

第十二章 小型电器计算

第一节 小型单相变压器与整流变压器计算

一、小型单相变压器计算

(一) 计算法

对1000伏安以下的小型单相变压器（频率为50赫），可用下述方法计算：

第一步 由变压器的功率 S 确定铁心截面积 A_c ：

1. 求出变压器的输出总视在功率 S 如变压器的二次侧为多绕组时，则输出总视在功率为二次侧各绕组输出视在功率的总和

$$S_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + \dots + U_n I_n \quad (\text{VA}) \quad (12-1-1)$$

式中 $U_2, U_3, \dots, U_n$ ——二次侧各绕组电压有效值，伏；

$I_2, I_3, \dots, I_n$ ——二次侧各绕组电流有效值，安。

2. 求出变压器的输入视在功率 S_1 及输入电流 I_1

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta}, \quad (\text{VA}) \quad (12-1-2)$$

式中 η ——变压器的效率。对功率为1千伏安以下的变压器 $\eta = 0.8 \sim 0.9$ 。

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} \times (1.1 \sim 1.2) \quad (\text{A}) \quad (12-1-3)$$

式中 U_1 ——外加电源电压，伏；

1.1~1.2——考虑到变压器空载励磁电流大小的经验系数。

3. 确定变压器铁心截面 A_c 铁心尺寸如图12-1-1所示

$$A_c = K_0 \sqrt{S_2} \quad (\text{cm}^2) \quad (12-1-4)$$

式中 S_2 ——变压器总输出视在功率（次级总功率），伏安；

K_0 ——经验系数。 K_0 的大小与 S 的关系可参考表 12-1-

1选用， K_0 也与硅钢片质量有关，一般硅钢片

取8000~10000高斯， K_0 可小些，差的硅钢片，

如电机用热轧硅钢片， K_0 可适当取大些。

根据图12-1-1 $A_c = a \times b \quad (\text{cm}^2)$

式中 a ——铁心中柱宽，厘米；

b ——铁心净迭厚，厘米。

由所求得之 A_c ，结合实际情况确定铁心尺寸 a 与 b ：

变压器铁心多用涂绝缘漆的硅钢片迭成，考虑漆膜与硅钢片间隙的厚度，实际铁心厚度 b' 应将 b 除以0.9。

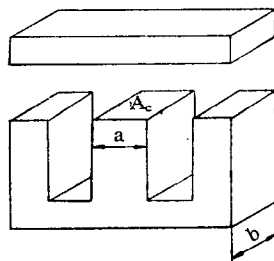


图 12-1-1 变压器铁心尺寸

表 12-1-1 系数 K_0 与 S 的关系

$S \text{ VA}$	0~10	10~50	50~500	500~1000	1000以上
K_0	2	2~1.75	1.75~1.4	1.4~1.2	1

$$b' = \frac{b}{0.9} = 1.1b \quad (\text{cm}) \quad (12-1-5)$$

a 的选择参看目前通用的小型硅钢片规格, 其中各尺寸之间关系大致如下: $c = 0.5a$, $l = 1.5a$, (当 $a > 64$ 时 $l = 2.5a$) $A = 3a$, $L = 2.5a$, 选厚 $b \leq 2a$, 表12-1-2列出目前通用的小型硅钢片尺寸。

小型变压器通用的硅钢片尺寸(mm)

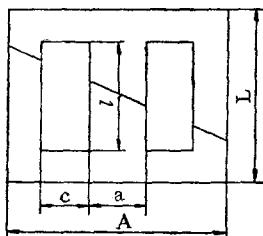


表 12-1-2

a	c	l	A	L
13	7.5	22	40	34
16	9	24	50	40
19	10.5	30	60	50
22	11	33	66	55
25	12.5	37.5	75	62.5
28	14	42	84	70
32	16	48	96	80
38	19.0	57	114	95
44	22	66	132	110
50	25	75	150	125
56	28	84	168	140
64	32	96	192	160

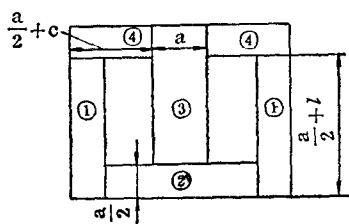


图 12-1-2 拼条硅钢片尺寸

如果所需要的尺寸不符合表12-1-2时, 推荐采用条式拼片。拼片尺寸共有四种, 如图12-1-2所示。

第二步 截面 A_c 求出后, 再计算各绕组匝数:

1. 求每伏匝数 N_0

$$N_0 = \frac{4.5 \times 10^5}{B_m A_c} \quad (\text{匝/V}) \quad (12-1-6)$$

式中 B_m ——磁感应强度, 高斯。

不同的硅钢片, 所允许的 B_m 值也不同。通常:

冷轧硅钢片 D310

 B_m 可取12000~14000高斯

热轧硅钢片 D41、D42

 B_m 可取10000~12000高斯

热轧硅钢片 D43

 B_m 可取11000~12000高斯一般电机用热轧硅钢片D21~D22 B_m 可取5000~7000高斯2. 根据所得 N_0 值求各绕组匝数

$$N_1 = U_1 N_0; N_2 = U_2 N_0; N_3 = U_3 N_0 \cdots N_n = U_n N_0 \quad (12-1-7)$$

其中二次侧绕组都应增加5%的匝数以便补偿负载时的电压降。

第三步 计算绕组的导线直径 d :根据导线中的电流 I , 选择适当的电流密度 j , 即求出导体的截面积。

$$A_c = \frac{I}{j} \quad (\text{mm})^2 \quad (12-1-8)$$

对于铜线, 一般取 $j = 2 \sim 3$ 安/毫米²。变压器短时工作时可以取 $j = 4 \sim 5$ 安/毫米²; 如果取 $j = 2.5$ 安/毫米², 则

$$d_c = 0.715 \sqrt{I} \quad (\text{mm}) \quad (12-1-9)$$

第四步 核算铁心窗口是否容纳得下所有绕组:

根据选定的窗高 l 计算绕组每层可绕的匝数 n_i

$$n_i = \frac{0.9[l - (2 \sim 4)]}{d} \quad (\text{mm}) \quad (12-1-10)$$

式中 d ——包括绝缘厚度的导线外径, 毫米;

