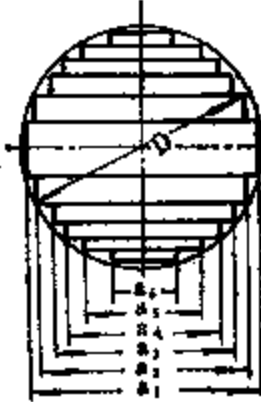
$P_{\text{柱}}$ ——铁芯每柱功率(千瓦)(见表2-1)。

表 2-1

变压器类别	$P_{\text{柱}}$ 与 P 关系	铝线(K)	铜线(K)
单相双绕组	$P_{\text{柱}} = P/2$	热轧硅钢片	冷轧硅钢片
单相三绕组	$P_{\text{柱}} = 3P/2$	5.4~5.8	6.1~6.6
三相双绕组	$P_{\text{柱}} = P/3$	冷轧硅钢片	冷轧硅钢片
三相三绕组	$P_{\text{柱}} = P/2$	5.2~5.4	5.7~6.0

从上式中不难看出, 在铁芯直径 D_c 一定的情况下, 铁芯的 K_0 越大(级数越多), 则铁芯的有效面积 S_c 也越大; 反之, 如果在铁芯截面积 S_c 一定的情况下, 铁芯的 K_0 越大(级数越多), 其直径 D_c 就越小。同时, 随着铁芯 K_0 (级数) 的变化, 对变压器的体积和重量, 以及铁芯的加工简烦也会带来一定影响。因此, 在这种利弊兼有的情况下, 应认真比较, 定其取舍, 亦即在设计时既要保证产品的技术性能优良。又要考虑到产品的成本低廉。

表 2-2

系数 K_4	每级尺寸 (cm)	铁芯级数						铁芯柱结构
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	
0.787	三级	0.85D	0.525D					
0.851	三级	0.905D	0.707D	0.424D				
0.866	四级	0.935D	0.8D	0.6D	0.355D			
0.91	五级	0.95D	0.847D	0.707D	0.532D	0.312D		
0.93	六级	0.955D	0.87D	0.77D	0.64D	0.496D	0.3D	

(3) 初估铁芯结构尺寸：根据前面计算得到的 D_c 、 S_c 之值，先估算一个可供参考的铁芯结构尺寸。其估算方法，可按下列经验比例关系式求得，见图2-2。

方形铁芯截面积：

$$S_c = (1 \sim 2) A^2 \quad (\text{厘米}^2)$$

铁芯窗孔高度：

$$h = (2.5 \sim 4) A$$

(厘米)

铁芯窗孔宽度：

$$C = (1 \sim 2) A$$

(厘米)

铁芯叠合厚度：

$$B = (1 \sim 2) A$$

(厘米)

铁芯长度：

$$\text{单相：} L = (3 \sim 4) A \quad (\text{厘米})$$

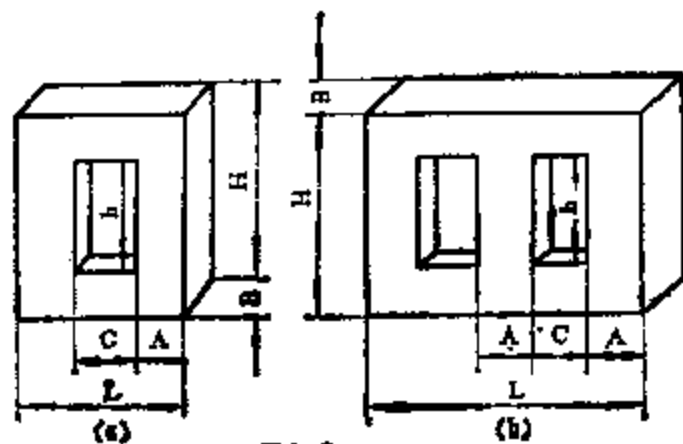


图 2-2

三相: $L=(5\sim7)A$ (厘米)

铁芯高度: $H=(5\sim7.5)A$ (厘米); A 铁芯柱片宽度 (厘米) ③

等式括号中的系数在功率不变的情况下, 与变压器的工作电压, 或耐压有关。

若变压器的工作电压或耐压要求高时取上限, 反之取下限。

中等功率变压器铁芯柱的截面形状常为方形和圆形两种。在实用中, 若无特殊条件所限的情况下, 以采用方形铁芯截面为宜。因为方形铁芯截面, 特别是方形铁芯的叠合厚度为柱片宽度的两倍 (即 $B=2A$) 时, 在技术条件相同, 以及铁芯材料和铁芯窗孔高度及铁芯窗孔宽度都不变的情况下, 方形截面铁芯的体积和重量要比圆形截面铁芯的体积和重量小。同时, 方形截面铁芯的加工和装配也远比圆形 (多级) 截面的铁芯简便得多, 省得多。因此, 这从提高经济效益的角度看是极为有利的。

另外, 在一定条件下, 采用方形截面铁芯结构, 无论对绕组的机械强度, 还是对铁芯的磁性能 (指铁芯损耗), 都不会代来不利影响, 因此, 这从技术性能的角度来看也是无弊的。

3. 绕组匝数计算

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = \frac{U_1(1 - \Delta U\%) \times 10^3}{4.44fBS_c}$$

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{U_2(1 + \Delta U\%) \times 10^3}{4.44fBS_c}$$

式中:

U_1 、 U_2 ——初、次级相电压 (伏);

f ——电源频率 (赫);

B ——磁感应强度 (高斯)。

一般对各向同性硅钢片，B可达：1000~14000(高斯)

对各向异性的硅钢片，B可达：16000~18000(高斯)

$\Delta U\%$ ——电压降(可在表1-23中查得)。

4. 绕组电流计算

绕组电流可按小功率电源变压器的方法进行计算。这里仅针对初级绕组电流提出一种简便的算法，即在公式中引入变压器效率 η 之值进行计算。即

初级绕组电流：

$$I_1 = \frac{P_2(P_{柱})}{\eta U_1} \quad (\text{安})$$

式中：

$P_2(P_{柱})$ ——每相输出功率(瓦)；

U_1 ——相电压(伏)；

η ——变压器效率(一般取0.95左右)。

5. 绕组导线计算

绕组导线的计算，完全与小功率电源变压器的算法相同，这里不再重述，可见实例运算。

6. 绕组结构计算

绕组结构计算，不仅影响到绕组损耗的大小及温升的高低，同时还影响到电气绝缘强度的高低，尤其对高压变压器而言更是如此，因此必须倍加重视。不然，就会因绕组电气绝缘强度不好，造成变压器的击穿或短路，甚致烧毁变压器。

在中等功率变压器的绕组结构计算中，对低压而言，与小功率电源变压器一样。下面介绍高压变压器的绕组结构算法。

一般在未算绕组结构之前，常需首先确定变压器的绝缘方式及冷却方式(是采用油浸冷却，还是采用固体绝缘及干式空气自冷等方式)：若绕组采用固体绝缘及干式空气自冷的方式，则绕组结构中的绝缘计算，可参照表2-3及表1-10或至表1-21中的绝缘参数。

表2-3

变压器的绝缘厚度表

绕组间的 试验电压 (50赫) (千伏)	两边墙板 厚度 (mm)	中间墙板 厚度 (mm)	绕组间的 绝缘厚度 (mm)	高压固架 内墙板厚度 (mm)	高压固架 和低压绕 组间的空隙 (mm)	从边墙板 到固架边 缘的距离 (mm)
1	2~3	1.5~2	0.3~0.5			
2	3~4	2~2.5	0.5~0.8			
4	3~5	2.5~3	1~1.5			
7	5~6	3~4	2~3			3~5
10	6~8	4~5		3~4		7~10
15	8~10	4~5		4~5	3~4	10~12
21	8~10	4~5		4~6	5~6	15~18
30	8~10	4~5		4~8	6~8	20~25

7. 铜、铁损耗计算

铁芯损耗是影响变压器温升的主要技术参数之一，其计算方法与小功率变压器相似，但是，其中铁芯重量尚无标准系列铁芯表可查，而只能根据初估的铁芯结构几何尺寸重新进行计算（见图2-2）。

下面根据图2-2所示的铁芯结构，介绍一种简易的计算方法。
 即 单相铁芯重量（见图2-2a）： $G_{C单} = K_C L_{CT} S_C \times 10^{-3}$ （公斤）
 三相铁芯重量（见图2-2b）： $G_{C3} = K_C (2L S_{C绕} + 3h S_C) \times 10^{-3}$ （公斤）

式中，

$G_{C单}$ 、 G_{C3} 分别为单相和三相铁芯重量（公斤）；

L_{CT} ——单相平均磁路长度： $[l_{CT} = 2(h + C) + 4A]$ （厘米）；

S_C ——铁芯柱截面积（厘米²）；

$S_{C绕}$ ——三相铁芯轭铁截面积（厘米²）；

L ——三相铁芯轭铁长度（厘米）；

h ——三相变压器的铁窗高度（厘米）；

K_C ——硅钢片的比重（一般为7.8克/厘米³）。

8. 温升计算

变压器的温升高低，不仅取决于铜、铁损耗的大小，或散热方式的优劣；同时，还取决于散热面积的大小，以及散热面积的合理计算。这里仅以空气自冷干式变压器为例（见图2—3），来讨论散热面积的确定方法。

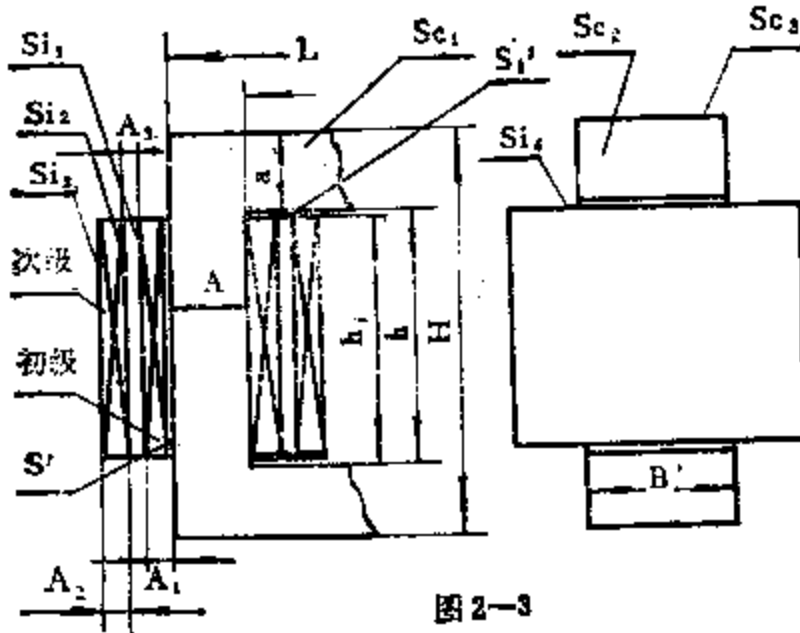


图2—3

这类变压器的散热面积，主要由两部分组成；一是完全外露于空气中的部分，如 Si_3 或 Sc_3 等部分；二是处于气道中或两附件之间的部分，如 S' 或 S'_1 等部分。前者具有对流和辐射两种散热同时存在的良好效果，后者仅有加强对流散热效果，而无辐射散热效果。因此前者散热好，后者散热差。

当然，在设计计算过程中，要精确计算这些散热面的散热效果也是很困难的，特别是后一种散热面更是如此。不过，只要在计算误差影响不大情况下，还是可以根据它们不同的散热效果，用一种简易的经验算法，将它们分别进行处理。一般可将前一种散热面计算值的百分之百计为一种有效散热面，而把后一种散热面计算值的百分之三十至百分之四十计为另一种有效散热面。二者相加，则为总的有效散热面。

在图2—3中，还有些散热效果极差的部分，如 S' 等，可将它们略去不计。下面即根据图2—3的结构，分别介绍上述两种散热

面的计算方法。

A. 铁芯散热面

$$S_{c_1} = 4aL \quad (\text{厘米}^2)$$

$$S_{c_2} = 4AB \quad (\text{厘米}^2)$$

$$S_{c_3} = 2BL \quad (\text{厘米}^2)$$

式中:

S_{c_1} ——铁轭上下, 前后散热面 (厘米²);

S_{c_2} ——铁轭端部上下散热面 (厘米²);

S_{c_3} ——铁轭顶部上下散热面 (厘米²);

a ——轭片宽度 (厘米);

B ——铁芯叠合厚度 (厘米);

L ——轭铁长度 (厘米)。

B. 绕组散热面 (见图2-3)

$$S_{i_1} = 2nh_1(A + B + \pi A_1) \quad (\text{厘米}^2)$$

$$S_{i_2} = 2nh_1(A + B + 4A_1 + 4A_3) \quad (\text{厘米}^2);$$

$$S_{i_3} = 2nh_1(A + B + 4A_1 + 4A_3 + \pi A_2) \quad (\text{厘米}^2);$$

$$S_{i_4} = 2n[L_{mCT}(A_1 + A_2 + A_3) - B(A_1 + A_2 + A_3)] \quad (\text{厘米}^2)$$

式中:

L_{mCT} ——初次级平均匝长和的平均值 (厘米)

S_{i_1} ——初级绕组的外散热面 (厘米²);

S_{i_2} ——次级绕组的内散热面 (厘米²);

S_{i_3} ——次级绕组的外散热面 (厘米²);

S_{i_4} ——绕组两端部散热面 (厘米²);

A_1 ——初级绕组厚度 (厘米);

A_2 ——次级绕组厚度 (厘米);

A_3 ——初次级之间的距离 (厘米);

n ——绕组个数。

绕组折合后的有效散热面为:

$$S_{i5} = K_1(S_{i1} + S_{i2}) \text{ (厘米}^2\text{)}$$

式中:

S_{i5} ——折合后的有效散热面 (厘米) ;

K_1 ——折合系数(0.3~0.4)。

C. 总的有效散热面

$$S = S_{C1} + S_{C2} + S_{C3} + S_{i3} + S_{i5}$$

D. 温升计算

$$\Delta\tau = 0.36q^{0.8} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

式中:

$\Delta\tau$ ——变压器温升 ($^\circ\text{C}$)

$q = P_0 \times 10^4 / S$ 为单位热负荷 (瓦/厘米²)

$P_0 = P_m + P_c$ 为铜、铁损耗 (瓦)

$\Delta\tau$ 之值首先是不能超过技术条件所规定的允许工作温升, 同时还要考虑所选绝缘材料的允许工作温度 (即变压器的温升加环境工作温度不能超过所选绝缘材料的允许工作温度)。如有超过应进行调整, 其调整的方法与小功率电源变压器的方法相似。这里不再重述。

[例] 一只三相变压器的技术条件为:

1. 初级电源电压 $U_{1\text{线}} = 380$ (伏)
2. 次级输出电压 $U_{2\text{线}} = 5000$ (伏)
3. 次级电流 $I_{2\text{线}} = 1.16$ (安)
4. 电源频率 $f = 50$ (赫)
5. 工作状态 连续
6. 允许温升 60°C
7. 接法 Δ/Y
8. 对地耐压 11000伏

根据中等功率变压器的设计计算步骤:

1. 功率计算

$$P_2 = \sqrt{3} U_{2\text{线}} I_{2\text{线}} = 1.732 \times 5000 \times 1.16 \\ = 10045.6 \quad (\text{瓦})$$

2. 铁芯计算

铁芯材料选用 D310, 0.35 毫米厚的冷轧硅钢片, 选用铜质导线。从表2-1中查得 $K=6$ 。根据技术要求:

$$P_{\text{柱}} = \frac{P_2}{3} = \frac{10045.6}{3} = 3348.5 \quad (\text{瓦})$$

则

(1) 铁芯直径

$$D_c = K \sqrt[3]{P_{\text{柱}}} = 6 \sqrt[3]{3.3485} \approx 8.1 \quad (\text{厘米})$$

(2) 铁芯截面

$$S_c = 0.785 K_\phi D_c^2 = 0.785 \times 0.93 \times 8.1^2 \\ \approx 48 \quad (\text{厘米}^2)$$

(从表2-2中查得 $K_\phi = 0.93$)。

(3) 初估铁芯结构尺寸: 根据上面提示, 决定铁芯截面采用方形, 铁芯叠合厚度为两倍铁芯柱片宽度为宜, 即 $B=2A$, $S=2A^2$ 。

考虑到占空系数 K_ϕ , 则

$$S = 2K_\phi A^2$$

铁芯柱片宽度,

$$A = \sqrt{\frac{S_c}{2K_\phi}} = \sqrt{\frac{48}{2 \times 0.93}} \approx 5.1 \quad (\text{厘米})$$

(为计算方便取 5.2 厘米)

根据铁芯柱片宽度 A , 则铁芯窗孔高度

$$h = (2.5 \sim 4)A$$

铁芯窗孔宽度:

$$C = (1 \sim 2)A$$

由于绕组耐压要求较高, 故括号中的系数趋于上限选用。因此

$$h = 3.5A = 3.5 \times 5.2 = 18.2 \quad (\text{厘米})$$

$$C = 1.85A = 1.85 \times 5.2 = 9.6 \quad (\text{厘米})$$

铁芯长度:

$$L = 3A + 2C = 3 \times 5.2 + 2 \times 9.6 = 34.8 \quad (\text{厘米})$$

铁芯高度:

$$H = h + 2A = 18.2 + 2 \times 5.2 = 28.6 \quad (\text{厘米})$$

根据这些基本几何尺寸, 即可得到变压器铁芯的整体结构。

见图2-4。

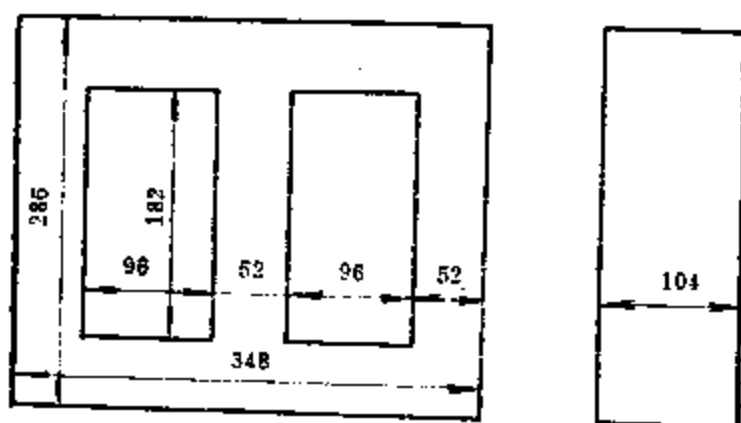


图2-4

3. 绕组匝数计算

(1) 初级绕组匝数:

$$N_1 = \frac{U_1(1 - \Delta U\%) \times 10^8}{4.44fB \cdot S_c}$$

$\Delta U\%$ 从表1-23中查得2%

B 从磁化曲线1-1中查得17000高斯, 则

$$N_1 = \frac{380(1 - 0.02) \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 17000 \times 48} = \frac{372.4 \times 10^8}{181152000}$$

$$\approx 206$$

(匝)

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{U_2(1 + \Delta U\%) \times 10^8}{4.44fB \cdot S_c} = \frac{U_{2\text{线}}(1 + \Delta U\%) \times 10^8}{\sqrt{3} \times 4.44fB \cdot S_c}$$

$$= \frac{5000(1 + 0.02) \times 10^8}{1.732 \times 4.44 \times 50 \times 17000 \times 48} = \frac{5100 \times 10^8}{285771686400}$$

$$=1625 \quad (\text{匝})$$

4. 初级绕组电流计算

设 $\eta=0.95$, 则

$$I_1 = \frac{P_2(P_{\text{柱}})}{\eta U_1} = \frac{3348.5}{0.95 \times 380} = 9.276 \quad (\text{安})$$

5. 绕组导线计算

这里取电流密度 $j=2$ 安培/毫米²。

根据初级电流 $I_1=9.276$ 安, 即可从表 1-8 中查得初级导线直径 $d_1=2.44$ 毫米, $d_m=2.62$ 毫米。导线每千米直流电阻 $R_{20}^{\text{C}}=3.75$ 欧。

根据次级电流 $I_2=1.16$ 安, 即可从表 1-6 中查得次级绕组导线 $d_2=0.86$ 毫米, $d_m=0.95$ 毫米。导线每千米直流电阻 $R_{20}^{\text{C}}=30.1$ 欧。

6. 绕组结构计算

(1) 绕组每层匝数: 为满足给定数据中的耐压要求和绕组层匝计算, 确定初级绕组绕线宽度 $L_{01}=160$ 毫米, 次级绕组绕线宽度 $L_{02}=140$ 毫米。同时, 从表 1-10 中查得绕组排绕系数 $K_{\text{排}}=1.05$ 。

根据这些基本数据, 即可分别进行绕组层匝计算。

初级绕组层匝:

$$a_1 = \frac{L_{01}}{d_{1m} K_{\text{排}}} = \frac{160}{2.62 \times 1.05} \approx 58 \quad (\text{匝})$$

次级绕组层匝:

$$a_2 = \frac{L_{02}}{d_{2m} K_{\text{排}}} = \frac{140}{0.95 \times 1.05} = 140 \quad (\text{匝})$$

(2) 层数

初级绕组层数:

$$a_1' = \frac{N_1}{a_1} = \frac{206}{58} = 3.55 \quad (\text{取整数 } 4)$$

次级绕组层数:

$$a_2' = \frac{N_2}{a_2} = \frac{1625}{140} = 12$$

(3) 各绕组厚度

A. 初级绕组厚度 由于初级绕组工作电压不高, 因此, 对绕组层间绝缘的选择, 以及绕组骨架的选择, 多以机械强度的要求进行考虑。这里层间绝缘选用0.12毫米厚的电缆纸一层, 初级外包同样厚度的电缆纸三层, 绕组骨架内墙板厚度选用三毫米。另外, 从表1-10中查得叠绕系数 $K_{\text{叠}} = 1.15$ 。这样, 根据前面计算得到的绕组导线, 以及绕组层数, 下面即可进行绕组厚度计算。即

$$\begin{aligned} A_1 &= K_{\text{叠}}(d_{1m} + 0.12)a_1' + 0.12 \times 3 + 3 \\ &= 1.15 \times 4(2.62 + 0.12) + 0.12 \times 3 + 3 \\ &= 12.604 + 0.36 + 3 = 15.964 \end{aligned} \quad (\text{毫米})$$

B. 次级绕组厚度 由于次级绕组本身工作电压及对地耐压都较高, 且绕组层间电压为444伏, 因此绕组绝缘要求也较高。为此, 绕组层间绝缘从表1-16中选用0.12毫米厚度的电缆纸2层。次级外包绝缘选用同样厚度的电缆纸6层。

另外, 从表2-3中选用次级骨架内墙板厚度为6毫米, 边墙板厚度为8毫米, 初级和次级绕组之间的空隙为4毫米, 这样, 根据绕组导线及绕组层数和叠绕系数, 则次级绕组厚度为

$$\begin{aligned} A_2 &= K_{\text{叠}}a_2'(d_{2m} + 0.12 \times 2) + 6 + 0.12 \times 6 \\ &= 1.15 \times 13(0.95 + 0.24) + 6 + 0.12 \times 6 \\ &= 17.7905 + 6 + 0.72 = 24.511 \end{aligned} \quad (\text{毫米})$$

(4) 绕组厚度

$$\begin{aligned} D_m &= A_1 + A_2 + \text{初、次级之间的空隙} A_3 \\ &= 15.964 + 24.511 + 4 \\ &= 44.475 \end{aligned} \quad (\text{毫米})$$

(5) 绕组平均匝长

初级绕组平均匝长:

$$\begin{aligned}L_{m1} &= 2(A+B) + \pi A_1 \\ &= 2(52+104) + 3.14 \times 15.964 \\ &= 362 \quad (\text{毫米})\end{aligned}$$

次级绕组平均匝长:

$$\begin{aligned}L_{m2} &= 2(A+B+4A_1+4A_3+\pi A_2) \\ &= 2(52+104+4 \times 15.964+4 \times 4) + 3.14 \times 24.511 \\ &= 2(156+63.856+16) + 76.965 \\ &= 471.712 + 76.965 \\ &= 548.67 \quad (\text{毫米})\end{aligned}$$

(6) 各绕组用线长度

初级绕组用线长度:

$$L_{l1} = L_{m1} N_1 = 362 \times 206 \times 10^{-3} = 74.57 \quad (\text{米})$$

次级绕组用线长度:

$$L_{l2} = L_{m2} N_2 = 548.67 \times 1625 \times 10^{-3} = 892 \quad (\text{米})$$

(7) 绕组热态电阻

初级绕组热态电阻:

$$R_{m1} = K_T R_{20} \cdot L_{l1} \times 10^{-3} \quad (K_T \text{从曲线1-3中查得} 1.1)$$

则

$$\begin{aligned}R_{m1} &= 1.1 \times 3.75 \times 74.57 \times 10^{-3} \\ &= 0.31 \quad (\text{欧})\end{aligned}$$

次级绕组热态电阻:

$$\begin{aligned}R_{m2} &= K_T R_{20} \cdot L_{l2} \times 10^{-3} \\ &= 1.1 \times 30.1 \times 892 \times 10^{-3} \\ &= 29.5 \quad (\text{欧})\end{aligned}$$

7. 铜、铁损耗计算

(1) 绕组铜耗

$$\begin{aligned}P_M &= (I_1^2 R_{m1} + I_2^2 R_{m2}) \times 3 \\ &= (9.276^2 \times 0.31 + 1.16^2 \times 29.5) \times 3\end{aligned}$$

$$= (26.67 + 39.7) \times 3 = 199.1 \quad (\text{瓦})$$

(2) 铁芯损耗

$$P_c = P_{c0} G_c \text{ (见图2-4)}$$

从表1-9中查得 $P_{c0} = 2.9$ 瓦/公斤, 则

$$\begin{aligned} P_c &= P_{c0} K_c (2LS_{c\text{轆}} + 3hS_{c\text{心}}) \times 10^{-3} \\ &= 2.9 \times 7.8 (2 \times 34.8 \times 48 + 3 \times 18.2 \times 48) \times 10^{-3} \\ &= 22.62 (3340.8 + 2620.8) \times 10^{-3} \\ &= 22.62 \times 5961.6 \times 10^{-3} = 135 \quad (\text{瓦}) \end{aligned}$$

8. 温升计算

(1) 铁芯散热面 (参考图2-4)

$$S_{c1} = 4aL = 4 \times 52 \times 348 \times 10^{-2} = 723.8 \quad (\text{厘米}^2)$$

$$S_{c2} = 4Ba = 4 \times 104 \times 52 \times 10^{-2} = 216 \quad (\text{厘米}^2)$$

$$S_{c3} = 2BL = 2 \times 104 \times 348 = 723.8 \quad (\text{厘米}^2)$$

(2) 绕组散热面 (见图2-3)

$$\begin{aligned} S_{i1} &= 2h_{i1}n(A + B + \pi A_1) \times 10^{-2} \\ &= 2 \times 182 \times 3(52 + 104 + 3.14 \times 15.964) \times 10^{-2} \\ &= 1092(156 + 50.13) \times 10^{-2} \\ &= 1092 \times 206.13 \times 10^{-2} = 2251 \quad (\text{厘米}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{i2} &= 2h_{i2}n(A + B + 4A_1 + 4A_3) \times 10^{-2} \\ &= 2 \times 182 \times 3(52 + 104 + 4 \times 15.964 + 4 \times 4) \times 10^{-2} \\ &= 1092(52 + 104 + 4 \times 15.964 + 4 \times 4) \times 10^{-2} \\ &= 1092(156 + 63.86 + 16) \times 10^{-2} \\ &= 1092 \times 235.86 \times 10^{-2} = 2575.6 \quad (\text{厘米}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{i3} &= 2h_{i3}n(A + B + 4A_1 + 4A_3 + \pi A_3) \times 10^{-2} \\ &= 2 \times 152 \times 3(52 + 104 + 4 \times 15.964 + 4 \times 4 + 3.14 \times \\ &\quad 24.511) \times 10^{-2} \\ &= 912(156 + 63.860 + 16 + 76.965) \times 10^{-2} \\ &= 912 \times 312.825 \times 10^{-2} \\ &= 2853 \quad (\text{厘米}^2) \end{aligned}$$

(3) 总散热面

$$S = K_1(S_{l1} + S_{l2}) + S_{l3} + S_{e1} + S_{e2} + S_{e3}$$

式中:

K_1 为折算系数 $K_1=0.35$, 则

$$\begin{aligned} S &= 0.35(2251 + 2575.6) + 2853 + 723.8 + 216 + 723.8 \\ &= 1689.31 + 4516.6 = 6205.91 \quad (\text{厘米}^2) \end{aligned}$$

(4) 温升

$$\Delta\tau = 0.36q^{0.8} \quad (\text{℃})$$

$$= 0.35 \left(\frac{199.1 + 135}{6205.91 \times 10^{-4}} \right)^{0.8} = 0.35 \times 553^{0.8}$$

$$= 0.35 \times 157 \approx 55 \quad (\text{℃})$$

$\Delta\tau_1$ 值没有超过给定值 60℃ , 因此设计可取。这样, 即可得变压器整体结构, 如图2-5所示。

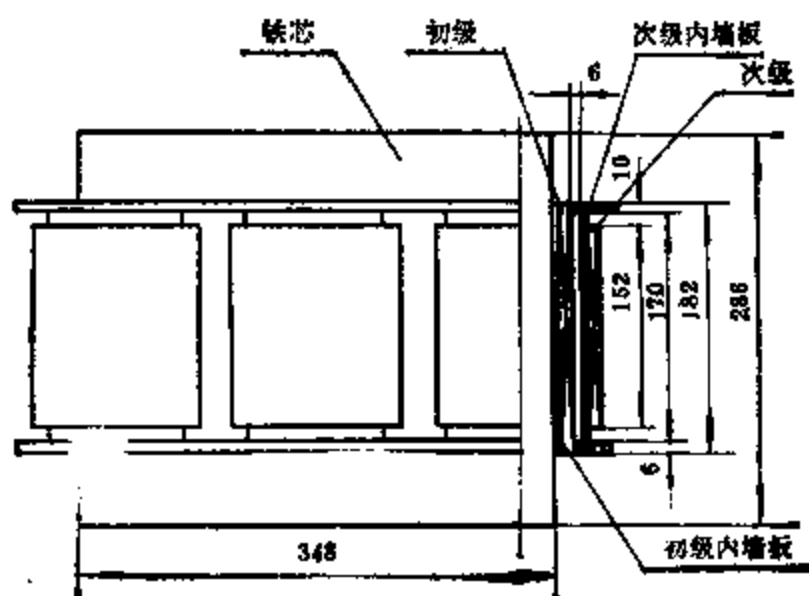


图2-5

第三单元 滤波扼流圈设计计算

各类无线电电子仪器设备，几乎都设有直流电源部分。而滤波扼流圈就常常出现在直流电源的滤波网络中。它在网络中的作用，主要是滤除直流电量中的变量，以达到整定电量波形的目的。随着滤波扼流圈在滤波网络中所处的位置不同，其铁芯中所产生的变流磁感应的强弱也不同。在要求精确计算的情况下，应根据给定技术条件，再结合这一特点。然后进行设计计算，但其法较烦。

下面，在满足技术要求、简化设计计算步骤，保证计算误差影响不大的前提下，介绍一种简易的设计计算方法以供参考。

其具体计算步骤大体分为铁芯截面计算，绕组匝数计算，绕组导线计算，绕组结构计算及磁路最佳气隙计算。

1. 铁芯截面积计算

$$S_c = K_0 \sqrt{LI_0} \quad (\text{厘米}^2)$$

式中：

S_c ——铁芯截面积（厘米²）；

L ——电感量（亨）；

I_0 ——流经绕组的直流电流（安）；

K_0 ——经验系数。

一般 K_0 值在12~26之间。选用的铁芯型式不同，则系数的取值也不相同。

若选用E型铁芯，则括号中的系数趋于上限选用。若选用C型铁芯，则括号中的系数趋于下限选用。

根据计算得到的 S_c 之值，对小型滤波扼流圈来说，即可从1-3或表1-4中查得相应的铁芯型号和铁芯几何结构尺寸。

2. 绕组匝数计算

$$N = 10 \sqrt{\frac{L L_{CT}}{1.26 \mu_z S_c}} \quad (\text{匝})$$

式中:

N ——绕组匝数;

L_{CT} ——磁路平均长度(厘米);

μ_z ——铁芯的有效导磁系数(见曲线3-1)或(曲线3-2)。

μ_z 之值是根据已知的铁芯截面 S_c 和已知的磁路平均长度 L_{CT}

等参数先算出 $\frac{L I_0^2}{S_c L_{CT}}$ 之值, 然后再根据不同的铁芯材料, 从曲线

3-1或曲线3-2中查得。

3. 绕组导线计算

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I_0}{j}} \quad (\text{毫米})$$

式中:

I_0 ——绕组中的直流电流(安);

j ——电流密度(安/毫米²);

d ——导线直径(毫米)。

导线直径 d 也可根据直流电流 I_0 及 j 的数值、由表1-5至表1-8中查出。

4. 绕组结构计算

绕组结构计算与小功率电源变压器相似。

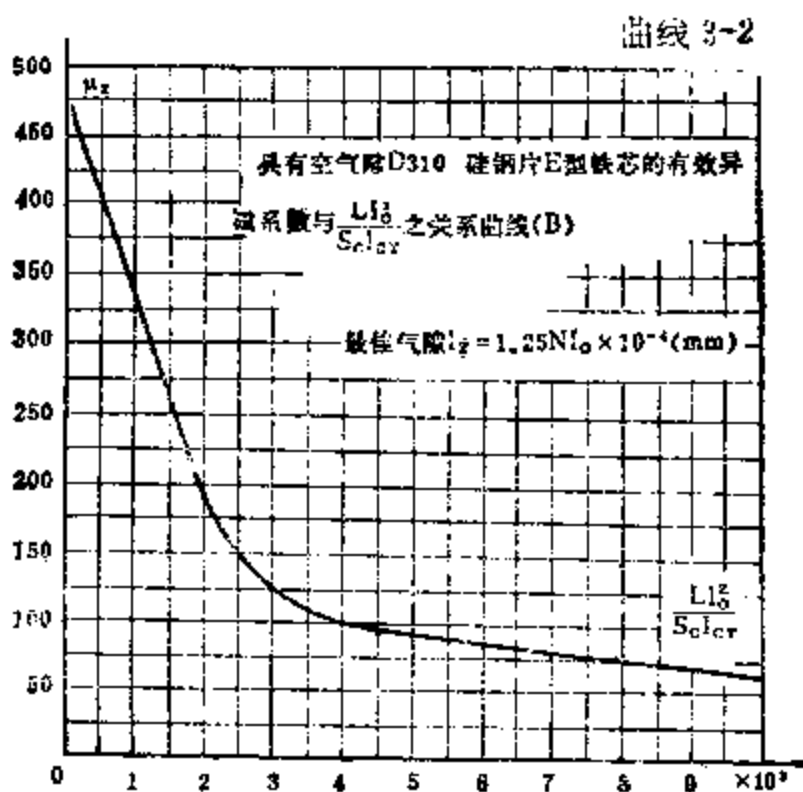
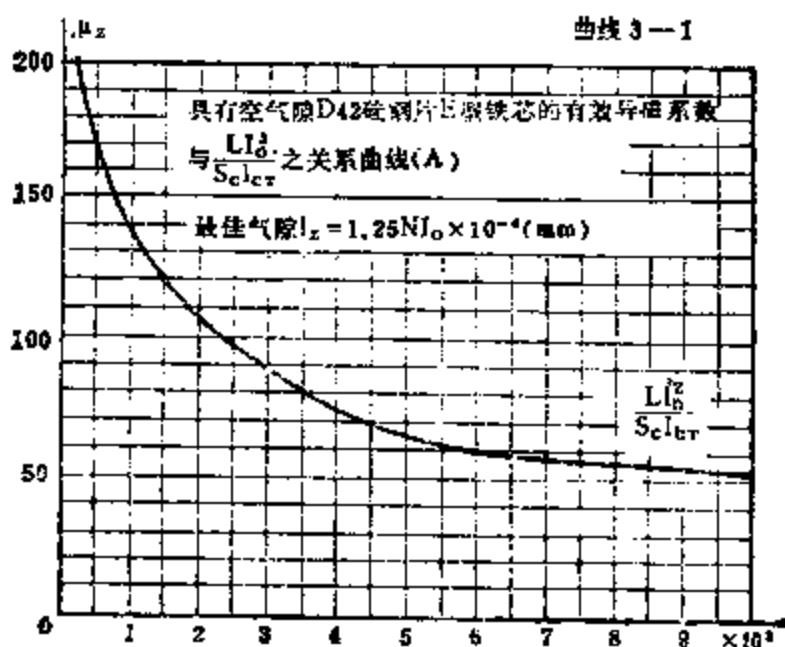
5. 磁路气隙计算

$$\delta_z = 1.25 N I_0 \times 10^{-3} \quad (\text{毫米})$$

气隙 δ_z 之值是用于调整磁路中的磁阻, 以改变铁芯中的有效导磁系数, 从而达到改变绕组电感量的目的。因此, 在装配时, 要求按电感量的需要进行调整。调整时用纸片垫入, 直至适宜为止。

在上述滤波扼流圈的设计计算中, 略去了它的温升计算。由于滤波扼流圈的工作状态, 不同于普通变压器的工作状态, 相比

之下，它在滤波网络中是处于直流状态下工作，因此铁芯中的交流成分所引起的铁芯损耗基本可略去不计，所以滤波扼流圈的损耗，主要是绕组的铜耗，即滤波扼流圈的热量主要由绕组的铜耗产生。这样，只要绕组电流密度选取适宜，则仅由绕组铜耗而引起滤波扼流圈产生过热的现象是有限的，故滤波扼流圈略去温升不计也是无弊的。



[例]已知: 电感量 $L=10$ 亨; 电流 $I_0=0.1$ 安

计算步骤:

1. 铁芯截面积计算

$$S_c = K_0 \sqrt{LI_0^2}$$

这里选用D42, 0.35毫米厚的硅钢片制成的E型铁芯, 取经验系数 $K_0=20$ 。则

$$S_c = 20 \sqrt{10 \times 0.1^2} = 20 \times 0.316 = 6.32 \quad (\text{厘米}^2)$$

根据 S_c 之计算值, 从表1-3中求得相应的铁芯型号为GEIB 22×33, 铁芯截面积 $S_c=6.6$ 平方厘米。铁芯窗孔的高度 $h=3.9$ 厘米、宽度 $C=1.4$ 厘米, 磁路长度 $L_{CT}=12.44$ 厘米

则 $\frac{LI_0^2}{S_c L_{CT}}$ 之值为 $\frac{10 \times 0.1^2}{6.6 \times 12.44} = 0.00122$

2. 绕组匝数计算

$$N = 10 \sqrt[4]{\frac{LL_{CT}}{1.26 \mu_z S_c}}$$

根据 $\frac{LI_0^2}{S_c L_{CT}} = 0.00122$ 之值, 从曲线3-1中查得 $\mu_z=130$, 则

$$N = 10 \sqrt[4]{\frac{10 \times 12.44}{1.26 \times 130 \times 6.6}} = 10 \sqrt[4]{\frac{124.4}{1081.08}}$$

$$= 10 \sqrt[4]{0.115} = 10^4 \times 0.3391 = 3391 \quad (\text{匝})$$

3. 绕组导线计算

现取电流密度 j 为3安/厘米², 即可从表1-5中求得标准线规格 $d=0.23$ 毫米, $d_m=0.28$ 毫米。

4. 绕组结构计算

首先确定绕组在骨架上绕制, 骨架的内墙板厚度为1毫米, 边墙板厚度为1.5毫米。则绕组的绕线长度 $L_0 = h - 2 \times 1.5 = 39 - 3 = 36$ 毫米。

再从表1-10中求得排绕系数 $K_{排}=1.05$, 叠绕系数 $K_{叠}=1.15$, 根据这些数据即可进行绕组结构计算。

(1) 绕组每层匝数

$$a = \frac{L_0}{K_{\text{排}} d_m} = \frac{36}{1.05 \times 0.28} = 122 \quad (\text{匝})/\text{层}$$

(2) 绕组层数

$$a' = \frac{N}{a} = \frac{3391}{122} = 27.79$$

取整数 $a' = 28$ (层)

3. 绕组厚度计算

由于对绕组没有具体的绝缘要求，因此仅以机械强度来确定绕组绝缘。这样，从表1-11中求得绕组层间绝缘用0.08毫米厚的电缆纸一层。绕组外包同样厚度的电缆纸三层。则绕组厚度为：

$$\begin{aligned} \delta &= K_{\text{叠}} a' (d_m + 0.08) + 1 + \text{绕组内包绝缘} + \text{绕组外包绝缘} \\ &= 1.15 \times 28(0.28 + 0.08) + 1 + 0.08 \times 2 + 0.08 \times 3 \\ &= 11.592 + 1 + 0.16 + 0.24 = 12.992 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

δ 之计算值没有超过所选铁芯窗孔的宽度 ($C=14$ 毫米)，因此设计可取毋须修改。

5. 磁路最佳气隙计算

$$\delta_z = 1.25 \times 0.1 \times 3391 \times 10^{-3} = 0.423 \quad (\text{毫米})$$

第四单元 日光灯镇流器设计计算

随着日光灯照明系统应用领域里的大量需要，日光灯镇流器早已形成各种不同规格的定型产品。这里仅介绍一种常用的简易设计计算方法及一些定型产品的技术数据，以供参考。其具体计算步骤如下：

1. 镇流器工作电压计算

当镇流器的损耗不超过灯管功率的20~25%时，则镇流器的工作电压为：

$$U_B = \sqrt{\frac{U^2 - 1.5U_L^2}{1.15}} \quad (\text{伏})$$

式中，

U_B ——镇流器的工作电压(伏)；

U ——电源电压(伏)；

U_L ——灯管工作电压(伏)。

1.15为系数

2. 铁芯截面积计算

$$S_o = K_o \sqrt{\frac{P_L U}{U_L}} \quad (\text{厘米}^2)$$

式中，

S_o ——镇流器的铁芯截面积(厘米²)；

P_L ——灯管的额定功率(瓦)；

K_o ——铁芯截面系数。

K_o 一般在0.5~0.7之间选取，若取上限时，镇流器体积大，耗料多，温升高。

3. 绕组匝数计算

对采用两根引线的镇流器，若铁芯材料选用各向同性的热轧硅钢片，其磁感应强度 B_m 可在11000~13000高斯的范围内选取，则绕组匝数为：

$$N = \frac{U_B}{B_m S_c} \times 45 \times 10^4 \quad (\text{匝})$$

式中： N —— 绕组匝数；
 B_m —— 铁芯的最大磁感应强度(高斯)。

4. 绕组导线计算

$$d = K_i \sqrt{I} \quad (\text{毫米})$$

式中： d —— 绕组导线直径(毫米)；
 I —— 流过灯管的额定工作电流(安)；
 K_i —— 电流密度系数。

K_i 值可在0.54~0.7之间选用。

5. 铁芯窗孔尺寸计算

(1) 绕组厚度：根据绕组匝数，导线直径等技术参数，可按下式求得绕组厚度，即

$$\delta = \frac{2N(d+0.03)^2}{H_1} \quad (\text{毫米})$$

式中： H_1 —— 绕组高度(毫米)；
 δ —— 绕组厚度(毫米)。

(2) 铁芯窗孔尺寸

铁芯窗孔宽度： $C = \delta + 1$ (毫米)

铁芯窗孔高度： $H = 0.5H_1 + 0.5$ (毫米)

式中， H_1 为绕组高度(毫米)

