

当导线尺寸（层的厚度）小于穿透深度时， $F_R$  的计算是很复杂的。道威尔（Dowell）给出了正弦波交流电阻的计算方法，如图 6-9 所示。图中纵坐标  $F_R=R_{ac}/R_{dc}$ ，横坐标  $Q$  为层厚度或导线厚度与穿透深度  $\Delta$  的比值。对于铜带和铜箔线圈，层的厚度就是铜带的厚度。当线圈交错分段时，参变量为每段线圈层数。

对于每层相互叠绕直径为  $d$  的圆导线，有效层厚度为导线直径的 0.83 倍。如果圆导线层间有间隙，有效层厚度为  $0.83d\sqrt{d/s}$ ， $d$  为导线直径， $s$  为导线中心距。圆导线  $Q$  也可以用以下公式计算：

$$Q = \frac{h\sqrt{F_l}}{\Delta} \quad (6-12)$$

式中  $h=0.83d$ ;

$d$ —导线直径;

$\Delta$ —穿透深度;

$F_l=N_l d/w$ —铜层系数;

$N_l$ —每层匝数;

$w$ —层的宽度。

对于铜箔， $F_l=1$ 。

在例 2 中  $Q=5$ ，到图 6-9 中查得  $Q=5$  时 3 层对应的  $F_R$  差不多是 31.67，两者是一致的。

在图 6-9 的最右边，是导体的厚度远大于穿透深度  $\Delta$ ， $F_R$  很大。曲线是平行的。在最左边，导体厚度远小于  $\Delta$ ， $F_R$  接近 1。在图的中心，曲线随着  $Q$  的减少向下弯曲。对于变压器交流电流分量，通常选择  $F_R=1.5$  最佳。 $F_R$  加大，损耗变得很大。要是低于 1.5，超过最小折返点，需要用更细的导线，充填系数减少。 $F_R=1.5$  时，1 层  $Q$  大约 1.6，10 层大约为 0.4。图 6-9 在选择导线直径时是非常有用的。如果导线要求截面积较大，应当采用多股线或铜箔。即使用较薄铜带导致高的直流电阻，但交流电阻可大大减少还是有利的。在直流电感中，交流纹波相对直流分量很小

（电感电流连续）时，可选取较大  $F_R$ 。

如果将初级和次级绕组分段交错绕制，图 6-10 画出几种安排的低频磁场分布图。图 (a) 在初级次级结合处磁场强度最高。线圈是两层初级和两层次级，如果  $Q=4$ ，由图 6-9 查得  $F_R=13$ 。

图 (b) 交错排列，最大磁场强度只有图 (a) 的一半。每段 1 层，仍然  $Q=4$ ，再由图 6-9 查得  $F_R=4$ 。交流损耗电阻大大下降。图 (c) 采用初级 1/3—次级 2/3—初级 2/3—次级 1/3 的安排，从磁场分布图可以看到最大磁场强度比图 (b) 更低。因此，存储能量更少。更多的分段减少磁场能量，但会带来其它问题。

例 3 初级电流幅值  $I_p=20A$ ，占空度为  $D=0.5$ ，工作频率为 90kHz，共 10 匝。磁芯窗口宽度  $l=24mm$ 。选择导线尺寸。