0.9——考虑绕组框架两端各约空出5%地位不绕线。

因此每组绕组需绕的层数 m_i 为

$$m_i = \frac{N}{n_i} \quad (12-1-11)$$

每个线圈所需的厚度 B_i

$$B_i = m_i(d + \delta) + \gamma \quad (\text{mm}) \quad (12-1-12)$$

其中一次侧绕组厚度

$$B_1 = m_1(d + \delta) + \gamma \quad (\text{mm})$$

式中 δ ——绕组层间绝缘的厚度, 毫米; γ ——绕组间绝缘的厚度, 毫米。同样, 可求出套在一次侧绕组外面的各个二次侧绕组的厚度 $B_2, B_3, B_4, \dots$ 。所有绕组的总厚度 B 为:

$$B = (B_0 + B_1 + B_2 + B_3 + \cdots) \times (1.1 \sim 1.2) \quad (\text{mm}) \quad (12-1-13)$$

式中 B_0 ——绕组框架的厚度, 毫米;

1.1~1.2——尺寸裕量。

如果计算所得到的绕组厚度 B 小于铁心窗口宽度 C , 则设计是可行的, 若 $B > C$ 时, 这时有两种办法, 一是加大铁心迭厚使绕组匝数降低, 但是一般迭厚 $b' = (1 \sim 2)a$ 比较合适, 不能任意加厚。另一种办法就是重选硅钢片的尺寸, 按原法计算和核算直到合适为止。

〔例1〕要绕制一只36伏安的电源变压器, 初级电压220伏, 次级电压110伏, 求铁心截面及线圈圈数。

3-12-4 变压器、高低压电器及特殊电机

解：第一步：由变压器总输出视在功率确定铁心截面积 A 。

$$S_2 = 36 \text{ 伏安}$$

所以

$$A_c = 1.75\sqrt{S_2}, \quad (\text{查表12-1-1 } K_0 = 1.75) \\ = 1.75\sqrt{36} = 10.5 \text{ 厘米}^2$$

第二步：由每伏匝数 N_0 求各绕组匝数。

$$\text{选 } B_m = 9000 \text{ 高斯, 所以 } N_0 = \frac{4.5 \times 10^5}{9000 \times 10.5} = 4.7 \text{ 匝/伏, 则初级绕组 220 伏的匝数}$$

$N_1 = U_1 N_0 = 220 \times 4.7 = 1034 \text{ 匝}$, 在计算次级绕组圈数时, 考虑到变压器的漏感及线圈的电阻, 故须加5%的余量, 所以次级绕组 $N_2 = U_2 N_0 = 110 \times 4.7 \times 1.05 = 543 \text{ 匝}$ 。

第三步：由电流求导体直径 d_c 。

$$\text{初级电流为 } I_1 = \frac{36}{220 \times 0.8} = 0.205 \text{ 安, 选电流密度 } j = 2.5 \text{ 安/毫米}^2, \text{ 所以初级绕组}$$

导线直径为：

$$\text{由 } A_{c1} = \frac{I_1}{j} = \frac{0.205}{2.5} = 0.082 \text{ 毫米}^2$$

查表5-3-4选得邻近截面的线径 $d_{c1} = 0.33 \text{ 毫米}$, 再由表5-3-6得绝缘厚度, 从而得到包括漆膜在内的导线外径 $d_1 = 0.37 \text{ 毫米}$ 。

$$\text{次级电流为 } I_2 = \frac{36}{110} = 0.327 \text{ 安}$$

次级绕组导线直径为：

$$\text{由 } A_{c2} = \frac{I_2}{j} = \frac{0.327}{2.5} = 0.130 \text{ 毫米}^2$$

相应的线径 $d_{c2} = 0.41 \text{ 毫米}$, 包括绝缘在内的导线外径 $d_2 = 0.45 \text{ 毫米}$ 。

第四步：核算铁心窗口是否容纳得下所有绕组

根据现有铁心截面积 $A_c = 10.5 \text{ 厘米}^2$, 查表12-1-2选取 $a = 32 \text{ 毫米}$ 的硅钢片, 则可算

$$\text{得铁心迭片厚 } b' = 1.1 \times \frac{A_c}{a} = 1.1 \times \frac{10.5}{3.2} = 36 \text{ 毫米}。$$

校验 $b'/a = 36/32 = 1.1$, 这个比值在1~2之间, 所以是合适的。

由表12-1-2可得 $l = 48 \text{ 毫米}$, 可求得各绕组每层绕制匝数。

$$n_1 = \frac{0.9[l - (2 \sim 4)]}{d_1} = \frac{0.9[48 - 3]}{0.37} = 110 \text{ 匝}$$

$$n_2 = \frac{0.9(48 - 3)}{0.45} = 90 \text{ 匝}$$

各绕组所绕的层数

$$m_1 = \frac{N_1}{n_1} = \frac{1034}{110} = 9.4 \text{ 层} \approx 10 \text{ 层}$$

$$m_2 = \frac{N_2}{n_2} = \frac{543}{90} = 6.1 \text{ 层} \approx 7 \text{ 层}$$

各绕组绝缘选用如下：

对地(铁心)绝缘:用二层电缆纸(0.07毫米)夹一层黄蜡布(0.14毫米)厚度 $\gamma = 2 \times 0.07 + 0.14 = 0.28$ 毫米。

绕组间绝缘:与对地(铁心)相同。

绕组层间绝缘:一次侧绕组较细用白玻璃纸一层 $\delta_1 = 0.04$ 毫米

二次侧绕组中较粗用电缆纸一层 $\delta_2 = 0.07$ 毫米

绕组框架用弹性纸1毫米厚,外包对地绝缘共厚 $B_0 = 1 + 0.28 = 1.28$ 毫米。

绕组总厚度 $B = (B_0 + B_1 + B_2) \times (1.1 \sim 1.2)$

$$= [B_0 + m_1(d_1 + \delta_1) + \gamma + m_2(d_2 + \delta_2) + \gamma] \times (1.1 \sim 1.2)$$

$$= [1.28 + 10(0.37 + 0.04) + 0.28 + 7(0.45 + 0.07)$$

$$+ 0.28] \times (1.1 \sim 1.2)$$

$$= (1.28 + 4.1 + 0.28 + 3.64 + 0.28) \times 1.1 = 10.6\text{mm} < 16\text{mm}$$

所以此绕组可以放入铁心窗口中且有裕度。

(二) 图算法

对于50周1千伏安以下的小型变压器比较适用,具体方法如下:

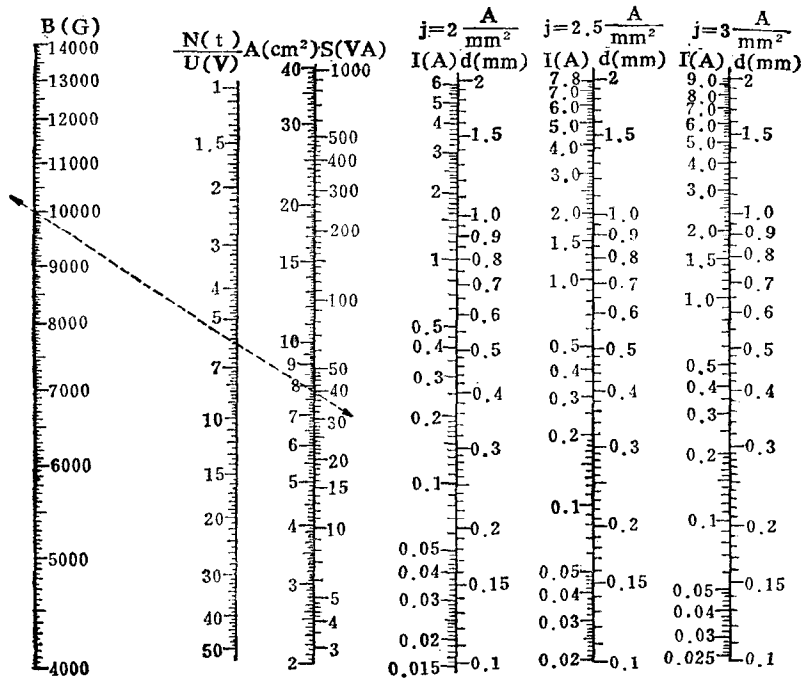


图 12-1-3 1 千伏安以下小型变压器图算法

在图12-1-3中, S表示变压器的容量(伏安); A表示铁心截面(厘米²) N/U表示每伏所需要绕的匝数(匝/伏); B表示磁通密度(高斯)。这四根标尺中, S和A在同一根直线上。如果已知变压器的容量S,则在A标尺上即能得出所需的铁心净截面积为多少厘米²;根据所选择的钢片质量高低确定磁通密度B的数值(一般B选在8000~10000左右),将所确定的A点和B点连成一直线,便得与N/U标尺的交点,此交点便是该变压器每伏所需要绕的匝数N/U(匝/伏)。

图12-1-3中右侧另外三根标尺表示电流为一定值时,不同电流密度j所需导线直径的

大小。使用在精密仪表和仪器设备装置中,取 $j = 2$ 安/毫米²; 使用在一般仪器设备中取 $j = 2.5$ 安/毫米²; 在其它设备中,取 $j = 3$ 安/毫米²。

〔例2〕若已知变压器容量 $S = 40$ 伏安,磁通密度 $B = 10000$ 高斯, $U_1 = 220$ 伏, $U_2 = 36$ 伏, $I_1 = 0.182$ 安, $I_2 = 1.11$ 安。试用图算法设计此变压器。

解: 如果取 $j = 2.5$ 安/毫米², 则从图12-1-3中可得

$$A_c = 7.8 \text{ 厘米}^2 \quad \frac{N}{U} = 5.9 \text{ 匝/伏}$$

$$d_{c1} = 0.3 \text{ 毫米} \quad d_{c2} = 0.75 \text{ 毫米}$$

于是

$$N_1 = 1298 \text{ 匝} \quad N_2 = 213 \text{ 匝}$$

使用时应注意下列各项:

(1) 变压器容量是由二次侧绕组的电压与电流的乘积来决定的。当有一个以上的二次侧绕组时, 它的输出总容量是全部二次侧绕组输出容量之和。

(2) 对于小容量变压器, 由于电阻压降较大, 所以一般用增加二次侧绕组匝数来补偿 (增加上次侧绕组匝数5~10%左右), 若要求得精确一些, 必须先计算绕组的电阻 R , 然后计算补偿满载时电阻压降 IR 所需要的匝数, 即补偿匝数 $N = IR/\text{每伏匝数}$ 。

表12-1-3列出了1千伏安以下部分容量的变压器铁心及每伏匝数等技术数据, 可以直接查得, 不需计算。

1千伏安以下的变压器数据

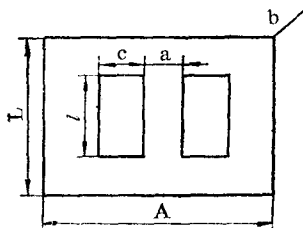


表 12-1-3

容量 VA	一次侧电压 $U_1=220V$				铁心截 面积 A_c cm^2	每伏需绕匝数 匝/V				参考铁心尺寸 mm			
	电 流 A	裸导线直径 mm				7000 G	8500 G	10000 G	中心柱宽 ×迭厚 $a \times b$ mm	A	L	c	l
		j=2 A/mm ²	j=2.5 A/mm ²	j=3 A/mm ²									
3	0.0136	0.09	0.08	0.08	2.18	31	25	22	12×21	44	38	8	22
4	0.0182	0.11	0.09	0.09	2.47	27	22	19	12×24	44	38	8	22
5	0.0227	0.12	0.11	0.10	2.8	24	20	17	14×22	50	43	9	25
6	0.0273	0.13	0.12	0.108	3.05	22	18	15.5	16×22	56	48	10	28
8	0.0363	0.15	0.136	0.125	3.55	18.5	15.5	13	16×24	56	48	10	28
10	0.0454	0.17	0.15	0.14	3.95	17	14	12	16×28	56	48	10	28
12	0.0546	0.19	0.17	0.15	4.35	15	12.7	11	19×26	67	57.5	12	33.5
15	0.0682	0.21	0.18	0.17	4.85	14	11.5	9.6	19×35	56	48	10	28
16	0.0728	0.21	0.19	0.18	5	13	11	9.4	19×30	67	57.5	12	33.5
20	0.0910	0.24	0.21	0.2	5.6	12	10	8.4	19×34	67	57.5	12	33.5
22	0.10	0.25	0.23	0.21	5.85	11.3	9.3	8	22×30	78	67	14	39
25	0.1135	0.27	0.24	0.22	6.15	10.5	8.7	7.4	19×37	67	57.5	12	33.5
30	0.1365	0.29	0.26	0.24	6.85	9.5	8	6.8	22×36	78	67	14	39