根据上述计算，可得图4-1的铁芯结构。

6. 磁路气隙计算

$$\delta_z = \frac{NI}{0.16B_m} \quad (\text{毫米})$$

式中： I 为绕组工作电流(即灯管额定工作电流)(安)。

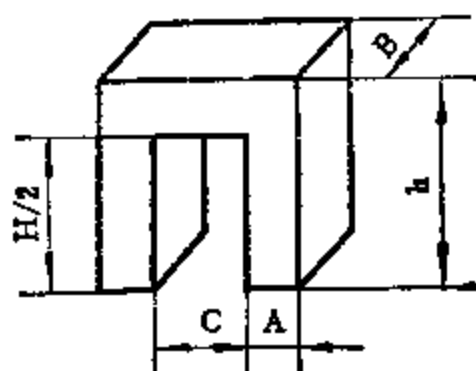


图 4-1

δ_z 之值，在装配调试时，用以调整镇流器的技术参数，以满足灯管工作特性的要求，调好后用纸片垫入。

表 4-1 是部分镇流器的有关技术数据。

表 4-1 镇流器技术数据 (地区标准) 表

规格 (瓦)	技术 参数	工作状态		启动状态		功率损耗 (瓦)
		电压(伏)	电流(毫安)	电压(伏)	电流(毫安)	
6		202	140—20	215	180±20	<4
8		200	160—20	215	200±20	<4
15		202	330—30	215	440±20	<7
20		192	350—30	215	460±30	<7.5
30 (细管)		183	320—30	215	530±30	<7
30		180	360—30	215	560±30	<7
40		185	410—30	215	650±30	<8

规格 (瓦)	线 径 (mm)	匝 数	铁芯截面 (cm ²)	磁隙长度 (mm)
6	0.19~0.2	2200~2400	2.5	0.03~0.08
8	0.19~0.2	2200~2400	2.5	0.05~0.1
15	0.31~0.35	1360~1420	4.5	0.1~0.15
20	0.31~0.33	1360~1420	4.5	0.15~0.25
30	0.34~0.35	1360~1420	4.5	0.25~0.35
40	0.34~0.35	1360~1420	4.5	0.30~0.45

第五单元 磁饱和稳压器设计计算

在大量无线电电子仪器设备中的电源部分，往往都具有稳压装置。这类稳压装置，常见的有电子稳压器和磁饱和稳压器等。

如稳压输出后的电量波形要求不严、则常采用磁饱和稳压器作稳定装置。这种稳压装置结构简单，制作方便，稳定可靠，不受干扰，其稳定度可达 $\pm 2\%$ 左右。

常见的磁饱和稳压器，有三柱式（见图5—1a）、双柱式（见图5—1b）和铁壳式（见图5—1c）三种。

三柱式由非饱和、饱和及磁分路三个铁芯组成。双柱式由两个铁芯组成，即非饱和铁芯及饱和铁芯组成。铁壳式更简单，仅有一个饱和铁芯。

三种磁饱和稳压器的设计大同小异。

其设计计算步骤大体分为：铁芯计算，绕组匝数计算，谐振电容计算，绕组电流计算等。

1. 三柱式磁饱和稳压器

三柱式磁饱和稳压器由三个铁芯柱组成。它们各具不同的用途，因而铁芯截面积也各不相同，也有共同之处。即铁芯截面积不仅与每匝感应电势 e_0 成正比，同时还与稳压器的容量成正比。

(1) 铁芯计算：每匝感应电势为：

$$e_0 = 0.035\sqrt{P} \quad (\text{伏/匝})$$

非饱和铁芯截面积为： $S_1 = 36e_0$ (厘米²)

饱和铁芯截面积为： $S_2 = 0.558S_1$ (厘米²)

磁分路铁芯截面积为： $S_3 = 0.4S_1$ (厘米²)

式中， P 为稳压器的负载功率 (瓦)。

(2) 绕组匝数计算：磁饱和稳压器的绕组分为初级绕组，补

偿绕组和谐振绕组（其中包括次级绕组）。如图5—1所示。

(a) 初级绕组匝

$$\text{数: } N_1 = \frac{U_1}{e_0} \quad (\text{匝})$$

次级绕组匝数:

$$N_2 = 1.43 \frac{U_2}{e_0} \quad (\text{匝})$$

(b) 谐振绕组匝

$$\text{数: } N_c = 1.18 \frac{U_0}{e_0} \quad (\text{匝})$$

(c) 补偿绕组匝

$$\text{数 } N_K = 0.15 N_2 \quad (\text{匝})$$

式中:

U_1 ——电源额定电压
(伏);

U_2 ——稳压器的输出
电压 (伏);

U_0 ——电容器的允
许工作电压
(伏)。

一般 U_0 之值, 常
取电容器额定工作电压
的65%为宜。

(3) 谐振电容计
算:

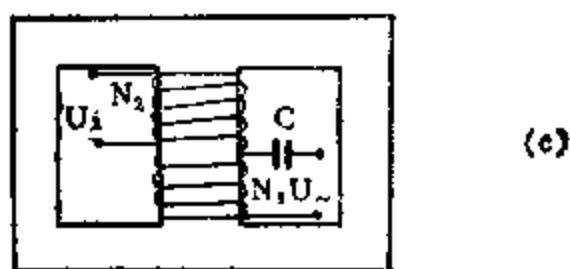
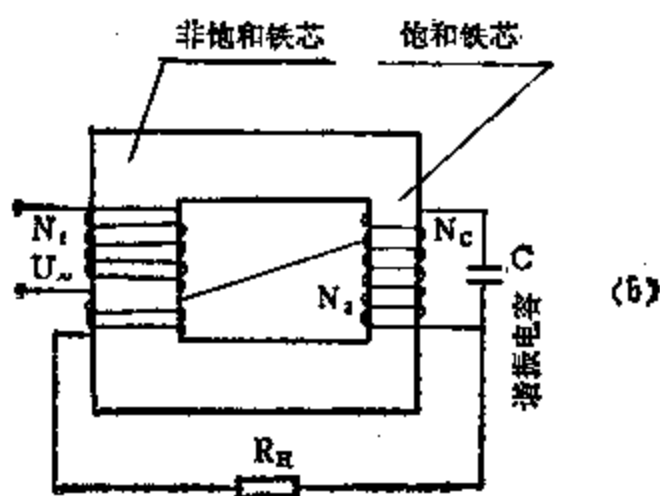
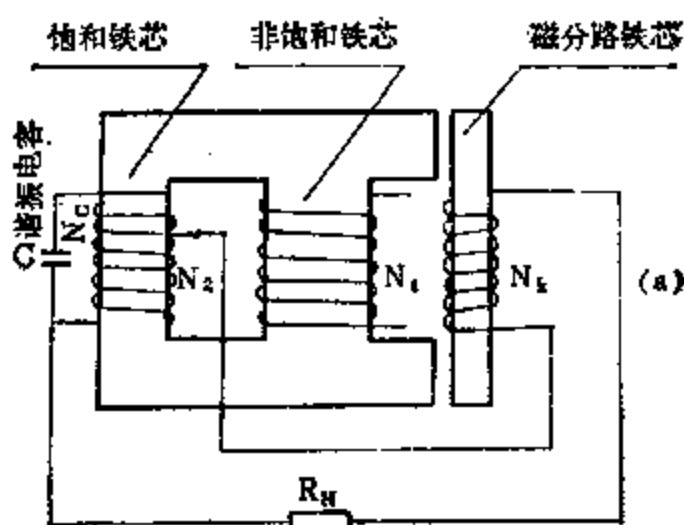


图5—1

$$C=10000\sim 13000 \frac{P}{U_0^2} \quad (\text{微法})$$

C之计算值，一般仅作为调整磁饱和稳压器时参考。最后再按调整好的稳定度所需的实际值来确定。

(4) 绕组电流计算：磁饱和稳压器绕组，由于各自的用途不同，流经绕组中的电流也不同。特别是谐振绕组与次级绕组，次级绕组与补偿绕组，其电流都是不等的。比如，次级绕组中不仅有负载电流，而且还有谐振绕组的电流，并且其值的大小还应按两者的矢量关系进行计算。又如补偿绕组，看起来是与次级绕组串联的，但是其流过绕组的电流就只有负载电流而无谐振绕组中的电流。

初级绕组电流：

$$I_1 = \frac{2P}{U_1} \quad (\text{安})$$

谐振绕组电流：

$$I_c = 1.5 \frac{P}{U_0} \quad (\text{安})$$

次级绕组电流：

$$I_2 = \sqrt{I_c^2 + I_L^2} \quad (\text{安})$$

补偿绕组电流：

$$I_k = \frac{P}{U_2} \quad (\text{安})$$

(5) 绕组线径：磁饱和稳压器的绕组导线计算，也是根据各绕组的电流和所取的电流密度，可从表1—5或至表1—8求得。

一般为使磁饱和稳压器不致过热，初级绕组 N_1 和补偿绕组 N_k 的电流密度 j ，均选用2安/毫米²次级绕组 N_2 和谐振绕组 N_c 的电流密度 j ，选用1.5安/毫米²。

另外，绕组结构计算与上述单元相同。

【例】设计一只三柱式磁饱和稳压器。

已知:

1. 电源电压的变化范围 $U_1=170\sim 240$ (伏)
2. 输出额定电压 $U_2=220$ (伏)
3. 负载电流 $I_2=0.5$ (安)
4. 电源频率 $f=50$ (赫)
5. 稳定度为 $\pm 1.5\%$
6. 连续工作

解: (1) 铁芯计算

每匝感应电势:

$$e_0 = 0.035 \sqrt{P} = 0.035 \sqrt{220 \times 0.5} = 0.367 \text{ (伏/匝)}$$

非饱和铁芯截面积:

$$S_1 = 36e_0 = 36 \times 0.367 = 13.212 \text{ (厘米}^2\text{)}$$

(取整数 $S_1 = 14 \text{ 厘米}^2$)

饱和铁芯截面积:

$$S_2 = 0.558S_1 = 0.558 \times 14 = 7.812 \text{ (厘米}^2\text{)}$$

(取整数 $S_2 = 8 \text{ 厘米}^2$)

磁分路铁芯截面积:

$$S_3 = 0.4S_1 = 0.4 \times 14 = 5.6 \text{ (厘米}^2\text{)}$$

(取整数 $S_3 = 6 \text{ 厘米}^2$)

(2) 绕组匝数计算

初级绕组匝数:

$$N_1 = \frac{U_1}{e_0} = \frac{220}{0.367} \approx 600 \text{ (匝)}$$

次级绕组匝数:

$$N_2 = 1.43 \frac{U_2}{e_0} = 1.43 \frac{220}{0.367} = 858 \text{ (匝)}。$$

谐振绕组匝数: 为计算谐振绕组匝数之便, 可先假定采用额定电压为600伏的电容器, 再将600伏的电压折算成电容器长期的允许工作电压, 即 $U_0 = 0.65 \times 600 = 390$ 伏。然后, 再根据绕组

的每匝感应电势 e_c 计算谐振绕组匝数, 即

$$\begin{aligned} N_c &= 1.18 \frac{U_c}{e_c} = 1.18 \frac{390}{0.367} \\ &= 1.18 \times 1063 = 1254 \quad (\text{匝}). \end{aligned}$$

补偿绕组匝数:

$$N_K = 0.15 N_2 = 0.15 \times 858 = 129 \quad (\text{匝}).$$

(3) 谐振电容计算

$$\begin{aligned} C &= 13000 \frac{P}{U^2} = 13000 \frac{110}{390^2} \\ &= 13000 \times 0.00072 = 9.36 \quad (\text{微法}). \end{aligned}$$

(4) 绕组电流计算

初级绕组电流:

$$I_1 = \frac{2P}{U_1} = \frac{2 \times 110}{220} = 1 \quad (\text{安})$$

谐振绕组电流:

$$\begin{aligned} I_c &= 1.15 \frac{P}{U_c} = 1.15 \frac{110}{390} \\ &= 1.15 \times 0.282 = 0.324 \end{aligned} \quad (\text{安})$$

补偿绕组电流:

$$I_K = \frac{110}{220} = 0.5 \quad (\text{安})$$

次级绕组电流:

$$\begin{aligned} I_2 &= \sqrt{I_c^2 + I_K^2} = \sqrt{0.324^2 + 0.5^2} \\ &= \sqrt{0.355} = 0.596 \quad (\text{安}) \end{aligned}$$

(5) 绕组导线计算

根据选用的初级绕组和补偿绕组导线的电流密度2安培/毫米², 次级绕组和谐振绕组导线的电流密度1.5安培/毫米², 以及各绕组的工作电流, 从国产漆包线表1—5至表1—6中求得各绕组线径为:

初级绕组线径: $d_1=0.8$ (毫米)

$d_{m1}=0.89$ (毫米)

次级绕组线径: $d_2=0.72$ (毫米)

$d_{m2}=0.80$ (毫米)

谐振绕组线径: $d_c=0.53$ (毫米)

$d_{mc}=0.64$ (毫米)

补偿绕组线径: $d_k=0.57$ (毫米)

$d_{mk}=0.64$ (毫米)

2. 双柱式磁饱和稳压器

双柱式磁饱和稳压器, 常有两个绕组, 分别安置在不同的两铁芯柱上。其计算方法与三柱式差异不大。

这里仅将不同的部分, 如铁芯计算, 谐振电容计算, 以及每匝感应电势的计算, 分别进行介绍。

(1) 铁芯计算

非饱和铁芯截面积,

$$S_1=1.1\sqrt{P} \quad (\text{厘米}^2)$$

饱和铁芯截面积,

$$S_2=\frac{S_1}{1.55} \quad (\text{厘米}^2)$$

式中:

P ——负载功率 (瓦)

(2) 每匝感应电势计算

$$e_0=4.44fBS_1 \times 10^{-8} \quad (\text{伏/匝})$$

式中:

e_0 ——每匝感应电势 (伏/匝);

f ——电源频率 (赫);

B ——非饱和铁芯中的磁感应强度 (高斯);

S_1 ——非饱和铁芯截面积 (厘米²)。

磁饱和稳压器的铁芯可选用各向同性的热轧硅钢片, 也可选

用各向异性的冷轧硅钢片。若选前者，铁芯的磁感应强度 B 可在 10000~13000 高斯之间选用；若选后者，则铁芯的磁感应强度 B 可在 15000~17000 高斯之间选用。

(3) 绕组匝数计算

初级绕组匝数：

$$N_1 = \frac{U_1}{e_0} \quad (\text{匝})$$

次级绕组匝数：

$$N_2 = 1.4 \frac{U_2}{e_0} \quad (\text{匝})$$

谐振绕组匝数：

$$N_c = \frac{U_c}{e_0} \quad (\text{匝})$$

补偿绕组匝数：

$$N_k = 0.3N_2 \quad (\text{匝})$$

式中：

U_1 ——电源电压 (伏)；

U_2 ——稳压器输出电压 (伏)；

U_c ——谐振电容器的允许工作电压 (伏)

(4) 谐振电容计算

$$C = \frac{1 \times 10^6}{\omega^2 L} \quad (\text{微法})$$

式中：

L 为谐振绕组的电感量 (亨)

即

$$L = \frac{1.26 N^2 \mu_r S_2 \times 10^{-9}}{L_{CT}} \quad (\text{亨})$$

$$\omega = 2\pi f$$

f ——电源频率 (赫)；

- L_{CT} ——磁路平均长度 (厘米);
 S_2 ——饱和铁芯截面积 (厘米²);
 N_c ——谐振绕组匝数 (匝);
 μ_x ——有效导磁系数。

μ_x 之值可根据不同的铁芯材料选用。如铁芯材料选用各向同性的热轧硅钢片时(D42、D43等), 可取300左右; 如铁芯材料选用各向异性的冷轧硅钢片(D310、D320等)时, 可取500左右。

【例】: 设计一只双柱式磁饱和稳压器

- 已知: (1) $U_1=170\sim 240$ (伏); (2) $U_2=220$ (伏);
 (3) $I_2=0.5$ (安); (4) $f=50$ (赫); (5) 稳定度为 $\pm 1.5\%$;
 (6) 连续工作。

解: (1) 铁芯

非饱和铁芯截面积

$$S_1 = 1.1\sqrt{P} = 1.1\sqrt{110} = 11.5 \quad (\text{厘米}^2)$$

(取整数 $S_1 = 12$ 厘米²)

饱和铁芯截面积:

$$S_2 = \frac{S_1}{1.55} = \frac{12}{1.55} = 7.7 \quad (\text{厘米}^2)$$

(取整数 $S_2 = 8$ 厘米²)。

(2) 每匝感应电势

$$\begin{aligned}
 e_0 &= 4.44fBS_1 \times 10^{-8} = 4.44 \times 50 \times 13000 \times 12 \times 10^{-8} \\
 &= 0.346 \quad (\text{伏/匝})
 \end{aligned}$$

(3) 绕组匝数

初级绕组匝数:

$$N_1 = \frac{U_1}{e_0} = \frac{220}{0.346} = 636 \quad (\text{匝})$$

次级绕组匝数:

$$N_2 = \frac{1.4U_2}{e_0} = \frac{1.4 \times 220}{0.346} = 890 \quad (\text{匝})$$

谐振绕组匝数:

$$N_c = \frac{U_c}{e_c} = \frac{390}{0.346} = 1127 \quad (\text{匝})$$

补偿绕组匝数:

$$N_k = 0.3N_2 = 0.3 \times 890 = 267 \quad (\text{匝})$$

这里绕组电流及绕组导线的技术条件与三柱式的完全相同，可直接引用前面三柱式稳压器的计算结果。即

初级绕组电流: $I_1 = 1$ (安)

谐振绕组电流: $I_c = 0.324$ (安)

次级绕组电流: $I_2 = 0.596$ (安)

补偿绕组电流: $I_k = 0.5$ (安)

初级绕组线径: $d_1 = 0.8$ (毫米)

次级绕组线径: $d_2 = 0.72$ (毫米)

谐振绕组线径: $d_c = 0.53$ (毫米)

补偿绕组线径: $d_k = 0.57$ (毫米)。

根据铁芯计算结果，参照第二单元提出的铁芯估算法，即可得图5—2的铁芯结构。

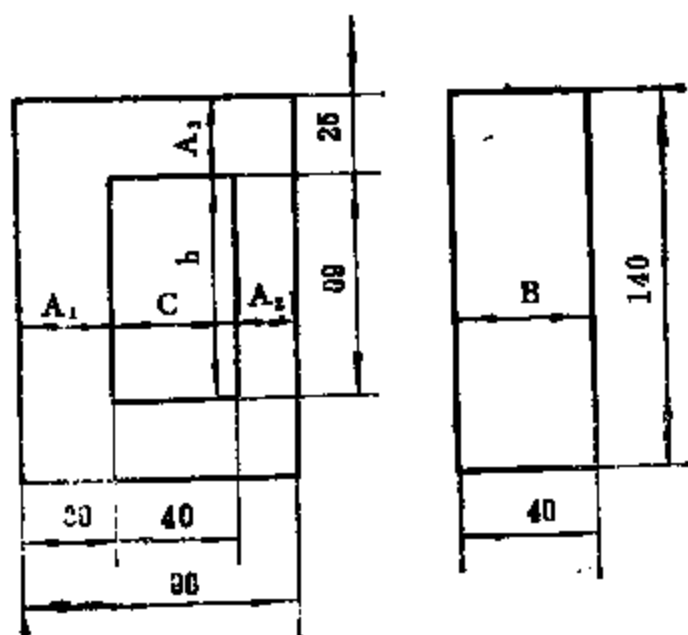


图5—2

图中平均磁路长度的近似值为:

$$\begin{aligned} L_{CT} &= 2(h+c) + 0.6\pi(A_1 + A_2) \\ &= 2(9+4) + 0.6 \times 3.14(3+2) \\ &= 2 \times 13 + 1.884 \times 5 = 35.42 \quad (\text{厘米}) \end{aligned}$$

(4) 谐振电容

根据已知的谐振绕组匝数及估算得到的铁芯结构尺寸等参数, 可按下式算得谐振绕组的电感量为:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1.26\mu_r N^2 S_c \times 10^{-9}}{L_{CT}} = \frac{1.26 \times 300 \times 1127^2 \times 8 \times 10^{-8}}{35.42} \\ &= \frac{38.41 \times 10^8 \times 10^{-8}}{35.42} = 1.1 \quad (\text{亨}) \end{aligned}$$

则谐振电容为:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1 \times 10^9}{\omega^2 L} = \frac{1 \times 10^9}{(2 \times 50 \times 3.14)^2 \times 1.1} \\ &= \frac{1 \times 10^9}{98596 \times 1.1} = \frac{1 \times 10^9}{108455.6} \\ &= 9.22 \quad (\text{微法}) \end{aligned}$$

C之值供调整稳定度时参考。

3. 壳式磁饱和稳压器

所谓壳式, 如同普通变压器一样, 系指绕组大部分被铁芯所包围的即称壳式。

这类磁饱和稳压器, 就其谐振方式而言, 常用串联谐振式, 如图5—1c所示。而容量多属小功率范围。铁芯多从标准系列铁芯中选用, 这里以表1—3作参考。

具体设计计算步骤, 分为功率计算铁芯截面积、绕组匝数和绕组导线的计算等。

(1) 功率计算

$$P_T = 2P_H \quad (\text{瓦})$$

式中:

P_T ——磁饱和稳压器容量 (瓦) ;

P_H ——磁饱和稳压器负载功率 (瓦) 。

(2) 铁芯计算

$$S_c = 1.1 \sqrt{P_T} \quad (\text{厘米}^2)$$

式中:

S_c 为铁芯截面积 (厘米²)

(3) 绕组匝数计算

初级绕组每匝感应电势 (伏/匝)

$$e_1 = \frac{S_c}{40}$$

则初级绕组匝数为:

$$N_1 = \frac{U_1}{e_1} \quad (\text{匝})$$

次级绕组每匝感应电势为

$$e_2 = \frac{1.3 S_c}{40} \quad (\text{伏/匝})$$

则次级绕组匝数为:

$$N_2 = \frac{U_2}{e_2} \quad (\text{匝})$$

式中:

U_1 ——磁饱和稳压器初级电压 (伏);

U_2 ——磁饱和稳压器输出电压 (伏)。

(4) 绕组导线计算

初级绕组线径为:

$$d_1 = 0.95 \sqrt{\frac{P_T}{U_1}} \quad (\text{毫米})$$

次级绕组线径为:

$$d_2 = 0.8 \sqrt{I_2} \quad (\text{毫米})$$

式中:

I_2 ——磁饱和稳压器负载电流 (安)。

(5) 谐振电容计算

谐振绕组电感:

$$L = \frac{1.26\pi_2 N_1^2 S_c \times 10^{-9}}{L_{CT}} \quad (\text{亨})$$

式中:

L ——谐振绕组 (初级绕组) 电感 (亨);

N_1 ——谐振绕组 (初级绕组) 匝数 (匝);

S_c ——铁芯截面积 (厘米²);

L_{CT} ——磁路平均长度 (厘米);

μ_2 ——铁芯有效导磁系数。

μ_2 值可参考双柱式磁饱和稳压器所提供的条件选用。

谐振电容:

$$C = \frac{1 \times 10^6}{(2\pi f)^2 L} \quad (\text{微法})$$

式中:

f ——电源频率 (赫);

L ——初级绕组电感 (亨)。

C 之值仅作为调整磁饱和稳压器的稳定度时参考。

[例] 设计一只壳式磁饱和稳压器, 其技术条件完全与三柱式或双柱式磁饱和稳压器相同。

(1) 功率计算

$$P_T = 2P_H = 2 \times 220 \times 0.5 = 220 \quad (\text{瓦})$$

(2) 铁芯截面积计算

$$S_c = 1.1 \sqrt{P_T} = 1.1 \sqrt{220} = 16.32 \quad (\text{厘米}^2)$$

根据 S_c 之计算值, 从标准系列铁芯表1—3中求得铁芯型号为GE1B35×52。铁芯平均磁路长度 $L_{CT} = 19.75$ 厘米。截面积 $S_c = 16.1$ 厘米², 窗孔高度 $h = 6.15$ 厘米, 窗孔宽度 $C = 2.2$ 厘米。

(3) 绕组匝数计算

初级每匝感应电势为:

$$e_1 = \frac{S_c}{40} = \frac{16.1}{40} = 0.4025 \quad (\text{伏/匝})$$

则初级绕组匝数为:

$$N_1 = \frac{U_1}{e_1} = \frac{220}{0.4025} = 547 \quad (\text{匝})$$

次级绕组每匝感应电势为:

$$e_2 = \frac{1.3S_c}{40} = \frac{1.3 \times 16.1}{40} = 0.523 \quad (\text{伏/匝})$$

则次级绕组匝数:

$$N_2 = \frac{U_2}{e_2} = \frac{220}{0.523} = 421 \quad (\text{匝})$$

(4) 绕组导线计算

初级绕组线径为:

$$\begin{aligned} d_1 &= 0.95 \sqrt{\frac{P_T}{U_1}} = 0.95 \sqrt{\frac{220}{220}} \\ &= 0.95 \times 1 = 0.95 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

次级绕组线径为:

$$\begin{aligned} d_2 &= 0.8 \sqrt{I_2} = 0.8 \sqrt{0.5} = 0.8 \times 0.705 \\ &= 0.565 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

根据 d_1 、 d_2 之计算值,从表1—8中求得初级实用绕组导线直径 $d_1=0.96$ 毫米,最大外径 $d_{m1}=1.05$ 毫米,次级绕组导线 $d_2=0.57$ 毫米,最大外径 $d_{m2}=0.64$ 毫米。

(5) 谐振电容计算

谐振绕组电感:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1.26 \mu_z N_1^2 S_c \times 10^{-8}}{L_{CT}} = \frac{1.26 \times 300 \times 547^2 \times 16.1 \times 10^{-8}}{19.75} \\ &= 0.923 \quad (\text{亨}) \end{aligned}$$

谐振电容,

$$C = \frac{1 \times 10^9}{(2\pi f)^2 L} = \frac{1 \times 10^9}{(2 \times 3.14 \times 50)^2 \times 0.923} = \frac{1 \times 10^9}{91004.11} \\ = 10.988 \quad (\text{微法})$$

C之计算值仅供调整磁饱和稳压器的稳定度时参考。

以上三种磁饱和稳压器的绕组结构计算方法均与小功率变压器或中等功率变压器相同。故计算时,可参照进行。

另外,三种磁饱和稳压器的绕组匝数,为调整稳定度之便,在匝数的10~25%的范围内应有若干抽头,其抽头位置均在绕组的最后部分。

第六单元 磁饱和电抗器设计计算

磁饱和电抗器，目前已广泛用于无线电电子设备中，特别是各类标准及非标准专用电子设备中。它在机体中，主要是起变换阻抗和传输能量的作用，并能以较弱的直流输入信号去控制较强的交流输出信号。一般在这类磁饱和电抗器的设计原始数据中，通常对放大系数、灵敏度、时间常数等都不作具体要求，而在设计过程中，只要能满足技术要求，以及在温升允许的情况下，作到体积小、重量轻、传输效率高、成本低。

当然，不同用途的磁饱和电抗器，其设计出发点也是不同的。

这里介绍一种给定电源电压，对电流变化倍数有一定要求（要求线性范围宽广），而且是纯电阻负载的磁饱和电抗器来说明用线性方法的设计计算步骤和程序。在一定条件下，此计算方法也适用于无反馈的磁放大器。

在图6-1中， N_a 为磁饱和电抗器的交流绕组， N_c 为磁饱和电抗器的直流（控制）绕组， N_o 为磁饱和电抗器的位移绕组。在设计磁饱和电抗器时，除根据这一基本原理结构，其原始数据负载功率 P_H 、负载电阻 R_H 、电源电压 U_a 、电源频率 f ，以及无直流激磁时的最小输出电流 I_o 等等之外，还必须掌握铁芯的冲片尺寸或铁芯材料，以及铁芯的交直流同时磁化曲线族。这里仅提供曲线6-1或曲线6-2以作参考。

要想获得一只较为理想的磁饱和电抗器，在设计计算过程中，还应该在确定铁芯结构型式及铁芯材料之后，再作出它们接近实用的交直流同时磁化曲线族，然后，再按这一交直流同时磁化曲线族，以指导设计计算。

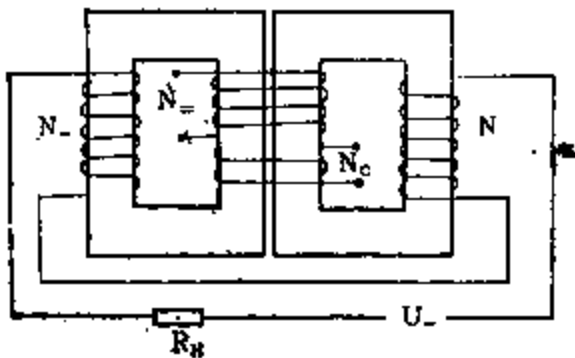


图 6-1

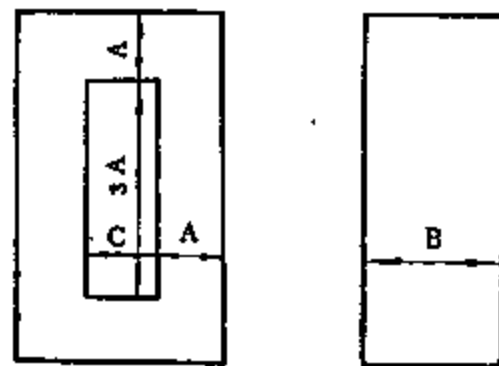


图 6-2

具体设计计算步骤，分为铁芯体积、绕组匝数、绕组导线的计算等。

1. 铁芯体积计算

磁饱和电抗器的铁芯，多以Π型结构组成。其单个铁芯的体

积为：

$$V_C = \frac{P_H \times 10^8}{8.88 f H_K \sqrt{B_0^2 - B_K^2}} \quad (\text{厘米}^3)$$

式中：

V_C ——一个单Π铁芯的体积 (厘米³)；

P_H ——负载功率 (瓦)；

f ——电源频率 (赫)；

H_K ——最大直流激磁时的交流磁场强度

(安匝/厘米)；

B_K ——最大直流激磁时的交流磁感应强度 (高斯)；

B_0 ——无直流激磁时的交流磁感应强度 (高斯)。

B_0 之值，一般可从交直流同时磁化曲线族中，从直流激磁为零时，即 $H_L=0$ 时的那条磁化曲线上查取。

B_K 及 H_K 之值，可在交直流同时磁化曲线族中，以直流激磁为最大时的那条磁化曲线的下部弯曲部分中求得。其具体求法，在实例运算中介绍。

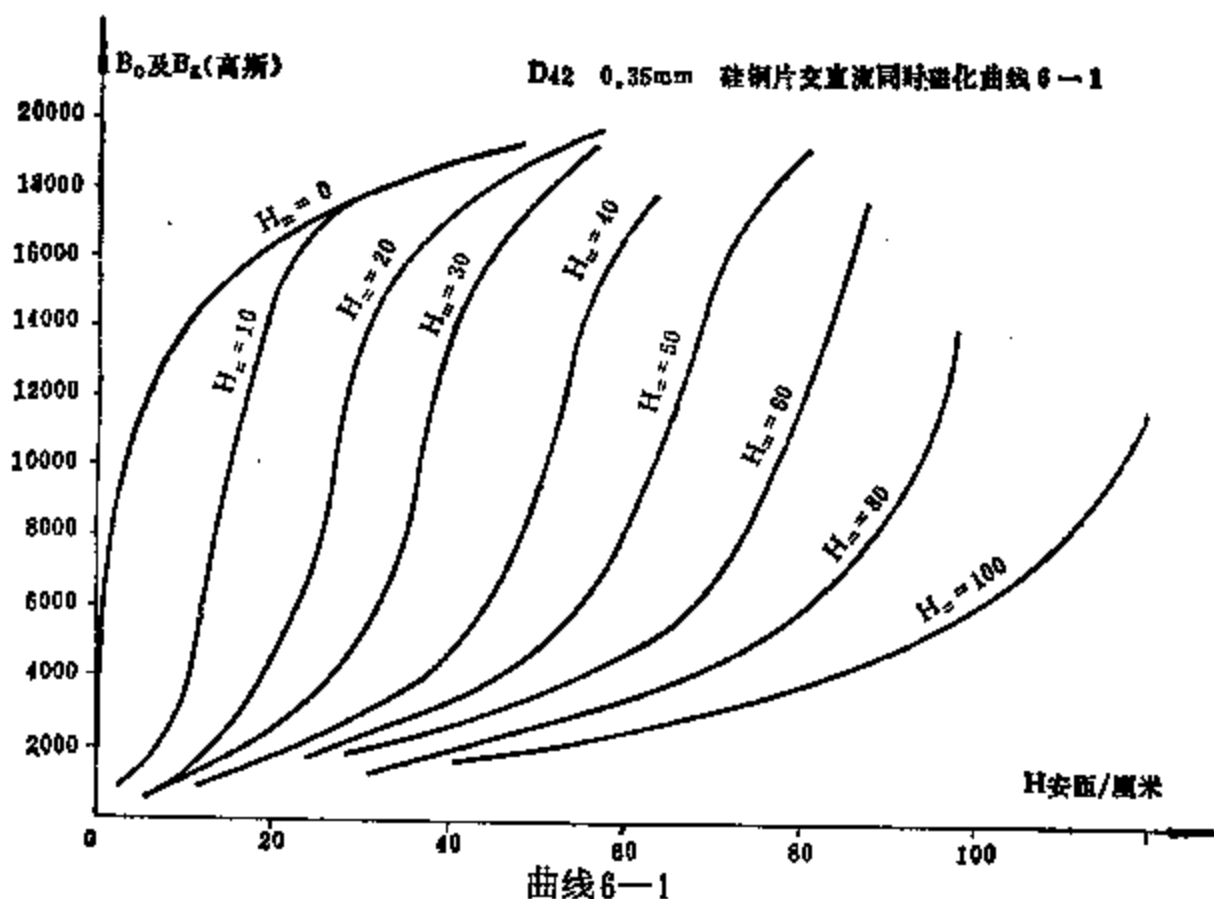
当利用上式算得一个单Π铁芯体积 V_C 之后，尚需估算一个单Π铁芯的几何结构尺寸。可按下面经验估算法求得。

这里先假设一个单II铁芯的柱片宽度为A, 则铁芯叠合厚度 $B=2A$, 铁芯窗孔宽度 $c=(0.5\sim 1)A$, 铁芯窗孔高度 $h=(2\sim 2.5)A$, 铁芯磁路平均长度 $L_{cr}=(9\sim 11)A$, 铁芯截面积 $S_c=2A^2$, 铁芯体积 $V_c=(16.4\sim 22)A^3$ 。

根据上面这些经验估算值, 以及铁芯体积 V_c 的大小, 再返回来求得单II铁芯的柱片宽度A, 即

$$A = \sqrt[3]{\frac{V_c}{16.2\sim 22}} \quad (\text{厘米})$$

计算时, 可参考图6-2的铁芯结构。



在磁饱和电抗器单II铁芯的体积 V_c 的计算中, 对无直流激磁时的磁感应强度 B_0 的选用是极为重要的。它不仅取决于负载功率 P_H 的大小, 同时还取决于电流变化范围的宽窄, 即取决于无直流激磁时的最小输出电流 I_0 的大小, 以及最大直流激磁时的输出负载电流 I_H 的大小。当然还取决于铁芯材料本身磁性能的优劣, 或磁饱和电抗器本身发热的限制等。

若 B_0 之值选用越高，则铁芯体积越小，重量越轻。但是，电流变化范围小，铁芯发热严重，电源波动时稳定度差，因此， B_0 之值不宜选用过高。

对各向同性的热轧硅钢片，如D41、D43、D43等，可在8000~13000高斯的范围内选取。

对各向异性的冷轧硅钢片，如D310、D320、D330、D340等，可在10000~15000高斯的范围内选取。以上材料的厚度均以0.35毫米为例。

为验证上式计算得到的磁饱和电抗器的铁芯体积 V_c ，是否误差过大，这里再给出一个经验数据以供比较参考。即

$$\frac{V_c}{P_H} = 0.7 \sim 0.8 \quad (\text{厘米}^3/\text{瓦})$$

有时也可直接利用这一经验数据，根据负载功率 P_H 的大小，算出磁饱和电抗器一个单 Π 铁芯的体积 V_c 之值。即

$$V_c = (0.7 \sim 0.8) P_H \quad (\text{厘米}^3)$$

2. 绕组匝数计算

(1) 交流绕组匝数：一般可按下面的三个公式进行计算，并利用它们相互比较验证，最后取其平均值。即

$$N_{\sim} = \frac{U_{\sim} \times 10^8}{8.88f \cdot B_0 \cdot S_c} \quad (\text{匝})$$

及

$$N_{\sim} = \frac{H_{klct}}{I_H} \quad (\text{匝})$$

或

$$N_{\sim} = \frac{H_{olct}}{I_o} \quad (\text{匝})$$

式中：

N_{\sim} ——交流绕组匝数 (匝)；

U_{\sim} ——电源电压 (伏)；

I_H ——最大直流激磁时的输出负载电流 (安);

I_0 ——无直流激磁时的最小输出电流 (安);

S_c ——一个单II铁芯的截面积 (厘米²);

L_{CT} ——一个单L铁芯的磁路平均长度 (厘米)。

U_{\sim} 之值是无直流激磁时,及交流绕组两端的压降也为零时的感应电压(即等于电源电压)。

(2) 直流绕组匝数,一般多以输入等于输出的观点进行计算。即

$$N_{\sim} I_H = N_- I_-$$

$$N_- = \frac{N_{\sim} I_H}{I_-} \quad (\text{匝})$$

式中,

I_- ——供给直流绕组中的直流电流 (安);

N_- ——直流绕组匝数 (匝)。

其中 I_- 之值可由给定原始数据中提供,也可由设计计算时具体确定。

(3) 位移绕组匝数,必须在先确定位移绕组安匝数的前题下进行。

此值过高或过低都不能使铁芯剩磁的影响得到消除而达到理想的效果。

一般此值的大小,应等于无直流激磁的最小输出电流 I_0 与交流绕组匝数 N_{\sim} 之积。即

$$N_c I_c = N_{\sim} I_0$$

N_c ——位移绕组匝数 (匝);

$$N_c = \frac{N_{\sim} I_0}{I_c} \quad (\text{匝})$$

式中,

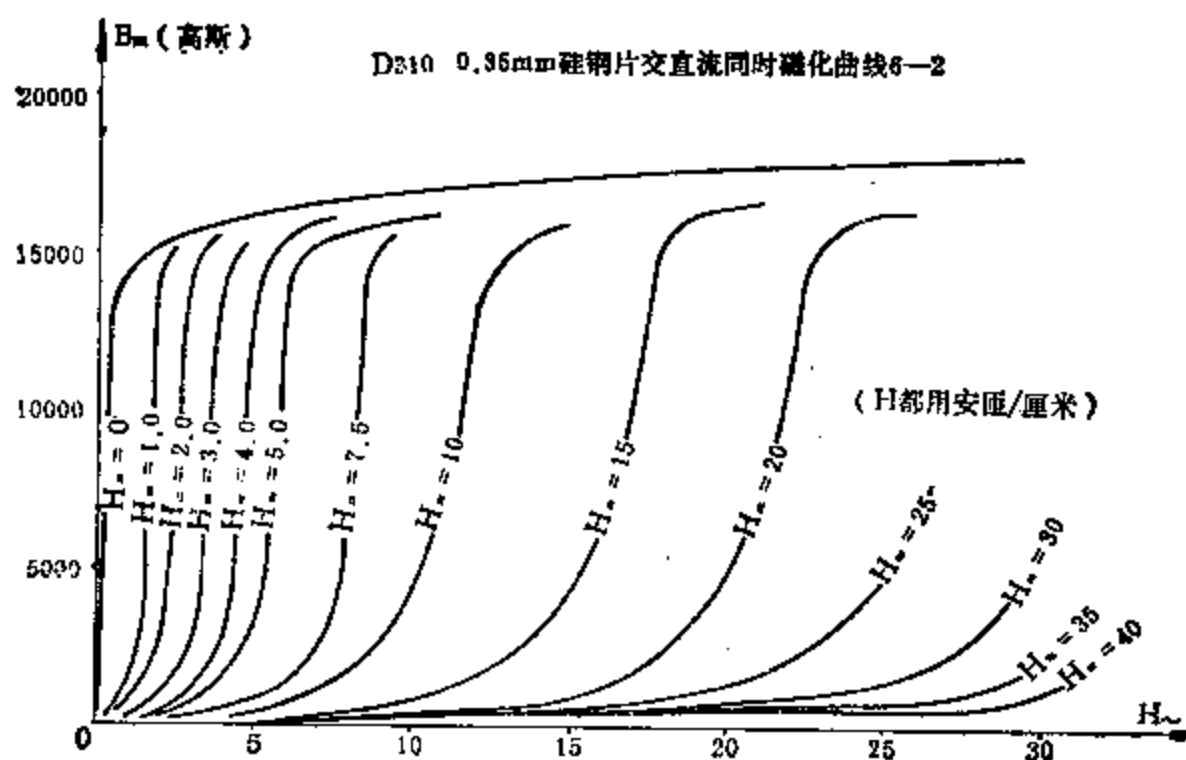
I_c ——流经位移绕组中的电流 (安)。

I_c 之值的大小，可在计算时具体确定。

3. 绕组导线计算

各绕组导线，可根据电流及导线电流密度从表1-5或至表1-8中求得。

该绕组结构计算与小功率电源变压器的算法相似，留在实例运算中再行介绍。



曲线6-2

[例] 设计一只磁饱和电抗器

给定数据为：

1. 电源电压 $U_s = 220$ (伏)
2. 负载功率 $P_H = 10000$ (瓦)
3. 负载电阻 $R_H = 10$ (欧)
4. 负载电流 $I_H = 31.62$ (安)
5. 电源频率 $f = 50$ (赫)
6. 无直流激磁时的最小输出电流

$$I_0 \leq 6 \text{ (安)}$$

解：1. 铁芯体积计算

$$V_c = \frac{P_H \times 10^8}{8.88 f H_K \sqrt{B_0^2 - B_K^2}}$$

从上式可以看出，其铁芯体积的大小，与给定的负载功率 P_H ，电源频率 f ，以及铁芯材料的磁性能之间的关系。

当给定数据不变，而铁芯材料已定的情况下，如何充分地利用铁芯材料的磁性能，不仅关系到磁饱和电抗器的铁芯体积大小，而且还关系到磁饱和电抗器的电性能是否优良，发热是否严重及成本高低的问题。因此，这些问题是值得加倍重视的，否则就难以使计算获得满意的效果。

在本例中，由于磁饱和电抗器的给定功率大，且目前尚无现成的标准铁芯系列可供选用，因此，只能根据给定数据及材料状态重新进行计算，然后再经剪裁等机械加工后组合成铁芯。

这里选用现有的D42、0.35毫米厚的各向同性的热轧硅钢板料或硅钢带料制成铁芯，其材料的磁性能参数，可近似地从交直流同时磁化曲线族6-1中求得。

无直流激磁时的磁感应强度 $B_0 = 12000$ (高斯)；

无直流激磁时的磁场强度 $H_0 = 5$ (安匝/厘米)；

假定最大直流激磁时的磁场强度 $H_L = 30$ (安匝/厘米)。

则从该曲线下部的弯曲部分求得：

最大直流激磁时的交流磁场强度 $H_K = 28$ (安匝/厘米)；

最大直流激磁时的交流磁感应强度 $B_K = 4200$ (高斯)。

根据这些基本参数，即可进行磁饱和电抗器的铁芯体积计算：

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{10000 \times 10^8}{8.88 \times 50 \times 28 \sqrt{12000^2 - 4200^2}} \\ &= \frac{10000 \times 10^8}{8.88 \times 50 \times 28 \times 11241} = \frac{10000 \times 10^8}{139748112} \end{aligned}$$

$$=7156 \quad (\text{厘米}^3)$$

在算出磁饱和电抗器的铁芯体积 V_c 之后，还应估算一个单 Π 铁芯的结构尺寸。按上述经验估算法，即得：

$$V_c = 16.4A^3$$

则一个单 Π 铁芯的柱片宽度为：

$$A = \sqrt[3]{\frac{V_c}{16.4}} = \sqrt[3]{\frac{7156}{16.4}} = \sqrt[3]{436.34} = 7.5 \quad (\text{厘米})$$