解：平均电流

$$I_a=DI_p=0.5 \times 20=10A$$

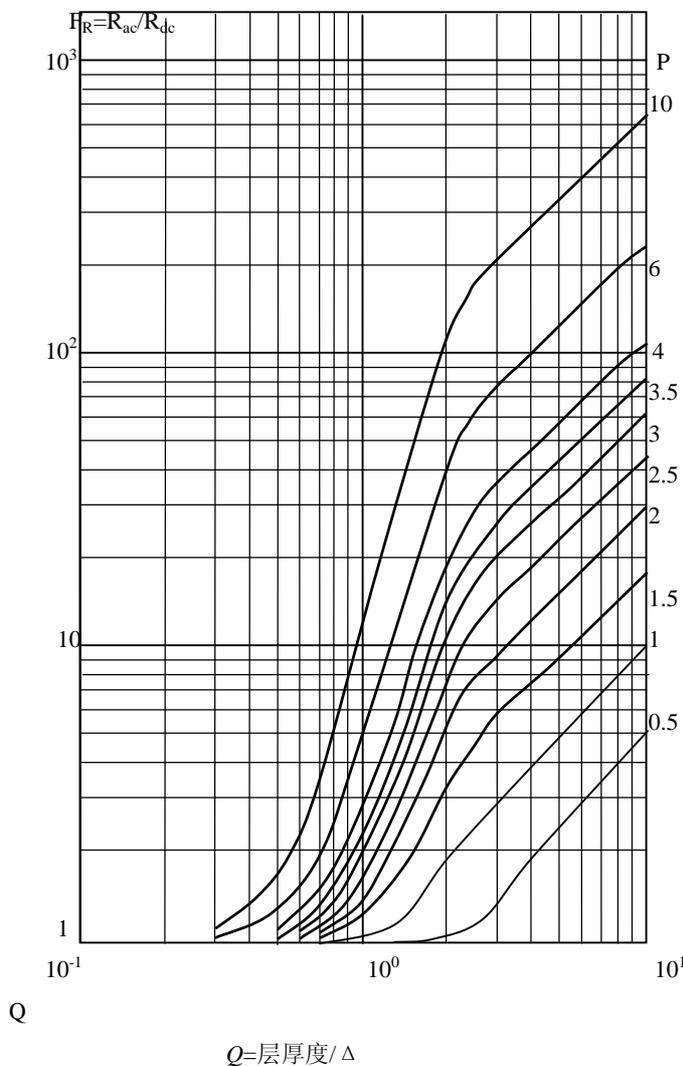


图 6-9 交流与直流电阻比和等效铜厚度、层数关系

总有效值

$$I = \sqrt{DI_p} = \sqrt{0.5 \times 20} = 14 \text{ A}$$

交流分量有效值

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{0.5 \times 20^2 - 10^2} = 10 \text{ A}$$

选择电流密度  $j=4\text{A/mm}^2$ , 需要的导线截面积

$$A_{\text{cu}} = \frac{I_{\text{rms}}}{j} = \frac{10}{4} = 2.5 \text{ mm}^2$$

### 1. 选择圆导线

由表 10-2 查得裸线径  $d=1.8\text{mm}$  ( $A_{\text{cu}}=2.545\text{mm}^2$ ), 带漆皮外径  $d'=1.92\text{mm}$ 。10 匝导线占窗口宽度为  $10 \times 1.92=19.2\text{mm} < 24\text{mm}$ , 正好一层可以绕下。两端各留 2mm 爬电距离。

工作频率为 90kHz, 线圈要发热, 假定工作在  $100^\circ\text{C}$ , 其集肤深度为

$$\Delta = \frac{7.6}{\sqrt{f}} = \frac{7.6}{\sqrt{90 \times 10^3}} = 0.0253 \text{ cm} = 0.253 \text{ mm}$$

假定导线匝与匝之间仅绝缘层, 铜层系数  $F_1=d/d'=1.8/1.92$ , 因此

$$Q = \frac{0.83 \times d \sqrt{F_1}}{\Delta} = \frac{0.83 \times 1.82 \times \sqrt{1.8/1.92}}{0.253} = 5.7$$

由图 6-9 查得当横坐标  $Q=5.7$ , 1 层找到  $F_R \approx 5.7 = R_{\text{ac}}/R_{\text{dc}}$ , 交流电阻太大了。

### 2. 选择多股绞绕圆导线

选择导线直径小于两倍集肤深度  $d < 2\Delta = 2 \times 0.253 = 0.506\text{mm}$ , 由表 10-2 查选择标称直径  $d=0.45\text{mm}$ , 带漆皮直径  $d'=0.51\text{mm}$ , 截面积  $A_{\text{cun}}=0.159\text{mm}^2$ 。需要导线股数

$$N = \frac{A_{\text{cu}}}{A_{\text{cun}}} = \frac{2.5}{0.159} = 15.7 \text{ 股} \quad \text{取 } n=16 \text{ 股}$$

16 股导线相当于  $4 \times 4$  矩形截面。每层导线  $4 \times 10 = 40$  匝, 宽度为  $40 \times 0.51 = 20.4\text{mm} < 24\text{mm}$ 。同样计算

$$Q = \frac{0.83 \times d \sqrt{F_1}}{\Delta} = \frac{0.83 \times 0.45 \times \sqrt{0.45/0.51}}{0.253} = 1.39$$

在图 6-9 上  $Q=1.39$  向上交到 4 层曲线向左水平指向  $F_R \approx 7$ , 这比单股还要大。

如果将多股绞线夹在两个一半次级当中, 4 层线圈就作为两层处理, 这时  $Q=1.39$  对应  $F_R \approx 2.3$ 。可见交错安排线圈对减少交流电阻很有效。

### 3. 采用利兹线

选用  $0.18 \times 100$  利兹线。相当于  $10 \times 10$  层, 可以计算出  $Q=0.57$ , 在图 6-9 上查得  $F_R \approx 1.9$ 。还稍大于  $F_R=1.5$ , 可以采用比 0.18 更细的线, 减少交流电阻。

### 4. 采用铜箔

考虑到爬电距离, 采用宽度  $b=20\text{mm}$  的铜箔, 铜箔厚度为

$$\delta = \frac{A_{\text{cu}}}{b} = \frac{2.5}{20} = 0.125 \text{ mm}$$

因此

$$Q = \frac{\delta}{\Delta} = \frac{0.125}{0.253} \approx 0.5$$

对于 1 层,  $Q=0.5$ ,  $F_R \approx 1$ , 非常满意。

虽然图 6-9 曲线非常有用, 但应记住, 图 6-9 是正弦波电流下得到的。对于包含丰富谐波的开关电源应用, 实际损耗大于计算值。如果精确计算, 必须将电流波形分解成富里叶级数, 然后计算电