续 表

容量 VA	一次侧电压U ₁ = 220V				铁心截 面积 A _e cm ²	每伏需绕匝数 匝/V				参考铁心尺寸 mm			
	电 流 A	裸导线直径 mm				7000 G	8500 G	10000 G	中心柱宽 ×迭厚 a×b mm	A	L	c	l
		j=2 A/mm ²	j=2.5 A/mm ²	j=3 A/mm ²									
33	0.15	0.31	0.27	0.25	7.15	9.2	7.6	6.5	19×43	67	57.5	12	33.5
38	0.1725	0.33	0.30	0.27	7.65	8.6	7	6.0	22×40	78	67	14	39
40	0.181	0.34	0.30	0.28	7.8	8.4	6.9	5.9	22×41	78	67	14	39
42	0.191	0.35	0.31	0.28	8	8.2	6.7	5.7	26×35	94	81	17	47
45	0.204	0.36	0.32	0.29	8.3	7.8	6.5	5.5	22×43	78	67	14	39
50	0.227	0.38	0.34	0.31	8.8	7.4	6.2	5.2	22×46	78	67	14	39
55	0.25	0.40	0.36	0.33	9.25	7	5.9	5	26×41	94	81	17	47
60	0.273	0.41	0.38	0.35	9.65	6.7	5.6	4.7	26×43	94	81	17	47
70	0.318	0.45	0.40	0.36	10.3	6.3	5.2	4.4	30×39	106	91	19	53
76	0.345	0.47	0.42	0.38	10.8	6	5	4.2	26×48	94	81	17	47
90	0.409	0.51	0.46	0.41	11.8	5.5	4.5	3.8	30×45	106	91	19	53
100	0.454	0.53	0.48	0.44	12.4	5.3	4.4	3.7	30×48	106	91	19	53
120	0.546	0.59	0.53	0.48	13.6	4.8	3.9	3.4	30×50	106	91	19	53
140	0.636	0.63	0.57	0.52	14.7	4.5	3.7	3.1	35×48	123	105.5	22	61.5
160	0.728	0.68	0.61	0.56	15.5	4.1	3.4	2.9	35×50	123	105.5	22	61.5
185	0.841	0.73	0.66	0.60	16.7	3.8	3.2	2.7	35×35	123	105.5	22	61.5
200	0.91	0.76	0.68	0.62	17.7	3.7	3.1	2.6	35×58	123	105.5	22	61.5
230	1.045	0.83	0.73	0.67	19	3.4	2.9	2.4	40×55	144	124	26	72
250	1.135	0.86	0.77	0.69	19.7	3.3	2.75	2.3	40×57	144	124	26	72
280	1.273	0.90	0.8	0.73	20.8	3.1	2.6	2.2	40×60	144	124	26	72
320	1.454	0.96	0.86	0.8	22.3	2.9	2.4	2.1	40×64	144	124	26	72
380	1.725	1.04	0.94	0.86	24.5	2.7	2.2	1.9	45×63	161	138.5	29	80.5
420	1.91	1.10	0.98	0.90	25.5	2.6	2.1	1.8	40×73	144	124	26	72
450	2.045	1.14	1.02	0.93	26.5	2.5	2.05	1.75	45×68	161	138.5	29	80.5
518	2.35	1.23	1.10	1.00	28.5	2.30	1.90	1.6	45×73	161	138.5	29	80.5
575	2.61	1.29	1.16	1.04	29.8	2.2	1.8	1.55	45×76	161	138.5	29	80.5
600	2.72	1.33	1.18	1.08	30.5	2.15	1.75	1.5	50×70	178	153	32	89
700	3.18	1.43	1.30	1.16	32.8	2.0	1.63	1.4	50×75	178	153	32	89
781	3.55	1.50	1.35	1.22	34.5	1.85	1.55	1.3	50×79	178	153	32	89
1020	4.63	1.72	1.55	1.40	39.5	1.6	1.35	1.15	50×91	178	153	32	89

二、整流变压器计算

整流变压器是整流设备中重要的组成部分,为了满足直流输出的需要,用它来将交流电网的电压转换成一定大小和相数的电压再进行整流,同时为了使整流后的直流更为平直,整流变压器的二次侧通常不少于三相,有的是六相或十二相。整流变压器的计算基本原则与普通电力变压器相同,但是,整流变压器也具有它自己的特殊性:

(一) 整流变压器的特点

1. 普通电力变压器的负载一般都是恒定的阻抗,因此输出电流与电源电压的波形一样,都是正弦波,而且一次侧和二次侧的视在功率相等。

由于整流器的整流作用,各相整流元件只在一周期内的部分时间轮流导电,所以它的二次侧电流是非正弦波形,因此二次侧电流含有直流分量,而一次侧电流不含直流分量。

整流变压器视在功率比直流输出功率要大；而且二次侧视在功率比一次侧的视在功率也大（桥式电路除外）。这是因为一、二次通电时间不同所造成的。

2. 当整流器发生逆弧（如汞弧整流器）或击穿（如半导体整流器）时，变压器中就流过很大的短路电流，于是会产生比普通电力变压器大1.4~1.8倍的电动力。为此，要求变压器阻抗设计得大些以限制短路电流。因而整流变压器的外形较为矮胖，其绕组和铁心等结构的机械强度也需要加强。

3. 整流变压器由于非正弦电流引起较大的漏抗压降，因此它的直流电压输出外特性较软，在计算时，要选择适当的接法和补偿方法。

4. 整流变压器的二次侧可能产生异常的过电压，因此需要加强绝缘。

（二）整流变压器铁心和绕组数据的确定

整流变压器的计算参数值如表12-1-4所示。

1. 原始数据

表 12-1-4 各种整流

电 路 名 称	单 相 半 波	单 相 全 波	单相桥式(全波)
整 流 电 路 图			
变压器绕组接法 (一次侧/二次侧)	I/1	I/1	I/1
输 出 电 压 波 形			
变压器一次侧相电流 I_{ϕ_1}	$1.21kI_d$	$1.11kI_d$	$1.11kI_d$
变压器二次侧相电压(有效值) U_{ϕ_2}	$2.22U_d + N_s$	$1.11U_d + N_s$	$1.11U_d + 2N_s$
变压器二次侧相电流(有效值) I_{ϕ_2}	$1.57I_d$	$0.785I_d$	$1.11I_d$
变压器一次侧容量 S_1	$2.69U_dI_d$	$1.23U_dI_d$	$1.23U_dI_d$
变压器二次侧容量 S_2	$3.49U_dI_d$	$1.74U_dI_d$	$1.23U_dI_d$
变压器平均计算容量 S_{av}	$3.09U_dI_d$	$1.48U_dI_d$	$1.23U_dI_d$

注：c—硅元件正向压降；N—硅元件的串联只数； $K = \frac{U_2}{U_1}$ 。

- 1) 整流器的型式与特性, 采用的整流线路。
- 2) 额定直流输出电压 U_d 和额定直流输出电流 I_d (均为平均值)。
- 3) 交流电源输入电压 U_1 , 电流 I_1 及电源频率 f 。
- 4) 相数 m_1 与 m_2 (m_2 不一定与变压器二次侧相数相同, 它主要由整流电路来确定)。
- 5) 变压器的冷却方式。