根据 A 之计算值，即可得一个单 Π 铁芯的几何结构尺寸：

$$\text{铁芯柱片宽度 } A = 7.5 \quad (\text{厘米})$$

$$\text{铁芯叠合厚度 } B = 2A = 2 \times 7.5 = 15 \quad (\text{厘米})$$

$$\text{铁芯窗孔宽度 } C = 0.6 \times 7.5 = 4.5 \quad (\text{厘米})$$

$$\text{铁芯窗孔高度 } h = 2A = 2 \times 7.5 = 15 \quad (\text{厘米})$$

$$\begin{aligned} \text{铁芯磁路平均长度 } L_{CT} &= 2(C+h) + \pi A \\ &= 2(4.5+15) + 3.14 \times 7.5 \\ &= 39 + 23.55 = 62.55 \quad (\text{厘米}) \end{aligned}$$

$$\text{铁芯高度 } H = h + 2A = 15 + 2 \times 7.5 = 30 \quad (\text{厘米})$$

$$\text{铁芯长度 } L = C + 2A = 4.5 + 2 \times 7.5 = 19.5 \quad (\text{厘米})$$

$$\text{铁芯截面积 } S_c = 2A^2 = 2 \times 7.5^2 = 112.5 \quad (\text{厘米}^2)$$

考虑到0.93的占空系数，可得铁芯有效截面积 $S_c = 0.93 \times 112.5 = 104 \quad (\text{厘米}^2)$ 。

根据一个单 Π 铁芯的结构尺寸，即可得出整个饱和电抗器的铁芯结构尺寸，如图6-3所示

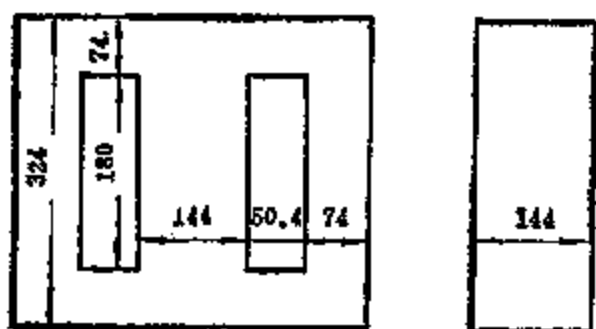


图6-3

2. 绕组匝数计算

在计算绕组匝数时，可按上述三种不同的公式进行。

通常，先就其中一个进行计算，然后由其余公式进

行计算比较。当发现有出入时，对单件生产，应首先以满足所给定的原始数据为前提，取其较大者。若对成批生产，还应考虑降低成本以提高经济效益的因素，然后进行综合比较定其取舍。

(1) 交流绕组匝数

$$N_{\sim} = \frac{U_{\sim} \times 10^8}{8.88f \cdot B \cdot S_c} = \frac{220 \times 10^8}{8.88 \times 50 \times 12000 \times 104} \\ = 40 \quad (\text{匝})$$

$$N_{\sim} = \frac{H_K L_{CT}}{I_H} = \frac{28 \times 62.55}{31.62} = 55 \quad (\text{匝})$$

$$N_{\sim} = \frac{H_0 L_{CT}}{I_0} = \frac{5 \times 62.55}{6} = 52 \quad (\text{匝})$$

将上述算式得到的交流绕组匝数取其平均值。即

$$N_{\sim} = \frac{40 + 55 + 52}{3} = 49 \quad (\text{匝})$$

(2) 直流(控制)绕组匝数：通过上面计算，得出交流的安匝数 $N_{\sim} I_H = 49 \times 31.62 = 1549$ 安匝。如果，按输入等于输出的观点，假设流经直流绕组的电流 $I_c = 1$ 安培，则直流绕组匝数即可按下式求得

$$N_c = \frac{N_{\sim} I_H}{I_c} = \frac{49 \times 31.62}{1} = 1549 \quad (\text{匝})$$

(3) 位移绕组匝数：位移绕组安匝，应等于无直流激磁时的交流绕组安匝。因此，只要确定了流经位移绕组的直流电流(设 $I_c = 1$ 安培)，则位移绕组的匝数即可求出。即

$$N_c I_0 = H_0 L_{CT} = 5 \times 62.55 = 312.75 \quad (\text{安匝})$$

位移绕组匝数为：

$$N_c = \frac{N_c I_0}{I_c} = \frac{312.75}{1} = 313 \quad (\text{匝})$$

上述各绕组匝数算出之后，为便于调整电流变化倍数(即线性范围)，要求将各绕组的最后部分抽出若干头。一般，抽头之

间的匝数大约为总匝数的3~5%。

3. 绕组导线计算

各绕组导线应根据流经各绕组的电流，以及电流密度，从表1-5或至表1-8中求得。

本设计中，由于给定负载功率大，因此，为避免磁饱和电抗器发热严重，这里确定：

交流绕组电流密度 j 不得超过1.5安培/毫米²；

直流绕组电流密度 j 不得超过1.8安培/毫米²；

位移绕组电流密度 j 不得超过2—3安培/毫米²。

根据交流绕组电流 $I_H=31.62$ 安培， $j=1.5$ 安培/毫米²，则绕组导线即可从表1-8中求得 3.26×6.4 毫米²的双纱包扁线，其最大尺寸为 3.63×6.73 毫米²；直流绕组电流 $I_L=1$ 安培，电流密度 $j=1.8$ 安培/毫米²，则绕组线径即可从表1-6中求得 $d_L=0.83$ 毫米，其最大外径 $=_m d_L=0.92$ 毫米。

位移绕组电流 $I_C=1$ 安培， $j=2$ 安培/毫米²，则绕组线径即可从表1-6中求得 $d_C=0.8$ 毫米，其最大外径 $d_{Cm}=0.89$ 毫米。

4. 绕组结构计算

确定各绕组应在骨架上绕制。由于给定数据中没有提出具体的绝缘要求，因此，各绕组的绝缘均以满足机械强度为出发点，确定骨架内墙板厚度为6毫米，骨架高度为150毫米，各绕组层间绝缘采用0.12毫米厚的电缆纸一层，组间及各绕组外包绝缘均用同样厚度的电缆纸3层。

为了防止绕组脱圈，骨架两端各空出10毫米，则绕线宽度 L_0 为 $150-20=130$ 毫米。

另外，从表1-10中求得各绕组的排绕系数 $K_{排}=1.05$ 叠绕系数 $K_{叠}=1.15$ 。

根据上述的基本数据，即可进行各绕组结构计算。

(1) 交流绕组结构

交流绕组每层匝数，

$$a_{\sim} = \frac{L_0}{d_m K_{\text{排}}} = \frac{130}{6.73 \times 1.05} = 18 \quad (\text{匝})$$

交流绕组层数:

$$a_{\sim}' = \frac{N_{\sim}}{a_{\sim}} = \frac{49}{18} \div 3 \quad (\text{层})$$

交流绕组厚度:

$$\begin{aligned} \delta_{\sim} &= K_{\text{叠}} a_{\sim}' (d_{\sim m} + 0.12) + 3 \times 0.12 + 6 \\ &= 1.15 \times 3 (3.63 + 0.12) + 0.36 + 6 \\ &= 1.15 \times 3 \times 3.75 + 6.36 = 19.3 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

2) 直流绕组和位移绕组结构

直流绕组每层匝数:

$$a_{-} = \frac{L_0}{d_{-m} K_{\text{排}}} = \frac{130}{0.92 \times 1.05} = 134 \quad (\text{匝/层})$$

直流绕组层数:

$$a_{-}' = \frac{N_{-}}{a_{-}} = \frac{1549}{134} = 12$$

直流绕组厚度:

$$\begin{aligned} \delta_{-} &= K_{\text{叠}} a_{-}' (d_{-m} + 0.12) + 3 \times 0.12 + 6 \\ &= 1.15 \times 12 (0.92 + 0.12) + 0.36 + 6 \\ &= 14.352 + 6.36 = 20.712 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

(3) 位移绕组每层匝数

$$a_c = \frac{L_0}{d_{cm} K_{\text{排}}} = \frac{130}{0.89 \times 1.05} = 139 \quad (\text{匝/层})$$

位移绕组层数:

$$a_c' = \frac{N_c}{a_c} = \frac{313}{139} \div 2 (\text{取} 3) \quad (\text{层})$$

位移绕组厚度:

$$\begin{aligned} \delta_c &= K_{\text{叠}} a_c' (d_{cm} + 0.12) + 3 \times 0.12 \\ &= 1.15 \times 3 (0.89 + 0.12) + 3 \times 0.12 \end{aligned}$$

$$= 3.485 + 0.36 = 3.84 \quad (\text{毫米})$$

(4) 直流绕组和位移绕组总厚度

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_{-} + \delta_{c} = 20.712 + 3.84 \\ &= 24.6 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

(5) 绕组总厚度

$$\begin{aligned} D_m &= \delta_{-} + \delta = 19.3 + 24.6 \\ &= 43.85 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

绕组结构计算结果，其绕组总厚度未能超过前面确定的铁芯窗孔宽度，则计算可取。

4. 直流绕组和位移绕组供电电压计算

(1) 绕组平均匝长

$$\begin{aligned} L_m &= 2(2A + B) + \pi\delta \\ &= 2(2 \times 7.5 + 15) + 3.14 \times 2.46 \\ &= 60 + 7.7 = 67.6 \quad (\text{厘米}) \end{aligned}$$

(2) 直流绕组用线长度

$$l_{-} = N_{-} L_m = 67.7 \times 1549 \times 10^{-2} = 1049 \quad (\text{米})$$

(3) 位移绕组用线长度

$$L_c = N_c L_m = 313 \times 67.7 \times 10^{-2} = 212 \quad (\text{米})$$

(4) 直流绕组铜阻

$$R_{-} = K_{\tau} L_{-} R_{20^{\circ}\text{C}} \times 10^{-3}$$

(式中 K_{τ} 从曲线 1-3 中求得为 1.1, $R_{20^{\circ}\text{C}}$ 从表 1-6 中求得为 32.4 欧/千米) 则

$$\begin{aligned} R_{-} &= 1.1 \times 1049 \times 32.4 \times 10^{-3} \\ &= 37.4 \quad (\text{欧}) \end{aligned}$$

(5) 位移绕组铜阻

$$R_c = K_{\tau} L_c R_{20^{\circ}\text{C}} \times 10^{-3}$$

(式中 K_{τ} 之值同上, $R_{20^{\circ}\text{C}}$ 从表 1-6 中求得为 34.8 欧姆/千米), 则

$$R_c = 1.1 \times 212 \times 34.8 \times 10^{-3} = 8.1 \quad (\text{欧})$$

(6) 直流绕组供电电压

$$U_{\text{L}} = I_{\text{L}}^2 R_{\text{L}} = 1^2 \times 37.4 = 37.4 \quad (\text{伏})$$

(7) 位移绕组供电电压

$$U_{\text{C}} = I_{\text{C}}^2 R_{\text{C}} = 1^2 \times 8.1 = 8.1 \quad (\text{伏})。$$

第七单元 电压互感器设计计算

电压互感器在仪用互感器中，俗称表用变压器。它在电力系统中，早已得到广泛应用。至目前为止，它仍被视为该系统不可缺少的电压鉴别器件。而且，高精度的电压互感器，常被视为标准的电压鉴别器件，并用它来鉴别其它电压检测元、器件的精度等级。因此，在设计计算电压互感器的时候，必须进行精确度的计算，即比差和相差的计算。精确度要求高的电压互感器，它的比差和相差都要求很小，同时对它的铁芯结构和铁芯材料也有一定要求，并对其绕组导线的电流密度和铁芯材料的磁感应强度也有一定要求（即两者取值较低）。其目的是为了尽量减少铜、铁损耗，便于在设计计算的过程中少经往复调整，即能满足电压互感器所需的精度要求。因此，电压互感器的设计计算，不同于普通变压器的设计计算。相比之下，电压互感器的重点，在于精确度的计算，而对发热的问题，则毋须特别重视。

1. 每匝电压计算

电压互感器的每匝电压，应视电压互感器的额定负荷及额定电压的高低而定。

假设每匝电压在0.4~1之间时，一般可利用下面经验公式进行计算，

$$e=c\sqrt{VA} \quad (\text{伏/匝})$$

式中，

e ——电压互感器每匝电压（伏/匝）；

VA ——电压互感器额定负荷（伏安）；

c ——常数。

对单相电压互感器可取0.06；

对三相电压互感器可取0.04~0.05。

如果要设计一只0.2级的电压互感器，仅依上式中所求得的每匝电压未必就能获得理想的比差和相差。因此，在计算过程中，必须进行调整加工，即根据初步计算得到的结果，视其比差和相差的大小，进行调整。如当计算结果不满足具体要求时，可先降低绕组导线的电流密度，以改变绕组导线的尺寸，或降低铁芯材料的磁感应强度，以改变绕组匝数之后，再进行第二次计算，尽可能求得合理的绕组结构尺寸。这样往复调整计算，最后，使比差和相差都接近于零时，则有可能获得一只0.2级的电压互感器。

2. 铁芯截面计算

当铁芯材料若为含硅量4%的硅钢片时，则磁感应强度B可取10000高斯以上，而铁芯截面即为：

$$S_c = \frac{e \times 10^8}{4.44f \cdot B} \quad (\text{厘米}^2)$$

为满足电压互感器的精度要求，应尽量减少绕组的漏感和铜耗。因此，一般将铁芯截面制成圆形。因为相同的截面，圆的周长最短。

这样，就必须根据上式算得的铁芯截面 S_c ，再按下式换算出铁芯直径 D_c ，即：

$$D_c = 1.13 \sqrt{\frac{S_c}{K_s f_c}} \quad (\text{厘米})$$

式中：

D_c ——铁芯直径（厘米）；

K_c ——硅钢片绝缘系数0.92~0.96；

f_c ——铁芯填隙系数（看表7—1）。

铁芯材料的磁感应强度B的选取，应随电压互感器的精度等级而定。一般精度要求高的取低一些，反之取高一些。

同时，铁芯柱的截面积和铁轭的截面积不一定相等。往往是轭面大于柱面，一般可放大在5~10%。这样，不仅使总的损耗和

空载电流保持定值，而且对减少漏感及降低铜耗也是有利的。

3. 绕组匝数计算

初级绕组匝数：

$$N_1 = \frac{U_1}{e} \quad (\text{匝})$$

次级绕组匝数：

$$N_2 = \frac{U_2}{e} \quad (\text{匝})$$

4. 绕组电流计算

电压互感器的电流密度同普通变压器相比，一般都选值较低，用线也较粗。加以铁芯材料的磁感应强度B之选值也不高，故铁芯的损耗电流在绕组中引起的铜损也不大。因此，在计算绕组导线的时候，可直接按电压互感器的负荷大小与电压之比所求得的电流值来进行计算。

单相：

初级绕组电流：

$$I_1 = \frac{VA}{U_1} \quad (\text{安})$$

次级绕组电流：

$$I_2 = \frac{VA}{U_2} \quad (\text{安})$$

三相：

初级绕组电流：

$$I_1 = \frac{VA}{\sqrt{3} U_1} \quad (\text{安})$$

次级绕组电流：

$$I_2 = \frac{VA}{\sqrt{3} U_2} \quad (\text{安})$$

式中：

VA——电压互感器额定负荷（伏安），

U_1 ——电压互感器初级电压 (伏) ;

(单相指相电压, 三相指线电压)

U_2 ——电压互感器次级电压 (伏)

(单相指相电压, 三相指线电压)。

5. 绕组导线计算

电压互感器的绕组电流密度 j , 一般在 $0.4 \sim 0.8$ 之间选用。如果有时因负荷低, 电压高、电流小所选导线太细而绕制困难时, 还可将电流密度取得更低一些。此外, 电流密度 j 的选用, 还必须视其电压互感器的精度高低, 即比差和相差的大小而定。

绕组导线可从下式求得。

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}} \quad (\text{毫米})$$

d 算出之后, 应从表1—5或至表1—8中求得实用值。

6. 绕组导线电阻计算

电压互感器绕组导线的直流电阻, 是影响电压互感器精度等级的一个重要因素, 由于绕组温度不高, 故可按环境温度为 25°C 来进行计算。即

$$R_{25^\circ\text{C}} = 0.0181 \frac{L_i}{S_i} \quad (\text{欧})$$

式中:

$R_{25^\circ\text{C}}$ ——环境温度为 25°C 时的绕组导线直流电阻

L_i ——绕组导线长度 (米);

S_i ——绕组导线截面积 (毫米²)。

7. 漏抗计算

电压互感器的漏感所形成的漏抗即使在工频状态下, 也是影响电压互感器精度的又一重要因素。其算法如下:

$$L_{S1} = \frac{1.26 N_1^2 L_{m1} \times 10^{-8}}{h_1} \left(\frac{\delta_0}{2} + \frac{\delta_1}{3} \right) \quad (\text{亨})$$

式中:

- L_{S1} ——初级绕组漏感 (亨) ;
 N_1 ——初级绕组匝数;
 L_{m1} ——初级绕组平均匝长 (厘米) ;
 δ_0 ——初、次级绕组之间的空隙 (厘米) ;
 δ_1 ——初级绕组厚度 (厘米) ;
 h_1 ——初级绕组高度 (厘米) 。

(2) 初级漏抗

$$X_{S1} = 2\pi f L_{S1} \quad (\text{欧})$$

(3) 初次级等效漏感

$$L_S = \frac{1.26 N_1^2 L_{mCT} \times 10^{-8}}{h_{1CT}} \left(\delta_0 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right)$$

式中:

- L_S ——初次级等效漏感 (亨) ;
 L_{mCT} ——初次级绕组平均匝长和的二分之一 (厘米)
 δ_1, δ_2 ——初、次级绕组厚度 (厘米)
 h_{1CT} ——初次级绕组高度的平均值 (厘米) 。

(4) 初次级等效漏抗

$$X = 2\pi f L_S \quad (\text{欧})。$$

8. 比差和相差计算

$$K_V = K_T + \frac{I_1 R + I_C R_1 + I_m X_{S1}}{U_1}$$

中式:

- K_V ——电压互感器的真实比;
 K_T ——初、次级绕组匝数比 (N_1/N_2) ;
 I_1 ——初级绕组中的电流 (安) ;
 R ——等效电阻 (折算到初级的) (欧) ;
 I_m ——磁化电流 (安) ;
 R_1 ——初级绕组电阻 (欧) ;
 X_{S1} ——初级绕组漏抗 (欧) ;

I_c ——铁芯损耗电流 (安) ;
 U_2 ——次级绕组额定电压 (伏) 。

相差计算可按下式进行:

$$\gamma = \frac{3438}{K_T U_2} (-I_1 X - I_c X_{S1} + I_m R_1)$$

式中:

γ ——相差;

X ——初次级等效漏抗 (欧) 。

比差和相差经计算之后, 是否需要调整, 一般除取决于精度等级之外, 还取决于使用对象。前者仅随精度等级而定。后者不仅取决于精度等级, 而且还取决于使用对象, 如对电压表、电流表、电度表则影响不大, 毋须调整。而对电力表则有必要。

9. 误差率计算

误差的大小, 一般以误差率表示。它是表示电压互感器精确度的主要参数。

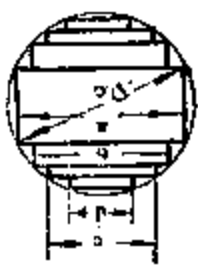
$$D = \frac{K_{nv} - K_v}{K_v} 100\%$$

式中:

K_{nv} ——电压互感器的标称比例 (U_1/U_2)

D 之值, 以不超过精度等级为限。

表 7-1

级 数	第一级	第二级	第三级	第四级	铁芯结构形状
a	0.707 D_c	0.851 D_c	0.906 D_c	0.933 D_c	
b		0.506 D_c	0.707 D_c	0.786 D_c	
c			0.424 D_c	0.607 D_c	
d				0.359 D_c	
填充系数	0.637	0.787	0.861	0.886	
绝缘系数 K_c	一般为0.93				

【例】设计一只0.2级的标准表用变压器，用以校准其它电压检测器件（原理图7—1）

其给定条件为：

1. 额定负荷：30VA
2. 输入电压：220伏
3. 输出电压：30000伏
4. 电源频率：赫
5. 精度等级：0.2级
6. 采用油浸自冷式
7. 次级绕组一端接地

按上述计算步骤：

1. 每匝电压

$$e = c \sqrt{VA}$$

(c按单相选用0.06)

则

$$e = 0.06 \sqrt{30} \approx 0.33 \text{ (伏/匝)}$$

2. 铁芯截面积

$$S_c = \frac{e \times 10^6}{4.44fB}$$

这里选用各向异性的冷轧硅钢片、D310、0.35毫米厚的铁芯材料（或更好一些的材料也可）。磁感应强度 $B=14000$ 高斯，磁场强度 $H=1.8$ 安匝/厘米，铁芯损耗 $P_o=1.25$ 瓦/公斤。截面积为：

$$S_c = \frac{0.33 \times 10^6}{4.44 \times 50 \times 14000} = 10.6 \text{ (厘米}^2\text{)}$$

为更进一步降低漏感（或漏抗）和减少铜损耗，将采用圆形铁芯截面，则铁芯直径为：

$$D_o = 1.13 \sqrt{\frac{S_c}{K_c f_o}}$$

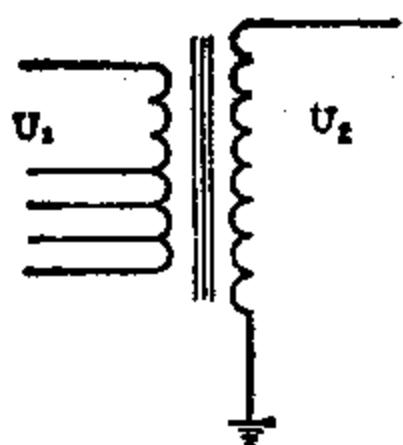


图 7—1

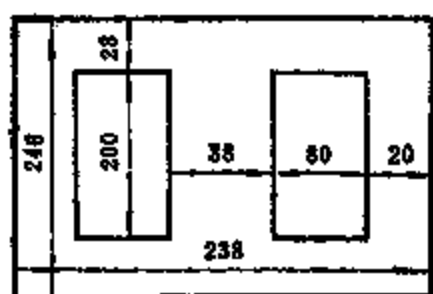
圆形铁芯截面积由三级组成，从表 7—1 中求得 $K_0=0.93$ ， $f_c=0.851$ ，则

$$D_c = 1.13 \sqrt{\frac{10.6}{0.93 \times 0.851}} = 1.13 \times 3.66 = 4.14 \text{ (厘米)}$$

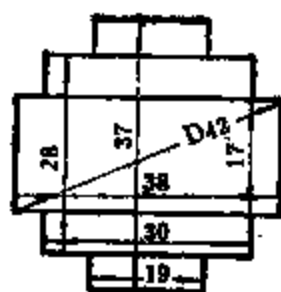
(D_c 之值取整数 4 厘米)。

根据上式算得的铁芯截面积 S_c 或铁芯直径 D_c ，先估算一个壳式铁芯的结构尺寸，

- 铁芯窗孔宽度 $c=80$ (毫米)
 - 铁芯窗孔高度 $h=200$ (毫米)
 - 铁芯边柱宽度为 $=20$ (毫米)
 - 铁芯中柱直径 $D_c=40$ (毫米)
 - 铁芯中柱宽度为 38 (毫米)
 - 铁芯轭铁宽度为 23 (毫米)
 - 铁芯磁路平均长度为 655 (毫米)
- 由此可得图 7—2 的铁芯结构。



(a) 铁芯结构尺寸



(b) 铁芯中柱结构

图 7—2

3. 绕组匝数计算

初级绕组匝数，

$$N_1 = \frac{U_1}{e} = \frac{220}{0.33} = 667 \text{ (匝)}$$

次级绕组匝数，

$$N_2 = \frac{U_2}{e} = \frac{30000}{3.33} = 90910 \text{ (匝)}。$$

4. 绕组电流

(铁芯损耗电流略去不

计)

初级绕组电流:

$$I_1 = \frac{VA}{U_1} = \frac{30}{220}$$

$$= 0.14 \text{ (安)}$$

次级绕组电流:

$$I_2 = \frac{VA}{U_2} = \frac{30}{30000}$$

$$= 0.001 \text{ (安)}$$

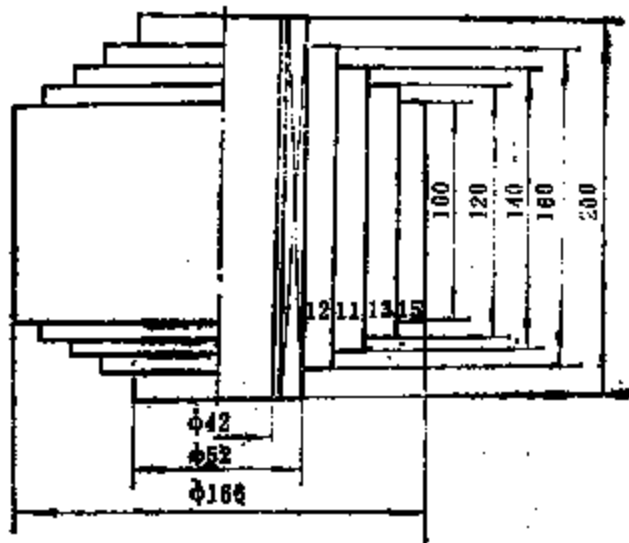


图 7-3

5. 绕组导线计算

取绕组导线的电流密度 $j = 0.4$ 安/毫米², 则

初级绕组线径:

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.14}{0.4}} = 0.668 \text{ (毫米)}$$

次级绕组线径:

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.001}{0.4}} = 0.056 \text{ (毫米)}$$

为尽量减少调整精度计算的往复次数。将导线用粗一些。因此, 从表1—8中求得 $d_1 = 1.04$ 毫米, 最大外径 $d_{1m} = 1.15$ 毫米。从表1—5中求得 $d_2 = 0.15$ 毫米, 最大外径 $d_{2m} = 0.19$ 毫米。

6. 绕组结构计算

绕组结构计算可参照中等功率变压器的方法进行(图7-3)。

在本例中, 由于绕组工作电压高, 特别是次级已达 30000 伏的高压, 其绕组结构计算, 除满足机械强度之外, 更重要的是要满足绝缘强度的要求。为此, 确定初级绕组均在同一骨架上绕制, 先绕低压, 后绕高压, 绕组骨架高度为 200 毫米, 骨架内墙板厚度为 3 毫米。

另外，为降低绕组铜损耗及漏抗，以及使初、次级之间的绝缘得到保证，特将次级绕组靠近初级的一端作为所需的接地端。

用于初级绕组工作电压不高，故其绕组绝缘及一些基本结构参数主要从满足机械强度的角度加以考虑。这里将绕组骨架两端各空出8毫米，则初级绕线宽度 $L_{c1}=200-16 \approx 184$ 毫米。绕组层间绝缘选用0.12毫米厚的电缆纸一层，绕组外包绝缘同样厚度的电缆纸6层。

另外，从表 1—10 中求得绕组排绕系数 $K_{排}=1.05$ ，叠绕系数 $K_{叠}=1.15$ 。则

(1) 初级绕组每层匝数

$$a_1 = \frac{L_{c1}}{d_{1m} K_{排}} = \frac{184}{1.15 \times 1.05} \approx 152 \text{ (匝/层)}$$

(2) 初级绕组层数

$$a_1' = \frac{N_1}{a_1} = \frac{667}{152} \approx 5 \text{ (层)}$$

(3) 初级绕组厚度

$$\delta_1 = K_{叠} a_1' (d_{1m} + \text{层间绝缘}) + 3 + 6 \times 0.12$$

为尽量减小绕组结构尺寸，采用表 1—20 中的0.05毫米厚的聚脂薄膜作层间绝缘，则

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 1.15 \times 5(1.15 + 0.05) + 3 + 0.72 \\ &= 10.62 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

(4) 初级用线长度

$$\begin{aligned} L_{11} &= \pi(D_c + \delta_1)N_1 = 3.14(40 + 10.62) \times 667 \times 10^{-3} \\ &= 106 \text{ (米)} \end{aligned}$$

由于次级绕组工作电压已达 30000 伏的高压，因此确定次级绕组由四级组成：

第一级绕线宽度为170毫米，绝缘宽度为185毫米；

第二级绕线宽度为160毫米，绝缘宽度为170毫米；

第三级绕线宽度为140毫米，绝缘宽度为160毫米；

第四级绕线宽度为120毫米，绝缘宽度为140毫米。

对于各绕组的层间绝缘，均按各绕组层间工作电压的高低而定。

这里，根据表1—20中提供的材料性能，再加上绕组采用高强度漆包线，以及绕组油浸后所取得的良好绝缘效果，提出各级绕组绝缘的参考值。

绕组第一级层间工作电压预计不超过550伏，选用 2×0.05 （电话纸）+ 1×0.05 （聚脂薄膜），作为层间绝缘。

绕组第二级层间工作电压，预计不超过510伏，选用与第一级相同的材料作为层间绝缘；

绕组第三级层间工作电压，预计不超过450伏，选用 3×0.05 （电话纸）作为层间绝缘。

绕组第四级层间工作电压，预计不超过380伏，选用 2×0.08 （电缆纸）作为层间绝缘。

另外，再从表1—10中求得绕组排绕系数 $K_{排}=1.1$ 。绕组叠绕系数 $K_{叠}=1.15$ 。

第一级绕组匝数为32500匝，可提供的电压为10725伏。

绕组每层匝数为：

$$a_{2.1} = \frac{170}{d_{2m} K_{排}} = \frac{170}{0.19 \times 1.1} \approx 813 \text{ (匝/层)}$$

绕组层数为：

$$a'_{2.1} = \frac{N_{2.1}}{a_{2.1}} = \frac{32500}{813} \approx 40 \text{ (层)}$$

绕组厚度为：

$$\begin{aligned} \delta_{2.1} &= K_{叠} a'_{2.1} (d_{2m} + 3 \times 0.05) \\ &= 1.15 \times 40 (0.19 + 0.15) \\ &= 15.64 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

第二级绕组匝数为22900匝，可提供的电压为7557伏。

绕组每层匝数为：

$$a_{2.2} = \frac{160}{d_{2m} K_{排}} = \frac{160}{0.19 \times 1.1} = 765 \text{ (匝/层)}$$

绕组层数为:

$$a'_{2.2} = \frac{N_{2.2}}{a_{2.2}} = \frac{22900}{765} \approx 30 \text{ (层)}$$

绕组厚度为:

$$\begin{aligned} \delta_{2.2} &= K_{叠} a'_{2.2} (d_{2m} + 3 \times 0.05) \\ &= 1.15 \times 30 (0.19 + 0.15) \\ &= 11.73 \text{ (毫米)}. \end{aligned}$$

第三级绕组匝数为20000匝, 可提供的电压为6600伏。

绕组每层匝数为:

$$a_{2.3} = \frac{140}{d_{2m} K_{排}} = \frac{140}{0.19 \times 1.1} = 669 \text{ (匝/层)}$$

绕组层数为:

$$a'_{2.3} = \frac{N_{2.3}}{a_{2.3}} = \frac{20000}{669} \approx 30 \text{ (层)}$$

绕组厚度为:

$$\begin{aligned} \delta_{2.3} &= K_{叠} a'_{2.3} (d_{2m} + 3 \times 0.05) \\ &= 1.15 \times 30 \times (0.19 + 0.15) \\ &= 11.73 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

第四级绕组匝数为15510匝, 可提供的电压为6118.3伏。

绕组每层匝数为:

$$a_{2.4} = \frac{120}{d_{2m} K_{排}} = \frac{120}{0.19 \times 1.1} = 574 \text{ (匝/层)}$$

绕组层数为:

$$a'_{2.4} = \frac{N_{2.4}}{a_{2.4}} = \frac{15510}{574} \approx 28 \text{ (层)}$$

绕组厚度为:

$$\delta_{2.4} = K_{叠} a'_{2.4} (d_{2m} + 2 \times 0.08)$$

$$= 1.15 \times 28 (0.19 + 0.16)$$

$$= 11.27 \text{ (毫米)}$$

绕组总厚度为:

$$\delta_2 = \delta_{2.1} + \delta_{2.2} + \delta_{2.3} + \delta_{2.4}$$

$$= 15.64 + 11.73 + 11.73 + 11.27$$

$$= 50.37 \text{ (毫米)}$$

次级绕组用线长度为:

$$L_{12} = \pi (D_c + 2\delta_1 + \delta_2) N_2$$

$$= 3.14 (40 + 2 \times 10.62 + 50.37) \times 90910 \times 10^{-3}$$

$$= 31860 \text{ (米)}$$

7. 绕组导线直流电阻

(1) 初级绕组导线的直流电阻

$$R_{25^\circ\text{C}_1} = 0.0181 \frac{L_{11}}{S_{1.1}}$$

$$= \frac{0.0181 \times 106}{0.8495}$$

$$= 2.259 \text{ (欧)}$$

(2) 次级绕组导线的直流电阻

$$R_{25^\circ\text{C}_2} = 0.0181 \frac{L_{12}}{S_{1.2}}$$

$$= 0.0181 \frac{31860}{0.0177}$$

$$= 32580 \text{ (欧)}$$

(3) 次级折合到初级的等效电阻

$$R'_{25^\circ\text{C}_2} = \frac{R_{25^\circ\text{C}_2}}{n^2} = \frac{R_{25^\circ\text{C}_2}}{\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2}$$

$$= \frac{32580}{\left(\frac{30000}{220}\right)^2} = \frac{32580}{18595}$$

$$=1.75 \text{ (欧)}$$

8. 漏抗计算

(1) 初级漏感

$$\begin{aligned} L_{s1} &= \frac{1.26 N_1^2 L_{m1}}{h_1} \left(\frac{\delta_0}{2} + \frac{\delta_1}{2} \right) \times 10^{-8} \\ &= \frac{1.26 \times 667^2 \times 15.9}{18} \left(\frac{0.072}{2} + \frac{1.062}{3} \right) \times 10^{-8} \\ &= 495161 \times 0.39 \times 10^{-8} \\ &= 0.00193 \text{ (亨)} \end{aligned}$$

(2) 初级漏抗

$$\begin{aligned} X_{s1} &= 2\pi f L_{s1} = 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.00193 \\ &= 0.606 \text{ (欧)} \end{aligned}$$

(3) 初次级等效漏感

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{1.26 N_1^2 L_{mCT}}{h_{1CT}} \left(\delta_0 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right) \times 10^{-8} \\ &= \frac{1.26 \times 667^2 \times 25.5}{16.4} \left(0.072 + \frac{1.062 + 5.037}{3} \right) \times 10^{-8} \\ &= 861101 \times 2.105 \times 10^{-8} \\ &= 0.018 \text{ (亨)} \end{aligned}$$

(4) 初次级等效漏抗

$$\begin{aligned} X &= 2\pi f L_s = 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.018 \\ &= 5.652 \text{ (欧)} \end{aligned}$$

9. 比差和相差计算

$$K_V = K_T + \frac{I_1 R + I_C R_1 + I_m X_{s1}}{U_2}$$

式中:

$$K_T = \frac{N_1}{N_2} = \frac{667}{90910} = 0.007336$$

$$I_C = \frac{P_C G_C}{U_1} = \frac{1.25 \times S_C L_{CT} \times 7.8 \times 10^{-8}}{U_1}$$

$$= \frac{1.25 \times 10.6 \times 65.5 \times 7.8 \times 10^{-8}}{220}$$

$$= 0.031 \text{ (安)}$$

$$I_m = \frac{H \cdot L_{CT}}{N_1} = \frac{1.8 \times 65.5}{667} = 0.177 \text{ (安)}$$

则

$$K_v = 0.00733 +$$

$$\frac{0.136 \times 1.755 + 0.031 \times 2.259 + 0.177 \times 0.6060}{30000}$$

$$= 0.007226 + 0.0000138 = 0.007349$$

10. 误差率计算

$$D = \frac{K_{nv} - K_v}{K_v} \times 100\% \quad (K_{nv} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{30000} = 0.00733)$$

$$= \frac{0.00733 - 0.007349}{0.007349} \times 100\% = -0.0026 \times 100\%$$

经计算误差率D已接近于零，因此，要获得一只0.2级的电压互感器是可能的。

由于本设计计算，是指电压互感器，所以相差即可免算了。

第八单元 高频电源变压器设计计算

在军事技术及宇宙空间技术等领域中，使用了大量的无线电电子仪器设备。其电源频率多是400赫，500赫，800赫、1000赫，甚致2400赫。

采用如此高的电源频率，其目的就是为了大大减小变压器本身的体积和重量，以减小整个设备的体积和重量。所以高频电源变压器，就以它不同于50赫电源变压器的这一使用特点，被广范用于军事技术及宇宙空间技术等领域中。

但是，这类变压器在高频工作时，其铁芯损耗，要比50周时大得多。故在设计计算中，对铁芯材料的磁感应强度 B 的选值，应比磁性材料本身的饱和磁感应强度低得多。即使如此，铁芯的温升有时都还可能超过一般绝缘材料所能允许的工作温度。所以，应尽可能选用耐温等级高的绝缘材料。（可参考表1—22中所提供的数值）。

此外，为了防止铁芯过热，必须尽量减小铁芯的涡流损耗。为此，通常选用薄钢带料制成铁芯，如选用0.2毫米、0.1毫米、0.08毫米，以及0.05毫米等厚度的薄钢带料。若电源频率更高时，还可选用铁氧体铁芯。

对于高频电源变压器，如果磁性材料和绝缘材料选用得当，则当容量相同时（或其他给定条件都不变的情况下），800赫变压器的体积要比50赫变压器的体积小90%。

其设计计算步骤分为：变压器次级功率计算、铁芯计算、每匝感应电势计算，绕组匝数计算，绕组电流计算，绕组导线计算等。

1. 变压器次级功率计算

$$P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + U_4 I_4 + \dots + U_n I_n \quad (\text{瓦})$$

式中:

P_2 ——变压器次级功率 (瓦);

$U_2, U_3, U_4, \dots, U_n$ ——变压器次级各绕组的电压(伏);

$I_2, I_3, I_4, \dots, I_n$ ——变压器次级各绕组中的热效应电流

(倍)。

2. 铁芯计算

$$S_o S_c = \frac{P_2 (1 + \eta) \times 10^8}{4.44 f B_m j K_o K_c \eta}$$

式中:

S_c ——铁芯截面积 (厘米²);

S_o ——铁芯窗孔面积 (厘米²)。

B_m 之值, 一般可按变压器次级功率、电源频率、以及选用的铁芯材料从曲线8—1中和曲线8—2中和曲线8—3中求得。

j ——绕组导线的电流密度 (安/毫米²);

K_o ——铁芯的占空系数 (一般取0.9);

K_c ——铜线在铁芯窗孔中的占空系数。

K_o 之值, 可按变压器次级功率的大小, 从曲线8—6中求得。

η 为变压器效率

η 之值可按变压器次级功率大小, 从曲线8—5中求得。

$S_o S_c$ 之值, 不仅能按上式计算得到。而且还可以根据变压器次级功率的大小, 温升的高低、电源频率高低, 以及不同的铁芯材料, 从曲线8—7中、曲线8—8中, 以及曲线8—9中求得。

但是, 无论是经计算得到的 $S_o S_c$ 之值, 还是从各曲线中求得的 $S_o S_c$ 之值, 都应根据标准铁芯系列选用。所以, 从上述方法获得的 $S_o S_c$ 之值, 再从表8—1中或8—2中去比较, 最后应以标准系列铁芯中获得的值作为后面计算的参考值。

3. 每匝感应电势计算

$$e = 4.44 f B_m S_c K_o \times 10^{-8} \quad (\text{伏/匝})$$

4. 绕组匝数计算

初级绕组匝数:

$$N_1 = \frac{U_1 \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)}{e}$$

ΔU 之值可从曲线8—10中求得。

次级绕组匝数:

$$N_2 = \frac{U_2 \left(1 + \frac{\Delta U}{100}\right)}{e}$$

$$N_n = \frac{U_n \left(1 + \frac{\Delta U}{100}\right)}{e} \quad (\text{匝})$$

式中:

U_2, \dots, U_n 为次级各绕组电压 (伏)

5. 绕组电流计算

(1) 磁化电流

$$I_m = \frac{HL_{CT}}{N_1} \quad (\text{安})$$

式中:

I_m 为磁化电流 (安);

H 为磁场强度 (安匝/厘米)。

H 之值, 可从曲线8—11或曲线8—12中求得。

L_{CT} 为铁芯磁路平均长度 (厘米)

L_{CT} 之值, 可按 $S_o S_o$ 之值从表8—1中或表8—2中求得。

(2) 铁芯损耗电流

$$I_o = \frac{P_{Co} G_c}{U_1} \quad (\text{安})$$

式中:

I_c 铁芯损耗电流 (安);

G_c 铁芯重量 (公斤)。

G_c 之值, 可根据 $S_o S_e$ 之值, 从表8—1中或表8—2中求得。

P_{c_0} 为铁芯单位损耗 (瓦/公斤)

P_{c_0} 可根据铁芯磁感应强度 B_m , 电源频率 f , 以及不同的铁芯材料, 从曲线8—13中或曲线8—14中求得。

(3) 次级绕组电流折合到初级绕组的电流

$$I' = I'_2 + I'_3 + I'_4 \cdots I'_n \text{ (安)}$$

式中:

I' 为各次级绕组电流折合到初级绕组的电流之和 (安)

$I'_2, I'_3, I'_4 \cdots I'_n$ 为各次级绕组电流折合到初级绕组中的电流 (安)

(4) 初级绕组电流

$$I_1 = \sqrt{(I' + I_c)^2 + I_m^2} \text{ (安)}$$

6. 绕组导线计算

各绕组导线, 可按各绕组中的电流, 及绕组导线电流密度, 从表1—5中或至表1—8中求得, 也可依下式求得。即

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}} \text{ (毫米)}$$

另外, 变压器的结构计算及温升等计算留在实例运算中加以介绍。

[例] 已知一只高频电源变压器的条件是:

1. 电源电压 $U_1 = 220$ (伏);

2. 电源频率 $f = 400$ (赫);

3. 次级绕组电压 $U_2 = 300$ (伏)

$U_3 = 500$ (伏);

4. 次级绕组电流 $I_2 = 0.15$ (安)

$I_3 = 0.1$ (安);

5. 环境温度 70°C ;

6. 温升 $t=35^{\circ}\text{C}$ 。

根据上述设计步骤:

1. 变压器次级功率计算

$$P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 = 300 \times 0.15 + 500 \times 0.1 \\ = 95 \quad (\text{瓦})$$

2. 铁芯计算

$$S_o S_c = \frac{P_2 (1 + \eta) \times 10^6}{4.44 f B_m K_c K_o \eta}$$

选用 D44、0.2 毫米厚的硅钢料制成铁芯、按变压器次级功率的大小从曲线 8—2 中求得 $B_m = 10000$ 高斯。

从曲线 8—4 中求得 $j = 2.7$ 安/毫米²

从曲线 8—6 中求得: $K_o = 0.262$;

从曲线 8—5 中求得: $\eta = 0.95$ 。

$$S_o S_c = \frac{95 (1 + 0.95) \times 10^6}{4.44 \times 400 \times 10000 \times 2.7 \times 0.95 \times 0.262} \\ = \frac{185.25 \times 10^6}{11935252.8} = 15.5 (\text{厘米}^4)$$

根据 $S_o S_c$ 之计算, 可从高频电源变压器铁芯标准系列表 8—1 中求得略大一些的铁芯为:

型号 LLI16 × 20;

截面积: $S_c = 3.2$ (厘米²);

窗孔截面积: $S_o = 6.4$ (厘米²);

窗孔高度: $a_o = 4$ (厘米);

窗孔宽度: $b_o = 1.6$ (厘米);

磁路平均长度: $L_{CT} = 13.7$ (厘米);

重量: $G_c = 0.299$ (公斤);

散热面积: $F_{ox} = 163.2$ (厘米²)。

3. 每匝感应电势计算

$$e = 4.44 f B_m S_o K_o \times 10^{-8}$$

$$= 4.44 \times 400 \times 10000 \times 0.9 \times 3.2 \times 10^{-8}$$

$$= 5115 \times 10^4 \times 10^{-8} = 0.51 \quad (\text{伏/匝})$$

4. 绕组匝数计算

从曲线8—10中求得: $\Delta U = 7.6\%$

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = \frac{U_1 \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)}{e} = \frac{220 \times \left(1 - \frac{7.6}{100}\right)}{0.51}$$

$$= \frac{220 \times 0.924}{0.51} = 399 \quad (\text{匝})$$

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{U_2 \left(1 + \frac{\Delta U}{100}\right)}{e} = \frac{300 \left(1 + \frac{7.6}{100}\right)}{0.51}$$

$$= \frac{300 \times 1.076}{0.51} = 633 \quad (\text{匝})$$

$$N_3 = \frac{U_3 \left(1 + \frac{\Delta U}{100}\right)}{e} = \frac{500 \left(1 + \frac{7.6}{100}\right)}{0.51}$$

$$= \frac{500 \times 1.076}{0.51} = 1055 \quad (\text{匝})$$

5. 绕组电流计算

(1) 磁化电流

$$I_m = \frac{HL_{CT}}{N_1}$$

从曲线8—11中求得 $H = 5.2$ 安匝/厘米1则

$$I_m = \frac{5.2 \times 13.7}{399} = 0.179 \quad (\text{安})$$

(2) 铁芯损耗电流

$$I_c = \frac{P_{Co} G_o}{U_1}$$

从曲线8—13中求得 $P_{Co} = 16$ 瓦/公斤, 则

$$I_c = \frac{16 \times 0.243}{220} = 0.0177 \quad (\text{安})$$

(3) 各绕组电流折合到初级绕组中的电流

$$\begin{aligned} I' &= I'_2 + I'_3 \\ &= \frac{U_2}{U_1} I_2 = \frac{U_3}{U_1} I_3 = \frac{300}{220} \times 0.15 = \frac{500}{220} \times 0.1 \\ &= 0.205 + 0.227 = 0.432 \quad (\text{安}) \end{aligned}$$

(4) 初级绕组

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{(I' + I_c)^2 + I_m^2} = \sqrt{(0.432 + 0.0177)^2 + 0.179^2} \\ &= \sqrt{0.202 + 0.032} = 0.484 \quad (\text{安}). \end{aligned}$$

6. 绕组导线计算

(1) 初级绕组线径

$$\begin{aligned} d_1 &= 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.484}{2.7}} \\ &= 1.13 \times 0.423 = 0.478 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

(2) 次级绕组线径

$$\begin{aligned} d_2 &= 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.15}{2.7}} \\ &= 1.13 \times 0.236 = 0.266 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_3 &= 1.13 \sqrt{\frac{I_3}{2.7}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.1}{2.7}} \\ &= 1.13 \times 0.192 = 0.217 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

根据 d_1 、 d_2 、 d_3 之计算值, 分别从表1—6中求得:

$d_1 = 0.47$ 毫米; $d_{1m} = 0.53$ 毫米; 每千米导线的直流电阻

$r_1 = 101$ 欧

从表1—5中求得;

$d_2=0.27$ 毫米; $d_{2m}=0.32$ 毫米; 每千米导线的直流电阻 $r_2=306$ 欧。

$d_3=0.23$ 毫米; $d_{3m}=0.28$ 毫米; 每千米导线的直流电阻 $r_3=422$ 欧。

7. 绕组结构计算

预先确定:

骨架高度为40毫米;

骨架内壁厚度为1毫米;

组间用0.12毫米厚的电缆纸3层;

初级层间用0.12毫米厚的电缆纸1层 (参考表1—11)

次级层间用0.08毫米厚的电缆纸1层 (参考表1—11)

骨架面端各空出2毫米

另外, 从表1—10中求得绕组排绕系数 $K_{排}=1.05$, 绕组叠绕系数 $K_{叠}=1.15$ 。

根据以上数据, 即可按小功率电源变压器绕组结构计算的方法进行计算。这里仅将计算结果列出如下:

初级绕组厚度 $\delta_1=6.6$ (毫米);

次级绕组厚度 $\delta_2=4$ (毫米)

$\delta_3=4.92$ (毫米);

(绕组总厚度 δ 之值小于铁芯窗孔宽度16毫米。此计算可取)

初级绕组平均匝长 $L_{m1}=84.9$ (毫米);

次级绕组平均匝长: $L_{m2}=113.76$ (毫米)

$L_{m3}=136.33$ (毫米);

初级绕组用线长度: $L_{11}=34$ (米);

次级绕组用线长度: $L_{12}=89$ (米)

$L_{13}=178$ (米);

8. 铜、铁损耗计算

(1) 初级绕组铜损耗

$$P_m = I_1^2 R_1 = I_1^2 K_T L_{11} R_{20} \cdot 1 \times 10^{-3} \quad (\text{瓦})$$

式中 K_T 从曲线1—3中求得为1.2。则

$$\begin{aligned} P_m &= 0.484^2 \times 1.2 \times 34 \times 101 \times 10^{-3} \\ &= 0.965 \quad (\text{瓦}) \end{aligned}$$

(2) 次级绕组铜损耗

$$\begin{aligned} P_{m_2} &= I_2^2 R_2 = I_2^2 K_T L_{l_2} R_{20^\circ\text{C}} \cdot 2 \times 10^{-3} \\ &= 0.15^2 \times 1.2 \times 89 \times 306 \times 10^{-3} \\ &= 0.74 \quad (\text{瓦}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{m_3} &= I_3^2 R_3 = I_3^2 K_T L_{l_3} R_{20^\circ\text{C}} \cdot 3 \times 10^{-3} \\ &= 0.1^2 \times 1.2 \times 178 \times 422 \times 10^{-3} \\ &= 0.90 \quad (\text{瓦}) \end{aligned}$$

(3) 绕组铜耗

$$\begin{aligned} P_m &= P_{m_1} + P_{m_2} + P_{m_3} \\ &= 0.965 + 0.74 + 0.90 = 2.605 \quad (\text{瓦}) \end{aligned}$$

9. 铁芯损耗计算

$$P_c = P_{c_0} G_0 = 16 \times 0.299 = 4.784 \quad (\text{瓦})$$

10. 变压器铜、铁损耗计算

$$P = P_m + P_c = 2.94 + 2.605 = 5.545 \quad (\text{瓦})$$

11. 温升计算

$$\Delta\tau = \frac{\Sigma P}{\alpha S_m}$$

式中:

ΣP ——铜、铁损耗之和 (瓦);

α ——变压器在空气中的表面散热系数

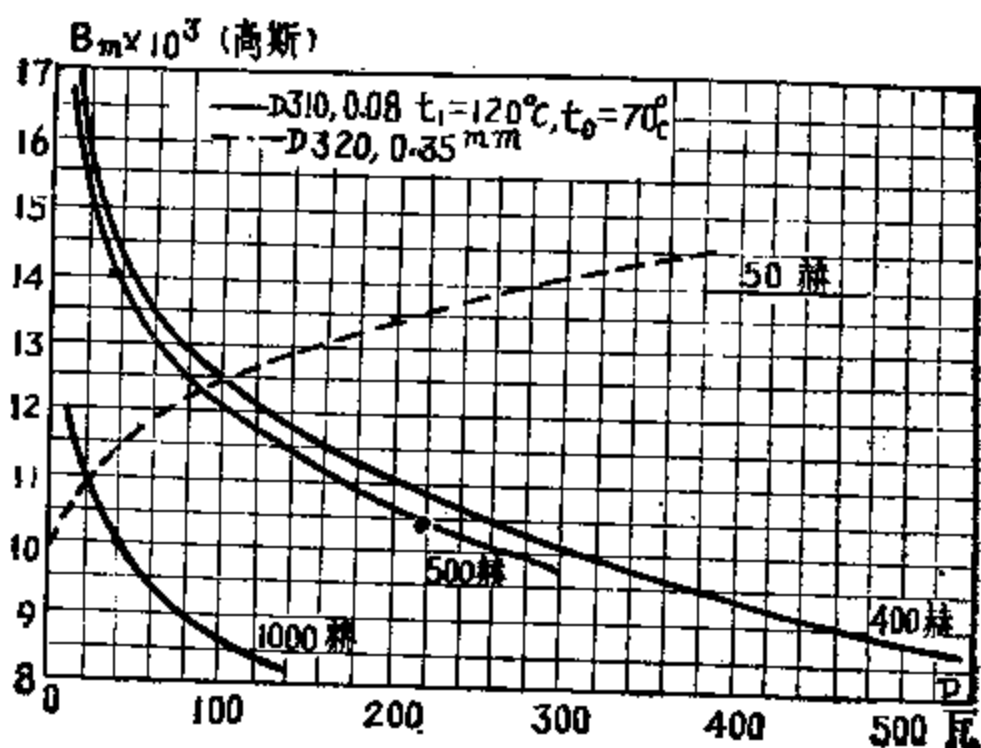
$$\alpha = 1.3 \times 10^{-2} \text{瓦/厘米}^2 \times \text{C}$$

S_m ——变压器散热面积 (厘米²)。

则

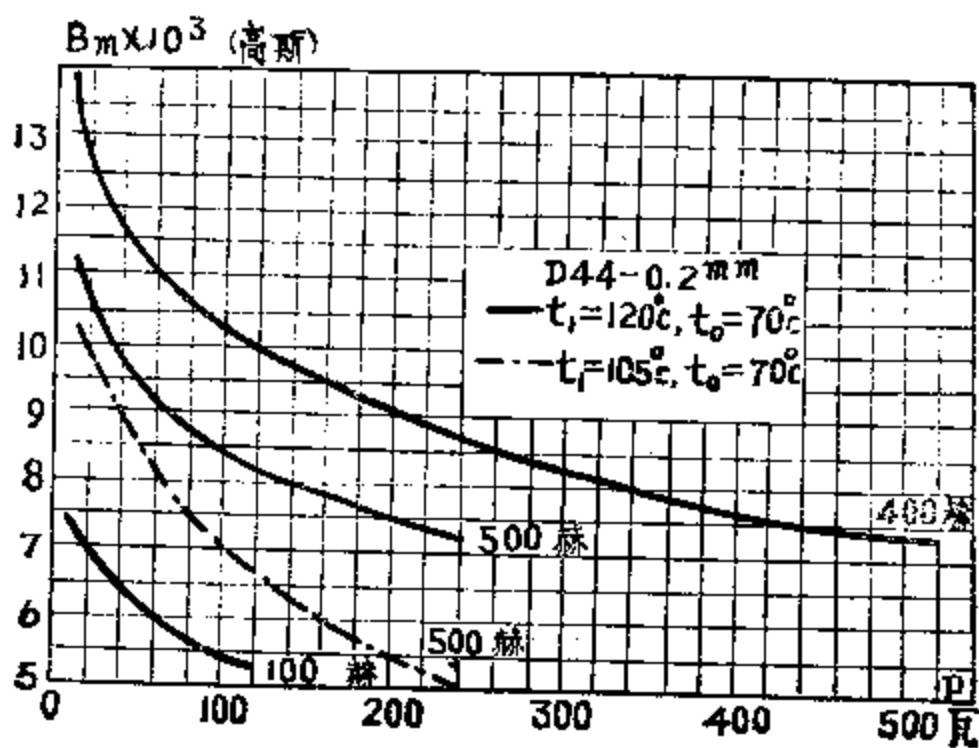
$$\Delta\tau = \frac{5.545}{1.3 \times 10^{-2} \times 163.2} = 26^\circ\text{C}$$

$\Delta\tau$ 之值, 未超过技术要求, 故此设计可取。



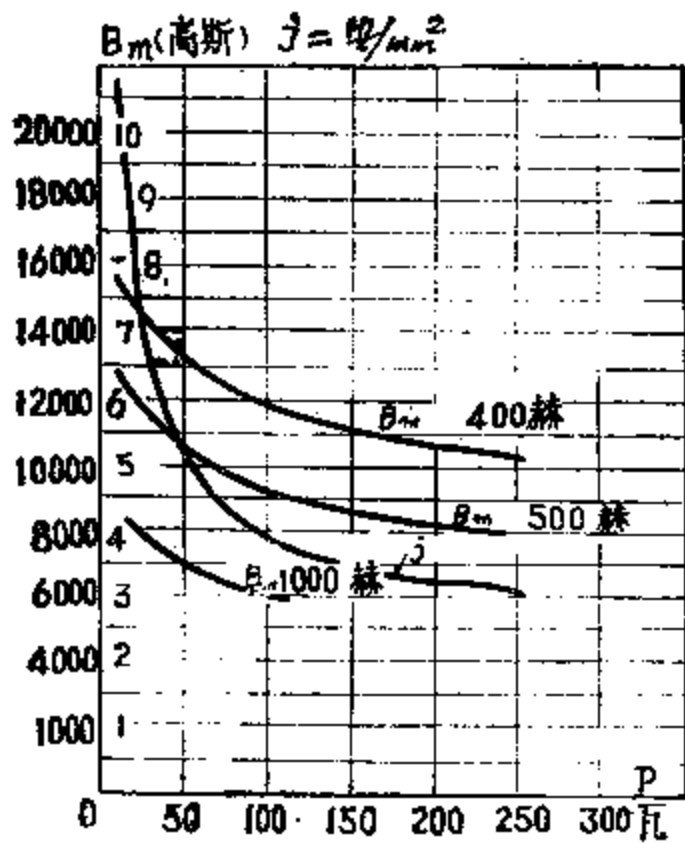
曲线 8-1

根据变压器功率确定壳式铁芯中的磁感应



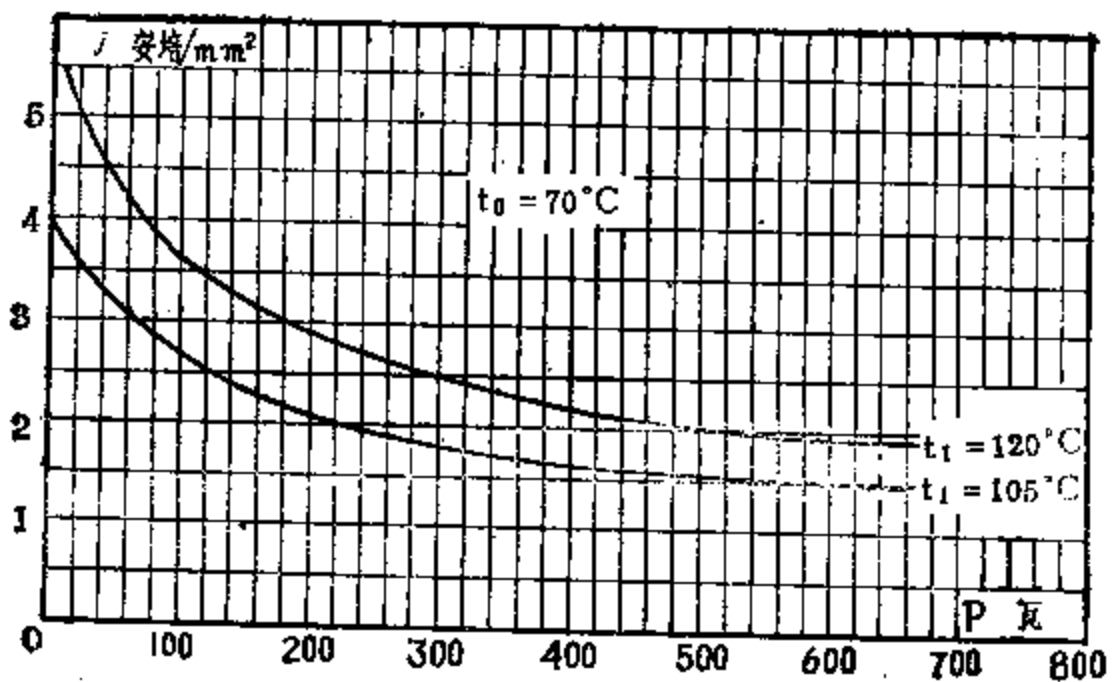
曲线 8-2

根据变压器功率确定壳式铁芯中的磁感应

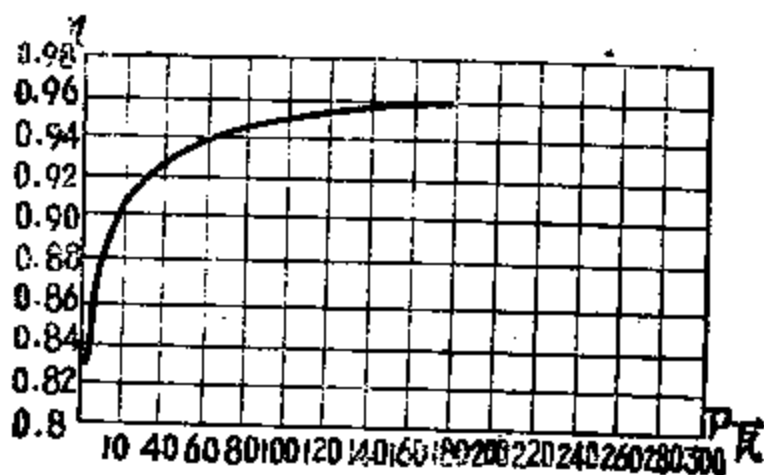


曲线 8-3

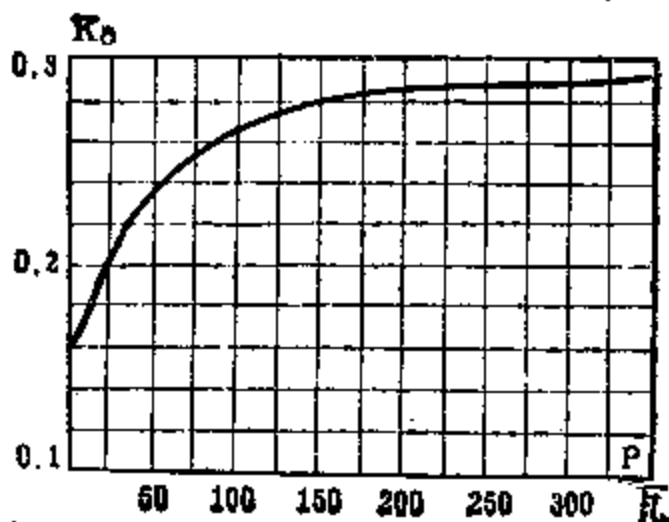
根据变压器功率确定环形铁芯中的磁感应
铁芯材料: 0.08毫米、D310钢片



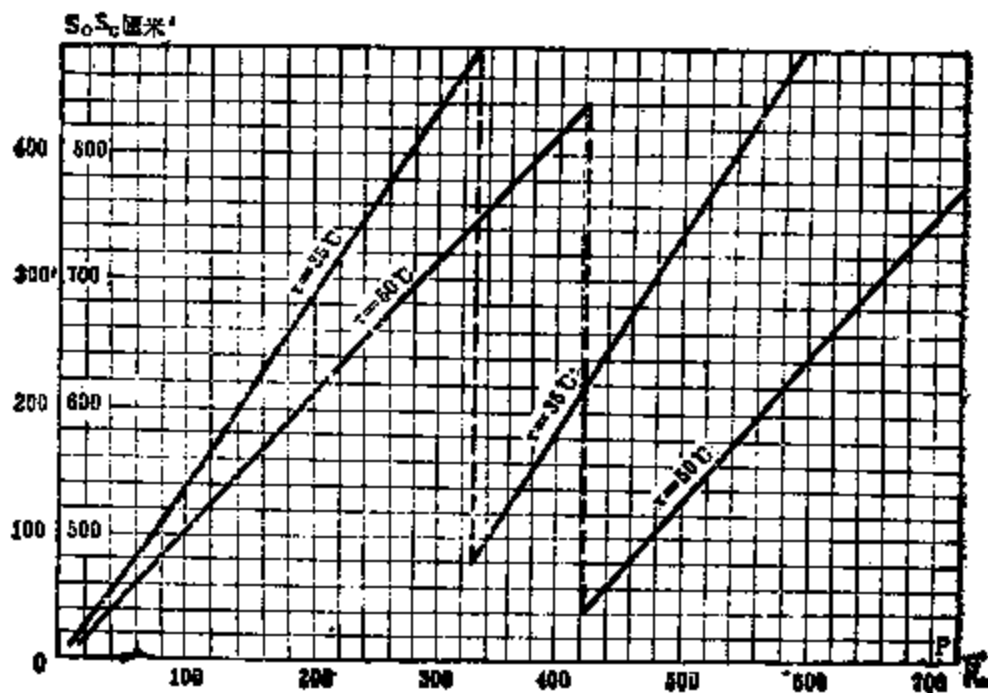
曲线 8-4 根据变压器功率确定导线中的电流密度



曲线 8-5 根据变压器功率确定效率

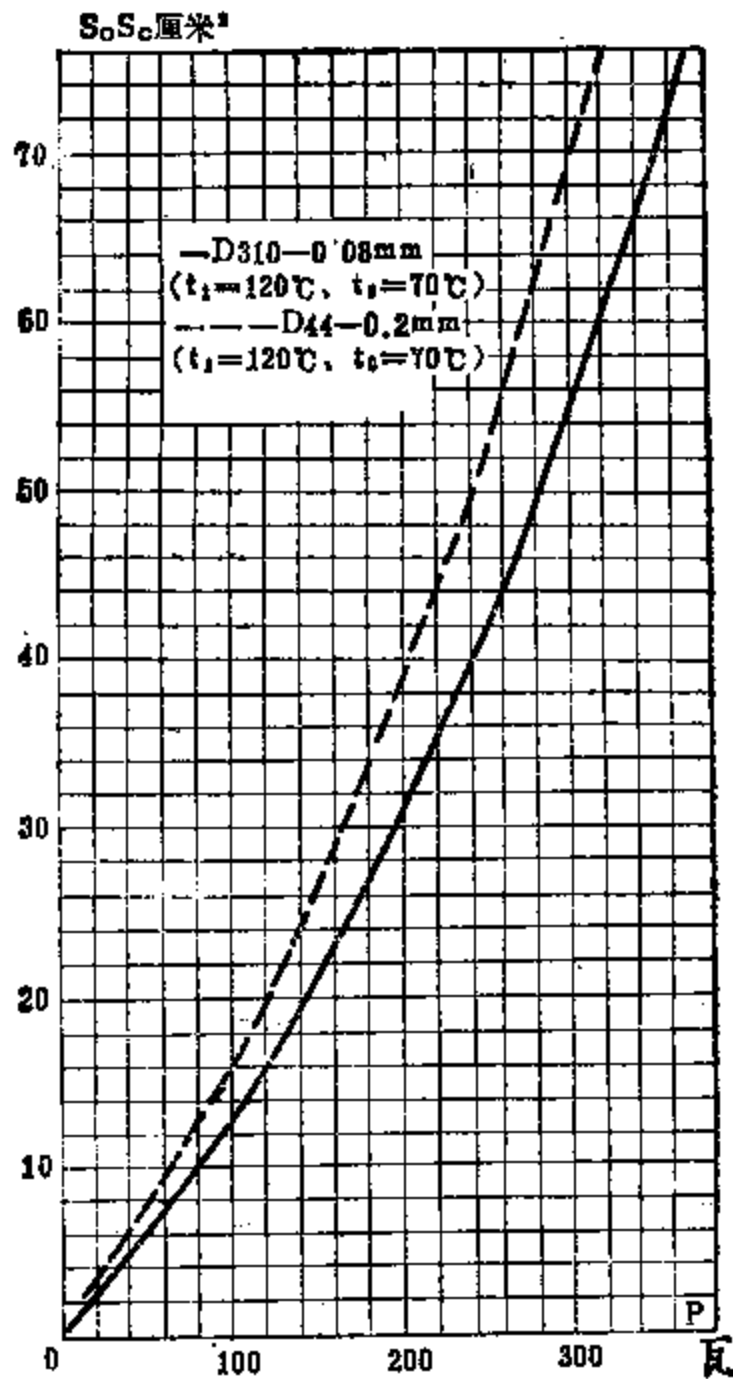


根据变压器功率确定环形铁芯中净铜线的占空系数



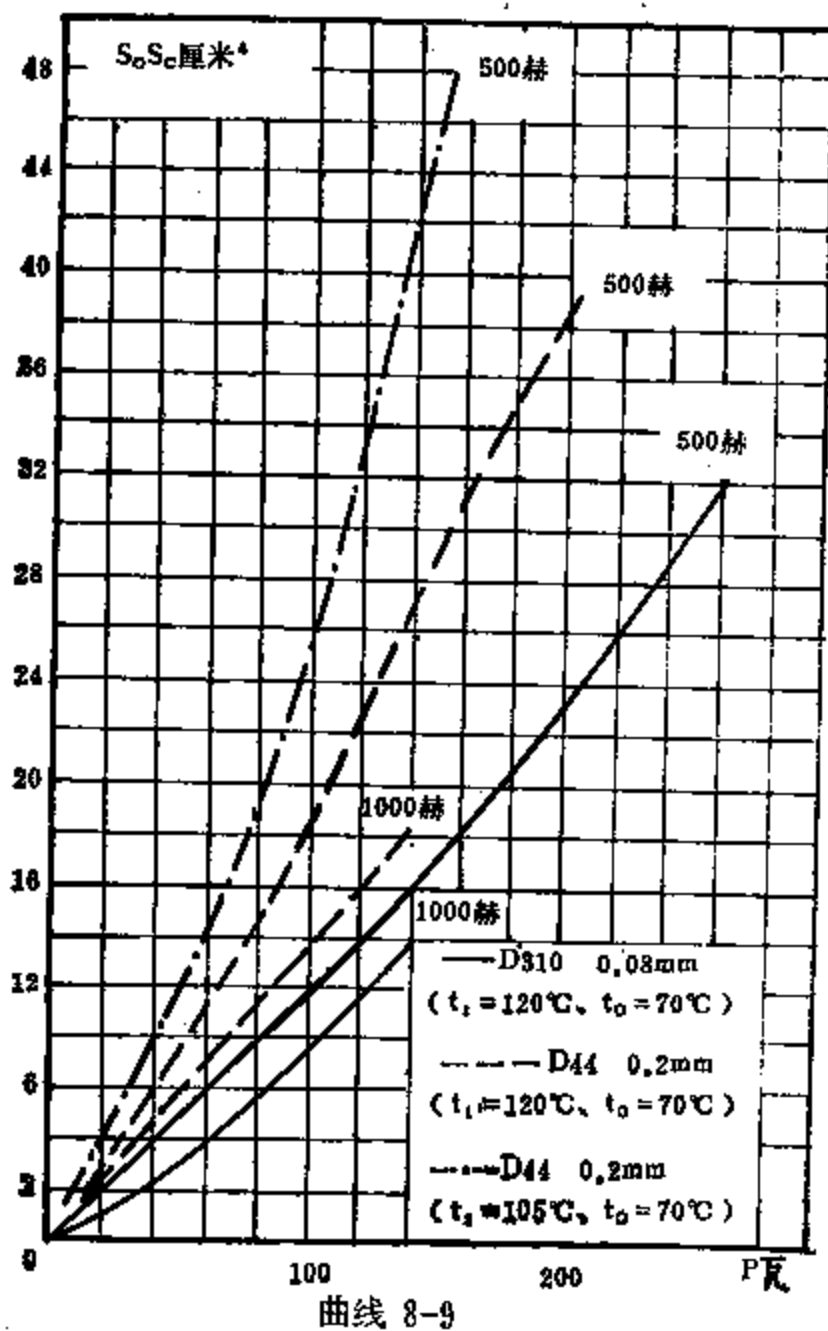
曲线 8-7 根据变压器功率确定铁芯的 $S_0 S_c$ 乘积

铁芯材料: 0.35毫米D320钢片、50赫

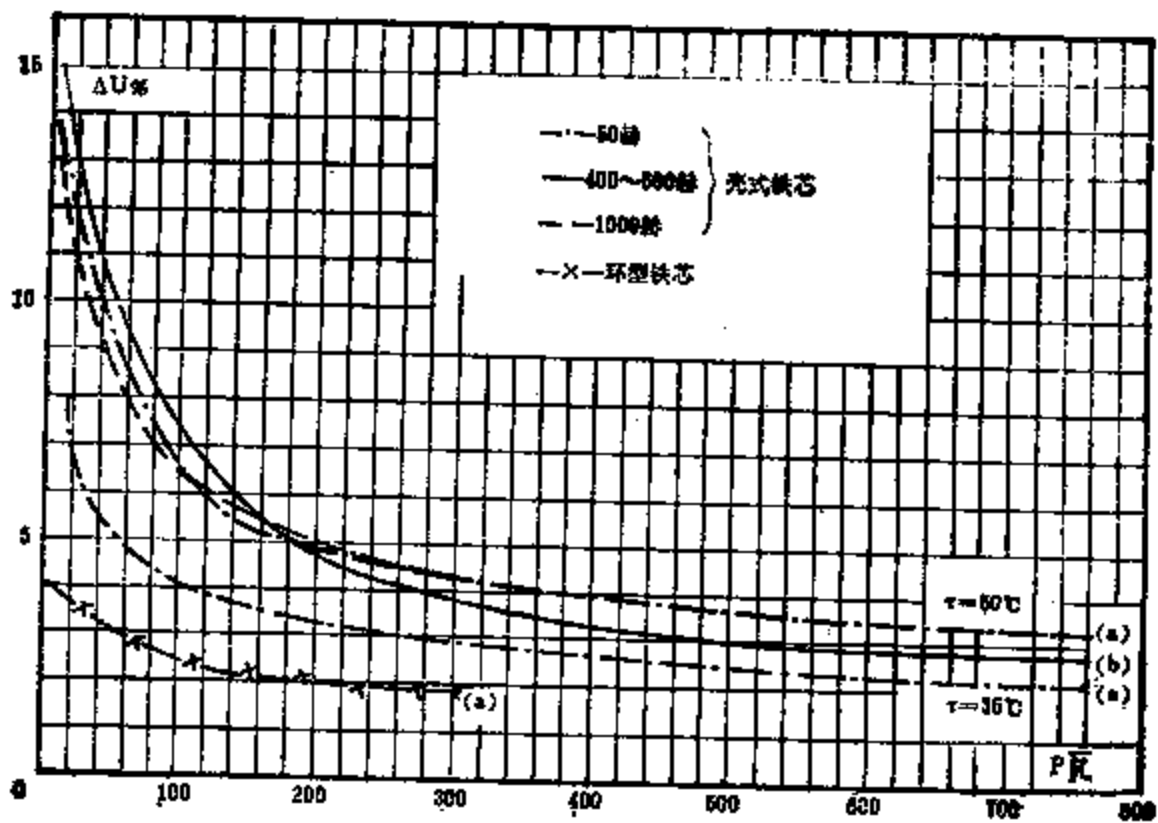


曲线 8-8

根据变压器功率确定壳式铁芯的 $S_0 S_c$ 乘积

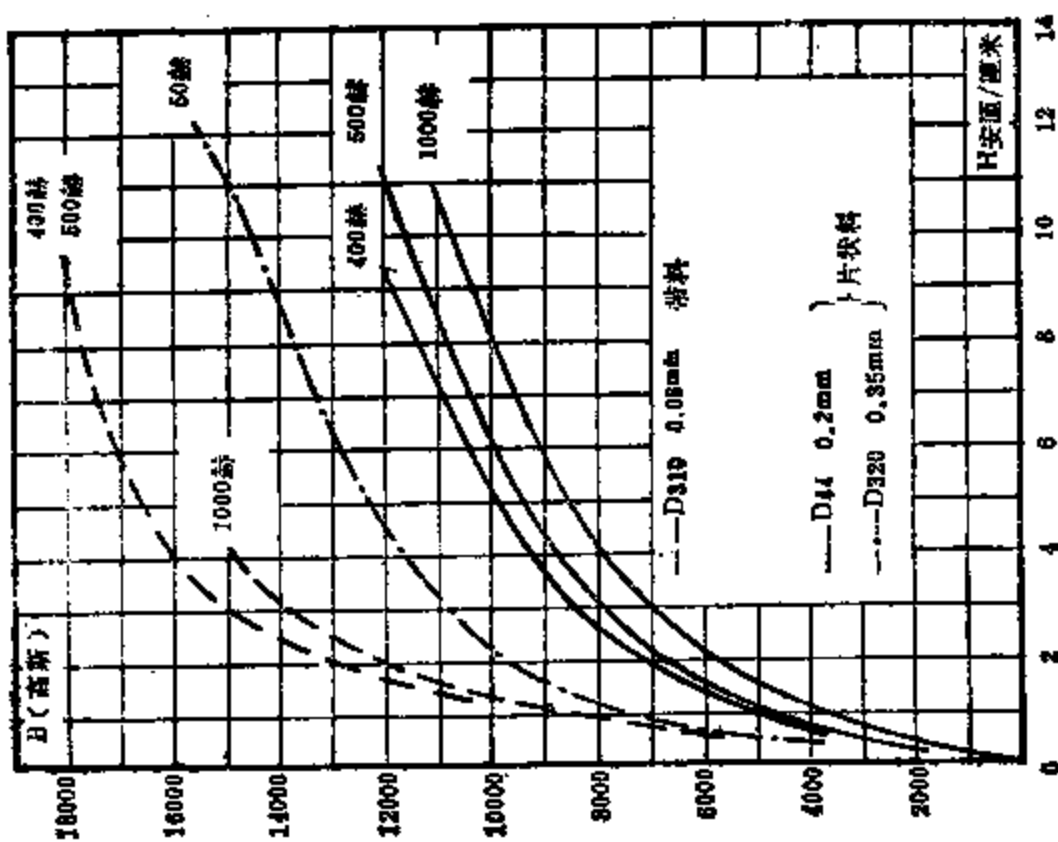


根据变压器功率确定壳式铁芯的 $S_0 S_c$ 乘积

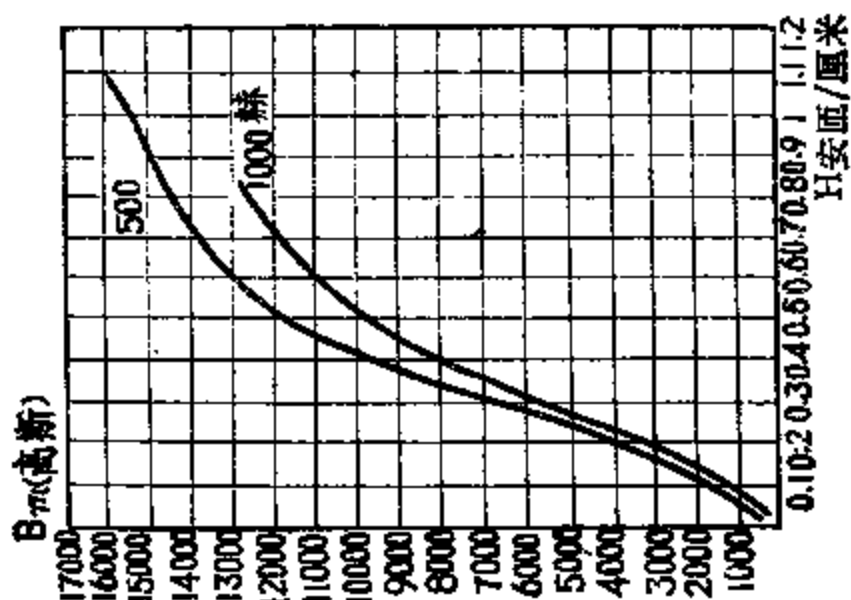


曲线8-10

壳式铁芯及环形铁芯变压器线圈中的电压降

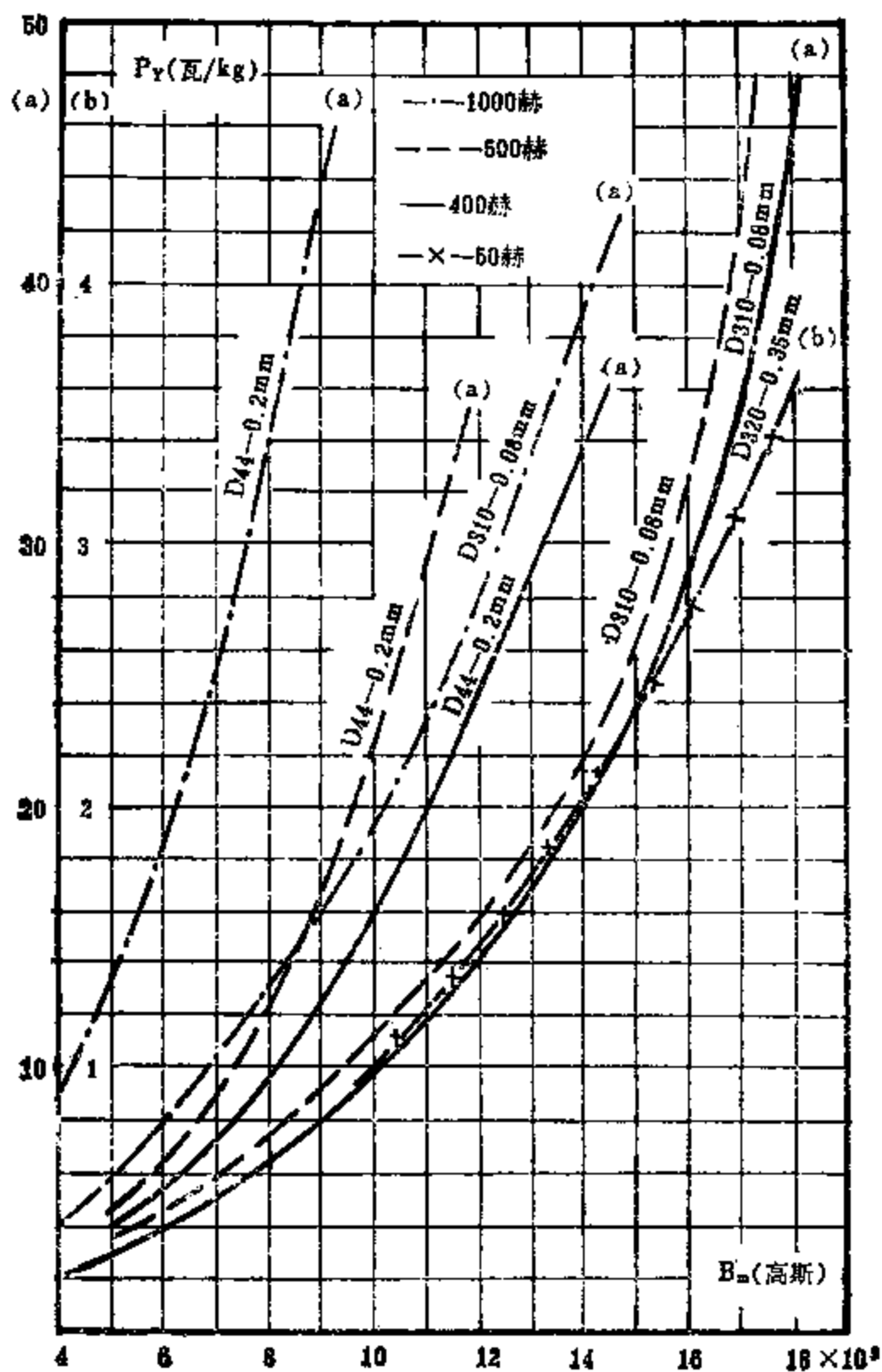


曲线8-11 壳式铁芯变压器的磁化曲线



曲线8-12

0.08毫米D310钢片卷绕环形铁芯的磁化曲线



曲线 8-13
壳式铁芯中的损耗功率

表 8-1

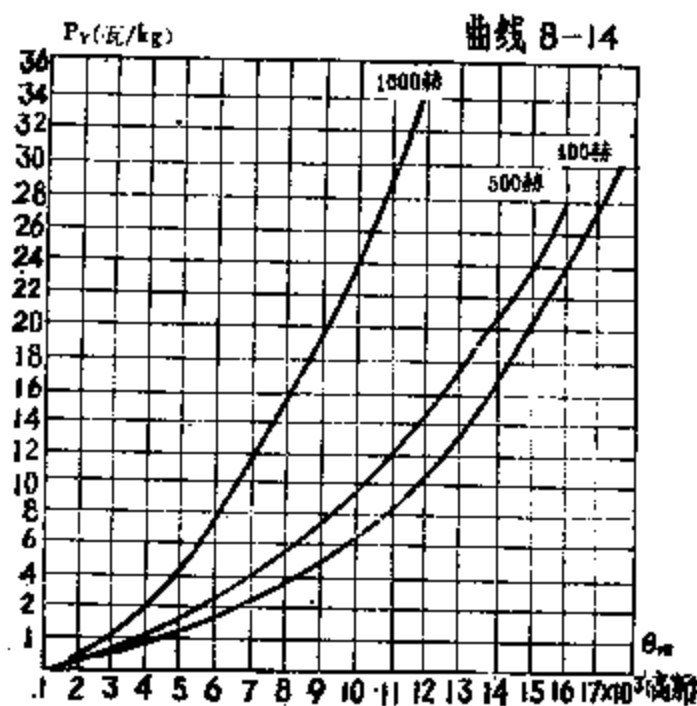
高频电源变压器铁芯标准表

铁芯型式	铁 芯 尺 寸 (mm)							So (cm ²)	SoSc (cm ⁴)	G(kg) 0.2mm D44	lcr (cm)	Fox (cm ³)		
	a	b	a ₁	a ₀	b ₀	b	H							
III 9×10 ×12	9	10 12	4.5	22.5	9	31.5	36	2.025	1.82 1.19	0.047 0.056	7.72	49.9 52.6		
	III 12×12 ×16 ×20 ×25	12	12 16 20 25	6	30	12	42	48	3.6	5.18 6.91 8.64 10.8	0.1 0.131 0.166 0.207	10.03	86.4 93.5 101.0 110.1	
III 16×16 ×20 ×25 ×32		16	16 20 25 32	8	40	16	56	64	6.4	18.4 20.48 25.6 32.8	0.243 0.299 0.373 0.473	13.7	153.6 163.2 175 192	
		III 20×20 ×25 ×32 ×40	20	20 25 32 40	10	50	20	70	80	10	40.0 50.0 64.0 80.0	0.462 0.585 0.788 0.936	17.14	240 255 276 300
			III 25×25 ×32 ×40 ×50	25	25 32 40 50	12.5	62.5	2.5	87.5	100	15.63	97.5 125 156 195	0.903 0.154 0.442 1.805	21.4
	III 32×32 ×40 ×50 ×64			32	32 40 50 64	16	80	32	112	128	25.6	202.1 328 409.6 524.8	1.885 2.96 2.98 3.78	27.4