2. 确定变压器的接法

变压器的接法对于整流器的外特性与变压器的利用率都有直接的影响。目前除少数小容量整流变压器用 Y/Y 接法以外, 大多数整流变压器都采用 Y/ Δ (较小功率) 或 Δ /Y (较大功率) 的接法, 或者在铁心上附有闭合的第三绕组, 用以产生平衡电流, 抵消铁心上剩余磁动势。近来大功率的变压器还有用双反 Y 带平衡电抗器的接法。

3. 确定二次侧的相电压 $U_{\phi 2}$

根据直流输出电压 U_d 及整流电路形式, 查表 12-1-4 可得初选的二次侧相电压 $U_{\phi 2}$, 然

电 路 的 参 考 表

三相半波(星形零点)	三相星形桥式	六相双反星形	六相星形半波
$0.47kI_d$	$0.816kI_d$	$0.407kI_d$	$0.576kI_d$
$0.855U_d + N_c$	$0.427U_d + 2N_c$	$0.855U_d + N_c$	$0.744U_d + N_c$
$0.577I_d$	$0.816I_d$	$0.289I_d$	$0.407I_d$
$1.21U_dI_d$	$1.05U_dI_d$	$1.05U_dI_d$	$1.28U_dI_d$
$1.49U_dI_d$	$1.05U_dI_d$	$1.48U_dI_d$	$1.81U_dI_d$
$1.35U_dI_d$	$1.05U_dI_d$	$1.26U_dI_d$	$1.43U_dI_d$

后考虑到变压器阻抗压降较大，整流元件压降以及电源电压的波动等因素，一般 $U_{\phi 2}$ 应增加5~10%。还应按整流电路的实际情况，对某些低电压大电流的负载（例如电镀电源）还得考虑到连接导线及连接处的接触电阻所引起的压降，这时二次侧电压应增加得更多些，有的甚至达30%。

4. 根据直流输出电流 I_d 和整流电路型式可由表12-1-4查得二次侧相电流 $I_{\phi 2}$ 。

5. 由计算或查表12-1-4可得一，二次侧视在容量 S_1 和 S_2 ，最后求得整流变压器的标称（平均）容量 P_{av} ，其计算公式为：

$$S_1 = m_1 U_{\phi 1} I_{\phi 1} \times 10^{-3} \text{ (kVA)}$$

$$S_2 = m_2 U_{\phi 2} I_{\phi 2} \times 10^{-3} \text{ (kVA)}$$

$$S_{av} = \frac{S_1 + S_2}{2} \text{ (kVA)}$$

6. 铁心和绕组的设计计算步骤和普通电力变压器相同，有些参数可根据经验选择。

1) 整流变压器磁通密度低于电力变压器。

对油浸式变压器：

热轧D43(0.35)

$B_m = 13000 \sim 14000$ 高斯

冷轧

$B_m = 16000 \sim 16500$ 高斯

2) 油面温升取低于电力变压器5℃。

3) 导线电流密度适当降低，使绕组的温升和短路损耗不超过预定值。

有关整流变压器的技术数据（绕组及铁心）如表12-1-5。

三相干式整流变压器技术数据

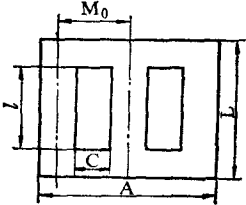


表 12-1-5

容量 kVA	整流电路 型式	接线方式	直流电压 V	直流电流 A	一次侧 (相)			
					电 压 V	匝 数	电 流 A	线 规
2.5	三相全桥	Y/△	36	30	248	376	3.5	φ1.35
10	三相全桥	Y/△	70	130	376	284	9.55	φ1.95
15	三相全桥	Y/△	70	200	376	234	14.6	φ2.83
25	三相全桥	Y/△	110	200	376	183	22.7	φ3.53
30	双反星形	△/Y-Ⅰ	12	1500	450	196	18.7	φ4.1
40	三相全桥	Y/△	170	200	289	117	45.2	2×(1.56×6.9)
45	双反星形	△/Y-Ⅰ	12	2500	480	160	27	2.7×5.1
50	三相全桥	Y/△	170	250	376	130	43.5	2×(1.35×6.9)
60	三相全桥	Y/△	275	200	220	70	100	3.05×14.5
100	三相全桥 带中心线	Y/△-0	240	400	220	38	165	2×(2.63×13.5)

〔例〕一75千瓦的绕线式异步电动机拖动某一设备，现需将电动机的异步运行改为同步运行。根据要求需绕制一整流变压器，整流线路形式采用三相桥式，元件为硅管，要求直流输出： $U_d = 24$ 伏， $I_d = 500$ 安。试计算变压器的数据。

解：1. 由表12-1-4得：变压器二次相电流 $I_{\phi 2} = 0.816 \times I_d = 408$ 安，变压器二次侧相电压（空载） $U_{\phi 2} = 0.427 U_d + 2 N_s = 0.427 \times 24 + 2 \times 2 \times 0.6 \approx 13$ 伏。

整流元件串联数为2，元件正向电压降0.6伏；考虑变压器的阻抗压降，元件压降及电源电压的波动，连接导线接触电阻的压降等因素，故取 $U_{\phi 2} = 14$ 伏。

2. 变压器的二次容量，由表12-1-4，得

$$S_2 = 3 \times 1.05 \times 14 \times 408 \approx 18 \text{ 千伏安，二次绕组为三相。}$$

3. 变压器的一次容量

$$S_1 = 1.05 \times 18 \approx 19 \text{ 千伏安}$$

4. 变压器的一次侧相电流：

$$I_{\phi 1} = \frac{19 \times 10^3}{3 \times 220} = 28.8 \text{ 安}$$

变压器电源电压380伏，一次线圈为Y接三相， $U_{\phi 1} = 220$ 伏， $f = 50$ 赫。

根据以上所得出的各个参数，便可进行铁心截面选择，线圈的计算，导线的选择等。计算步骤与方法和普通电力变压器同，但要注意以下几点：1) 磁通密度取低于电力变压器；2) 油面顶层温升取低于电力变压器 5°C 为 50°C ；3) 电流密度适当取低；4) 适当放大其杂散损耗，（在大容量时）。