表8-2

高频变压器带料卷绕的环形铁芯表

铁芯型式 (d/D-h)	铁芯尺寸 (mm)				Sc (cm ²)	So (cm ²)	SoSc (cm ⁴)	G(kg)	lcr(cm)
	内径 d	外径 D	高度 h	宽度 a					
20/28-6.5	20	28	6.5	4	0.26	1.13	0.294	0.0128	7.52
20/28-10			10		0.4		0.452		
20/32-10	20	32	10	6	0.6	1.23	0.678	0.0318	8.18
20/32-15			15		0.9		1.016		
25/35-10	25	35	10	5	0.5	2.9	1.45	0.0306	9.42
25/39-10			10		0.7		2.03		
25/39-15			15	1.05	3.05		10.04		
20/42-15	30	42	15	6	0.9	5.05	4.55	0.0661	11.3
20/46-15			15		1.2		6.06		
35/53-15	35	53	15	9	1.35	7.61	10.27	0.1215	23.8
35/55-20			20		2		15.22		
40/60-20	40	60	20	10	2	10.55	21.1	0.204	15.7
40/60-25			25		2.5		26.4		
45/65-25	45	65	25	10	2.5	13.9	34.7	0.254	17.3
45/69-25			25		3		41.6		



0.08毫米D310钢片卷绕环形铁芯中的损耗功率

第九单元 高频电感线圈设计计算

高频电感线圈，在无线电电子线路中是常见的。其结构型式，常见有单层的和多层的。

其线圈电感量的大小，主要取决于线圈匝数、几何形状，以及线圈结构尺寸，如绕组长度、直径、厚度等。其次，若线圈内部有屏蔽，以及铁芯等，对线圈电感量的影响也是很大的。

这类高频电感线圈的设计计算，与普通变压器相比，要简单得多，所以是很容易熟悉掌握的。

下面，仅以单层和多层两种高频电感线圈的计算为例，予以介绍。

1. 单层线圈的电感量计算

$$L = FN^2D \times 10^{-9} \quad (\text{微亨})$$

式中：

- L——单层线圈的电感量(微亨)；
- D——线圈外径(厘米)；
- N——线圈匝数；
- F——形状系数(见表9-1中所示)。

为计算更为简便起见，其单层线圈电感量，也可按下面近似公式求得，即

$$L = \frac{N^2 D}{100L_0 + 44D} \quad (\text{微亨})$$

式中：

L_0 ——线圈长度(厘米)

当 $L_0/D=0.1$ 以上时，线圈电感量用上式计算是相当准确的。

2. 多层线圈的电感量计算(见图9-1中所示)

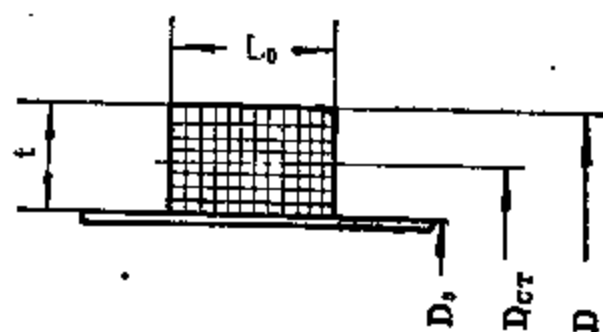


图 9-1

表 9-1

L_0/D	F	L_0/D	F	L_0/D	F	L_0/D	F	L_0/D	F
0.01	34.5	0.15	17.5	0.7	8.56	3.5	2.61	9	1.05
0.02	30.2	0.2	15.8	0.75	8.2	4.0	2.22	10	0.95
0.03	27.5	0.25	14.4	0.8	7.87	4.5	2.0	12	0.8
0.04	25.8	0.3	13.3	0.85	7.59	5.0	1.82	15	0.62
0.05	24.4	0.35	12.4	0.90	7.28	5.5	1.66	20	0.48
0.06	23.3	0.4	11.6	0.96	7.02	6.0	1.53	25	0.39
0.07	22.3	0.45	11.0	1.0	6.8	6.5	1.42	30	0.32
0.08	21.8	0.5	10.4	1.2	6.0	7.0	1.33	35	0.29
0.09	20.7	0.55	9.85	1.5	5.06	7.5	1.27	40	0.24
0.1	20	0.6	9.35	2.0	4.04	8.0	1.17	45	0.21
0.12	18.9	0.65	8.92	2.5	3.36	8.5	1.11	50	0.2

$$L = FN^2D \times 10^{-9} \quad (\text{微亨})$$

L 之值也可按下面近似式进行计算，即

$$L = \frac{0.08 D_{CT}^2 N^2}{3D_{CT} + 9L_0 + 10t} \quad (\text{微亨})$$

式中： D_{CT} ——线圈平均直径（厘米），
 t ——线圈厚度（厘米）。

通过上述算式可以看出，这类高频电感线圈的计算比较简单，只要知道电感量 L 的大小、线圈长度 L_0 以及圈内径 D_0 ，然后，再假设一个线圈外径 D，则线圈匝数即可求得。

反过来说，只要知道线圈的尺寸，如线圈长度 L_0 、线圈内径 D_0 、线圈外径 D，则线圈的电感量 L 也可求得。

第十单元 高漏抗变压器设计计算

高漏抗变压器，就其含义而言，具有漏抗高的特点。也正因为这一特点，常常被用于负载急剧变化而又要求逐步趋于稳定状态的专用或非专用的电子设备中。如早已问世的冷阴极荧光灯所需的电子设备，以及钛升华离子泵所用的电子设备等，就是其常用之例。

在这类变压器的负荷中，往往包括即有功和无功两部分。在一定条件下，无功部分还会远远大于有功部分。同时，随着时间和负载的变化，二者也会变化，

即在一个时候，有功部分大于无功部分，而在另一时候，无功部分也会大于有功部分，有时两者又可能相等。

由于高漏抗变压器的这一特殊工作状态，有必要再将它在工作原理中浅述一下。

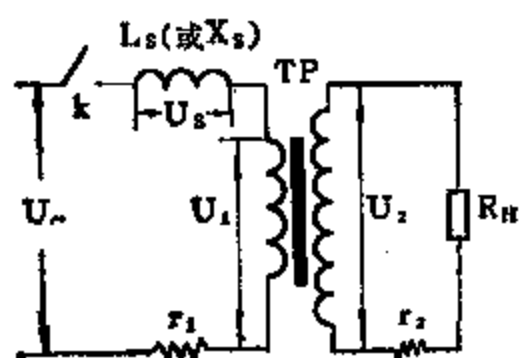


图 10-1

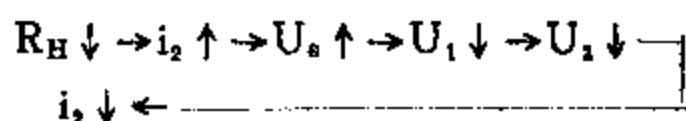
在图 10-1 中， U_0 为电源电压； U_1 、 U_2 分别为高漏抗变压器初、次绕组两端的输入和输出电压； L_s 及 X_L 分别为高漏抗变压器的等效漏感和漏抗；

r_1 、 r_2 分别为高漏抗变压器初、次绕组导线的直流电阻。

当输入电源电压 U_0 为定值时，开关 K 合上，电源接通，变压器 TB 工作（指 U_1 、 U_2 为定值）。此时，对普通变压器来说，假如负载电阻 R_H 趋近于零（即 $R_H \rightarrow 0$ ，系短路状态），则负载

电流 i_2 之起始值就趋于无穷大，即 $i_2 = \frac{U_2}{R_H}$ 趋近于无穷大（暂不

考虑 x_s 、 r_1 、 r_2 的影响)。这一状态无论对变压器及负载或电源，都是绝对不能允许的。因此，必须及时加以限制，使负载电流 i_2 之起始值能及时限制在允许的范围（这是为避免由于短路而造成的破坏性的损失所急需的）。在此情况下，若给变压器设置一个足够大的漏感 L_s ，从而获得一个足够高的漏抗 x_s 出现在电路中，则当负载电流 i_2 之起始值趋于无穷大时，经变压器折算到初级回路的电流也是很可观的。同时该电流通过变压器的漏抗 x_s 所产生的电压降 U_s 也是不小的。因此，根据回路电压的分配关系可以看出，如果输入电源电压 U_0 为定值，当负载电流 i_2 之起始值骤然增加，而使变压器的漏抗压降 U_s 也随之上升时，则变压器的初级绕组两端的输入电压 U_1 就随之下降，而变压器次级绕组两端的输出电压 U_2 也随之下降，而使负载电流 i_2 之起始值也随之下降，这一连锁反应的过程，是在极短的时间内完成的。其变化过程为：



由此可知，只要电路中有一个足够大的漏抗 x_s 存在，就能将负载电流 i_2 之起始值，限制在允许的范围，即负载电流 i_2 之起始值，就不是按 $i_2 = \frac{U_2}{R_H}$ 趋于无穷大的规律变化，而是按

$$i_2 = \frac{U_2}{\sqrt{(r_2 + R_H)^2 + (n^2 x_s)^2}}$$

趋于允许值的规律变化（式中 n 为变

压器的变比，即 U_2/U_1 ）。因此，这类变压器在电路中所处的工作状态，以及它所需的漏抗的大小，是设计计算高漏抗变压器一个很重要的基本点。所以，对高漏抗变压器，不仅要计算有功功率，而且还要计算无功功率。在计算铁芯的时候，还必须视其不同的负荷性质，根据有功功率和无功功率的矢量关系来进行计算。在计算电流时，也必须根据暂载率的大小进行换算。

另外，在铁芯材料相同的情况下，用于高漏抗变压器的磁感

应强度 B ，一般都比铁芯材料本身的饱和磁感应强度 B_m 低得多。在要求漏抗更高的情况下，更是如此（对于普通变压器的磁感应强度 B ，一般都接近或等于铁芯材料本身的饱和磁感应强度 B_m 之值）。这是因为变压器的漏抗 x_s 的大小与变压器的漏感 L_s 成正比，而漏感 L_s 又与变压器绕组匝数的平方成正比，绕组匝数又与铁芯材料的磁感应强度 B 成反比，所以低的磁感应强度 B 是获得漏抗高的主要途径。对于变压器结构上的问题，在实例运算中加以讨论。

这类变压器的铁芯结构型式，常见有壳式和芯式两种，设制时，一般多用壳式。

对于铁芯材料，若频率为50赫时，无论是热轧硅钢板料（如 D41、D42、D43 等）或冷轧硅钢板料及带料（如 D310、D320、D330、D340、Z₀、Z₁₁ 等）均可使用。

假如在满足技术要求的同时，尚求减小变压器的体积和重量，则以选用冷轧硅钢板料或带料为宜，其材料厚度多在0.35毫米以下。

这类变压器的设计计算步骤分为：视在功率、铁芯、绕组匝数的计算，绕组导线计算，漏抗计算，起始电流计算等。

1. 视在功率计算

(1) 有功功率

$$P_H = U_2 I_H \quad (\text{瓦})$$

式中：

U_2 ——变压器输出电压(伏)；

I_H ——变压器负载电流(安)。

(2) 无功功率

$$Q = U_s I_s' \quad (\text{乏})$$

式中：

Q ——无功功率(乏)；

U_s ——变压器等效漏抗压降(伏)；

I'_1 ——变压器次级折合到初级的电流（等于负载电流（安）。

注意，若变压器是处于断续工作状态，则负载电流 I_H 的大小，应根据断续时的电流 i_2 的大小，以及暂载率的高低，按下式换算成长期负载电流。即

$$I_H = i_2 \sqrt{\text{暂载率}} \quad (\text{安})$$

则次级电流折算到初级的电流应为，

$$I'_1 = n I_H = n i_2 \sqrt{\text{暂载率}} \quad (\text{安})$$

式中，

n ——变压器变比（即 $n = U_2/U_1$ ）。

(3) 视在功率

$$VA = \sqrt{Q^2 + P_H^2} \quad (\text{伏安})$$

2. 铁芯截面积计算

$$S_c = \sqrt{VA} \quad (\text{厘米}^2)$$

3. 绕组匝数计算

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = \frac{U_1 \times 10^8}{4.44 \cdot f \cdot B \cdot S_c} \quad (\text{匝})$$

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{U_2 \times 10^8}{4.44 f \cdot B \cdot S_c} \quad (\text{匝})$$

4. 绕组导线计算

(1) 初级绕组线径

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I'_1}{j}} \quad (\text{毫米})$$

(2) 次级绕组线径

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} \quad (\text{毫米})$$

各绕组导线算出之后，应从表 1-5 或至 1-8 中求得所需的实

用导线。

5. 漏抗计算

(1) 漏感

$$L_s = \frac{1.26 N_1^2 L_{mCT}}{h_{CT}} \left(\delta_0 + \frac{A_1 + A_2}{3} \right) \times 10^{-8} \quad (\text{亨})$$

式中:

L_{mCT} ——横过漏磁力线方向的两绕组之平均匝长 (厘米);

h_{CT} ——沿漏磁力线方向的两绕组的平均长度 (厘米);

δ_0 ——初、次级间的空隙 (厘米);

A_1 、 A_2 ——横过漏磁力线方向的初、次级绕组厚度 (厘米)。

(2) 漏抗

$$x_s = 2\pi f L_s \quad (\text{欧})$$

6. 绕组导线直流电阻计算

各绕组导线直流电阻计算与普通变压器相同, 这里不再重述。

7. 起始电流计算

(1) 次级起始电流

$$i_2 = \frac{U_2}{\sqrt{(r_2 + R_H)^2 + (n^2 x_s)^2}} \quad (\text{安})$$

式中:

i_2 ——负载起始电流 (安);

r_2 ——次级绕组导线直流电阻 (欧);

R_H ——负载电阻 (欧)。

(2) 初级起始电流

$$i_1' = n i_2 \quad (\text{安})$$

式中:

n ——变压器的变比(即 $n = \frac{U_2}{U_1}$)。

经上式算得的 i_2 或 i_2' 之值, 均不能超过给定值, 如有超过必须进行调整

其调整的方法是, 可先调整绕组结构尺寸, 即降低各绕组高度, 或增加各绕组厚度, 以及增加初次间的间隙等, 再经计算, 是否凑效。如果不行, 再降低铁芯材料的磁感应强度 B 之值, 以增加绕组匝数, 从而增加绕组漏抗 x_a , 以及增加绕组导线直流电阻。然后重新进行计算, 就这样进行比较、调整, 直致 i_2 或 i_2' 之值不超过给定值为止。

还有一种状况, 当起始工作状态的持续时间较长, 且负载电流 i_2 的起始值很大, 甚致大到使持续工作状态时的工作电流 I_H 与之相比, 可以略去不计时, 这时候的负载电流 I_H 就应根据起始电流 i_2 的大小, 以及暂载率的高低, 换算成长期负载电流 I_H 之值, 即 $I_H = i_2 \sqrt{\text{暂载率}}$, 然后根据换算出的 I_H 之值去计算绕组导线或其它电气参数。

如果起始工作状态的时间很短, 则负载电流 I_H 就毋须按暂载率进行换算, 即可直接根据负载有效功率 P_H 的大小进行计算,

$$\text{即 } I_H = \frac{P_H}{U_2}。$$

另一种情况是, 这类变压器的铁芯损耗比较小, 因为在计算时所用铁芯材料的磁感应强度 B 之值比材料本身的饱和磁感应 B_m 之值取得低, 因而铁芯损耗不大。在材料越薄的情况下更是如此。因此, 高漏抗变压器的铁芯过热问题, 一般对工频50赫的电源来讲, 毋须特别重视。这样, 在高漏抗变压器的设计计算中, 只要绕组导线的电流密度选用适宜, 变压器就不会发生过热而超过绝缘材料所允许的工作温度。

[例] 设计计算一只用于钛升华离子泵电源的高漏抗变压器。

已知:

1. 输入电源电压 $U_{\sim} = 220$ (伏);
2. 输出电压 $U_2 = 5000$ (伏);
3. 负载起始电流 $i_2 = 0.5$ (安);
4. 负载额定电流 $I_H = 0.002$ (安);
5. 电源频率 $f = 50$ (赫);
6. 暂载率为15%;
7. 初级绕组对地耐压为2000(伏);
8. 次级绕组对地耐压为10000(伏)。

解: 1. 视在功率计算

(1) 有功功率

$$P_H = U_2 I_H = 5000 \times 0.002 = 10 \quad (\text{瓦})$$

(2) 无功功率

$$Q = U_2 I_2' \quad (\text{乏})$$

要计算无功功率 Q 之值, 就必须先确定漏抗压降 U_2 和变压器次级电流 I_2 折合到初级的电流 I_2' 之值。这里先假定当负载接通短路时, 电源电压 U_{\sim} 完全降落在漏抗 x_2 上, 即得漏抗压降 $U_{\sim} = U_2 = 220$ 伏。

由于负载起始电流 i_2 之值远远大于持续负载电流 I_H 之值, 再加上持续时间较长, 因此, I_2' 之值, 即可根据暂载率的大小进行计算。即

$$\begin{aligned} I_2' &= n I_H = n i_2 \sqrt{\frac{15}{100}} = \frac{5000}{220} \times 0.5 \sqrt{\frac{15}{100}} \\ &= 22.73 \times 0.5 \times 0.387 = 4.4 \quad (\text{安}) \end{aligned}$$

则无功功率:

$$Q = U_2 I_2' = 220 \times 4.4 = 968 \quad (\text{乏})$$

(1) 视在功率

$$\begin{aligned} VA &= \sqrt{Q^2 + P_H^2} = \sqrt{968^2 + 10^2} \\ &= \sqrt{937124} = 968.1 \quad (\text{伏安}) \end{aligned}$$

2. 铁芯截面积计算

$$S_c = \sqrt{VA} = \sqrt{968.1} = 31 \quad (\text{厘米}^2)$$

在小功率电源变压器的铁芯系列中，还找不到适合高漏抗变压器的铁芯，因此只能根据 S_c 之值；重新计算这类变压器的铁芯结构尺寸。

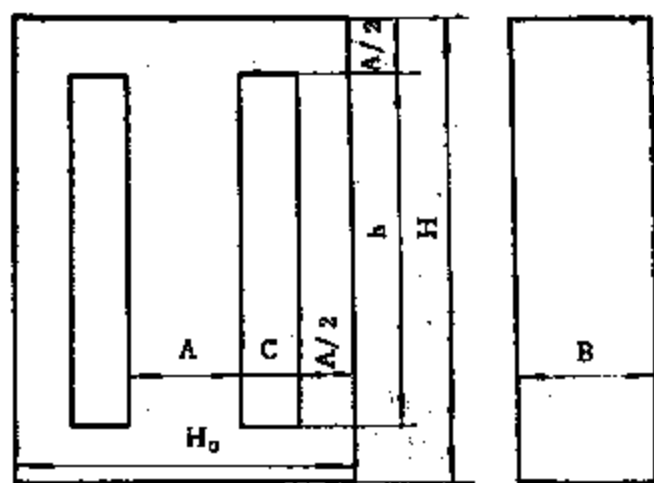


图10-2

这里提出一种可供参考的近似估算法，并结合图10-2来加以说明。

铁芯截面积： $S_c = (1 \sim 2)A^2$ (厘米²)

铁芯中柱宽度：

$$A = \sqrt{\frac{S_c}{(1 \sim 2)}} \quad (\text{厘米})$$

铁芯叠合厚度： $B = 2A$ (厘米)

铁芯窗孔宽度： $C = (0.5 \sim 1.5)A$ (厘米)

铁芯窗孔高度： $h = (3 \sim 5)A$ (厘米)

铁芯长度： $H_0 = (3 \sim 5)A$ (厘米)

铁芯高度： $H = (4 \sim 6)A$ (厘米)

磁路平均长度： $l_{CT} = 2(C + h + 1.57A)$ (厘米)

根据以上各式可得铁芯结构尺寸为：

$$A = \sqrt{\frac{31}{2}} = 3.93 (\text{取整数} 4) \quad (\text{厘米})$$

$$B = 2A = 2 \times 4 = 8 \quad (\text{厘米})$$

$$C = 1.125A = 4.5 \quad (\text{厘米})$$

$$h = 4.75A = 4.75 \times 4 = 19 \quad (\text{厘米})$$

$$H_0 = 4A = 4 \times 4 = 16 \text{ (取用17)} \quad (\text{厘米})$$

$$H = 5.75A = 5.75 \times 4 = 23 \quad (\text{厘米})$$

$$L_{CT} = 2(C + h + 1.57A) \\ = 2(4 + 19 + 1.57 \times 4) = 58.56 \quad (\text{厘米})$$

至此，即可绘出本设计的铁芯结构，如图10-3所示。

3. 绕组匝数计算

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = \frac{U_1 \times 10^8}{4.44fB \cdot S_c} \quad (\text{匝})$$

这里首先确定铁芯材料及铁芯材料的磁感应强度 B 之值。

一般常用材料，有 D41、D42、D43等，其 B 值可在 8000~10000 高斯的范围内选取。对材料 D310、D320、D330、D340、Z₁₁ 等，其 B 值可在 10000~14000 高斯的范围内选取。

这里选用 0.35 毫米厚的冷轧硅钢料 D310 制成铁芯。其磁感应强度 B 之值选用 11000 高斯，则初级绕组匝数为：

$$N_1 = \frac{220 \times 10^8}{4.44fB \cdot S_c} = \frac{220 \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 11000 \times 31} \\ = 291 \quad (\text{匝})$$

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{U_2 \times 10^8}{4.44fB \cdot S_c} = \frac{5000 \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 11000 \times 31} \\ = 6605 \quad (\text{匝})$$

4. 绕组电流计算

在本例中，由于负载额定电流，远小于负载起始电流，相比之下，几乎可以略去不计。因此，绕组电流是直接按负载起始电流的大小，以及暂载率的高低进行计算。即

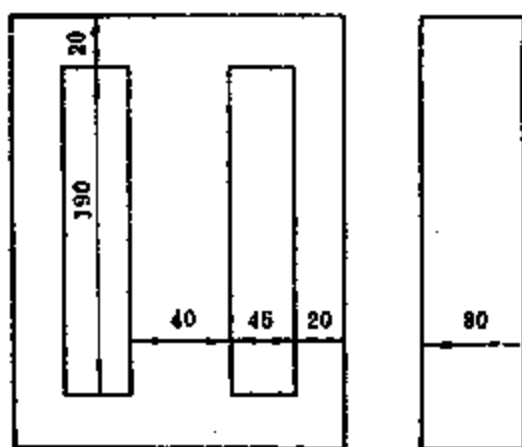


图10-3

(1) 初级电流,

铁芯损耗电流略去不计。则

$$I_1 = I'_1 = ni_2 \sqrt{\frac{15}{100}} = \frac{5000}{220} \times 0.5 \sqrt{\frac{15}{100}} \\ = 4.4 \quad (\text{安})$$

(2) 次级绕组电流

$$I_2 = i_2 \sqrt{\frac{15}{100}} = 0.5 \sqrt{\frac{15}{100}} \\ = 0.5 \times 0.387 = 0.194 \quad (\text{安})$$

5. 绕组导线计算

确定绕组导线电流密度 j 为 2 安/毫米², 则

(1) 初级绕组线径

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{4.4}{2}} \\ = 1.13 \times 1.48 = 1.68 \quad (\text{毫米})$$

(2) 次级绕组线径

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.194}{2}} \\ = 1.13 \times 0.311 = 0.352 \quad (\text{毫米})$$

根据 d_1 、 d_2 之计算值, 从表 1-7 中求得初级绕组实用导线 $d_1 = 1.68$ 毫米, 最大外径 $d_{1m} = 1.79$ 毫米, 导线每千米直流电阻 $R_{20^\circ\text{C}\cdot 1} = 7.91$ 欧。

从表 1-6 中求得次级绕组实用导线 $d_2 = 0.35$ 毫米, 最大外径 $d_{2m} = 0.41$ 毫米, 导线每千米直流电阻 $R_{20^\circ\text{C}\cdot 2} = 182$ 欧。

另外, 从表 1-10 中求得排绕系数 $K_{\text{排}} = 1.05$, 叠绕系数 $K_{\text{叠}} = 1.15$ 。

6. 绕组结构计算

高漏抗变压器的绕组结构计算与普通变压器相同, 这里为避免不必要的重复, 仅将计算结果列于下面。

(1) 初级绕组结构参数

绕组骨架高度56 (毫米)

骨架内墙板厚度3 (毫米)

骨架两端各空出2毫米供绕组装配时定位之用。然后，再各空出2毫米供端封环氧树脂之用，余下部分供绕线之用。

层间垫入绝缘纸宽度48 (毫米)

绕线宽度40 (毫米)

层间用0.12毫米厚的电缆纸一层

绕组外包0.12毫米厚的电缆纸三层，其宽度为52毫米。

绕组每层21匝，绕14层

绕组厚度34.1 (毫米)

绕组平均匝长346.76 (毫米)

绕组用线长度101 (米)

(2) 次级绕组结构参数

绕组骨架高度134 (毫米)

骨架内墙板厚度5 (毫米)

骨架外包0.12毫米厚的电缆纸15层

骨架两端各空出2毫米供装配时定位之用，然后再各空出2毫米供端封环氧树脂之用，余下部分供绕线之用。

绕组层间用0.12毫米厚的电缆纸2层，其宽度为108毫米。

绕线宽度98 (毫米)

绕组外包0.12毫米厚的电缆纸15层，其宽度为124毫米。

绕组每层227匝，绕30层

绕组厚度28.55 (毫米)

绕组平均匝长329.65 (毫米)

绕组用线长度2177 (米)

(3) 绕组导线直流电阻

初级绕组导线直流电阻：

$$R_1 = L_1 R_{20^\circ C} \cdot 1 \times 10^{-3} = 101 \times 7.91 \times 10^{-3} = 0.798 \text{ (欧)}$$

次级绕组导线直流电阻,

$$R_2 = L_{12} R_{20^\circ\text{C}} \cdot 2 \times 10^{-3} = 2177 \times 182 \times 10^{-3} = 396 \quad (\text{欧})$$

7. 漏抗计算

(1) 漏感 (参考图10-4)

$$\begin{aligned} h_s &= \frac{1.26 N_1^2 L_{mCT}}{h_{CT}} \left(\delta_0 + \frac{A_1 + A_2}{3} \right) \times 10^{-8} \\ &= \frac{1.26 \times 291^2 \times 33.8}{3.13} \left(2.6 + \frac{4 + 9.8}{3} \right) \times 10^{-8} \\ &= \frac{3606394.428}{3.13} \times 7.2 \times 10^{-8} \\ &= 0.083 \quad (\text{亨}) \end{aligned}$$

(2) 漏抗

$$x_s = 2\pi f h_s = 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.083 = 26.06 \quad (\text{欧})$$

8 起始电流计算

(1) 次级起始电流

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{U_2}{\sqrt{(R_2 + R_H)^2 + (n^2 x_s)^2}} \\ &= \frac{5000}{\sqrt{(396 + 10000)^2 + (22.7^2 \times 26.06)^2}} \\ &= \frac{5000}{\sqrt{108076816 + 180324040}} = \frac{5000}{16982.4} \\ &= 0.29 \quad (\text{安}) \end{aligned}$$

(2) 初级起始电流

$$i_1 = n i_2 = 22.7 \times 0.29 = 6.583 \quad (\text{安})$$

按给定值所得的初级起始电流的允许值为

$$i_1' = n i_1 = 22.7 \times 0.5 = 11.35 \quad (\text{安})$$

根据上述计算, 该高漏抗变压器能使初、次绕组的起始电流被限制在允许的范围, 设计可取, 得图 10-5 的高漏抗变压器结构。

注意，在装配调试时，如遇漏抗 x_s 之值达不到设计要求，可在初、次级之间填入适量的磁性材料以改变气隙的导磁系数 μ 来增加漏感 L_s 之值即可提高漏抗的数值。

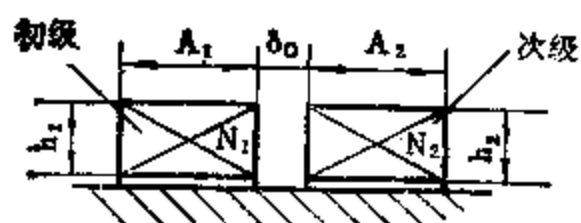


图10—4

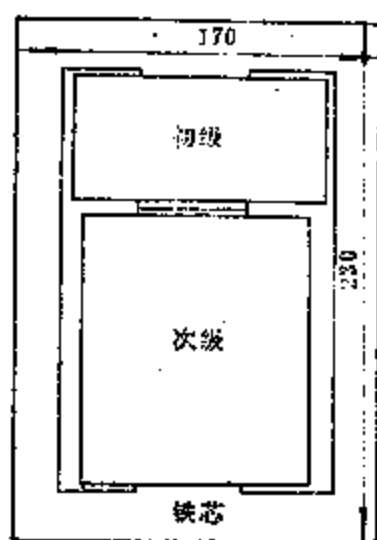


图10—5

第十一单元 充电电抗器设计计算

随着无线电技术，军事技术及微波等技术的惊人发展，各类无线电电子技术和遥控遥测等电子设备也随之“耳目”一新的涌现。

在这些电子设备中，常见有软性开关调制器。这类调制器，往往用一电感和仿真线组成谐振充电电路，以传送负载所需的电量。其中这一电感即称充电电感或充电电抗器。

这类充电电抗器在电路中的工作状态，不同于普通扼流圈在电路中的工作状态。就绕组中的电量而言，充电电抗器绕组中的电量是一个很强的周期性变量，而滤波扼流圈绕组中的电量，基本上是一个不变量(略去纹波分量不计)。就铁芯中的磁性能而言，用于充电电抗器铁芯中的磁感应强度及磁场强度，也是一个很强烈的周期性的变量，而滤波扼流圈铁芯中的磁感应强度及磁场强度，却是一个不变量(略去纹波分量不计)。

在相比之下，充电电抗器在电路中的工作状态，对电量而言，是处于交流工作状态，而滤波扼流圈则处于直流工作状态。因此，根据它们在电路中所处的工作状态不同，在设计计算过程中所考虑的问题也不同。

对铁芯而言，充电电抗器的铁芯多用芯式，并随着充电频率的增高，对铁芯材料的选用也越严格(即使对同类充电电抗器也是如此)，甚致为减少铁芯损耗及防止过热，常选用薄钢带制成铁芯(如0.2、0.1、0.08、0.05毫米厚的硅钢薄料等)。而滤波扼流圈的铁芯多用壳式或芯式(一般小型用壳式大型用芯式)。对铁芯材料的选用并不要求特殊，无论是热轧硅钢料还是冷轧硅钢料均可使用。材料厚度多在0.35毫米左右。只当特别要求体积小重

量轻时，才选用冷轧硅钢料。

另外，就绕组绝缘而言，一般充电电抗器绕组两端的交流压降都较高。流经绕组中的电流，随着仿真线阻抗的下降或充电频率的增高，电流的有效值也会增高。

因此，无论对绕组的绝缘计算，还是温升计算，一般都比普通滤波扼流圈严格得多。有时为了解决绕组的绝缘问题，以及整个器件的散热问题，还采用油浸（变压器油或电容器油）的方式进行冷却。

通过上述比较，对充电电抗器有了一个基本的了解。其设计计算步骤分为：铁芯体积计算，绕组匝数计算，绕组导线计算，绕组结构计算，铜、铁损耗计算，温升计算等。

1. 铁芯体积计算

充电电抗器的铁芯体积与给定数据中的充电电感和充电电流的峰值成正比，与铁芯材料及气隙中的磁性能的优劣成反比。其具体表达式为：

$$V_c = \frac{LI^2 \times 10^3}{B_m(H_c + H_0)K} \quad (\text{厘米}^3)$$

式中：

V_c ——充电电抗器的铁芯体积（厘米³）；

L ——充电电感（亨）；

I ——充电电流峰值（安）；

B_m ——铁芯材料的磁感应强度（高斯）；

H_c ——铁芯材料的磁场强度（安匝/厘米）；

（ B_m 和 H_c 之值，均可由已选定的铁芯材料的BH磁化曲线1—1或曲线8—12求得）

H_0 ——铁芯磁路气隙中的磁场强度（安匝/厘米）。

铁芯磁路气隙中的磁压降 F_0 是远远大于铁芯磁路中的磁压降 F_c 。同时，铁芯磁路中的磁场强度 H_c 也远远小于铁芯磁路气隙中的磁场强度 H_0 。这里提出一个经验估算式即 $H_0 = (0.0102 \sim$

0.0135)H₀，以供参考。

K——系数(0.8~0.9)。

经上式算得的铁芯体积，如属小型充电电抗器的铁芯体积，可从表8-1、表8-2或表1-3中求得相应铁芯体积。

其方法是，从上述三表中，选取一种适当的铁芯。其铁芯截面积S_c与它磁路平均长度l_{CT}之积V_c，应等于或近于上式算得的铁芯体积，然后再将这一铁芯的结构尺寸，作为计算的参考。

如果经上式算得的铁芯体积，属大型充电电抗器的铁芯体积而不属上述三表中的铁芯系列，则只能根据第二单元中提到的方法，估算一个铁芯结构尺寸供计算时参考。

2. 绕组匝数计算

$$N = \frac{LI \times 10^8}{B_m S_c K_c}$$

将上式中影响绕组匝数的诸因素相比较(除给定技术条件处)，最重要的铁芯材料的磁感应强度B_m和铁芯截面积S_c。磁感应强度B_m之值，不仅影响绕组匝数，同时，还影响充电电抗器的体积和温升。这里提供两类磁性材料的磁感应强度B_m之值作参考。

对热轧硅钢料D44等B_m之值在7000~10000高斯的范围内选用，材料厚度随充电电抗器的频率高低及铁芯损耗的大小而定，一般可在0.2、0.08、0.05毫米厚的范围内选用。

对冷轧硅钢料D310、D320、D330、D340、Z₉、Z₁₁等材料的B_m之值，可在8000~12000高斯的范围内选用，材料厚度同上。

总之，铁芯材料的B_m之值，必须视其频率的高低，以及铁芯损耗的大小、温升的高低而定。一般频率高，损耗大，温升高的趋于下限，反之趋于上限。

3. 绕组导线计算

充电电抗器的绕组导线计算，同普通变压器一样，应根据流

经绕组中的有效电流进行计算，但有时在它的给定数据中不是有效电流而是峰值电流，因此，必须先将峰值电流换算成有效电流，然后再进行绕组导线计算。

其近似换算式为 $I_e = 0.707I$ (I_e 为电流有效值， I 为电流峰值)。

则绕组线径为：

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I_e}{j}}$$

电抗器冷却方式不同，选用的 j 值也不同。

对空气自冷式

j 在 1.3~2 安/毫米² 之范围内选取。

对油浸自冷式

j 可在 2—3 安/毫米² 之范围内选取。

根据 d 之计算值，再从表 1-5 或至表 1-8 中求得标准线规的实用值。

绕组结构计算，其法与普通变压器相同。

4. 铜、铁损耗计算

(1) 铜损耗 (瓦)

$$P_m = I_e^2 R$$

式中：

P_m ——绕组铜损耗 (瓦)；

I_e ——有效电流 (安)；

R ——绕组导线的直流铜电阻 (欧)。

(2) 铁芯中的平均损耗

$$P_{CT} = 1.2 P_c G_c B_m^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} \times 10^{-3} \quad (\text{瓦})$$

式中：

G_c ——铁芯重量 (公斤)；

B_m ——铁芯材料的磁感应强度 (高斯)；

f ——电源频率 (赫);

P_0 ——铁芯单位损耗 (瓦/公斤)。

一般铁芯的单位损耗是在50赫时的频率下, 根据磁感应强度 B_m 的大小测定。如果, 铁芯的实际使用频率 f 超过50赫时, 则在上式中应乘一系数, 即 $\left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}$ 。

如果充电频率正好与下述各表和曲线的标注相符, 则铁芯的单位损耗即可根据磁感应强度 B_m 的数值近似地从曲线 1-2 中, 表 1-9 中或曲线 8-13 中及 8-14 中求得。另外亦可从曲线 12-1 中或表 12-1 中求得, 然后将该材料的单位损耗乘以铁芯重量, 即可得铁芯的平均损耗, 即 $P_{CT} = P_0 G_0$ 。

铜、铁损耗算出之后, 再计算充电电抗器的散热面积。大型充电电抗器的散热面积计算基本与中等功率变压器的算法相同。

对于小型充电电抗器的铁芯, 若可从标准铁芯系列表中, 如表 1-3 或 1-4 中, 以表 8-1 中查取时, 则散热面积亦可从表中查出, 毋须重新进行计算。

5. 温升计算

(1) 油浸自冷式的温升

油箱与空气的温差

$$\Delta t_1 = \frac{P_m + P_{CT}}{S_0} R_{t1} \quad (^\circ\text{C})$$

充电电抗器与油的温差

$$\Delta t_2 = \frac{P_m + P_{CT}}{S_1} R_{t2} \quad (^\circ\text{C})$$

式中,

P_m ——绕组铜损耗 (瓦);

P_{CT} ——铁芯中的平均损耗 (瓦);

S_0 ——油箱与空气的接触面积 (厘米²);

S_1 ——电抗器与油的接触面积 (厘米²);

R_{t_1} 、 R_{t_2} 分别——散热系数，即

$$R_{t_1} = 0.06 \text{米}^2 \text{℃/瓦}$$

$$R_{t_2} = 0.15 \text{米}^2 \text{℃/瓦}$$

Δt_1 与 Δt_2 之和不得超过 $30 \sim 40 \text{℃}$ ，否则充电电抗器不能正常工作。

(2) 空气自冷式的温升

$$\Delta t = \frac{P_m + P_{or}}{\alpha S_1} \quad (\text{℃})$$

式中：

α ——充电电抗器在空气中的表面散热系数，即 $\alpha = 1.3 \times 10^{-3} \text{瓦/厘米}^2 \cdot \text{度}$ ；

S_1 ——充电电抗器的散热面积（厘米²）。

6. 磁路中气隙长度计算

充电电抗器铁芯磁路中的气隙大小，不仅可以改变铁芯的工作状态（饱和与非饱和的工作状态），同时，还常常起着调节电感的作用。一般多按经验公式计算，下面提供一种简便的计算方法以供参考。即

$$\frac{\delta_z}{L_{CT}} = 0.012$$

式中：

δ_z ——铁芯磁路中的气隙长度（厘米）；

L_{CT} ——铁芯磁路的平均长度（厘米）。

按上式算得的气隙长度，仅供充电电抗器在装配时调整电感量参考之用，而最后应根据校准所需的实用电感量所确定的气隙长度为准。一般常用纸质绝缘材料垫入气隙。

[例] 设计一只充电电抗器

已知：

1. 充电电感量 $L = 10$ (亨)；

2. 充电电流峰值 $I = 0.3$ (安)；

- | | |
|------------|--------------------|
| 3. 充电电流有效值 | $I_e = 0.212$ (安); |
| 4. 充电频率 | $f = 400$ (赫); |
| 5. 对地耐压 | 8000(伏); |
| 6. 温升 | 60(°C)。 |

1. 铁芯体积计算

这里选用 D310、厚度为 0.08 毫米的薄钢带料制成铁芯。同时，可近似地以频率 f 为 500 赫时的曲线 8-12 中求得该材料的磁感应强度 B_m 为 8000 高斯。磁场强度 H_c 为 0.35 安匝/厘米，再根据给定数据中的充电电感 L 和充电电流的峰值 I ，即可得充电电抗器的铁芯体积为：

$$V_c = \frac{LI^2 \times 10^8}{B_m(H_c + H_0)K} = \frac{LI^2 \times 10^8}{B_m \left(H_c + \frac{H_c}{0.0102 \sim 0.0135} \right) k}$$

式中的系数 (0.0102~0.0135) 是随不同的充电电抗器和不同的铁芯材料而变的。如属小型充电电抗器，而铁芯材料又属一般，则式中系数趋于上限选用；反之，则式中系数趋于下限选用。

在本例中，根据给定技术条件是属小型充电电抗器。而所选用的铁芯材料又属一般，则式中系数 (0.0102~0.0135) 取上限，即得：

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{LI^2 \times 10^8}{B_m \left(H_c + \frac{H_c}{0.0115} \right) k} = \frac{10 \times 0.3^2 \times 10^8}{8000 \left(0.35 + \frac{0.35}{0.0115} \right) \times 0.8} \\ &= \frac{0.9 \times 10^8}{8000(0.35 + 30.4) \times 0.8} = \frac{0.9 \times 10^8}{8000 \times 31 \times 0.8} \\ &= 434 \text{ 厘米}^3 \end{aligned}$$

依 V_c 之计算值，从 C 型铁芯系列表 1-4 中求得近似铁芯型号为 CD25×50×100。其铁芯结构尺寸为：

$$\text{铁芯截面积 } S_c = 11.5 \text{ (厘米}^2\text{)}$$

铁芯窗孔高度 $h=100$ (厘米)
 铁芯窗孔宽度 $C=40$ (厘米)
 磁路平均长度 $L_{CT}=35.5$ (厘米)
 铁芯重量 $G_0=3.15$ (kg)
 绕组散热面积 $F_m=576$ (厘米²)
 铁芯散热面积 $F_0=198$ (厘米²)
 总散热面积 $S_1=576+198$ (厘米²)

由此可得图 11-1 的铁芯结

构。

2. 绕组匝数计算

$$N = \frac{LI \times 10^8}{E_m S_c} = \frac{10 \times 0.3 \times 10^8}{8000 \times 11.5}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{92000} = 3260 \text{ (匝)}$$

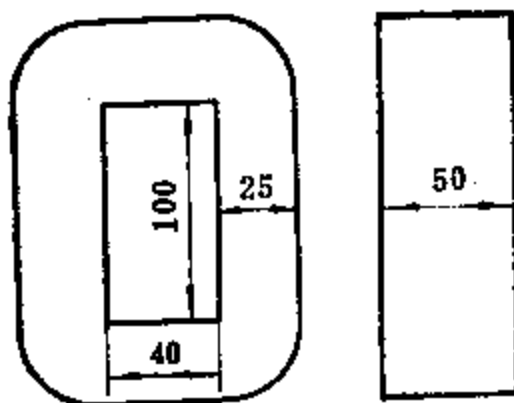


图 11-1

3. 绕组导线计算

充电电抗器的绕组线径，不是根据充电电流的峰值，而是根据充电电流的有效值 I_s ，以及绕组导线的电流密度 j 计算。

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I_s}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.12}{1.5}}$$

$$= 1.13 \times 0.3759 = 0.425 \text{ (毫米)}$$

根据 d 之计算，从国产漆包线规格表 1-5 中求得实用导线值 $d=0.44$ 毫米，导线最大外径 $d_m=0.50$ 毫米，每千米导线的直流电阻为 115 欧。

4. 绕组结构计算

计算绕组结构之前，应先确定一些与绕组结构计算有关的数据。即

绕组确定在骨架上绕制，并将绕组总匝数 3260 匝，均分在两骨架上绕制，各绕 1630，骨架内墙板厚 6 毫米，骨架端墙板厚 5 毫米，骨架高度为 100 毫米，骨架两端各空出 10 毫米，绕线宽度

不大于80毫米。

绕组层间用0.12毫米厚的电缆纸三层，宽度不大于90毫米。

绕组外包0.12毫米厚的电缆纸三层，宽度不大于90毫米。

绕组排绕系数 $K_{\text{排}}=1.05$

绕组叠线系数 $K_{\text{叠}}=1.15$

(1) 绕组每层匝数

$$a = \frac{\text{绕线宽度}}{d_m K_{\text{排}}} = \frac{80}{0.5 \times 1.05} \\ = 152 \text{ (匝/层)}$$

(2) 绕组层数

$$a' = \frac{N}{2a} = \frac{3260}{2 \times 152} = 11 \text{ (层)}$$

(3) 绕组厚度

$$\delta = K_{\text{叠}} a' (d_m + 3 \times 0.12) + 6 + 3 \times 0.12 \\ = 1.15 \times 11 (0.5 + 3 \times 0.12) + 6 + 0.36 \\ = 12.65 \times 0.86 + 6.36 = 17.34 \text{ (毫米)}$$

(4) 绕组总厚度

$$D_m = 2\delta = 2 \times 17.34 = 34.7 \text{ (毫米)}$$

(5) 绕组平均匝长

$$L_{\text{мсг}} = 2(A + B + \pi\delta) = 2(2.5 + 5 + 3.14 \times 1.734) \\ = 25.9 \text{ (厘米)}$$

(6) 绕组用线长度

$$l_1 = l_{\text{мсг}} N = 2 \times 25.9 \times 3260 \times 10^{-2} = 1689 \text{ (米)}$$

经上述绕组结构计算，其绕组厚度34.7毫米，未能超过所选
用铁芯窗孔宽度40毫米，则计算可取，毋须进行调整。

5. 铜、铁损耗计算

(1) 绕组导线的直流电阻

$$R_1 = L_1 r \times 10^{-3} = 1689 \times 115 \times 10^{-3} \\ = 194 \text{ (欧)}$$

(2) 绕组铜损耗

$$P_m = I_1^2 R_1 = 0.212^2 \times 194 \approx 8.72 \text{ (瓦)}$$

(3) 铁损耗：根据给定数据中的工作频率为 400 赫，以及所选的铁芯材料为 D310、0.08 毫米厚的硅钢带料，从曲线 8-13 中求得该材料的单位损耗为 6.2 瓦/公斤，则铁芯损耗即为，

$$P_{CT} = P_c G_c = 6.2 \times 3.15 = 19.53 \text{ (瓦)}$$

6. 温升计算

由于本设计计算实例属小型充电电抗器，又因铁芯损耗不大，绕组两端压降也不大，同时，绕组对地耐压也只有 8000 伏。因此，本例的温升计算，完全可以采用空气自冷式的方法进行。

即

$$\Delta t = \frac{P_m + P_{CT}}{\alpha S_i} = \frac{8.72 + 19.53}{1.3 \times 10^{-8} \times 774}$$
$$= \frac{28.25 \times 10^3}{1006.2} = 28.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

温升 Δt 之计算值并未超过给定数据中的 $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的允许值，因此设计可取。

7. 磁路中的气隙长度计算

$$\frac{\delta_z}{L_{CT}} = 0.012$$

$$\delta_z = 0.012 L_{CT} = 0.012 \times 35.5 = 0.426 \text{ (厘米)}$$

取整数 4 毫米，装配调整时可用纸片垫入。

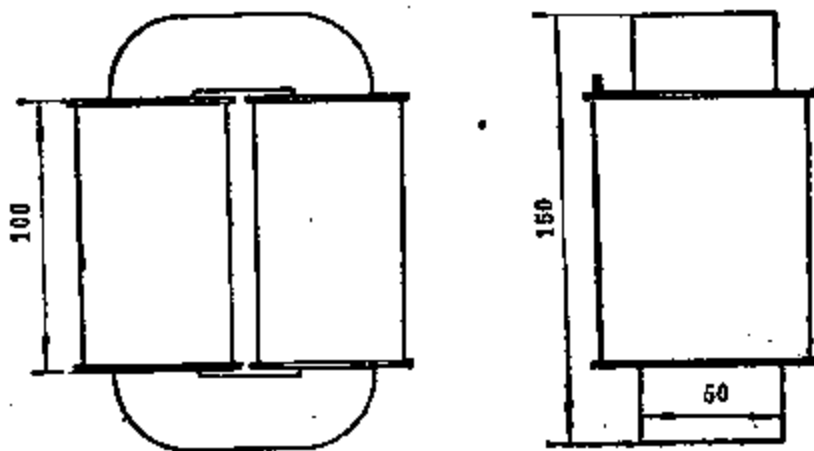


图11-2

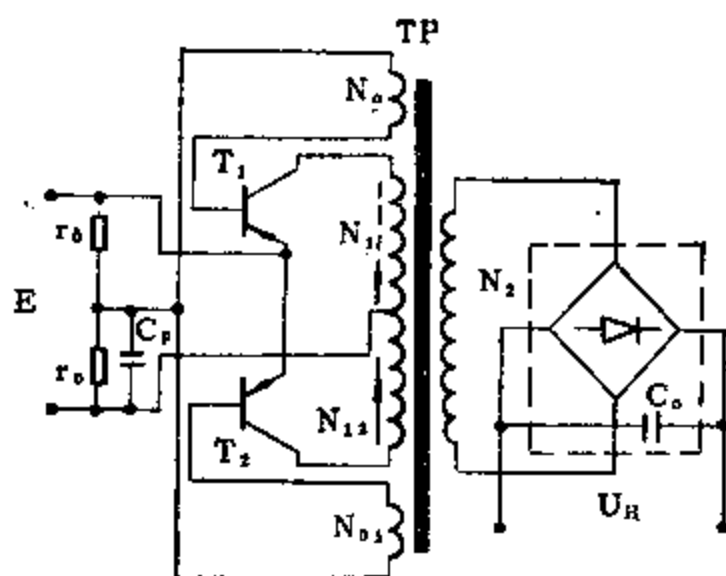
第十二单元 晶体管直流变换器中的 变压器设计计算

在讨论变压器之前，先提示一下晶体管直流变换器。这类变换器主要由换流（将低压直流变换为低压交流）、变压（将低压交流变换为高压交流）及整流（将高压交流变换为高压直流）三部分组成，如图12-1。其中第二部分，就是本单元所要讨论的变压器。

这类变压器通常有三个绕组，初级绕组（集电极绕组），反馈绕组（基极绕组）、次级绕组（输出绕组）。

初级绕组和反馈绕组各有中心抽头，有相应的两臂（ N_{11} 、 N_{12} 、 N_0 、 N_{01} ）。见图12-1所示。

这类变压器，不仅能起着变换电压幅度和传输能量的作用，同时还能将直流变换成交流。而这一变换，主要是通过换流器使绕组中的电流按图12-1中的实线和虚线箭头方向交替变化。这样，在变压器的次级绕组中



晶体管直流变换器电路

图 12-1

就会因基本电磁感应原理而产生交流感应电动势，达到其换流和变压的目的，再经变压器的次级绕组输出整流，则变换器的变换

过程和变压器的工作过程即全部结束。

这类变压器与普通变压器相比，有如下特点：

1. 交流电压为矩形波；
2. 工作频率较高，常在300~500赫左右；
3. 对漏感有一定要求；
4. 铁芯材料，常随交流电压的频率而定，见表12-1。

这类变压器的铁芯型式，常见有壳式和芯式（E型和环型）两类。当交流电压的频率为高频时，则变压器的铁芯多用铁氧体，同时，常以壳式为多。

这类变压器的设计计算分为：功率计算、铁芯计算、绕组匝数计算、绕组电流计算、绕组导线计算等。

1. 功率计算

这类变压器的计算功率，常以初级功率和次级功率之和的平均值进行计算，同时，各绕组的功率应以有效值计，因为次级绕组多供整流之用，而次级绕组中的电流应随整流型式不同而有所不同。所以，绕组中的功率应以有效值计。根据不同的整流型式和电路特点，提出变压器的功率计算方法如下

(1) 全波整流时的变压器的计算功率

$$P_T = (1.45 \sim 1.5) P_H \quad (\text{瓦})$$

如果考虑到反馈绕组的功率，则

$$P_T = (1.5 \sim 1.55) P_H \quad (\text{瓦})$$

(2) 桥式和倍压整流时的变压器计算功率

$$P_T = 1.2 P_H \quad (\text{瓦})$$

如果考虑到反馈绕组的功率，则

$$P_T = (1.25 \sim 1.3) P_H \quad (\text{瓦})$$

式中：

P_T ——变压器计算功率（瓦）；

P_H ——负载功率（瓦）。

2. 铁芯计算

这类变压器的铁芯计算，不同于普通变压器只算铁芯截面积 S_c ，而是要计算铁芯截面积 S_c 与铁芯窗孔面积 S_o 之积。

其具体表达式为：

$$S_c S_o = \frac{P_T \times 10^8}{2f B_m j \eta K_c K_m} \quad (\text{厘米}^4)$$

式中：

P_T ——变压器计算功率 (瓦)；

η ——变压器效率 (0.8~0.9)；

K_m ——绕组铜线在铁芯窗孔中的填充系数 (0.25~0.3)；

K_c ——铁芯填充系数 (0.8~0.9)；

f ——振荡频率 (赫)。

绕组导线的电流密度 j 一般可在 1.5~2.5 安/毫米² 的范围内选取，如果选用耐热高的漆包线，则电流密度 j 之值，也可在 3~4 安/毫米² 之内选用。

铁芯材料的磁感应强度 B_m 之值，在计算时应选取准确，不然会影响振荡频率偏离而造成变换器的工作状态发生改变。因此，只要振荡频率 f 之值偏离较大，则 B_m 之值就必须重新进行计算。

其计算方法是：先将上式算得的 $S_c S_o$ 之值，从表 12-2 或表 12-3 中求得相应的铁芯截面积 S_c 。然后初步估算出集电极绕组匝数和基极绕组匝数，并绕制成线圈装上铁芯，同时，按变换器的实际工作状态通电，测得其所需的振荡频率 f 。这样，按下式计算出铁芯材料的磁感应强度 B_m 之值，即

$$B_m = \frac{(E - U_{KP} - I_{KP} R_1) \times 10^8}{4f S_c N_1} \quad (\text{高斯})$$

式中：

N_1 ——初级绕组每臂匝数；

S_c ——铁芯截面积 (厘米²)；

E ——电源电压 (伏)；

U_{Kp} ——集电极电压降 (伏);

I_{Kp} ——集电极电流 (安);

R_1 ——初级绕组导线的直流电阻 (欧姆)。

根据实测得到的振荡频率 f ，以及上式算得的铁芯材料的磁感应强度 B_m 之值，即可按下面提供的方法，重新进行绕组匝数计算和其它参数计算。这样，就能保证所需的振荡频率 f 不致偏离。

这里提供两种可应用在高频工作状态下的 E 型铁氧体铁芯和环型铁氧体铁芯，见表 12-2 和表 12-3 所示。

如果振荡频率 f 不甚高时，也可按表 8-1 或表 8-2 中所提供的铁芯进行选用。

3. 绕组匝数计算

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = \frac{(E - U_{Kp} - I_{Kp}R_1) \times 10^8}{4fB_mS_c} \quad (\text{每一臂匝数})$$

当电源电压 E 大于 20 伏时，式中的 U_{Kp} 和 $I_{Kp}R_1$ 之值即可略去不计。

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = (1.2 \sim 1.5) \frac{U_H}{E - U_{Kp}} N_1 \quad (\text{匝})$$

(3) 反馈绕组匝数

$$N_3 = N_1 \frac{3 \sim 4}{E - U_{Kp}} \quad (\text{每一臂匝数}) \quad (\text{匝})$$

4. 绕组电流计算

(1) 初级绕组中的电流

$$I_1 = \frac{I_{Kp}}{\sqrt{2}} \quad (\text{安})$$

(2) 次级绕组中有效电流

$$I_2 = I_H \quad (\text{安})$$

(3) 反馈绕组中有效电流

$$I_0 = \frac{I_g}{\sqrt{2}} \text{ (安)}$$

式中:

I_{KP} ——集电极电流 (安);

I_E ——基极电流 (安);

I_H ——负载电流 (安)。

5. 绕组导线计算

(1) 初级绕组线径

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} \text{ (毫米)}$$

(2) 次级绕组线径

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} \text{ (毫米)}$$

(3) 反馈绕组线径

$$d_0 = 1.13 \sqrt{\frac{I_0}{j}} \text{ (毫米)}$$

绕组结构计算方法完全与普通变压器相同。为避免重复,在实例运算中进行介绍。

另外,有关这类变压器的铜、铁损耗计算,以及温升计算,一般均未进行。因为在正常状态下,铜、铁损耗不大,而温升也不甚高,特别是选用铁氧体铁芯,更是如此。

如果,变压器的计算功率 P_r 较大,而振荡频率 f 又较高,同时又选用硅钢制铁芯,则铜、铁损耗和温升计算,均不可忽视。

这里介绍几种应用在高频状态下的铁芯的单位损耗,以供参考,见曲线12-1。

晶体管变换器中变压器铁芯材料

【例】计算一只晶体管直流变换器中的变压器。

已知:

表12-1

晶体管交换器中变压器铁芯材料表

铁芯材料 牌 号	材料厚度 (mm)	预定频率 (赫)	饱和磁感应 (高斯)	给定磁感应值和给定频率下损耗系数的预定值		
				磁感应 (高斯)	频 率 (赫)	损耗系数 (瓦/kg)
D320	0.2	至 400	12000	10000	400	10
D340						12
D310	0.05~0.08	至1000	14000		400~1000	8~12
50HP	0.05~0.15	至2000	14500	14500	1000~2000	5~12
M-2000		1000~5000	2500	2500	1000~5000	5~8
M-3000						

表12-2

E型磁芯尺寸表

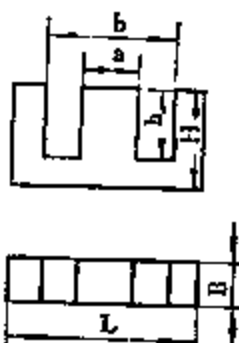
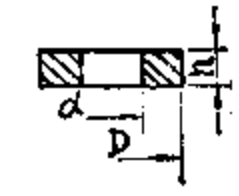
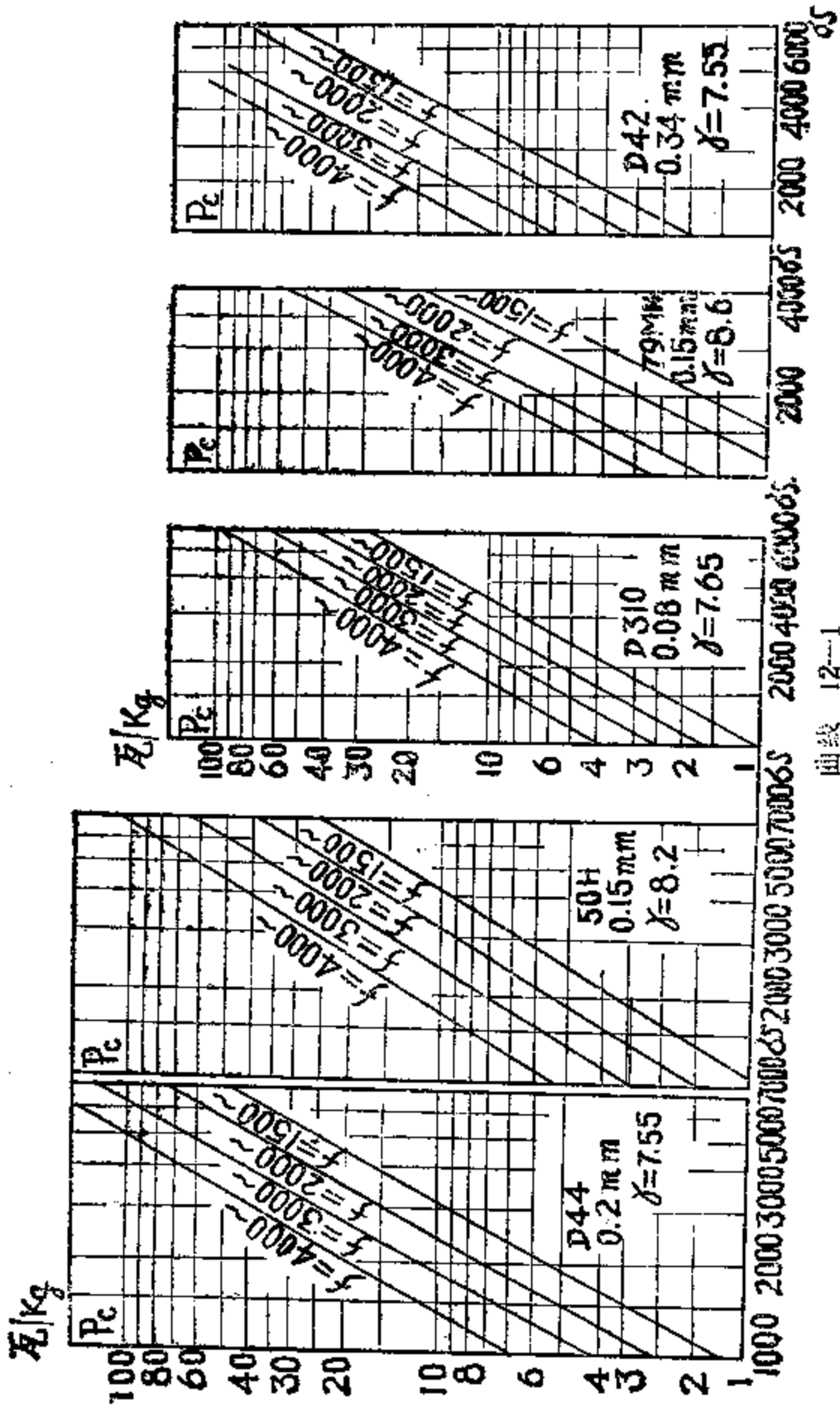
规格	尺 寸 (mm)						ScSo cm ⁴	铁芯结构
	a	b	L	h	H	B		
E-3	3-0.5	8+0.8	12-1	8+0.8	12-1	3-0.5	0.018	
E-4	4-0.5	10+0.9	16-1.2	10+0.9	16-1.2	4-0.5	0.048	
E-5	5-0.5	13+1	20-1.2	13+1	20-1.2	5-0.5	0.13	
E-6	6-0.8	16+1.2	24-1.4	16+1.2	24-1.6	6-0.8	0.287	
E-7	7-0.8	18+1.6	30-1.8	18+1.6	30-1.8	7-0.8	0.486	
E-12	12-1	26+1.8	43-2.4	26+1.8	43-2.4	12-1	3.23	
E-17	17-1.2	37+2.2	55-2.8	37+2.2	55-2.8	17-1.2	10.77	

表12-3

环型磁芯尺寸

规格 D×d×h	尺 寸 (mm)			ScSo cm ⁴	
	D	d	h		
7×4×2	7±0.5	4±0.4	2±0.2	0.00376	
10×6×5	10±0.5	6±0.4	5±0.3	0.0169	
18×8×5	18±0.6	8±0.5	5±0.3	0.126	
22×11×5	22±0.6	11±0.5	5±0.3	0.261	
31×18×7	31±1	18±0.7	7±0.5	1.183	
37×23×7	37±1.1	23±0.8	7±0.5	2.04	
45×26×8	45±1.2	26±1	8±0.5	3.41	

材料 MXO-2000, MXD-2000



曲线 12-1

1. 电源电压 $E=24$ (伏);
2. 反馈绕组电压 3 (伏);
3. 负载电压 $U_H=800$ (伏);
4. 负载电流 $I_H=0.03$ (安);
5. 集电极电流 $I_{KP}=0.63$ (安);
6. 基极电流 $I_g=0.01$ (安);
7. 振荡频率 $f=4000$ (赫);
8. 发射极—集电极电压 $U_{KP}=0.5$ (伏);
9. 次级绕组为桥式整流输出。

按上述计算步骤:

1. 变压器计算功率

$$P_T=1.3P_H=1.3 \times 800 \times 0.03=31.2 \text{ (瓦)}$$

2. 铁芯计算

根据给定数据中的振荡频率较高, 确定选用铁氧体铁芯。同时, 从表12-1中求得该铁芯的磁感应强度 B_m 之值为 2500 高斯, 另外, 再确定绕组导线的电流密度 j 为 2.5 安/毫米², 变压器效率 η 为 0.85, 铁芯填充系数 K_c 为 0.9, 绕组铜线在铁芯窗孔中的填充系数 K_m 为 0.25。则

$$\begin{aligned} S_c S_o &= \frac{P_T \times 10^6}{2f B_m j \eta K_c K_m} = \frac{31.2 \times 10^6}{2 \times 4000 \times 2500 \times 2.5 \times 0.9 \times 0.25} \\ &= \frac{31.2 \times 10^6}{11250000} = 2.77 \text{ (厘米}^4\text{)} \end{aligned}$$

根据 $S_c S_o$ 之计算值, 从表12-2中求得相近的铁芯型号为 E12, 其铁芯结构尺寸为;

- 铁芯中柱宽度 $a=1.2$ (厘米);
- 铁芯厚度 $B=1.2$ (厘米);
- 铁芯窗孔宽度 $C=0.8$ (厘米);
- 铁芯截面积 $S_c=1.44$ (厘米²);
- 铁芯平均磁路长度 $L_{CT}=14.998$ (厘米);

铁芯高度 $h=2 \times 2.8$ (厘米)。

3. 绕组匝数计算

依上所述, 当电源电压 E 大于或等于 20 伏时, 则绕组匝数计算应分别由下式进行:

(1) 初级绕组匝数 (每一臂)

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{E \times 10^8}{4fB_m S_c} = \frac{24 \times 10^8}{4 \times 4000 \times 2500 \times 1.44} \\ &= \frac{24 \times 10^8}{57600000} \approx 42 \text{ (匝)} \end{aligned}$$

(2) 次级绕组匝数

$$\begin{aligned} N_2 &= 1.2 \frac{U_H N_1}{E} = \frac{1.2 \times 800 \times 42}{24} \\ &= 1680 \text{ (匝)} \end{aligned}$$

(3) 反馈绕组匝数

$$N_0 = N_1 \frac{3 \sim 4}{E} = \frac{42 \times 3.5}{24} = 6 \text{ (匝)}$$

4. 绕组电流计算

(1) 初级绕组中的电流有效值

$$I_1 = \frac{I_{KP}}{\sqrt{2}} = \frac{0.63}{1.414} = 0.45 \text{ (安)}$$

(2) 次级绕组中的电流有效值

$$I_2 = I_H = 0.03 \text{ (安)}$$

(3) 反馈绕组中的电流

$$I_0 = I_g = 0.01 \text{ (安)}$$

5. 绕组导线计算

(1) 初级绕组线径

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.45}{2.5}} = 0.48 \text{ (毫米)}$$

(2) 次级绕组线径

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.03}{2.5}} = 0.124 \text{ (毫米)}$$

(3) 反馈绕组线径

$$d_0 = 1.13 \sqrt{\frac{I_0}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.01}{2.5}} = 0.071 \text{ (毫米)}$$

各绕组导线算出之后，应依标准线规选用。因此，从国产漆包线规格表1—6中求得初级绕组导线 $d_1 = 0.47$ 毫米，最大外径 $d_{1m} = 0.53$ 毫米。

从表1-5中求得次级绕组导线 $d_2 = 0.12$ 毫米，最大外径 $d_{2m} = 0.15$ 毫米；反馈绕组导线 $d_0 = 0.07$ 毫米，最大外径 $d_{0m} = 0.1$ 毫米。

根据上面给出的铁芯结构尺寸，以及绕组导线尺寸，下面即可进行绕组结构计算。

6. 绕组结构计算

为计算绕组结构，确定各绕组均在同一骨架上绕制。

初级绕组和反馈绕组均采用双线并绕，然后分臂使用。

骨架高度不大于5.6 (厘米)；

骨架内墙板厚度不大于0.08 (厘米)；

骨架端墙板厚度不大于0.15 (厘米)；

绕线宽度不大于4.8 (厘米)；

组与组间绝缘用0.12毫米厚的电缆纸3层，纸宽不大于5.3 (厘米)

初级绕组层间用0.12毫米厚的电缆纸1层，纸宽不大于5.3 (厘米)

次级绕组层间用0.05毫米厚的电缆纸1层，纸宽不大于5.3 (厘米)

绕组外包0.12毫米厚的电缆纸3层，宽度不大于5.3 (厘米)

绕组排绕系数 $K_{排} = 1.05$ (初级)

$$\text{绕组叠绕系数} \left\{ \begin{array}{l} K_{\text{排}}=1.1 \text{ (次级)} \\ K_{\text{排}}=1.15 \text{ (反馈)} \\ K_{\text{叠}}=1.15 \text{ (初级)} \\ K_{\text{叠}}=1.15 \text{ (次级)} \\ K_{\text{叠}}=1.2 \text{ (反馈)} \end{array} \right.$$

(1) 初级绕组层匝数 (以双线并绕计算)

$$a_1 = \frac{\text{绕线宽度}}{2d_{1m} K_{\text{排}}} = \frac{48}{2 \times 0.53 \times 1.05} \approx 43 \text{ (匝/层)}$$

(2) 初级绕组层数 (以双线并绕计算)

$$a_1' = \frac{N_1}{a_1} = \frac{42}{43} = 1 \text{ 层}$$

(3) 初级绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta_1 &= K_{\text{叠}} a_1' (d_{1m} + 0.12) + 3 \times 0.12 + 0.8 \\ &= 1.15 \times 1 (0.53 + 0.12) + 0.36 + 0.8 \\ &= 0.7475 + 1.16 = 1.91 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

(4) 次级绕组层匝数

$$a_2 = \frac{\text{绕线宽度}}{d_{2m} K_{\text{排}}} = \frac{48}{0.15 \times 1.1} = 290 \text{ (匝/层)}$$

(5) 次级绕组层数

$$a_2' = \frac{N_2}{a_2} = \frac{1680}{290} \approx 6 \text{ (层)}$$

(6) 次级绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta_2 &= K_{\text{叠}} a_2' (d_{2m} + 0.05) + 0.12 \times 3 \\ &= 1.15 \times 6 (0.15 + 0.05) + 0.36 \\ &= 1.38 + 0.36 = 1.74 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

(7) 反馈绕组层匝数 (双线并绕)

$$a_0 = \frac{\text{绕线宽度}}{2d_{0m} K_{\text{排}}} = \frac{48}{2 \times 0.1 \times 1.15} = 200 \text{ (匝/层)}$$

(8) 反馈绕组层数

$$d_0 = \frac{N_0}{a} = \frac{6}{200} \approx 0.03 \text{ (取整数1)}$$

(9) 反馈绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta_0 &= K_{\text{叠}} a_1' (d_{0m} + 0.05) + 3 \times 0.12 \\ &= 1.2 \times 1 (0.1 + 0.05) + 0.36 = 0.54 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

(10) 绕组总厚度

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_1 + \delta_2 + \delta_0 \\ &= 1.91 + 1.74 + 0.54 \approx 4.2 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

经计算得到的绕组厚度 δ ，未能超过所选铁芯的窗孔宽度 C ，则绕组结构设计可取，毋须进行调整。

若实测时发现振荡频率偏离不大，则整个设计可取，反之，应根据上述方法修改调整，直至频率达到要求为止。

第十三单元 低频变压器设计计算

低频变压器，主要用来变换宽频带讯号的变压器。这类变压器，按其电路中所处的位置不同，又可分为输入变压器、级间变压器和输出变压器。输入变压器是接在信号源与电子设备之间作匹配之用。级间变压器接在上一级输出电路和下一级输入电路之间，作前后级耦合之用。输出变压器接在输出电路和负载之间，作设备与负载匹配之用。

无论作何种用途，都要求变压器能使变换前后的讯号波形相同而无失真。有时还要求有一定数值的输入阻抗和输出阻抗，使之能保持输入或输出电路的平衡性。同时，还要求能传输一定的功率等。

另外，在经济结构方面，还要求体积小，重量轻、成本低、不过视其用途不同，又各有侧重。如用于固定式电子设备中的变压器，要求成本低是主要的，如用于航海、航空，以及战地等移动式电子设备中的变压器，则要求体积小和重量轻是主要的，而对成本低的要求则是次要的了。

这类变压器，虽视用途有别，但就设计计算方法和步骤而言，基本上还是相同的。

其具体步骤分为铁芯截面积计算，初、次级绕组的匝数比计算，每伏匝数计算，初级绕组两端的音频电压计算，绕组匝数计算，绕组电流计算等。

1 铁芯截面积计算

(1) 单管输出变压器的铁芯截面积

$$S_c = 1.3 \sqrt{\frac{60P_H}{f}} \quad (\text{厘米}^2)$$

(2) 推挽输出变压器的铁芯截面积

$$S_c = 1.6 \sqrt{\frac{60 P_H}{f}} \quad (\text{厘米}^2)$$

式中:

S_c ——铁芯截面积 (厘米²);

P_H ——负载功率 (瓦);

f ——最低工作频率 (赫)。

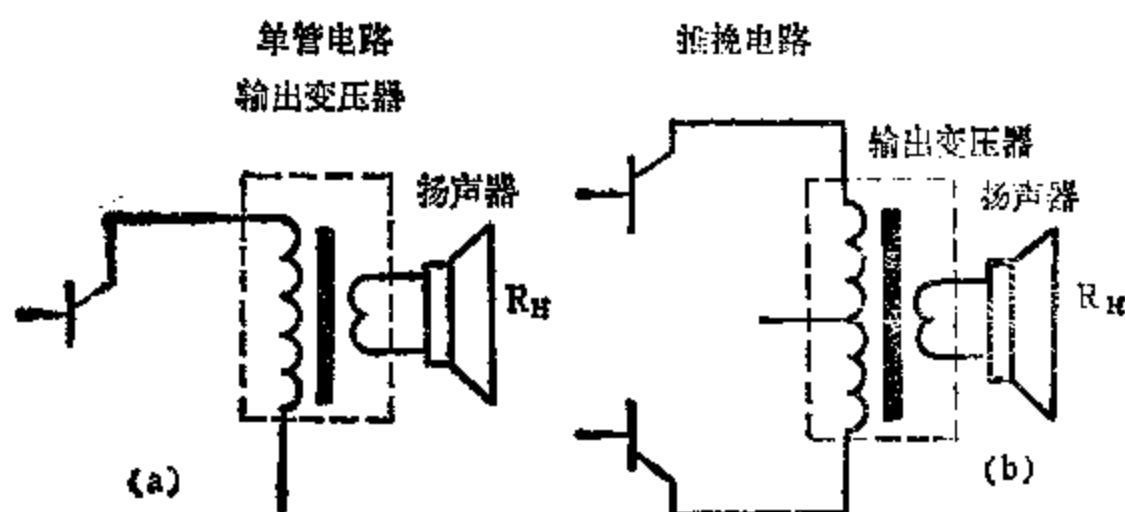


图 13—1

根据上式算得的 S_c 之值,再从表 13—1 中求得实际所需的铁芯型号和铁芯结构尺寸。这两种输出变压器的电路,见图 13—1 a、b。

2. 初、次级绕组匝数比计算

通常低频率变压器都存在一个阻抗匹配的问题。输出变压器也不例外。

低频变压器的匝数比与阻抗比之间的关系为

$$n = \sqrt{\frac{R_s}{R_H}} = \frac{N_1}{N_2}$$

式中:

n ——匝数比;

R_s ——最佳输入阻抗 (欧);
(指前级输出阻抗)

R_H ——负载阻抗 (欧).
(指扬音器的音圈阻抗)

3. 每伏匝数计算

$$W = \frac{10^8}{4.44fB_mS_c} \quad (\text{匝/伏})$$

式中:

W ——输出变压器每伏匝数 (匝/伏);

f ——最低工作频率 (赫);

B_m ——铁芯材料的磁感应强度 (高斯);

S_c ——铁芯截面积 (厘米²).

4. 初级绕组两端的音频电压计算

初级绕组两端的音频电压, 是计算绕组匝数的主要因素之一, 其值的大小与负载功率 P_H 及最佳输入阻抗有关。一般按下式进行计算。

$$E_0 = \sqrt{P_H R_s} \quad (\text{伏})$$

式中: E_0 ——初级绕组两端的音频电压 (伏);

P_H ——负载功率 (瓦)。

5. 绕组匝数计算

根据上面计算得到的绕组音频电压 E_0 及每伏匝数 W , 即可进行绕组匝数计算

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = WE_0 \quad (\text{匝})$$

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{N_1}{n} \quad (\text{匝})$$

6. 绕组电流计算

(1) 初级绕组电流

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_H}{R_s}} \quad (\text{安})$$

如变压器作单管输出时，则绕组中的电流，不仅有音频电流。同时还有直流电流。因此，在计算初级绕组中电流的时候，必须按下式进行计算，即

$$I_1' = \sqrt{I_1^2 + I_L^2} \quad (\text{安})$$

式中：

I_1' ——单管输出变压器初级绕组中的电流 (安)；

I_L ——初级绕组中的直流电流 (安)。

(2) 次级绕组中的音频电流

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_H}{R_H}} \quad (\text{安})$$

7. 绕组导线计算

(1) 初级绕组导线直径

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} \quad (\text{毫米})$$

(2) 次级绕组导线直径

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} \quad (\text{毫米})$$

初级电流密度： $j=2\sim 3$ 安/毫米²

次级电流密度： $j=4\sim 5$ 安/毫米²

该绕组结构计算与普通变压器相同。待实例运算中加以介绍。

8. 校准磁感应强度

低频变压器的非线性失真，通常是由磁芯材料的磁感应强度 B_m 之值过高而引起的。因此，必须进行计算校准。对热轧硅钢料来说， B_m 之值不得大于8000高斯。对冷轧硅钢料， B_m 之值可

略高一些。但也不得高于10000高斯。

其计算校准的方法，可按式进行。

$$B_m = \frac{1.59E_0 \times 10^7}{fS_c N_1} \quad (\text{高斯})$$

铁芯材料的磁感应强度 B_m 之值，经上式计算后，不得超过确定值。如有超过，必须进行调整。其调整的方法是，先视其铁芯窗孔是否安置全部绕组有余。如铁芯窗孔安置绕组有余，可增加初级绕组匝数 N_1 之值，然后进行计算。若铁芯窗孔安置绕组有余，可另选大一些的铁芯，以增铁芯截面积 S_c 之值，然后再进行计算，直至最后使 B_m 之值，调整到满意为止。

9. 漏感计算

对于低频变压器，不仅要解决非线性失真问题，同时还要解决频率失真问题。频率失真主要是由分布参数引起的，而分布参数主要包括分布电容和漏感，在不同的频率下，它们有着不同的影响。

如低频区域的失真，主要是由分布电容引起的。在高频区域的失真，主要是由漏感引起的。

这里仅考虑高频失真为主，也就是说要考虑漏感的大小，一般为使高频失真不至过大，就必须使漏感之值限制在允许的范围。其值的大小不得超过 $0.01L_1$ (L_1 为输出变压器初级绕组电感)。下面分别进行计算：

(1) 漏感计算

$$L_s = \frac{1.26N_1^2 L_{mCT}}{h_1} \left(\delta_0 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right) \times 10^{-9} \quad (\text{亨})$$

式中：

L_s ——漏感 (亨)；

N_1 ——初级绕组匝数；

δ_0 ——初、次级之间的间隙 (厘米)；

δ_1 、 δ_2 ——初、次级绕组厚度 (厘米)；

h_1 ——绕组高度 (厘米);

L_{mCT} ——绕组平均匝长 (厘米)。

调整漏感的方法常以改变绕组的分布型式和绕组结构尺寸为宜, 而不轻易改变初级绕组匝数 N_1 。因为改变初级绕组匝数 N_1 , 会使非线性失真受到影响。

(2) 初级绕组电感

在给定技术数据中, 若初级绕组电感未给出时, 可按下列式进行计算:

$$L_1 = \frac{1.26\mu N_1^2 S_c \times 10^{-8}}{L_{CT}} \quad (\text{亨})$$

式中:

L_1 ——初级绕组电感 (亨);

μ ——铁芯材料的有效导磁系数。

一般以材料的起始导磁系数计, 对热轧硅钢料取 300, 对冷轧硅钢料取 500。若变压器为推挽输入, 则 μ 之值可适当选用高一些。

L_{CT} ——铁芯磁路的平均长度 (厘米)。

[例]设计计算一只推挽输出变压器

已知:

1. 变压器负载功率 $P_H = 3$ (瓦);
2. 变压器负载阻抗 $R_H = 3$ (欧);
3. 变压器输入阻抗 $R_s = 1200$ (欧);
4. 变压器最低工作频率 $f = 30$ (赫)。

依上述设计计算步骤:

1. 铁芯截面积

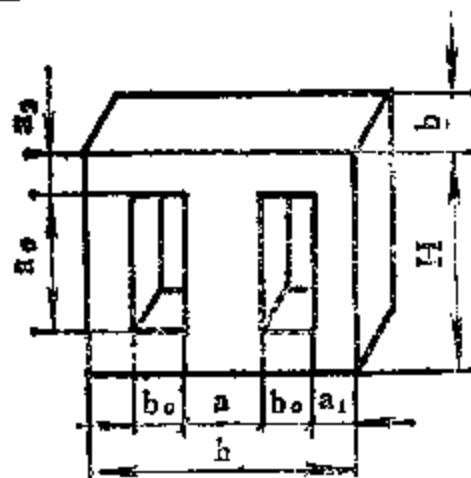
$$\begin{aligned} S_c &= 1.6\sqrt{\frac{60P_H}{f}} = 1.6\sqrt{\frac{60 \times 3}{30}} \\ &= 1.6 \times 2.449 = 3.919 \quad (\text{厘米}^2) \end{aligned}$$

根据 S_c 之计算值, 从表 13—1 中求得可供参考用的铁芯型号

表 13—1

低频变压器铁芯表

铁芯型号	铁 芯 尺 寸 (mm)						
	S_c	l_{CT}	a_c	b_c	H	h	a
III-10	10×10	6.66	18	9.5	31	36	10
	10×15						
	10×20						
III-12	12×12	6.74	22	8	38	44	12
	×16						
	×24						
III-14	14×14	7.92	25	9	43	50	14
	×21						
	×28						
III-16	16×16	9.03	28	10	48	58	16
	×24						
	×32						
III-19	19×19	10.6	33.5	12	57.5	67	19
	×28						
	×38						
III-22	22×22	12.4	39	14	67	79	22
	×33						
	×44						
III-26	26×26	14.7	41	17	81	91	26
	×39						
	×52						
III-30	30×30	16.9	53	19	91	108	30
	×45						
	×60						
III-35	35×35	19.9	61.6	22	105.5	123	35
	×52						
	×70						



为 III-14×28，铁芯截面积 $S_c=3.92$ 平方厘米。磁路平均长度 $l_{CT}=7.92$ 厘米。铁芯窗孔高度 $a_c=2.5$ 厘米，铁芯窗孔宽度 $b_c=$

0.9厘米。

2. 匝数比,

$$n = \sqrt{\frac{R_s}{R_H}} = \sqrt{\frac{1200}{3}} = 20$$

3. 每伏匝数,

$$W = \frac{10^8}{4.44fB_mS_c}$$

式中 B_m 之值取8000高斯。

$$W = \frac{10^8}{4.44 \times 30 \times 8000 \times 3.92} = \frac{10^8}{4177152} \\ = 23.939 \text{ (匝/伏)}。$$

4 初级绕组两端的音频电压

$$E = \sqrt{P_H R_s} = \sqrt{3 \times 1200} = 60 \text{ (伏)}$$

5. 绕组匝数

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = WE_0 = 23.94 \times 60 = 1436 \text{ (匝)}$$

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{N_1}{n} = \frac{1436}{20} \approx 72 \text{ (匝)}$$

6. 绕组中的电流

(1) 初级电流

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_H}{R_s}} = \sqrt{\frac{3}{1200}} = 0.05 \text{ (安)}$$

(2) 次级电流

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_H}{R_H}} = \sqrt{\frac{3}{3}} = 1 \text{ (安)}$$

7 绕组导线

这里确定初级绕组导线电流密度 $j=2.5$ 安/毫米², 次级绕组导线电流密度 $j=5$ 安/毫米²。则

(1) 初级绕组线径

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.05}{2.5}} = 0.159 \text{ (毫米)}$$

(2) 次级绕组线径

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{1}{5}} = 0.505 \text{ (毫米)}$$

根据 d_1 、 d_2 之计算值，从表 1—5 中求得初级绕组线径 $d_1 = 0.16$ 毫米，最大外径 $d_{1m} = 0.20$ 毫米，从表 1—6 中求得次级绕组线径 $d_2 = 0.51$ 毫米，最大外径 $d_{2m} = 0.58$ 毫米。

8. 绕组结构

为计算绕组结构，应先确定一些与绕组结构有关的数据，这里确定：

绕组在同一骨架上绕制，

骨架高度不得超过 25 毫米，

为防止绕组脱圈，骨架两端各留空 2.5 毫米。

初级绕组层间用 0.05 毫米厚的电缆纸一层，宽度不大于 25 毫米

次级绕组层间用 0.12 毫米厚的电缆纸一层，宽度不大于 25 毫米

骨架厚度为 0.8 毫米

绕线宽度为 20 毫米

初、次级间及绕组外面均用 0.12 毫米厚的电缆纸包 3 层。

排绕系数 $K_{排} = 1.05$

叠绕系数 $K_{叠} = 1.15$

(1) 初级绕组每层匝数

$$a_1 = \frac{\text{绕线宽度}}{d_{1m} K_{排}} = \frac{20}{0.2 \times 1.05} = 95 \text{ (匝/层)}$$

(2) 初级绕组层数

$$a'_1 = \frac{N_1}{a_1} = \frac{1436}{95} \approx 16 \text{ (层)}$$

(3) 初级绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta_1 &= K_{叠} a'_1 (d_{1m} + 0.05) + 0.8 + 3 \times 0.12 \\ &= 1.15 \times 16 \times (0.2 + 0.05) + 0.8 + 0.36 \end{aligned}$$

$$=4.60+1.16=5.76 \quad (\text{毫米})$$

(4) 初级绕组平均匝长

$$\begin{aligned} L_{m1} &= 2(a_0 + b_0) + \pi\delta_1 \\ &= 2(14 + 28) + 3.14 \times 5.76 \\ &= 84 + 18.1 = 102.1 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

(5) 次级绕组每层匝数

$$a_2 = \frac{\text{绕线宽度}}{d_{2m} K_{\text{排}}} = \frac{20}{0.58 \times 1.05} = 32 \quad (\text{匝/层})$$

(6) 次级绕组层数

$$a'_1 = \frac{N_2}{a_2} = \frac{72}{32} \approx 3 \quad (\text{层})$$

(7) 次级绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta_2 &= K_{\text{层}} d_2 (d_{2m} + 0.12) + 3 \times 0.12 \\ &= 1.15 \times 3(0.58 + 0.12) + 0.36 \\ &= 2.415 + 0.36 = 2.78 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

(8) 次级绕组平均匝长

$$\begin{aligned} L_{m2} &= 2(a + b + 2\delta_1) + \pi\delta_2 \\ &= 2(14 + 28 + 2 \times 5.76) + 3.14 \times 2.78 \\ &= 107.04 + 8.72 = 115.76 \quad (\text{毫米}) \end{aligned}$$

(9) 绕组总厚度

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 5.76 + 2.775 = 8.54 \quad (\text{毫米})$$

计算出的绕组厚度 δ 小于所选铁芯的窗孔宽度 9 毫米。则上述计算可取，毋须调整。

9. 漏感计算

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{1.26 N_1^2 L_{mCT} \times 10^{-8}}{h_1} \left(\delta_0 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right) \\ &= \frac{1.26 \times 1436^2 \times 10.86}{2} \left(0.036 + \frac{0.854}{3} \right) \times 10^{-8} \\ &= \frac{28216896.82 \times 10^{-8}}{2} \times 0.3205 \end{aligned}$$

$$=0.1411 \times 0.3205 = 0.045 \quad (\text{亨})$$

10. 初级绕组电感的近似计算

由于给定数据没有给出初级绕组电感 L_1 ，因此须经计算得到。

$$L_1 = \frac{1.26 \mu N_1^2 S_c}{l_{CT}} = \frac{1.26 \times 1436^2 \times 400 \times 3.92 \times 10^{-8}}{7.92}$$

$$= \frac{40.74}{7.92} = 5.14 \quad (\text{亨})$$

根据上述提示漏感 L_s 之值，应为 $0.01L_1$ ，则 $L_s = 0.01 \times 5.14 = 0.0514$ 亨。这样漏感 L_s 之值也未超过允许值。