二 次 侧 (相)				每匝电压	磁通密度	铁 心 尺 寸						
电 压 V	匝 数	电 流 A	线 规	V/匝	G	截面 cm ²	直径 mm	M mm	L mm	A mm	l mm	c mm
30	46	28.3	$\phi 3.53$	0.66	11000	27	$\phi 64$	142	261	342	155	84
58.4	44	61.3	$2 \times (1.68 \times 6.4)$	1.33	11000	51.2	$\phi 92$	230	380	543	214	147
58.4	36	94.1	$2 \times (2.44 \times 8)$	1.6	11000	66.4	$\phi 102$	254	399	600	215	162
90.4	44	94.1	$2 \times (2.83 \times 6.9)$	2.05	11300	80.4	$\phi 112$	275	430	652	230	173
13.75	6	434	(4.7×8) 饼式5饼并联	2.295	11400	90.85	$\phi 120$	234	450	580	250	122
138.2	56	94.1	$2 \times (2.83 \times 7.4)$	2.46	11300	99.7	$\phi 125$	288	494	692	280	172
12.5	4	72.5	铜排 8×24	3	11400		$\phi 130$	250	470	622	260	128
138.2	48	11.8	$2 \times (2.83 \times 9.3)$	2.89	11000	118.5	$\phi 135$	312	542	752	308	184
22.3	72	94	3.05×14.5	3.2	11300	142	$\phi 146$	319	598	778	334	179
110	11	328	$2 \times (2.63 \times 10)$ 饼式三饼并联	5.8	12200	214	$\phi 185$	385	644	946	350	209

第二节 空心电抗器及脉冲变压器计算

一、空心电抗器计算

电抗器即电感，有些场合要求的电感量很小，或是要求较好的线性，可用空心电抗。

空心电抗器的电感量与线圈的几何形状及线圈匝数有关，可以根据通过电流的大小选定导线的截面，然后假设几个尺寸大小及线圈匝数进行试算，重复修改几次就可以得到需要的电感。

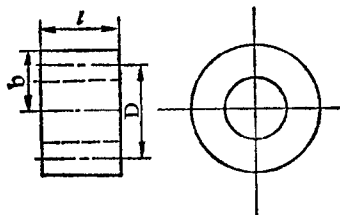


图 12-2-1 空心电抗器线圈

多层线圈电感的计算公式如下

$$L = \frac{N^2 D^2}{50(D + 2l + 1.3bl/D)} (\mu H) \quad (12-2-1)$$

式中 D —— 线圈的平均直径，厘米；

l —— 线圈的长度，厘米；

b —— 线圈的厚度，厘米；

N —— 匝数。

〔例1〕已知线圈 $N = 500$ 匝， $D = 16$ 厘米， $b = 3$ 厘米， $l = 10$ 厘米，计算电感量。

解：电感量

$$\begin{aligned} L &= \frac{500^2 \times 16^2}{50(16 + 2 \times 10 + 1.3 \times 3 \times 10/16)} \\ &= 3.3 \times 10^4 \text{ 微亨} = 33 \text{ 毫亨} \end{aligned}$$

此计算公式为近似的，计算结果与实际有时会有误差，但用于估算是有用的。计算结果可通过实测校验。

二、脉冲变压器计算

脉冲变压器能传递、升高或降低脉冲电压，并使电路互相隔离，因此适用于需要与主电路隔开的电路中。它与电源变压器不同，脉冲变压器原边输入的电压是单方向的脉冲电压，所以铁心磁密的变化是 $\Delta B = B_m - B_r$ ，脉冲变压器副边输出的脉冲前沿和脉冲宽度是一对矛盾，当铁心一定时，原边匝数多，可以使脉冲加宽，但漏感大，前沿变坏。

（一）脉冲变压器采用的磁性材料

一般的脉冲变压器铁心材料可以用热轧硅钢片。如果使用冷轧硅钢片，磁通密度可以选高些，线圈匝数可以少些。在脉冲宽度小，要求脉冲电压前沿较陡时，也可用铁淦氧磁心，一般情况下用坡莫合金并不十分必要，因为，如果脉冲变压器有直流磁化电流，用坡莫合金反易造成饱和而使传递脉冲电压的能力下降。

脉冲变压器一般只通过几十至一、二百毫安电流，发热很小，选择各线圈导线截面主要考虑导线电阻压降及绕线时的机械强度，一般选 $0.15 \sim 0.25$ 毫米的高强度漆包线，宽脉冲要选用稍粗的导线。绕制时，注意初级线圈与次级线圈以及各次级之间要有足够的绝缘。因绝缘强度不够而短路时，有可能引起可控硅元件的损坏，所以必须予以注意。

（二）用于窄脉冲的脉冲变压器

脉冲宽度在 $100 \sim 50$ 微秒以内（例如用普通单结晶体管产生的脉冲）脉冲变压器的数据可考虑按以下范围选用。

1. 在要求脉冲电压前沿不十分陡时, 铁心材料可以选用热轧硅钢片或冷轧硅钢片。如果用铁淦氧磁心做铁心时, 必须选用磁通密度较高的, 其前沿陡度可以好些。

2. 铁心截面用硅钢片时, 要求截面不小于 0.5 厘米^2 。一般可采用大型半导体收音机用输出变压器, 截面有 0.5 厘米^2 左右。如用冷轧硅钢片绕成的环形铁心, 可选用内径为 $0.18 \sim 2.0 \text{ 厘米}$, 外径 3.0 厘米 , 高 1.0 厘米 左右的。

3. 初级线圈匝数 N_1 (在铁心磁路长度 l 为 $6 \sim 8 \text{ 厘米}$ 左右时) 可考虑以下范围:
热轧硅钢片: $250 \sim 300$ 匝; 冷轧硅钢片的环形铁心: $200 \sim 300$ 匝; 铁淦氧磁环: $50 \sim 60$ 匝。
铁心磁路长度 l 长的, 可选 N_1 大些, l 小的可选 N_1 小些。

4. 次级线圈匝数 N_2 : 与 N_1 相同。

(三) 用于宽脉冲的脉冲变压器

根据脉冲电压的宽度与幅度的要求, 选定适当的铁心材料后, 计算变压器主要是计算铁心截面与初、次级线圈匝数。

[例2] 已知: 要求输出脉冲幅值 (空载) U 伏; 要求输出脉冲宽度 T 微秒; 变压器初级供电电压 E 伏; 负载电阻 R 欧; 变压器铁心的磁化曲线如图 12-2-2 所示。其中, B_m 为变压器铁心的最大磁密; B_r 为最大磁滞回线的剩磁磁密; H_m 为变压器铁心对应于 B_m 的最大磁场强度。

求 1) 初级线圈匝数 N_1 , 次级线圈匝数 N_2 。

2) 铁心截面 A_c , 迭厚 b 。

解: 1) 根据脉冲宽度 T , 初步选定铁心截面 A_c 。

因为变压器初级线圈磁链最大的变化值 $\Delta\psi$ 由初级脉冲幅度、宽度及形状决定, 例如: 矩形波: $\Delta\psi = ET$; 梯形波: $\Delta\psi = E\tau(1 - e^{-T/\tau})$; 尖波: $\Delta\psi = E\tau$ 。其波形如图 12-2-3 所示。

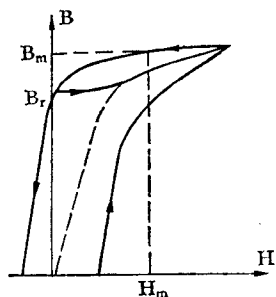


图 12-2-2 变压器铁心磁化曲线

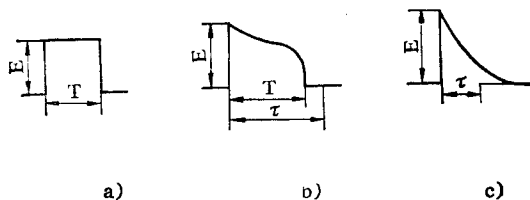


图 12-2-3 波形图
a—矩形波; b—梯形波; c—尖波

又因为 $\Delta\psi = A_c N_1 \Delta B / 100$, ($V \cdot \mu S$)。

式中 ΔB ——变压器铁心磁密的变化值, 高斯;

对输出单向脉冲: $\Delta B = B_m - B_r$

对有去磁绕组时: $\Delta B = 2B_m$

因此可得:

$$AN_1 = 100 \frac{\Delta\psi}{\Delta B} \quad (12-2-2)$$

初步选定 N_1 后, 就可估算出截面 A_c 的大小。

在脉冲宽度较小时 (例如 1000 微秒左右) 可选 $N_1 = 200$ 。在脉冲宽度大, 选出的 A_c 过大 (超过 3 厘米^2) 时, 可以适当增大 N_1 。

在脉冲宽度大时,可采用去磁线圈和采用 ΔB 大的铁心材料,以使 A_c 大大减小。

2) 定出截面积 A_c 后,从铁心截面 A_c 初步选择铁心尺寸,定出磁路长度 l_c ,见图12-2-4。

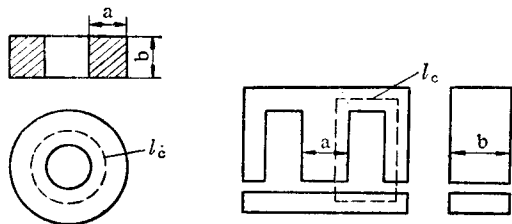


图 12-2-4 脉冲变压器铁心

3) 计算磁化电流 i_μ 的大小,根据 i_μ 及三极管能供给的电流大小校核 N_1 。

供给脉冲变压器的管子除了要供给负载的电流 i_1 外,还要供给变压器的磁化电流 i_μ 。铁心材料决定后, H_m 就决定了。因为 $H_m l_c = I_\mu N$, $H_m l_c$ 选定后,则初级线圈匝数与 i_μ 大小有关。所以, A_c 选定后,还要校核原先选

的 N_1 ,它所需的磁化电流 i_μ ,三极管功率能否满足。

$$i_1 \text{ 由下式决定: } i_1 = i_2 \frac{N_2}{N_1} = 1.2 \times \frac{U}{R} \quad \frac{U}{E} = \frac{1.2 U^2}{R E} \quad (12-2-3)$$

式中的1.2是考虑回路电压损失而加入的系数。

再根据 N_1 计算出最大磁化电流 i_μ ,考虑了 i_1 后,管子能够供出足够的 i_μ 电流,就可以确定 N_1 ,如不能供给 i_μ 的电流就要重新修改,或者把原计算的 N_1 适当加大(N_1 也不能过大,否则会使变压器漏感增大,影响脉冲前沿陡度),或选择功率较大的管子或改用 H_m 较小的铁心材料,例如可采用坡莫合金铁心。

4) 计算次级线圈匝数 N_2

$$N_2 = 1.2 \frac{N_1 U}{E} \quad (12-2-4)$$

以上只是近似的估计,有时需反复修改,才能得到较合适的数值。

脉冲宽度越大,则所需的 $A_c N_1$ 越大,如果 N_1 受一定限制时(N_1 大漏感也大,使脉冲电压前沿不陡),就要求铁心尺寸加大,而铁心尺寸大,又要求增大管子的功率,因此,在脉冲宽度大时,常用去磁线圈来增大 ΔB ,减小铁心尺寸。

[例3] 试计算一脉冲变压器,其要求如下:

输出脉冲幅值 $U = 7$ 伏;输出脉冲宽度 $T = 1100$ 微秒(20°);变压器初级供电电压 $E = 18$ 伏;负载电阻 $R = 35$ 欧,(相当于50A可控硅的控制极内阻)。

解: 1) 选用冷轧硅钢片, $B_m = 10000$ 高斯, $B_r = 4500$ 高斯, $H_m = 1.2$ 奥斯特。

2) 根据脉冲宽度,估算铁心截面 A_c 。

要求脉冲是矩形波

$$\Delta\psi = ET = 18 \times 1100 = 19800 \text{ 伏-微秒}$$

输出单向脉冲,没有去磁线圈,所以得:

$$\Delta B = B_m - B_r = 10000 - 4500 = 5500 \text{ 高斯}$$

因脉冲宽度较小(1100微秒),故选 $N_1 = 200$ 匝

$$\text{根据 } A_c N_1 = 100 \frac{\Delta\psi}{\Delta B}$$

$$\text{故 } A_c = 100 \frac{\Delta\psi}{N_1 \Delta B} = 100 \times \frac{19800}{200 \times 5500} = 1.8 \text{ 厘米}^2$$

取 $\frac{b}{a} = 1.3$, $A_c = a \times b$, 所以 $1.3a^2 = A_c$, $a^2 = \frac{1.8}{1.3} = 1.38$, $a = 1.18$ 厘米。

选用尺寸较相近的铁心尺寸如图12-2-5所示。

从图中尺寸可算出磁路长度 $l_0 = 9.2$ 厘米。

3) 根据磁化电流 i_m 校核 N_1

(1) 估算供给负载电流 i_1

$$i_1 = 1.2 \frac{U^2}{RE} = 1.2 \times \frac{7^2}{35 \times 18} = 0.094 \text{ A (即94毫安)}$$

(2) 根据 N_1 计算磁化电流 i_m

$$i_m = \frac{H_m l_0}{N_1} = \frac{0.948 \times 9.6}{200} = 0.045 \text{ 安} = 45 \text{ 毫安}$$

($H_m = 1.2$ 奥斯特 $= 1.2 \times 0.79 = 0.948$ 安匝/厘米)