11. 校准磁感应强度 B_m 之值。

$$B_m = \frac{1.59 E_s \times 10^7}{f N_1 S_c} = \frac{1.59 \times 60 \times 10^7}{30 \times 1436 \times 3.92}$$

$$= \frac{95.4 \times 10^7}{168873.6} = 5649 \quad (\text{高斯})$$

B_m 之计算值，没有超过所需铁芯磁感应强度的选用值 8000 高斯。因此，计算可取，毋须进行调整。

第十四单元 脉冲变压器设计计算

脉冲变压器在脉冲技术领域，早已得到广泛应用，主要用来变换脉冲电压幅度，变换脉冲讯号极性、分隔直流成分、阻抗匹配以及功率传输等。

无论作何种用途，对脉冲变压器都有具体要求。就电性能而言，要求脉冲变压器的激磁电感 L_1 尽可能大、漏感 L_s 和分布电容 C_0 尽可能小、波形好无失真。另外，还要求绝缘强度高、冷却条件好温升高，就经济结构而言，还要求脉冲变压器体积小、重量轻、施工方便、造价低廉等。但是，这些要求，往往都是互相矛盾和互相制约的，因此，在设计过程中，既要统酬兼顾又要折衷解决。如对单件生产，对造价一般都考虑少些，而对成批生产则不可忽视。

所以，要设计计算一只电性能优良而又经济合理的脉冲变压器是比较困难的，往往不是经过一次理论计算就能解决，而是要在设计计算过程中，经测试，改进，有时甚至往复多次，才能获得满意的效果。因此在计算时，应充分掌握影响脉冲变压器电气性能的诸因素，以及这些因素与经济效益之间的关系，同时，再进一步熟悉掌握脉冲变压器的基本设计计算方法，以求减少往复次数，少走弯路，加快设制进程，从而使设计获得满意的效果。

下面将讨论脉冲变压器的设计方法和步骤，其中将着重讨论影响脉冲变压器电气性能的诸因素的处理方法。其具体设计计算步骤，分为铁芯体积计算、绕组匝数计算、绕组电流计算、绕组导线计算、绕组结构计算、损耗计算、分布参数计算、脉冲波形计算和温升计算等。

1. 铁芯体积计算

$$V_0 = \frac{100\mu_k\tau\lambda P_H}{0.8(\Delta B)^2} \quad (\text{厘米}^3)$$

式中,

V_0 ——铁芯体积 (厘米³);

μ_k ——铁芯材料的视在导磁系数;

τ ——脉冲波形宽度 (微秒);

λ ——脉冲波形的顶部降落 (%);

P_H ——脉冲负载功率 (瓦);

ΔB ——铁芯材料的脉冲磁感应增量 (高斯)

脉冲变压器的铁芯体积 V_0 ,不是一经计算就能一蹴而就的,而是要经过绕组结构计算、脉冲波形计算、绝缘强度计算、热计算等之后,才能基本确定下来。有时,甚至到检测之后,都还有可能改变。

大家知道,对不同类型和不同用途的脉冲变压器,其铁芯型式和铁芯材料的选用也是不同的。一般小功率脉冲变压器,宜于选用各向异性的高镍(如含镍78%)坡莫合金带料制成铁芯,若为避免因高频而引起铁芯的过热现象,也可选用铁氧体铁芯。

大功率脉冲变压器,可选用高硅电工钢片D44制成铁芯,或最好选用各向异性的冷轧硅钢带料D310、D320、D330、D340、以及D360等带料制成铁芯,其材料厚度多在0.2、0.08、0.05毫米等。

功率不甚大时,可选用含镍45~65%的坡莫合金带料制成铁芯。

对脉冲功率大,波形窄(如 $\tau < 0.5$ 微秒)、前沿变化快、顶部失真系数要小($\lambda = 0.05$)的脉冲变压器,则要求材料具有很高的脉冲磁感应增量 ΔB 。而对导磁系数 μ 之值,并不要求很高,因为主要是要求有良好的高频特性,所以只要求Q值较高的软磁铁氧体(即限制工作频率较高的材料)即可。

材料厚度对涡流损耗的影响是很大的。因为涡流损耗的大小

(除频率等因素以外)，是同材料厚度的平方成正比。所以，为满足脉冲波形顶降的要求，减少涡流损耗，降低温升，应尽量选用薄钢带料制成铁芯。

脉冲变压器的铁芯型式，常见有O型卷带式铁芯（见图14—1a），以及模制的II型铁芯（见图14—1b）和E型铁芯（见图14—1c）。

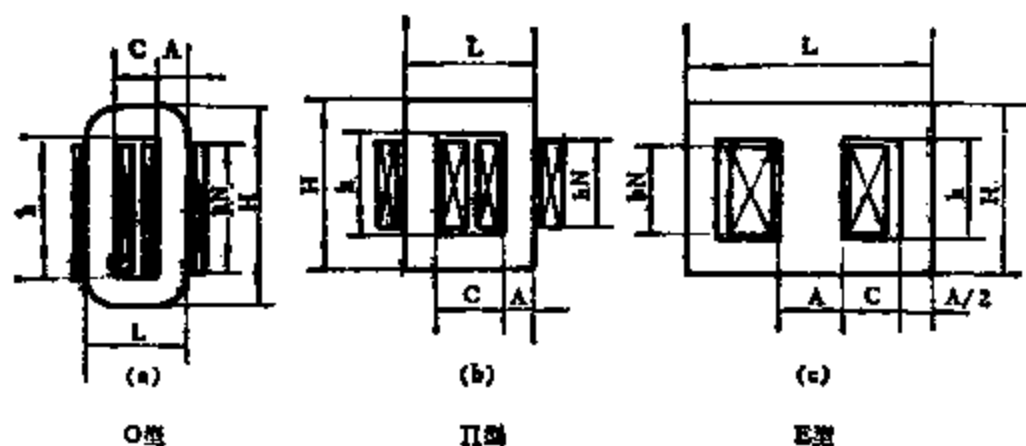


图14-1

O型和II型铁芯多用于高压大功率脉冲变压器，而E型铁芯多用于低压小功率脉冲变压器。

铁芯结构尺寸，一般可根据上式算得的铁芯体积 V_c ，再按普通变压器结构尺寸的估算法中求得（见第二单元中提供的方法）。

另外，若不为工作电压的高低所限，也可以根据热力学观点所获得最小损耗铁芯结构尺寸的比较式中求得。这里以图14—1a中的O型铁芯为例，即

铁芯窗孔高度	$h = (2-3)A$
铁芯窗孔宽度	$C = (0.8-1)A$
铁芯长度	$L = 3A$
铁芯高度	$H = (4-5)A$
铁芯厚度	$B = (1-2)A$
铁芯截面积	$S_c = (1-2)A^2$

磁路平均长度 $l_{CT} = (8.54 \sim 10.54)A$

铁芯体积 $V_c = (17.08 \sim 21.08)A^3$

但是，在具体应用中，除低压和自耦式的脉冲变压器以外，特别是高压大功率的脉冲变压器，其括号中的系数往往都趋于上限，甚致有时还有可能超过。上述三种型式铁芯的磁路平均长度的计算式如下：

O型铁芯磁路的平均长度： $l_{CT} = 2h + 1.4C + \pi A$

II型铁芯磁路的平均长度： $l_{CT} = 2(h + C) + 4A$

E型铁芯磁路的平均长度： $l_{CT} = 2(h + C) + 2.5A$

2. 绕组匝数计算

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = \frac{100U_1\tau}{\Delta B \cdot S_c K_c} \quad (\text{匝})$$

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{100U_2\tau}{\Delta B S_c K_c} \quad (\text{匝})$$

式中：

U_1 、 U_2 ——输入输出脉冲电压（伏）；

ΔB ——铁芯材料的脉冲磁感应增量（高斯）；

K_c ——铁芯填充系数（0.8~0.9）；

S_c ——铁芯截面积（厘米²）；

N_1 、 N_2 ——初、次绕组匝数。

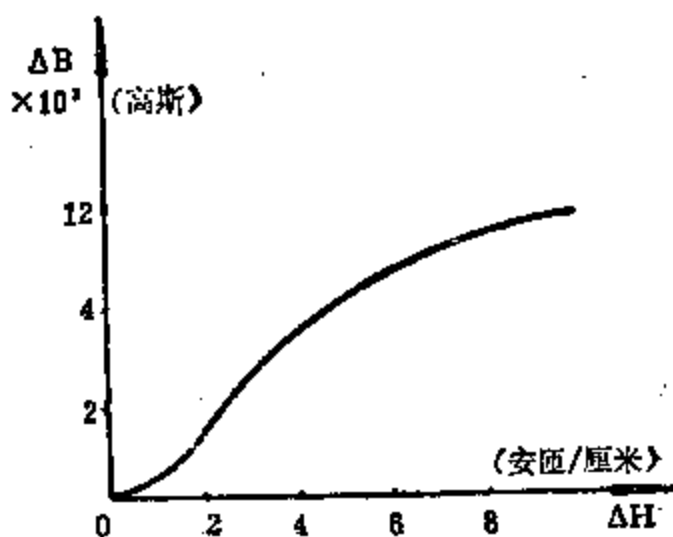
为使脉冲变压器获得良好的电气性能，脉冲磁感应增量 ΔB 之取用值，不能超过铁芯材料的最高磁感应强度 B_{makc} 与剩磁感应强度 B_{omakc} 之差，即 $\Delta B_{makc} = B_{makc} - B_{omakc}$

当铁芯材料已定的情况下，要提高 ΔB_{makc} 之值。常用的方法，是在铁芯磁路中加一定数值的直流磁场，以削弱铁芯材料的矫顽力 H_r ，或留一气隙（其值的大小，为磁路长度的千分之一至万分之一）。这样，就能降低铁芯材料的剩磁感应强度 B_{omakc} ，从

而提高铁芯材料的脉冲磁感应增量 ΔB_{max} 之值。

这里提供两种铁芯材料在脉冲工作状态下的磁感应增量 ΔB 之值作参考，见曲线14—1。

要使 ΔB 之值，更接近实用值，最好将所选用的铁芯材料结合给定的脉冲技术参数，重新测得该材料在脉冲工作状态下的磁感应增量 ΔB ，然后利用这一实测的 ΔB 值，再进行计算。



曲线14—1
D310、D340在脉冲工作状态下的磁化曲线

计算过程中，在不影响脉冲波形的顶部降落及不致引起变压器过热的情况下，应尽量将计算使用的脉冲磁感应增量 ΔB 之值，选用在铁芯材料的最大脉冲磁感应增量 ΔB_{max} 的范围。有时候宁可尽量选用薄钢带料，也不要轻易降低脉冲磁感应增量 ΔB 之值。这在一定条件下，减少脉冲变压器分布参数，从而获得良好波形的可靠途径。同时，也是获得脉冲变压器体积小，重量轻，温升低的可靠途径。

3. 绕组电流计算

(1) 初级绕组电流

$$I_1' = I_1 \sqrt{f\tau} \text{ (安)}$$

(2) 次级绕组电流

$$I_2' = I_2 \sqrt{f\tau} \text{ (安)}$$

式中：

I_1' 、 I_2' ——初次绕组脉冲有效电流 (安)；

I_1 、 I_2 ——初次绕组脉冲电流 (安)；

f ——脉冲重复频率 (赫) ;

τ ——脉冲波形宽度 (微秒 $\times 10^{-6}$) 。

4. 绕组导线计算

脉冲变压器的绕组导线, 是根据脉冲电流的有效值及电流密度来进行计算。

一般油浸式脉冲变压器的绕组导线的电流密度, $j=8\sim 10$ 安/毫米²。

空气自冷式脉冲变压器的绕组导线的电流密度, $j=4\sim 6$ 安/毫米²。

(1) 初级绕组线径

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1'}{j}} \quad (\text{毫米})$$

(2) 次级绕组线径

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2'}{j}}$$

5. 绕组结构计算

脉冲变压器的绕组结构及绕组分布型式, 是影响脉冲变压器分布参数的重要因素之一。因此, 必须根据给定技术条件, 首先确定绕组结构及绕组分布型式以及一些必要的参数, 通常是以最小分布参数为出发点, 从表14—1至表14—5中去比较选择。当确定二者均为最小分布参数之后, 再进行计算, 其计算方法与普通变压器的方法相同, 留在实例运算中再作介绍。

6. 损耗计算

(1) 铁芯损耗: 脉冲变压器铁芯中的损耗, 主要由铁芯的涡流损耗和磁滞损耗所造成。在脉冲工作状态下, 两者相比, 涡流损耗所占的比例很大, 磁滞损耗较小, 一般将其略去不计。因此, 脉冲变压器的热量主要是由铁芯的涡流损耗和绕组铜耗产生的。但是, 就绕组的铜耗而言, 小功率脉冲变压器的绕组铜耗要比铁芯涡流损耗小得多, 仍可略去不计。而大功率脉冲变压器的

绕组铜耗，则不可忽视。因此，在计算损耗的时候，应视其影响的大小分别进行计算。

(2) 涡流损耗的平均值

$$P_e = \frac{f \tau \sigma^2 U_1^2 L_{CT} \times 10^{-6}}{12 N_1^2 S_c \rho_0} \quad (\text{瓦})$$

式中：

- P_e ——铁芯中涡流损耗的平均值 (瓦)；
- ρ_0 ——铁芯材料的电阻系数 (欧姆—厘米)；
- L_{CT} ——磁路平均长度 (厘米)；
- N_1 ——初级绕组匝数 (匝)；
- σ ——铁芯材料厚度 (厘米)。

(3) 视在电流。视在电流的大小，是直接影响脉冲变压器的脉冲波形顶部降落大小的关键。因此，要求视在电流 I_m 之值越小越好。

$$I_m = \frac{80 \tau U_1 L_{CT}}{\mu_k N_1^2 S_c} \quad (\text{安})$$

式中：

μ_k 为视在导磁系数 (见曲线14—2)。

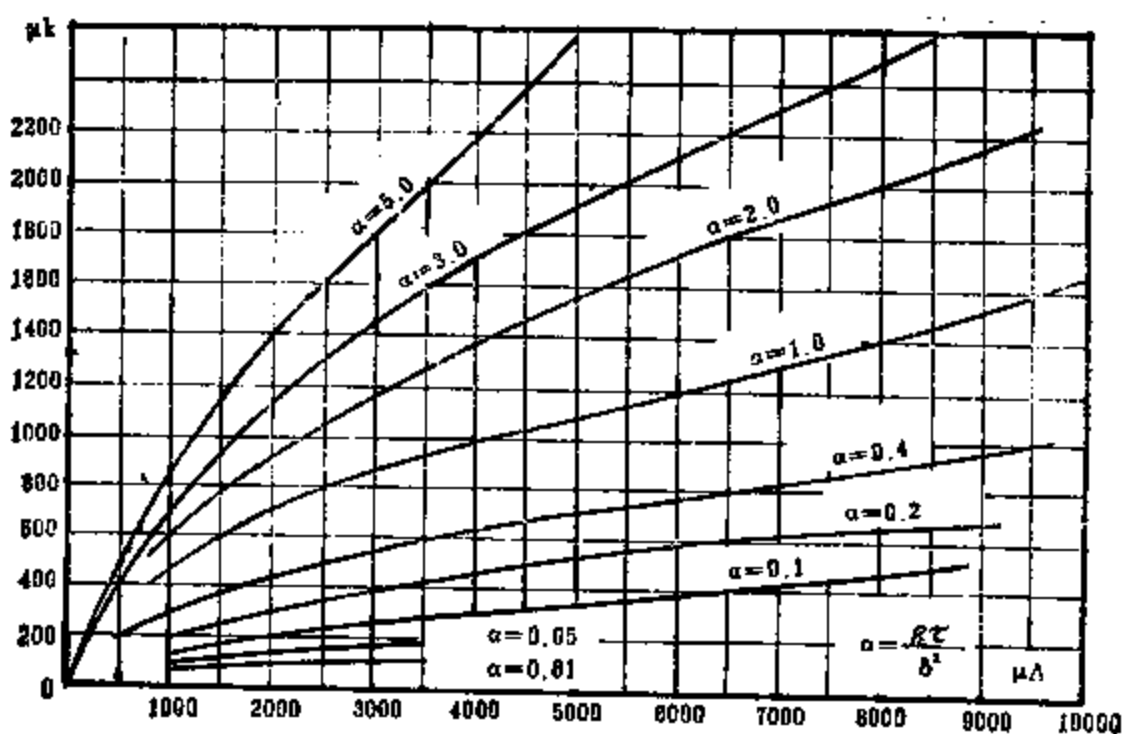
由于铁芯中存在着涡流损耗的影响，因而促使铁芯中的磁通分布不均匀，同时，也会影响脉冲导磁系数 μ_{Δ} 发生变化。变化后的脉冲导磁系数，称为视在导磁系数 μ_k 。脉冲持续时间越短，影响越大，持续时间越长，则影响越小，甚致还有可能使视在导磁系数 μ_k 之值，接近脉冲导磁系数 μ_{Δ} 之值，如选用铁氧体铁芯，就更为接近。

一般 μ_k 之值应由 $\alpha = \frac{\rho_c \tau}{\sigma^2}$ 及 $\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$ 之值，从曲线14—

2中求得。

式中：

ΔB ——铁芯材料的脉冲磁感增量 (高斯)；



曲线14—2

视在导磁系数与电阻系数、材料厚度及脉冲宽度的关系曲线

ΔH ——铁芯材料的脉冲磁场强度 (安匝/厘米)。

(4) 铜耗计算

$$P_M = I_1'^2 R_1 + I_2'^2 R_2 \text{ (瓦)}$$

7. 分布参数计算

分布参数，指绕组漏感 L_s 和分布电容 C_0 的总称。其值的大小，不仅表征脉冲波形前后沿升降的快慢，同时还表征脉冲变压器的电气性能是否优良。因此，在设计计算脉冲变压器的过程中，如何减少绕组漏感 L_s 及分布电容 C_0 之值，是值得精心研究的。

下面，我们就利用上述这些基本概念，分别进行分布参数的计算。

(1) 漏感；漏感 L_s 指没有同时通过初、次级绕组的那部分漏磁流所形成的漏感。即

$$L_s = \frac{1.26 N_1^2 L_{mCT} \times 10^{-8}}{h_H} \left(\delta + \frac{A_1 + A_2}{3} \right) k_p$$

式中：

L_s ——绕组漏感（亨）；

N_1 ——初级绕组匝数（匝）；

L_{mCT} ——初次级绕组平均匝长（厘米）；

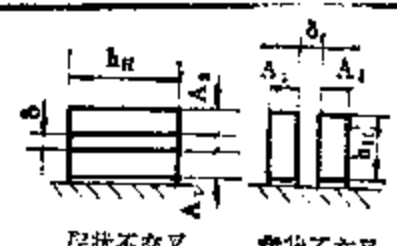
δ ——初次级间的间隙（厘米）；

A_1 、 A_2 ——初次级绕组厚度（厘米）；

h_H ——沿漏磁通方向的绕组平均长度（厘米）；

k_p ——绕组结构系数（见表14-1）。

表 14-1

绕组结构型式	k_p	
层状不交叉绕组	0.6~0.9	层状不交叉 盘状不交叉
盘状不交叉绕组	0.7~0.8	
层状盘状交叉绕组	0.9~1.0	

以上式中不难看出，要减少绕组漏感 L_s 之值，在不影响脉冲波形顶部降落入的情况下，以减少初级绕组匝数 N_1 最为有效。如果因受脉冲波形顶部降落入之值所限，就必须减少绕组结构尺寸，特别是减少初次级绕组厚度 A_1 和 A_2 、初次级之间的间隙 δ 及增加初次级绕组高度等。

当然，合理选用绕组的分布型式，如初次级绕组是采用并联还是串联，层状绕法还是盘状绕法等，也是减少绕组漏感 L_s 的有效方法之一。

(2) 分布电容：在计算分布电容 C_0 之前，先交待一下分布电容的组成。

分布电容 C_0 ，主要是指绕组与绕组之间；绕组对地或对铁芯之间；绕组层间，以及绕组匝间等电容的总称。不同分布的电容对脉冲波形的影响也是不同的。根据计算与试验证明，绕组与绕

组(一般指初次级之间)间、绕组对地之间的电容,对脉冲波形的影响是较大的,特别是在升压脉冲变压器中绕组与绕组之间的电容是主要的。因此,在计算误差不大的情况下,往往计其影响大者,而略去影响小者。所以,平时所说的分布电容,主要指绕组与绕组间的分布电容。并按下式计算。

$$C_0 \approx \frac{(n-1)^2}{0.9 \times 12\pi} \frac{\epsilon h_H L_{1CT}}{\Delta} \approx \frac{(n-1)^2}{34} \frac{h_H L_{1CT}}{\Delta} \quad (\text{微微法})$$

在具体计算时,可根据给定技术条件,以获得最小分布参数的角度出发,首先确定绕组结构及分布型式。然后,相应地从表14—2至表14—5中所提供的分布电容的计算方法,再行计算,这样就可能使脉冲变压器的脉冲波形获得满意的效果。

8. 脉冲波形计算

(1) 脉冲前沿建立时间 t ;

脉冲变压器的电气性能好坏,通常以脉冲波形的好坏来表征。而脉冲波形的好坏,又常以脉冲前、后沿的升降快慢,以及脉冲顶部降落的多少来表征,因此均应分别进行计算。

脉冲波形的前沿建立时间 t ,一般是指脉冲波形自 $0.1u_2$ 之值上升到 $0.95u_2$ 之值时所需要的时间(见图14—2)。其值的大小,多以分布参数(绕组漏感 L_s 及分布电容 C_0 之积)的大小近似地按下式进行计算

$$t = (1.5 \sim 2.5) \sqrt{L_s C_0} \quad (\text{秒})$$

脉冲波形的前沿建立时间 t 往往较脉冲后沿下降时间长,因此,在设计过程中一般只计前者不计后者。

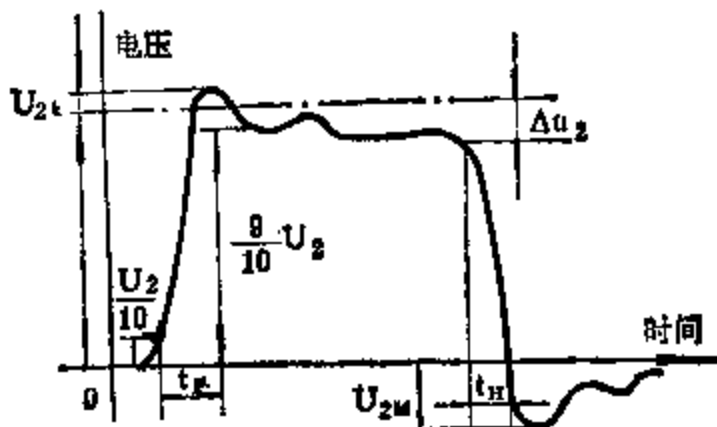
式中单位,漏感 L_s 为亨,分布电容 C_0 为法拉。

(2) 脉冲波形顶部降落

$$\lambda = \frac{I_m}{I_1} (\%)$$

通过前面对影响脉冲波形诸因素的分析 and 脉冲波形顶部降落

的具体计算式可以看出：当给定技术条件不变，在流过脉冲变压器初级绕组中的脉冲电流 I_1 已定的情况下，铁芯中的激磁电流反应到脉冲变压器初级绕组中的视在电流 I_m 是影响脉冲变压器脉冲波形顶部降落的关键。而 I_m 的大小，又主要取决于铁芯材料的磁性能。这里所指的铁芯磁性能，主要是指铁芯材料的饱和磁感应强度 B_m 的高低、铁芯涡流损耗的大小，以及由铁芯涡流损耗而引起的导磁系数 μ 的改变程度和铁芯材料本身导磁系数 μ 的高低。



矩形脉冲通过变压器后的失真

图 14-2

因此，对脉冲变压器脉冲波形的顶部降落而言，在一定条件下，如果铁芯材料的导磁系数 μ 越高，涡流损耗越小，则铁芯中的激磁电流反应到脉冲变压器初级绕组中的视在电流 I_m 就越小。而脉冲波形的顶部降落入就越低。所以

在确定铁芯材料的时候，要保证满足脉冲波形顶部降落的要求时，就应选用导磁系数 μ 高、涡流损耗小的铁芯材料。

9. 温升计算

$$\Delta\tau = K_T \frac{P}{S} (\text{℃})$$

式中：

P ——总损耗功率（瓦）；

S ——散热面（厘米²）。

K_T 与散热面有关的系数

根据不同的冷却条件和冷却方式，其 K_T 之值是不同的。

空气自冷式

$$K_T = 600 \frac{(\text{厘米})^2 \text{℃}}{\text{瓦}}$$

表14-2

绕组分布型式及分布参数计算表

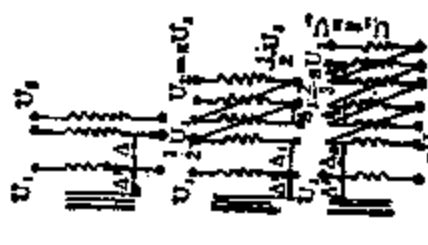
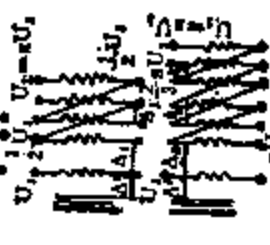


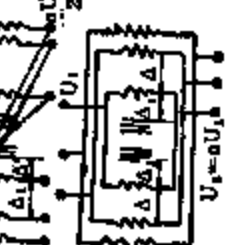

绕组布置	漏感 (微亨)	绕组电容 (微微法)	初级绕组电容 (微微法)	次级绕组电容 (微微法)
	$L_p = \left(\Delta + \frac{d_1 + d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{(n-1)^2}{\Delta} B$	$c = \frac{1}{\Delta'} B$	—
	$L_p = \left(\Delta_1 + \frac{\Delta_2}{4} + \frac{d_1 + 4d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{(n-1)^2}{\Delta_1} + \frac{3n^2}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{1}{\Delta'} B$	—
	$L_p = \left(\Delta_1 + \frac{5\Delta_2}{7} + \frac{d_1 + 6d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{9} \left[\frac{(n-1)^2}{\Delta_1} + \frac{3n^2}{\Delta_2} + \frac{3n^2}{\Delta_3} \right] B$	$c = \frac{1}{\Delta'} B$	—
	$L_p = \frac{1}{4} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{d_1 + d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{(n-2)^2}{\Delta_1} + \frac{7n^2 - 10n + 4}{\Delta_2} \right] B$	—	$c = \frac{n^2}{4\Delta'} B$
	$L_p = \frac{1}{4} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{2d_1 + 4d_2}{3} \right) A^{**}$	$c = \frac{(n-1)^2}{\Delta} \times \left[\frac{1}{\Delta_1} + \frac{2}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{1}{4} + \left(\frac{1}{\Delta_1} + \frac{2}{\Delta_2} \right) B$	—
	$L_p = \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{d_1 + 2d_2}{3} \right) A^{**}$	$c = 2 \frac{(n-1)^2}{\Delta} B$	$c = \frac{2}{\Delta'} B$	—

表14-3

绕组分布型式及分布参数计算表

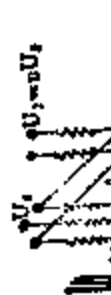
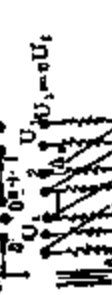
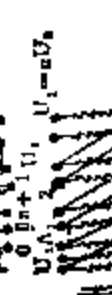
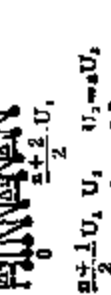

绕组分布	漏感 (微亨)	绕组电容 (微微法)	初级绕组电容 (微微法)	次级绕组电容 (微微法)
	$L_p = (n-1)^2 \left(A + \frac{d_1 + 4d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{n^2 + n + 1}{\Delta} B$	$c = \frac{B}{\Delta'}$	—
	$L_p = (n-1)^2 \left(\Delta_1 + \frac{\Delta_2}{4} + \frac{d_1 + 6d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{n^2 - 3}{\Delta_1} - \frac{3(n-1)^2}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{B}{\Delta'}$	—
	$L_p = (n-1)^2 \left(\Delta + \frac{4\Delta_2}{9} + \frac{\Delta_3}{9} + \frac{d_1 + 8d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{9} \left[\frac{n^2 + n + 7}{\Delta_1} + \frac{3(n-1)^2}{\Delta_2} + \frac{3(n-1)^2}{\Delta_3} \right] B$	$c = \frac{B}{\Delta'}$	—
	$L_p = (n-1)^2 \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{d_1 + 6d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{n^2 + 3}{\Delta_1} + \frac{7n^2 + 6n + 3}{\Delta_2} \right] B$	—	$c = \left(\frac{n^2 + n + 6}{4\Delta'} \right) \times B$
	$L_p = \frac{(n-1)^2}{4} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{2d_1 + 8d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{n^2 + 2n + 4}{\Delta_1} + \frac{7n^2 - 10n + 4}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\Delta_1'} + \frac{2}{\Delta_2'} \right) B$	—

表14-4 绕组分布型式及分布参数计算表

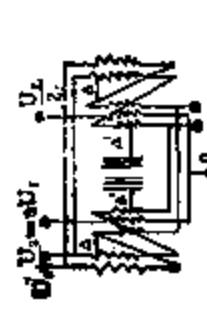
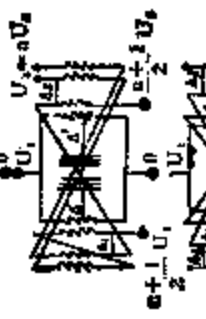

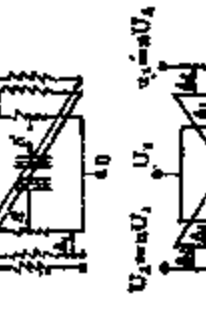

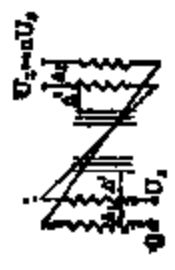

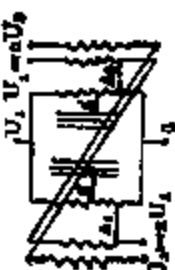

绕组分布	漏感 (微亨)	绕组电容 (微微法)	初级绕组电容 (微微法)	次级绕组电容 (微微法)
	$L_p = \frac{(n-1)^2}{2} \left(\Delta + \frac{d_1 + d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{n^2 - n + 1}{2\Delta} B$	$c = \frac{2}{\Delta} B$	—
	$L_p = \frac{(n-1)^2}{4} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{2d_1 + 6d_2}{3} \right)$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{n^2 + 3}{\Delta_1} + \frac{7n^2 - 6n + 3}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{2}{\Delta} B$	—
	$L_p = \frac{(n-1)^2}{2} \left(\Delta_1 + \Delta_2 - \frac{d_1 + 3d_2}{3} \right)$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{n^2 + 3}{\Delta_1} + \frac{3(n-1)}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{2}{\Delta} B$	—
	$L_p = \frac{1}{4} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{2d_1 + 4d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{(n-2)^2}{\Delta_1} + \frac{7n^2 - 10n + 4}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{2}{\Delta} B$	—
	$L_p = \frac{1}{2} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{d_1 + 2d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{2} \left[\frac{(n-2)^2}{\Delta_1} + \frac{3n^2}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{2}{\Delta} B$	—

表14-5 绕组分布型式及分布参数计算表

绕组分布	漏感 (微亨)	绕组电容 (微微法)	初级绕组电容 (微微法)	次级绕组电容 (微微法)
	$L_p = \frac{1}{4} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{2d_1 + 2d_2}{3} \right) A$	$c = \left[\frac{(n-1)^2}{4\Delta_1} + \frac{7(n-1)^2}{4\Delta_2} \right] B$	—	—
	$L_p = \frac{1}{4} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{2d_1 + 2d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{(n-2)^2}{\Delta_1} + \frac{7n^2 - 10n + 4}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{2}{\Delta_1} B$	—
	$L_p = \frac{1}{2} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{2d_1 + 4d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{1}{4} \left[\frac{(n-2)^2}{\Delta_1} + \frac{7n^2 - 10n + 4}{\Delta_2} \right] B$	$c = \frac{2}{\Delta_1} B$	—
	$L_p = \frac{1}{18} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \times \frac{4d_1 + 2d_2}{3} \right) A$	$c = \frac{(n-2)^2}{16\Delta_1} + \frac{19n^2 - 18n + 4}{16\Delta_2} + \frac{7n^2 - 28n + 18}{16\Delta_3} + \frac{37n^2 - 52n - 28}{16\Delta_4}$	—	—

说明 $A = 0.4\pi N_1^2 L_B \times 10^{-8}$; $B = 0.0275 \frac{L_H L_B}{L_H}$ (L_B 为绕组平均周长, L_H 为绕组长度, N_1 为初级绕组匝数, n 为变比, e 为介质的介电常数, d_1, d_2 分别为初次级导线直径, Δ 为初次级绕组距离, 单位为厘米, *为初级绕组总匝数; **为每半个初级绕组匝数。

风冷 (风速为 15 米/秒): $K_T = 150 \frac{(\text{厘米})^2 \text{℃}}{\text{瓦}}$

微风冷却: $K_T = 300 \frac{(\text{厘米})^2 \text{℃}}{\text{瓦}}$

油冷却: $K_T = 150 \frac{(\text{厘米})^2 \text{℃}}{\text{瓦}}$

对油冷却时各部分的温差计算为:

油箱壁与周围空气的温差: $\Delta t_1 = K_T \frac{P}{S_1}$

油箱壁与油的温差: $\Delta t_2 = K_T \frac{P}{S}$

变压器与油之温差: $\Delta t_3 = K_T \frac{P}{S}$

变压器与环境的温差为:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \text{ (℃)}$$

Δt 之值以不超过 30~40℃ 为宜。

[例] 设计计算一只脉冲变压器

已知:

输入脉冲电压	$U_1 = 10000$	(伏)
输出脉冲电压	$U_2 = 20000$	(伏)
输出脉冲电流	$I_2 = 150$	(安)
脉冲宽度	$\tau = 52$	(微秒)
脉冲前沿上升时间	$t = 2$	(微秒)
脉冲顶部降落	$\lambda = 6\%$	
重复频率	$f = 300$	(赫)
温升	$\Delta t = 55$	(℃)

解:

1. 铁芯体积计算

为满足脉冲顶部降落入的要求, 降低铁芯涡流损耗, 防止铁

芯过热，确定选用 D340，0.08 毫米厚的硅钢带料制成铁芯。该铁芯材料的磁性能，可从曲线 14-1 中求得脉冲磁感应增量 $\Delta B = 8000$ 高斯。脉冲磁场强度 $\Delta H = 7$ 安匝/厘米，则脉冲导磁系数 $\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{8000}{7} = 1143$ 。

另外，根据 $\alpha = \frac{\rho_{CT}}{\delta^2} = \frac{0.5 \times 10^{-4} \times 52}{0.08^2} = 0.41$ 和脉冲导磁系数 μ_d 之值，即可由曲线 14-2 中求得视在导磁系数 $\mu_K = 300$ ，则铁芯体积为：

$$V_c = \frac{100 \tau \lambda \mu_K P_s}{0.8 (\Delta B)^2} = \frac{100 \times 52 \times 0.06 \times 300 \times 20000 \times 150}{0.8 \times 8000^2}$$

$$= \frac{2.808 \times 10^{11}}{512 \times 10^6} = 5484 \text{ (厘米}^3\text{)}$$

求得铁芯体积 V_c 之后，可初估铁芯结构尺寸。

铁芯柱片宽度：

$$A = \sqrt[3]{\frac{V_c}{21}} = \sqrt[3]{\frac{5484}{21}} = \sqrt[3]{261}$$

$$= 6.2 \text{ (厘米)}$$

铁芯截面积为：

$$S_c = 2A^2 = 2 \times 6.2^2 = 76.88 \text{ (厘米}^2\text{)}$$

铁芯窗孔宽度为：

$$C = 0.8A = 0.8 \times 6.2 = 4.96 \text{ (厘米)}$$

铁芯窗孔高度为：

$$h = 3A = 3 \times 6.2 = 18.6 \text{ (厘米)}$$

考虑到高压绝缘要求，将铁芯窗孔高度 h 略取大一些，即 $h = 20$ 厘米。

铁芯磁路平均长度为：

$$L_{CT} = 2h + 1.4C + \pi A = 2 \times 20 + 1.4 \times 4.96 + 3.14 \times 6.2$$

$$= 40 + 6.944 + 19.468 = 66.4 \text{ (厘米)}$$

铁芯高度为:

$$H = h + 2A = 20 + 2 \times 6.2 = 32.4 \text{ (厘米)}$$

铁芯长度为:

$$L = C + 2A = 4.96 + 2 \times 6.2 = 17.36 \text{ (厘米)}$$

铁芯叠合厚度 $B = 2 \times A = 2 \times 6.2 = 12.4 \text{ (厘米)}$

根据以上数据, 可得图14-3

的铁芯结构。

2. 绕组匝数计算

(1) 初级绕组匝数

$$N_1 = \frac{100U_1\tau}{\Delta B \cdot S_c K_c}$$

$$= \frac{100 \times 10000 \times 52}{8000 \times 76.88 \times 0.9}$$

$$= \frac{52 \times 10^6}{553536} \approx 94 \text{ (匝)}$$

(2) 次级绕组匝数

$$N_2 = \frac{100U_2\tau}{\Delta B S_c K_c} = \frac{100 \times 20000 \times 52}{8000 \times 76.88 \times 0.9}$$

$$= \frac{104 \times 10^6}{553536} \approx 188 \text{ (匝)}$$

3. 绕组电流计算

绕组电流, 通常是以脉冲有效电流计。

(1) 初级绕组有效电流,

$$I_1' = I_1 \sqrt{f\tau} = \frac{U_2}{U_1} I_2 \sqrt{f\tau}$$

$$= \frac{20000}{10000} 150 \sqrt{300 \times 52 \times 10^{-6}}$$

$$= 300 \times 0.125 = 37.47 \text{ (安)}$$

(2) 次级绕组有效电流

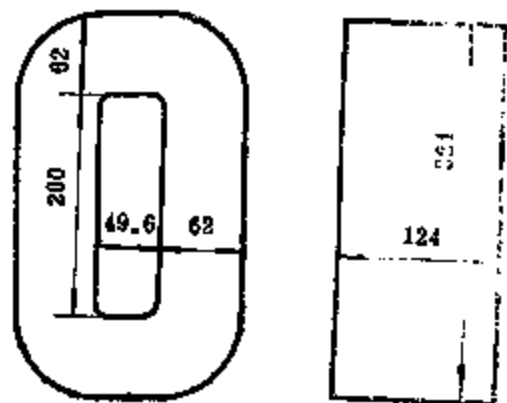


图14-3

$$I_1' = I_2 \sqrt{f\tau} = 150 \sqrt{300 \times 52 \times 10^{-6}}$$

$$= 150 \times 0.1248 = 18.73 \text{ (安)}$$

4. 绕组导线计算

绕组导线应根据流经绕组导线的有效脉冲电流及绕组导线的电流密度进行计算。这里确定变压器采用油冷，因此绕组导线的电流密度 j 取10安培/毫米²。

(1) 初级绕组线径：绕组采用并联方式，则为

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1'}{2j}} = 1.13 \sqrt{\frac{37.47}{2 \times 10}}$$

$$= 1.13 \times 1.3688 = 1.55 \text{ (毫米)}$$

(2) 次级绕组线径

绕组采用串联方式，则

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2'}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{18.73}{10}}$$

$$= 1.13 \times 1.369 = 1.55 \text{ (毫米)}$$

根据 d_1 、 d_2 之计算值，从表1-7中求得初级绕组导线 $d_1 = 1.56$ 毫米，最大外径 $d_{1m} = 1.67$ 毫米；次级绕组导线 $d_2 = 1.56$ 毫米，最大外径 $d_{2m} = 1.67$ 毫米。

d_1 、 d_2 的每千米长度的直流电阻 $R_{20^\circ\text{C}} = 9.17$ 欧。

5. 绕组结构计算

这里确定：初、次级绕组均分绕在两个骨架上，先绕初级后绕次级。

骨架长度不超过20（厘米）

初级骨架内壁厚度0.6（厘米）

初级骨架端墙板厚度0.4（厘米）

初级骨架两端（以沿面1.5kV/毫米计，则脉冲工作电压为10KV时）各空出0.65厘米（取整数？）

初级绕组绕线宽度：

$$L_{01} = 20 - 2(0.7 + 0.4) = 17.8 \text{ (厘米)}$$

次级骨架内壁厚度0.6 (厘米)

次级骨架端墙板厚度0.4 (厘米)

次级骨架两端以沿面1.5kV/毫米计, 则脉冲工作电压为20kV时面端各空出1.3 (厘米)

初次级绕组之间的油道以4.5kV/毫米计, 则脉冲工作电压为20kV时的油道宽为0.44 (厘米)

初级绕组对铁芯之间的油道以4.5kV/毫米计, 则脉冲工作电压为10kV时油道宽应近似为0.2 (厘米)

另外, 从表1-10中求得:

绕组排绕系数 $K_{排}=1.05$

绕组叠绕系数 $K_{叠}=1.15$

依上述基本数据进行绕组结构计算。

(1) 初级绕组每层匝数

$$a_1 = \frac{L_{c1}}{d_{1m} K_{排}} = \frac{178}{1.67 \times 1.05} \approx 101 \text{ (匝/层)}$$

(2) 初级绕组层数

$$a'_1 = \frac{N_1}{a_1} = \frac{94}{101} \approx 1 \text{ (层)}$$

(3) 初级绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta_1 &= K_{叠} d_{1m} a'_1 + 0.4 = 1.15 \times 0.176 \times 1 + 0.4 \\ &= 0.2 + 0.4 = 0.6 \text{ (厘米)} \end{aligned}$$

(4) 初级绕组平均匝长

$$\begin{aligned} L_{m1} &= 2(A + B + 4 \times 0.2) + 4\delta_1 \\ &= 2(6.2 + 12.4 + 0.8) + 4 \times 0.6 \\ &= 38.8 + 2.4 = 41.21 \text{ (厘米)} \end{aligned}$$

(5) 初级绕组用线长度

$$L_{11} = (L_{m1} N_1) 2 = 2 \times 41.21 \times 94 \times 10^{-2} = 77.47 \text{ (米)}$$