(3) 管子除供给 i_1 外, 是能够供给这么大的磁化电流的, 故 N_1 不必另算。

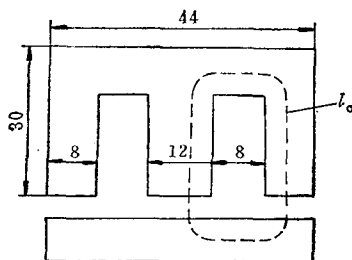


图 12-2-5 例 3 选用的硅钢片铁心图

第三节 电磁铁的估算

一、电磁铁结构型式选择

(一) 供电方式不同时对电磁铁性能的影响

表12-3-1列出了交流, 直流电磁铁性能的比较情况:

表 12-3-1 交直流电磁铁比较表

项 目	直 流	交 流	摘 要
铁 心	圆 柱 体	叠 片	交流有铁耗。防剩磁气隙直流的比交流的长。
振动噪音	无	有	交流有脉动电磁吸力, 直流则无。
机械强度	强	弱	交流叠压成型, 机械强度弱。
起动电流	小	大	交流电抗几乎和气隙成反比。
吸合时间	慢	快	直流时间常数大, 交流磁通建立很快。
吸力特性	陡	平 坦	交流磁链变化小。
操作频率	大	小	交流铁心机械强度弱, 起动次数多, 线圈温度上升快。
线圈形状	细 长	扁 平	扁平线圈对散热有利

(二) 利用结构因数 K_ϕ 选择电磁铁的类型

结构因数 $K_\phi = \frac{\sqrt{F}}{\delta} \propto \frac{D_0}{l_0}$, K_ϕ 和电磁铁类型的关系如表12-3-2所示。

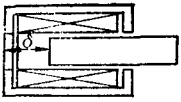
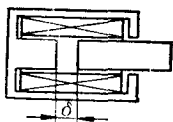
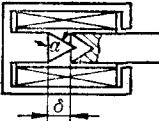
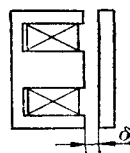
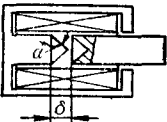
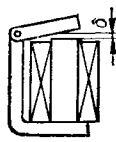
[例1] 欲选择一电磁铁, 其额定行程 $\delta = 0.25$ 厘米, 在该行程时吸力 $F = 25$ 公斤, 问应采用何种型式电磁铁最合理。

解: 结构因数 $K_\phi = \frac{\sqrt{25}}{0.25} = 20$, 查表12-3-2可知最好采用具有平面柱挡铁的螺管式

或拍合式。

表12-3-2是对直流电磁铁而言，对交流电磁铁的结构选择则是根据具体的实际情况和已知条件决定，表12-3-2也有一定的参考价值。

表 12-3-2 结构因数 K_ϕ 与电磁铁型式的关系

结构因数 K_ϕ	电磁铁型式	结构因数 K_ϕ	电磁铁型式
<0.2	 无挡铁螺管式	$16.5 \sim 93$	 具有平面柱挡铁的螺管式
$1.85 \sim 4$	 具有圆锥形($\alpha=60^\circ$)挡铁的螺管式	>93	 衔铁为平板形的盘式电磁铁
$4 \sim 16.5$	 具有圆锥形($\alpha=45^\circ$)挡铁的螺管式	$2.6 \sim 26$	 拍合式

二、电磁吸力的计算公式

在实际工作中经常遇到这样的问题，已知衔铁打开（或闭合位置）时的吸力，需要选择电磁铁并计算其参数，或者对现有的磁系统（铁心）进行吸力核算，都需要进行电磁铁的吸力计算。

（一）马克斯韦公式法

$$F = \left(\frac{\phi_s}{5000} \right)^2 \frac{1}{A} \quad (\text{kg}) \quad (12-3-1)$$

式中 A ——磁极截面积，厘米²；

ϕ_s ——工作气隙磁通，马；

μ_0 ——空气隙导磁系数 = 1.25 马/安匝·厘米。

式 (12-3-11) 中是假定磁极端面下的磁通在均匀分布的条件下求得的，因此适用于计算气隙较小时的吸力，例如，电磁铁处在吸合位置和接近吸合位置。它适用于直流也可适用于交流，但不能计算螺管力。

(二) 能量平衡法

$$F = 5.1(IN)^2 \frac{d\Lambda}{d\delta} \times 10^{-8} \quad (\text{kg}) \quad (12-3-2)$$

$$\text{或} \quad F = 5.1U_g^2 \frac{d\Lambda}{d\delta} \times 10^{-8} \quad (\text{kg}) \quad (12-3-3)$$

式中 IN ——线圈的全部激磁安匝，安匝；

δ ——工作气隙长度，厘米；

U_g ——工作气隙磁压降，安匝；

Λ ——全磁路的磁导，马/安；每一气隙下的 Λ 等于此气隙下的总磁通与激磁安匝的比值

$$\Lambda = \frac{\phi}{IN}$$

求出衔铁每一位置下的 Λ ，作出曲线 $\Lambda = f(\delta)$ ，用作图法求出 $\frac{d\Lambda}{d\delta} = f'(\delta)$ 曲线，便可以计算吸力。

能量平衡法在气隙较大时也有较高的准确度，它既适用于交流，也适用于直流，但计算时比较复杂。

(三) 各种磁系统吸力的简化公式

对某些典型的磁系统在忽略了铁心磁阻、铁损边缘磁通和线圈电阻压降等影响后推导出其吸力的简化计算公式，在气隙较大，磁通密度不高时有一定的适用价值，适合于计算衔铁打开位置时的吸力。

1. 拍合式磁系统 (图12-3-1)

1) 直流

$$F = -6.4(IN)^2 \frac{A_c}{\delta^2} \times 10^{-8} \quad (\text{kg}) \quad (12-3-4)$$

F 小于零是表示吸力的方向是 δ 增大的反方向。

2) 交流

当供给激磁线圈的是数值不变的电流时，吸力公式为吸力最大值

$$F_m = -6.4(I_m N)^2 \frac{A_c}{\delta^2} \times 10^{-8} \quad (\text{kg}) \quad (12-3-5)$$

吸力平均值

$$F_0 = \frac{F_m}{2} = -3.2(I_m N)^2 \frac{A_c}{\delta^2} \times 10^{-8} \quad (\text{kg}) \quad (12-3-6)$$

式中 I_m ——激磁电流最大值，安。

当供给激磁线圈的是恒定的交流电压时，吸力最大值为

$$F_m = -0.2 \left(\frac{U \cdot 10^4}{f \cdot N} \right)^2 \frac{A_c}{\left(A + \frac{l_c \lambda \delta}{\mu_0} \right)^2} \quad (\text{kg}) \quad (12-3-7)$$

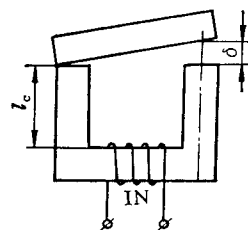


图 12-3-1 拍合式磁系统图