(6) 次级绕组每层匝数

$$a_2 = \frac{h_{12}}{d_{2m} K_{排}} = \frac{200 - 2 \times 13 - 2 \times 4}{1.67 \times 1.05}$$

$$= \frac{166}{1.7535} = 94 \text{ (匝/层)}$$

(7) 次级绕组层数

$$a'_2 = \frac{N_2}{2a_2} = \frac{188}{2 \times 94} = 1 \text{ (层)}$$

(8) 次级绕组厚度

$$\delta_2 = K_{叠} a'_2 d_{2m} + 0.6$$

$$= 1.15 \times 1 \times 0.167 + 0.6 = 0.79 \text{ (厘米)}$$

(9) 次级绕组平均匝长

$$L_{m2} = 2[A + B + 2(0.2 + \delta_1 + 0.44)] + 4\delta_2$$

$$= 2[6.2 + 12.4 + 2(0.2 + 0.6 + 0.44)] + 4$$

$$\times 0.7921$$

$$= 2[18.6 + 2.12] + 3.1684$$

$$= 41.44 + 2.12 = 43.56 \text{ 厘米}$$

(10) 次级绕组用线长度

$$L_{t2} = L_{m2} N_2 = 43.56 \times 188 \times 10^{-2} = 82 \text{ (米)}$$

(11) 绕组加油道之后的总厚度

$$\delta_{总} = 2\delta_1 + 2\delta_2 + 2(0.2 + 0.44)$$

$$= 2 \times 0.60 + 2 \times 0.79 + 1.28 = 4.07 \text{ (厘米)}$$

计算得到的 $\delta_{总}$ 之值，小于前面确定的铁芯窗孔 $C=4.96$ 厘米之值，因此，前面计算至此，暂且可取。

6. 损耗计算

脉冲变压器的损耗，主要是由铜、铁损耗组成，这是有功部分。此外，还有无功部、激磁损耗等。

前者是影响脉冲变压器是否过热的因素，后者是影响脉冲变压器的电气性能是否优良的因素。因此应分别进行计算。

(1) 铁芯涡流损耗

$$\begin{aligned}
 P_c &= \frac{f\tau\delta^2 U_1^2 L_{cT} \times 10^{-9}}{12N_1^2 S_{cp}} \\
 &= \frac{300 \times 52 \times 0.008^2 \times 10000^2 \times 10^{-9} \times 66.412}{12 \times 94^2 \times 76.88 \times 0.5 \times 10^{-4}} \\
 &= \frac{66305740.80}{4075870.08} = 16.27 \text{ (瓦)}
 \end{aligned}$$

(2) 激磁电流

视在激磁电流 I_m 按下式进行计算。

$$\begin{aligned}
 I_m &= \frac{80\tau U_1 L_{cT}}{\mu_k N_1^2 S_c} = \frac{80 \times 52 \times 10000 \times 66.412}{300 \times 94^2 \times 76.88} \\
 &= \frac{2762739200}{203793504} = 13.56 \text{ (安)}
 \end{aligned}$$

(3) 铜损耗

(a) 初级绕组导线直流电阻

$$\begin{aligned}
 R_1 &= L_{l1} R_{20^\circ C} \times 10^{-3} = 77.47 \times 9.17 \times 10^{-3} \\
 &= 0.71 \text{ (欧)}
 \end{aligned}$$

(b) 初级绕组铜损耗

$$P_{1m} = I_1^2 R_1 = (0.5 \times 37.47)^2 \times 0.71 = 249.2 \text{ (瓦)}$$

(c) 次级绕组导线直流电阻

$$\begin{aligned}
 R_2 &= L_{l2} R_{20^\circ C} \times 10^{-3} = 82 \times 9.17 \times 10^{-3} \\
 &= 0.75 \text{ (欧)}
 \end{aligned}$$

(d) 次级绕组铜损耗

$$P_{2m} = I_2^2 R_2 = 18.73^2 \times 0.75 = 258.03 \text{ (瓦)}$$

(e) 铜、铁总损耗

$$\begin{aligned}
 P &= P_m + P_c = 249.2 + 258.03 + 16.27 \\
 &= 523.5 \text{ (瓦)}
 \end{aligned}$$

7. 分布参数计算

分布参数是指绕组漏感 L_s 和分布电容 C_v 的总称。

在计算之前，应先确定绕组结构和绕组分布型式。因此，从

表14-1中确定绕组结构为不交叉绕法, $K_P=0.8\sim 0.9$ 。同时, 又从表14-5中确定绕组分布型式为其中第二类。

(1) 绕组漏感计算

$$\begin{aligned}
 L_S &= \frac{1.26N_1^2 L_{mCT} \times 10^{-9} K_P}{h_H} \frac{1}{4} \left(\Delta_1 + \Delta_2 + \frac{2d_{1m} + 2d_{2m}}{3} \right) \\
 &= \frac{1.26 \times 94^2 \times 42.39 \times 0.85 \times 10^{-9}}{17.2} \frac{1}{4} \left(0.44 + 0.44 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{2 \times 0.167 + 2 \times 0.167}{3} \right) \\
 &= \frac{401151.7 \times 10^{-9}}{17.2} \frac{1}{4} (0.88 + 0.223) \\
 &= \frac{401151.7 \times 10^{-9}}{17.2} \times 0.2758 = 6432.4 \times 10^{-9} \text{ (亨)}
 \end{aligned}$$

(2) 分布电容计算

$$\begin{aligned}
 C_0 &= \frac{1}{4} \left[\frac{(n-2)^2}{\Delta_1} + \frac{7n^2 - 10n + 4}{\Delta_2} \right] \times 0.0275 h_H L_{He} \\
 &= \frac{1}{4} \left[\frac{(2-2)^2}{0.44} + \frac{7 \times 2^2 - 10 \times 2 + 4}{0.44} \right] \times 0.0275 \times 17.2 \\
 &\quad \times 42.39 \times 2.5 \\
 &= 0.25 \left(\frac{12}{0.44} \right) \times 50.144 = 341.8 \text{ (微微法)}
 \end{aligned}$$

8. 脉冲波形计算

(1) 脉冲波形前沿上升时间

$$\begin{aligned}
 t &= (1.5 \sim 2.5) \sqrt{L_S C_0} = 2 \sqrt{6432.4 \times 10^{-9} \times 341.8 \times 10^{-12}} \\
 &= 2 \times 1482.8 \times 10^{-10} \text{ (秒)} \\
 &= 2 \times 1482.8 \times 10^{-10} \times 10^0 = 0.297 \text{ (微秒)}
 \end{aligned}$$

计算得到的脉冲前沿上升时间 t 之值, 没有超过给定值 2 微秒。因此计算可取, 毋须进行调整。

(2) 脉冲顶部降落

$$\lambda = \frac{I_m}{I_r} = \frac{13.556}{300} = 0.045$$

脉冲顶部降落 λ 之计算值，未超过给定值。

9. 温升计算 (参考图14-4)

(1) 散热面积 (铁芯)

$$\begin{aligned} S_{C_1} &= 4CA + 2\pi A^2 = 4 \times 4.96 \times 6.2 + 3.14 \times 6.2^2 \times 2 \\ &= 123 + 241 = 364 \text{ (厘米}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{C_2} &= 2CB + 2\pi AB = 2 \times 4.96 \times 12.4 + 2 \times 3.14 \times 6.2 \times 12.4 \\ &= 123 + 482.81 = 605.81 \text{ (厘米}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{C_3} &= 4(A+B)h = 4(6.2+12.4) \times 20 \\ &= 4 \times 18.6 \times 20 = 1488 \text{ (厘米}^2\text{)} \end{aligned}$$

(2) 绕组散热面积

$$\begin{aligned} S_{i_1} &= 2h(A+B+0.4) \times 2 = 4 \times 20(6.2+12.4+0.4) \\ &= 80 \times 19 = 1520 \text{ (厘米}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{i_2} &= 2h(A+B+2\delta_1+0.4) \times 2 = 4 \times 20(6.2+12.4+2 \\ &\quad \times 0.6024+0.4) \\ &= 80 \times 20.2 = 1616 \text{ (厘米}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{i_3} &= 2h(A+B+2\delta_1+0.4+0.88) \times 2 \\ &= 2 \times 20(6.2+12.4+2 \times 0.6024+0.4+0.88) \times 2 \\ &= 80 \times 21.085 = 1686.78 \text{ (厘米}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{i_4} &= 2h(A+B+2\delta_1+2\delta_2+0.4+0.88) \times 2 \\ &= 2 \times 20(6.2+12.4+2 \times 0.6024+2 \times 0.7921+0.4 \\ &\quad +0.88) \times 2 \\ &= 80(18.6+1.2048+1.5842+1.28) \\ &= 80 \times 22.669 = 1813.52 \text{ (厘米}^2\text{)} \end{aligned}$$

其中，由于 S_{C_2} 、 S_{i_1} 、 S_{i_2} 、 S_{i_3} 散热面的散热效果较差。因此，根据经验，仅将其计算值的40~65%计入有效散热面。则

$$S' = 0.5(1488 + 1520 + 1616 + 1686.78)$$

$$= 0.5 \times 6310.784 = 3155.39 \text{ (厘米}^2\text{)}$$

(3) 变压器总散热面

$$\begin{aligned} S &= S_{C_1} + S_{C_2} + S' + S_{L_4} \\ &= 384 + 605.81 + 3155.39 + 1813.52 \\ &= 5938.72 \text{ (厘米}^2\text{)} \end{aligned}$$

(4) 油箱散热面积

油箱尺寸长×宽×高=30×25×40厘米³。而箱体四周设有散热片，近似散热面积为18800 (厘米)²。

(5) 温升计算

油箱与空气的温差

$$\Delta t_1 = 600 \frac{P}{S_{\text{油}}} = 600 \frac{523.5}{18800} = 16.71 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

油与油箱的温差

$$\Delta t_2 = 150 \frac{P}{S_{\text{油}}} = 150 \frac{523.5}{18800} = 4.18 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

变压器与油的温差

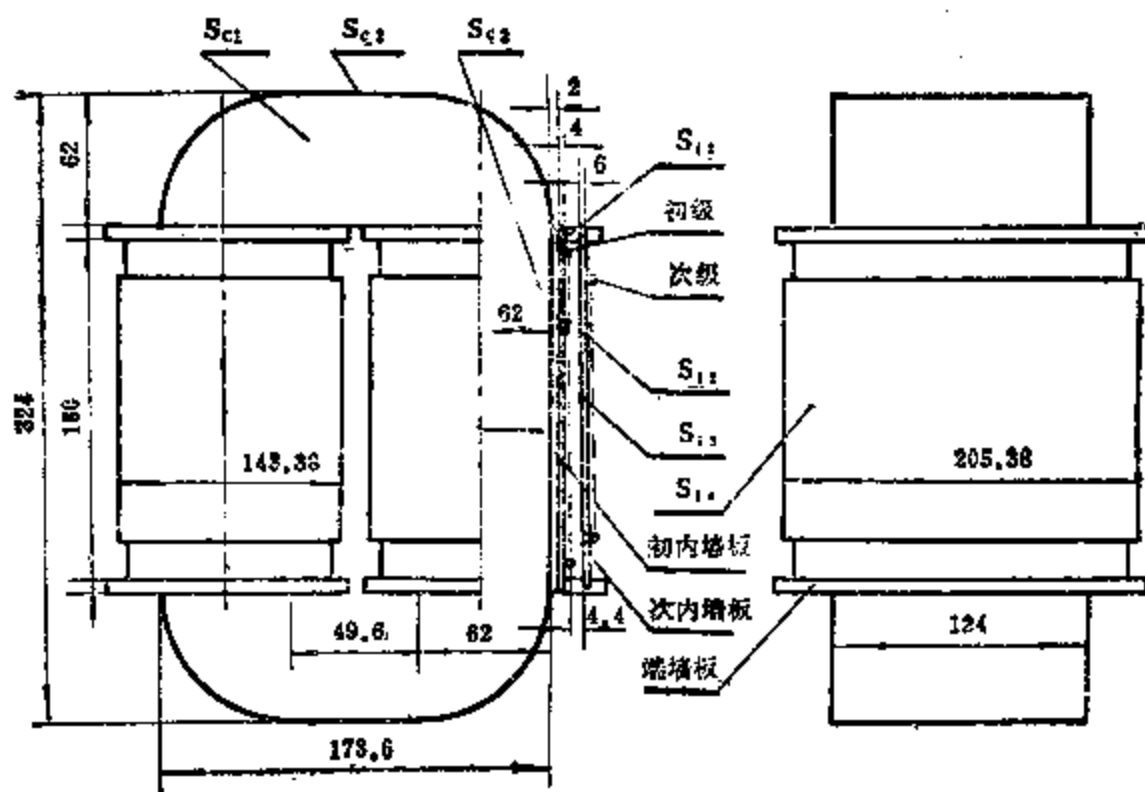


图14-4

$$\Delta t_3 = 150 \frac{P}{S_{\text{变}}} = 150 \frac{523.5}{5938.72} = 13.2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

总温差为,

$$\begin{aligned} \Delta t &= \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \\ &= 16.71 + 4.18 + 13.2 = 34.1 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

经温差 Δt 的计算, 未能超过允许值, 则计算可取。

本例各项计算结果, 均未超过给定数据的要求, 因此可得图 14-4 的变压器结构。

第十五单元 微波电子管中控制 磁场的设计计算

微波电子管，在无线电工程系统中，是一种极为重要的能量转换元件。这种能量转换，主要是依靠电磁场的相互作用及控制电流的方法来实现的。而电子流的控制，通常是采用外加磁场和外加电场的方法来实现的。在微波电子管的应用领域里，普遍采用外加磁场的方法，特别是在微波电子管的生产检测过程中更是如此。

到目前为止，微波电子管中的控制磁场结构，常见有轴向磁场结构和螺旋管磁场结构，见图15-1a, b。

现将其原理略述如下：

假如在图15-1a 磁场结构的磁柱上，加上一定的磁势 F ，使磁柱磁化而产生磁通 ϕ_c ，则该磁通 ϕ_c 经磁轭、极靴，并穿过气隙 $D-h$ 空间（即微波电子管的工作区间），使工作区间磁化而获得所需要的磁场，达到控制微波电子管电子流目的。

在图15-1b的磁场

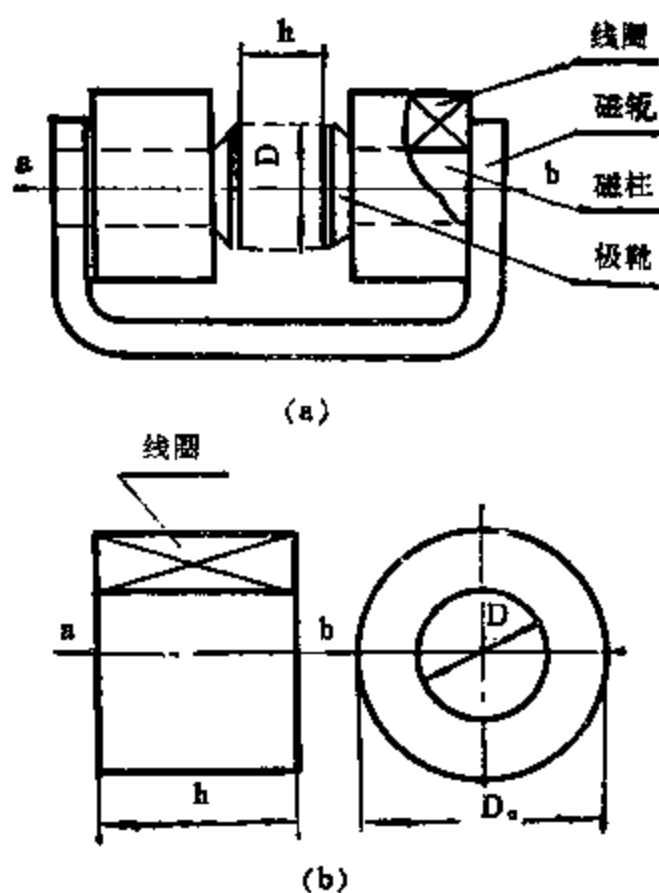


图 15-1

结构中，假如仍以一定数值的磁势 F 。通过绕组而直接加于 $D-h$ 空间，使气隙磁化而产生磁通 ϕ_0 ，则该磁通 ϕ_0 ，即可直接使微波电子管的工作区间得到所需要的磁场。

这两种磁场结构在设计计算过程中，是不能任意选择的，必须根据微波电子管的具体技术要求而定。

在微波技术领域里，随着微波电子管的不断发展，要求高的磁感应强度及大工作区间的磁场结构，尤其在微波电子管的生产检测过程中，往往还要求有一个可变的工作区间和可变的磁感应强度，因此，也要求设制这类磁场结构以满足这一需要。

要设制这类控制磁场结构，首先就必须弄清 $D-h$ 工作区间的截面积 S_0 同磁柱截面积 S_c 之间的关系，即工作区间的磁感应强度 B_0 同磁柱的磁感应强度 B_c 之间的关系，以及工作区间的磁压降 F_0 同磁柱上所加的磁势 F 之间的关系。这里以图 15-1a 为例来加以说明。

当有一定数值的磁势 F 加于磁柱上时，若按理想状态考虑，认为漏磁通 ϕ 等于零，磁体内的磁压降也等于零。这样，磁柱内所产生的磁通 ϕ_0 就会毫无散失地完全穿过 $D-h$ 工作区间而成为有效工作磁通 ϕ_0 ，即 $\phi_c = \phi_0$ 或 $B_c S_c = B_0 S_0$ ，磁柱上所加的磁势 F 也完全等于工作区间的磁压降 F_0 ，即 $F = F_0$ 。

而实际上这种理想状态是根本不可能存在的。必然有相当一部分磁通没有穿过 $D-h$ 工作区间。并且，随着工作区间的增大和结构的不同，此漏磁通 ϕ 之值还是很可观的。这一不理想因素，通常以漏磁系数 K 来表征它。将漏磁系数 K 代入上述关系式，即可得以下各式。

$$KF_0 = F$$

$$K\phi_0 = \phi_0$$

$$\text{或 } KB_c S_c = B_0 S_0$$

式中，

K —— 漏磁系数；

F_0 ——工作区间的磁压降(安匝);

F ——总磁势(安匝);

B_0 ——工作区间的磁感应强度(高斯);

B_c ——磁柱的磁感应强度(高斯);

S_0 ——工作区间的截面积(厘米²);

S_c ——磁柱截面积(厘米²)。

对轴向磁场结构,有磁柱截面积和直径计算,磁势计算,绕组匝数计算,绕组导线计算,绕组供电电压、电流计算。

对螺旋管磁场结构,除无磁柱截面积和直径计算以外,其余均与轴向磁结构相同。

1. 轴向磁场结构计算

(1) 磁柱截面积和直径

磁柱截面积,

$$S_c = \frac{B_0 S_0 K}{B_c} \quad (\text{厘米}^2)$$

磁柱直径,

$$D_c = 1.13 \sqrt{\frac{B_0 S_0 K}{B_c}} \quad (\text{厘米})$$

对轴向磁场结构 $K=1.5\sim 3.5$, 螺旋管磁场结构 $K=1.5\sim 2.5$ 。

若工作区间大, B_0 要求高时, K 之值取上限, 反之取下限。

这类磁场结构的磁体材料, 常用电工纯铁, 如DT3、DT4、DT5、DT6、DT4E、DT4C等。其磁性能, 可参考曲线15-1。

选用磁感应强度 B_0 之值, 一般以不超过曲线15-1中所示的饱和磁感应强度 B_m 之值为限。

如无特殊要求时, 磁柱截面积可采用圆形, 磁轭截面可采用方形。

对极靴的加工厚度, 在不影响工作区间及机械强度的前提下, 应以薄为宜, 周围应有一定的角度。

为降低磁路中非工作气隙的磁压降，以满足工作区间磁场的要求。若磁体是由分件加工组合而成，应要求紧密无隙以求得磁损失越小越好。同时，还要求经锻压等机加工后的磁体组件必须经过退火处理，以求恢复原有材料的磁性能。

对磁体中的磁柱、磁轭及极靴等部分，应尽量选用同类材料，特别是当磁柱与磁轭的磁路截面积相等的情况更是如此，不然会影响计算的准确性，使工作区间的磁感应强度 B_0 之值达不到给定数据的要求。当然材料短缺时，磁体中的磁轭部分也可用低碳钢制作，但截面积应大于磁柱截面积的20~30%为宜。

整个磁体结构尺寸必须在绕组结构尺寸确定之后，才能最后确定下来。

(2) 磁势计算

A. 工作区间的磁阻

$$R_0 = \frac{h_0}{\mu_0 S_0}$$

式中：

R_0 ——工作区间的磁阻(麦/安匝)；

μ_0 ——空气的导磁系数(为1.25)(亨/厘米)；

h_0 ——工作区间的气隙长度(厘米)；

S_0 ——工作区间的截面积(厘米²)。

B. 工作区间的磁压降

$$F_0 = \phi_0 R_0 = B_0 S_0 K_0 = \frac{B_0 h_0}{\mu_0} \quad (\text{安匝})$$

式中：

F_0 ——工作区间的磁压降(安匝)；

ϕ_0 ——工作区间的磁通。

C. 系统中的总磁势

$$F = F_0 K \quad (\text{安匝})$$

(3) 绕组匝数计算

这类磁场结构的绕组匝数计算极为简单，只要知道系统中的总磁势 F ，然后再根据需求和可能，先确定一个电流值，即可进行绕组匝数计算。

$$N = \frac{F}{I} \quad (\text{匝})$$

式中：

N ——绕组匝数， (匝)

I ——绕组中的电流。 (安)

(4) 绕组线径计算

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}} \quad (\text{毫米})$$

空气自冷式 $j = 1.5 \sim 2$ (安/毫米²)

油浸或水冷 $j = 8 \sim 10$ (安/毫米²)

根据 d 之计算值再从表1-5或1-8中求得适用值。

下面进行绕组结构计算。在无给定技术条件所限的情况下，应事先预估一个绕组整体结构尺寸，这个结构尺寸，主要是指绕组长度及厚度。

当总磁势（安匝）及磁体的磁柱直径等已定的情况下，为使工作区间的磁感应强度 B_0 能获得预计的效果，必须使总磁势（安匝）能尽量集中地靠近工作区间。这是一个计算绕组结构尺寸的基本原则。现提出预估绕组结构尺寸的方法如下：

绕组长度一般为磁柱直径的0.5~2倍。

$$\text{即} \quad h_i = (0.5 \sim 2) D_0 \quad (\text{厘米})$$

绕组厚度一般为磁柱直径的0.5~1.5倍

$$\delta = (0.5 \sim 1.5) D_0 \quad (\text{厘米})$$

根据这些预估的绕组结构计算尺寸，即可进行绕组结构计算。其计算方法与普通变压器的相同，见后面例题介绍。

在绕组结构尺寸确定之后，才能最后确定。此时必须首先满足给定技术条件的 $D-h$ 工作区间的要求，同时再满足计算出的绕

组结构尺寸的要求，计算较简单，见例题介绍。

(5) 绕组供电电压计算

A. 绕组平均匝长 $L_{mn} = \pi(D_o + \delta)$

式中：

L_{mn} ——绕组平均匝长(厘米)；

δ ——绕组厚度(厘米)

B. 绕组用线长度

$$L_1 = L_{mn} \cdot N \times 10^{-2} \quad (\text{米})$$

C. 绕组直流电阻

$$R = L_1 \cdot R_{20\text{C}} \times 10^{-5} \quad (\text{欧})$$

D. 绕组供电电压

$$U = I \cdot R \quad (\text{伏})$$

对这类磁场结构的损耗计算及热计算，只计绕组的铜损耗，而不计磁体的铁损耗。所以，只要绕组导线的电流密度 j 选用适宜，则绕组的热计算即可略去。

若绕组采用油冷或水冷，也可略去热计算。

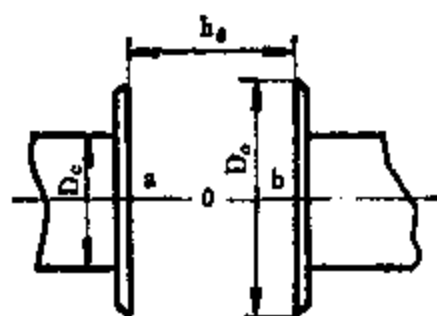


图15-2

[例] 设计计算一只轴向磁场结构(见图15-2)

已知：

1. 工作区间直径 $D_o = 20$ (厘米)；
2. 工作区间高度 $h_o = 15$ (厘米)；
3. 工作区间磁感应强度 $B_o = 1050$ (高斯)；
4. 绕组用水冷却。

解：1. 磁柱截面积和直径计算

为满足工作区间磁感应强度 B_o 的要求，这里确定选用电工纯铁DT5，其磁感应强度，可近似地从曲线15-1中求得 $B_c = 12000$ 高斯。同时整个磁体均用同种材料分件加工组成。

另外，确定漏磁系数 $K=2$ 。这样，磁柱截面积和磁柱直径即可分别按下式进行计算。

(1) 磁柱截面积

$$S_c = \frac{B_o S_o K}{B_c} \frac{1050 \times 0.785 \times D_c^2 \times 2}{12000}$$

$$= \frac{1050 \times 0.785 \times 20^2 \times 2}{12000} = 55 \quad (\text{厘米}^2)$$

(2) 磁柱直径

$$D_c = 1.13 \sqrt{\frac{B_o S_o K}{B_c}} = 1.13 \sqrt{\frac{1050 \times 0.785 \times 20^2 \times 2}{12000}}$$

$$= 1.13 \sqrt{\frac{659400}{12000}} = 1.13 \times 7.413 = 8.4 \quad (\text{厘米})$$

2. 磁势计算

(1) 工作区间的磁阻

$$R_o = \frac{h_o}{\mu_o S_o} = \frac{15}{1.25 \times 0.785 D_c^2} = \frac{15}{1.25 \times 0.785 \times 20^2}$$

$$= \frac{15}{392.5} = 0.03822 \quad (\text{麦/安匝})$$

(2) 工作区间的磁压降

$$F_o = \phi_o R_o = B_o S_o R_o = 1050 \times 314 \times 0.03822 = 12601 \quad (\text{安匝})$$

(3) 系统总磁势

$$F = F_o K = 12601 \times 2 = 25202 (\text{安匝})$$

3. 绕组匝数计算

对这类磁场结构的绕组匝数计算，通常是先确定绕组电流。这里确定绕组电流 $I_w = 20$ 安，则绕组匝数为：

$$N = \frac{F}{I_w} = \frac{25202}{20} \approx 1260 \quad (\text{匝})$$

4. 绕组导线计算

根据给定技术条件已知绕组采用水冷。因此，绕组导线是选用无水解作用的高强度漆包线 QQ 型或 OH 型。同时确定绕组导线

的电流密度 $j=10/\text{毫米}^2$ ，则绕组线径：

$$\begin{aligned}d &= 1.13\sqrt{\frac{I}{j}} = 1.13\sqrt{\frac{20}{10}} \\ &= 1.13 \times 1.414 = 1.598 \text{ (毫米)}\end{aligned}$$

依绕组导线 d 之计算值、从国产漆包线 1-7 表中求得实用导线直径 $d=1.62$ 毫米，最大外径 $d_m=1.73$ 毫米。该导线每千米长度的直流电阻 $r=8.5$ 欧。

5. 绕组结构计算

首先应确定一些与绕组结构计算有关的参数，然后进行计算。将绕组匝数 1260 匝分绕在两个骨架上，最后按图 15-1a 的型式进行安置。

骨架用铜或其他金属材料等制作，材料厚度为 0.15 厘米。

骨架外面用环氧树脂灌封，灌封厚度为 0.3 厘米。

骨架两端墙板与绕组之间，应各空出 0.3 厘米作为冷却水道。

绕组长度为 6.1 (厘米)

为防止脱匝，绕组两端各空出 0.25 厘米

绕线宽度为 5.6 厘米

绕组层间用 0.05 毫米厚的聚脂薄膜一层，其宽度为 6.1 厘米。

绕组排绕系数 $K_{排}=1.05$

绕组叠绕系数 $K_{叠}=1.15$

(1) 绕组每层数

$$a = \frac{\text{绕线宽度}}{d_m K_{排}} = \frac{5.6}{0.173 \times 1.05} = 30 \quad (\text{匝/层})$$

(2) 绕组层数

$$a' = \frac{N}{2a} = \frac{1260}{2 \times 30} = 21 \quad (\text{层})$$

(3) 绕组厚度

$$\begin{aligned}\delta &= K_{叠} a' (d_m + 0.005) + 0.15 \\ &= 1.15 \times 21 (0.173 + 0.005) + 0.15\end{aligned}$$

$$= 1.15 \times 21 \times 0.178 + 0.15 = 4.45 \text{ (厘米)}$$

(4) 绕组平均匝长

$$L_{m,n} = \pi(D_0 + \delta) = 3.14(8.4 + 4.45)$$

$$= 3.14 \times 12.85 = 40.35 \text{ (厘米)}$$

(5) 绕组用线长度

$$L_1 = L_{m,n} N = 40.35 \times 1260 \times 10^{-2} = 508.41 \text{ (米)}$$

(6) 绕组导线直流电阻

$$R = L_1 R_{20^\circ\text{C}} \times 10^{-3} = 508.41 \times 8.5 \times 10^{-3} = 4.32 \text{ (欧)}。$$

6. 供电电压计算

$$U_- = RI_- = 4.32 \times 20 = 86.4 \text{ (伏)}$$

经上述计算，可得图15-3的绕组结构

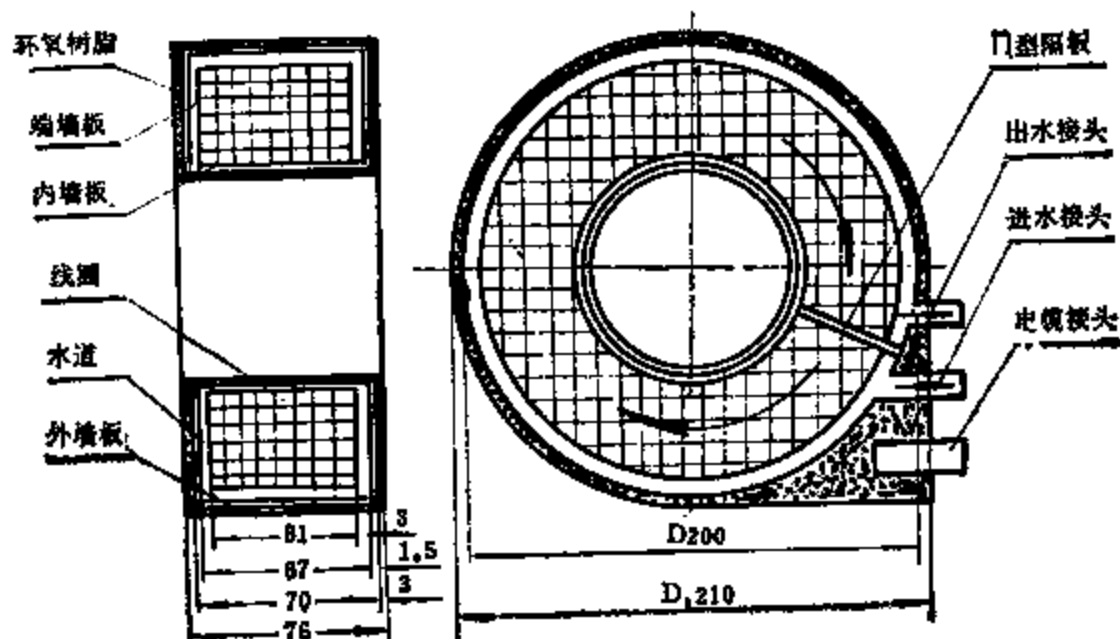


图15-3

2. 螺旋管磁场结构计算

螺旋管磁场结构与轴向磁场相比，不具完整的磁体部分，而仅绕组部分即能满足给定技术条件的要求。同时，这种磁场绕组的内部空间尺寸（D-h空间）就是给定条件的有效工作区间，见图15-4。其工作状态极为简单，只要在绕组中输入一定量的电流（直流），则绕组内部的D-h区间就会被磁化而获得所需的磁场。

这种磁场结构，一般是根据技术条件提出的 $D-h$ 空间尺寸，以及 $a-b$ 轴线上的磁场分布状况和具体使用条件；再加上散热的需要，将绕组分成多段置于 $a-b$ 轴线上，以达到正常使用的目的。

这类磁场结构的设计计算与轴向磁场结构的算法基本相同，见例题介绍。

〔例〕 设计计算一只螺旋管磁场结构（见图15-5及图15-8所示）

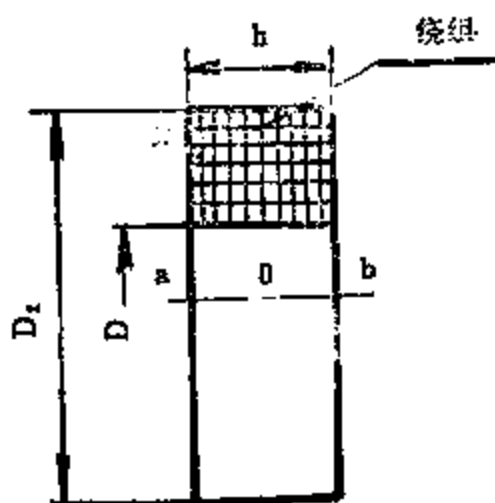


图15-4

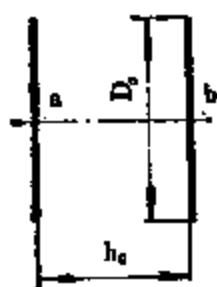


图15-5

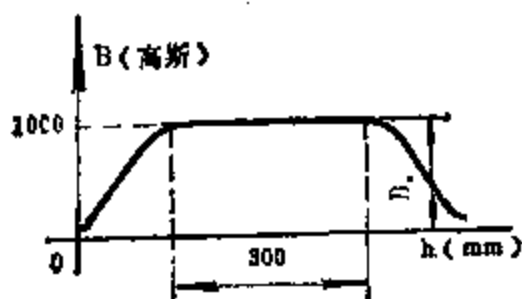


图15-6

已知：

$a-b$ 轴线上的磁感应强度

$$B_0 = 1000 \quad (\text{高斯})$$

$$D_0 = 12 \quad (\text{厘米})$$

$$h = 30 \quad (\text{厘米})$$

工作状态 连续

散热条件 水冷

1. 磁势计算

(1) 工作区间的磁阻

$$R_0 = \frac{h_0}{\mu_0 S_0} = \frac{30}{1.25 \times 0.785 \times D_0^2} = \frac{30}{1.25 \times 0.785 \times 12^2}$$

$$= \frac{30}{141.3} = 0.2123$$

(2) 工作区间的磁压降

$$\begin{aligned} F_o &= \phi_o R_o = S_o B_o R_o = 0.785 D^2 B_o R_o \\ &= 0.785 \times 12^2 \times 1000 \times 0.2123 = 23998.4 \text{ (安匝)} \end{aligned}$$

(3) 系统总磁势

$$F = F_o K = 23998.4 \times 2 = 47996.8 \text{ (安匝)}$$

2. 绕组匝数计算

由于绕组采用水冷，因此绕组导线电流密度 j 取 10 安/毫米²，同时，确定流经绕组的电流为 20 安，则绕组匝数为：

$$N = \frac{F}{I} = \frac{47996.8}{20} = 2399 \text{ (取整数 2400)} \quad (\text{匝})$$

3. 绕组线径计算

$$\begin{aligned} d &= 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{20}{10}} \\ &= 1.13 \times 1.414 = 1.598 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

依 d 之计算值，表 1-7 中求得实用的漆包线为 $d = 1.62$ 毫米，最大外径 $d_m = 1.73$ 毫米，导线每千米直流电阻 $r = 8.5$ 欧，采用无水解作用的 QQ 型漆包线。

4. 绕组结构计算

根据给定技术条件所提供的 a - b 轴线上的磁场分布状况 (见图 15-6)，确定将绕组匝数分为六组绕制，然后组合而成。既可单独供电，也可一起供电，既可单独调节，也可整体调节。这样不仅满足了 a - b 轴线上的磁场分布，同时也解决了绕组的散热问题。在这一基础上，下面再确定一些与绕组结构计算有关的参数：

将绕组 2400 匝，分绕在 6 个骨架上，然后按图 15-5 所示的 a - b 轴线安置而成。

绕组骨架长度 4.3 (厘米)

骨架用铜或其它金属材料制作，其材料厚度为 0.15 (厘米)

骨架外面最后用环氧树脂端封，其灌封厚度为0.3（厘米）
 骨架两端板内侧与绕组之间，应留有冷却水道，其距离为
 0.3（厘米）

绕组绕线宽度为2.9（厘米）

绕组长度为3.4（厘米）

绕组两端各空出0.25（厘米）

绕组层间用0.005厘米的聚脂薄膜一层，其宽度为3.4（厘米）

绕组排绕系数 $K_{排}=1.05$

绕组叠绕系数 $K_{叠}=1.15$

(1) 绕组每层匝数

$$a = \frac{\text{绕线宽度}}{d_m K_{排}} = \frac{29}{1.73 \times 1.05} = 15 \quad (\text{匝/层})$$

(2) 绕组层数

$$a' = \frac{N}{6a} = \frac{2400}{6 \times 15} = 27 \quad (\text{层})$$

(3) 绕组厚度

$$\begin{aligned} \delta &= K_{叠} a' (d_m + 0.005) + 0.15 \\ &= 1.15 \times 27 (0.173 + 0.005) + 0.15 \\ &= 1.15 \times 27 \times 0.178 + 0.15 = 5.68 \quad (\text{厘米}) \end{aligned}$$

(4) 绕组平均匝长

$$\begin{aligned} L_{m,n} &= \pi (D_o + 2 \times 0.3 + \delta) \\ &= 3.14 (12 + 0.6 + 5.68) = 57.4 \quad (\text{厘米}) \end{aligned}$$

(5) 绕组用线长度

$$L_l = L_{m,n} N = 57.4 \times 2400 \times 10^{-2} = 1377.6 \quad (\text{米})$$

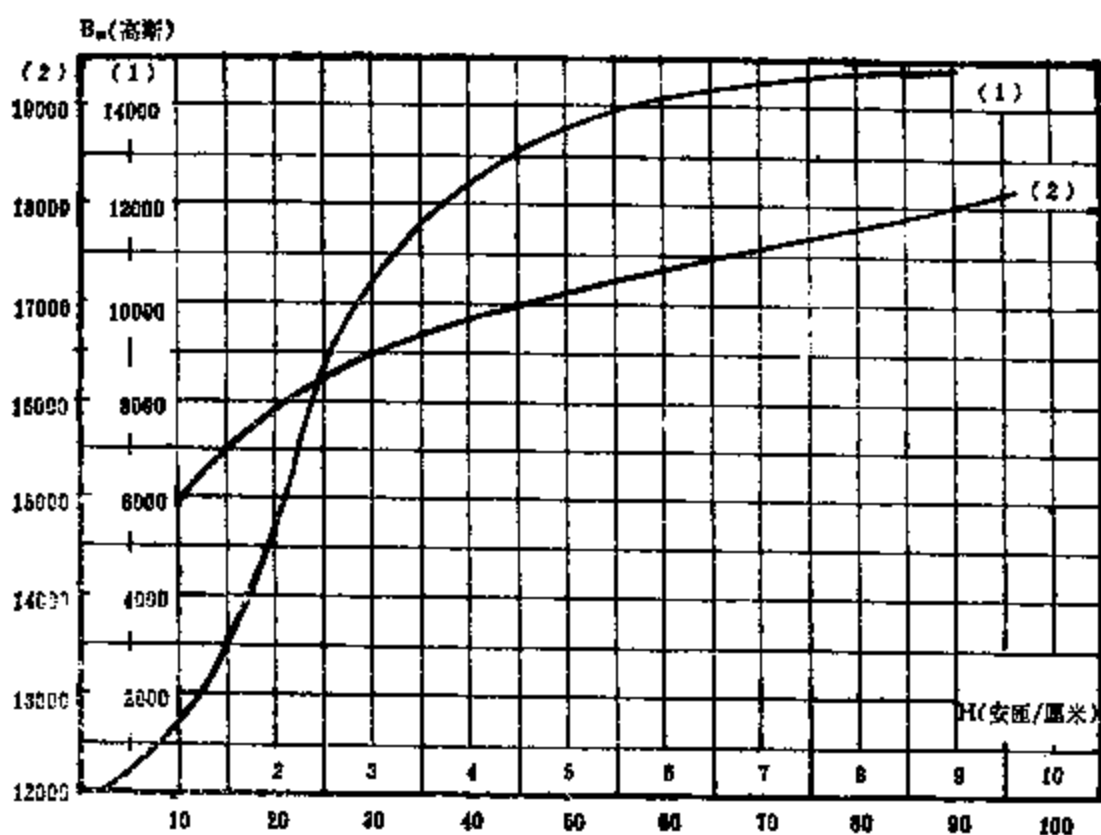
(6) 绕组导线直流电阻

$$R = L_l R_{20^\circ\text{C}} \times 10^{-3} = 1377.60 \times 8.5 \times 10^{-3} = 11.71 \quad (\text{欧})$$

5. 供电电压计算

$$U_l = I_l R = 20 \times 11.71 = 234.2 \quad (\text{伏})$$

根据上面计算结果即可绘出六个绕组中的一个绕组结构，见图15-7。



曲线15-1 电工纯铁磁化曲线

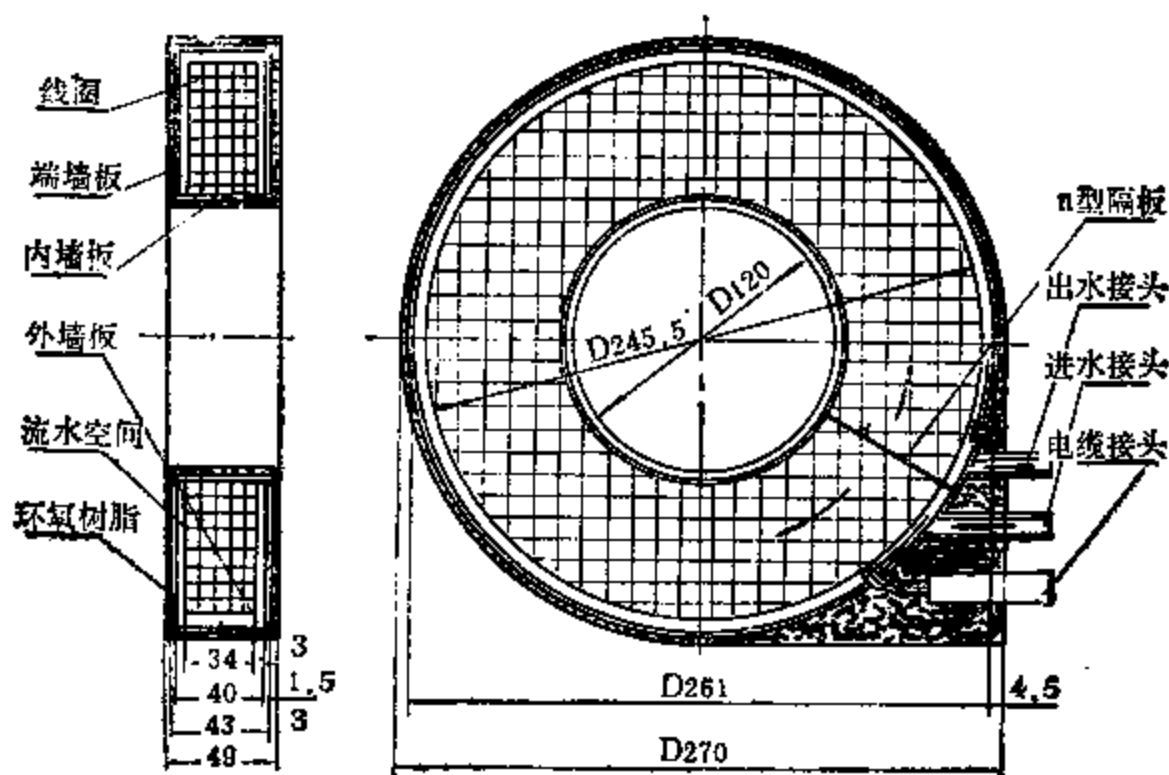


图15-7