

1 磁路

1.1 磁场的基本物理量

1. 磁通 Φ , 单位:Wb

磁场穿过某个截面的磁感线的条数 $\Phi = BA$

2. 磁感应强度 B , 单位:T, 矢量, 又称磁通密度, 掌握右手螺旋定则

3. 磁场强度 H , 单位:A/m, 矢量

方向和 B 相同, $H \propto i$

表示电流本身产生磁场的强弱

4. 磁导率 $\mu = \frac{B}{H}$, 单位:H/m, 表示介质的导磁能力, 值会随着介质的磁化程度变化

1.2 物质的磁性能

按照磁导率的差异, 分为非磁性物质和磁性物质

1.2.1 非磁性物质

总体特点 $\mu \approx \mu_0$

其中 $\mu > \mu_0$ 为顺磁物质, $\mu < \mu_0$ 为反磁物质

工业上将所有非磁性物质的磁导率看作 μ_0 , 非磁性物质的 B 和 H 成线性关系

1.2.2 磁性物质

由于磁畴, 产生的特殊点

特点: 1. $\mu \gg \mu_0$

2. μ 会随着磁化程度的变化而变化, 从而导致 3

3. B 和 H 成非线性关系

4. 2 3 称为磁饱和性, 熟悉初始磁化曲线

5. 磁滞性: B 的变化滞后于 H , 熟悉基本磁化曲线, 记忆 H_c 矫顽磁力, B_r 剩磁强度

6. 根据磁化曲线的不同, 将磁性物质分为三种: 硬磁物质, 软磁物质, 矩磁物质

硬磁物质: H_c B_r 较大

软磁物质: H_c B_r 较小, 用于变压器, 电机等的铁心

矩磁物质: 磁滞回线为矩形, 用于电子技术和计算技术中

1.3 磁路的基本定律

主磁通 Φ : 大部分经过铁心闭合的磁通

漏磁通 Φ_σ : 少部分经过空气等非磁性物质的磁通

磁路: 主磁通经过的路径

1.3.1 磁路欧姆定律

1. 恒定磁通

根据磁通连续性定律, 全电流定律

$$\text{磁阻 } R_m = R_{mc} + R_{mo} = \frac{l_c}{\mu_c A_c} + \frac{l_0}{\mu_0 A_0}$$

$$\text{磁通势 } F = NI$$

则有

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1)$$

公式 (1) 是恒定磁场中的欧姆定律, 在 $R_m = R_{mc} + R_{mo}$ 中, $R_{mo} \gg R_{mc}$, 则在 F 一定的情况下, 磁路中出现空气隙会使 Φ 减小很多

2. 交变磁通的磁路欧姆定律

$$\dot{\Phi}_m = \frac{\dot{F}_m}{Z_m}$$

其中 \dot{F}_m 为磁通势的幅值, $\dot{F}_m = NI_m = \sqrt{2}NI$

Z_m 为磁阻抗, $Z_m = R_m + jX_m$

1.3.2 磁路基尔霍夫定律

以恒定磁通磁路为例

1. 磁路基尔霍夫第一定律: 磁路的一个封闭面流出磁通等于流入磁通, 记流出为正流入为负则有 $\sum \Phi = 0$

2. 磁路基尔霍夫第二定律: 在磁路任意一个闭合回路中, 磁位差的代数和等于磁通势的代数和 $\sum U_m = \sum F$

1.4 铁心线圈电路

1.4.1 直流铁心线圈电路

直流电流产生恒定磁场, 不产生感应电动势, 电感相当于短路, 所以

$$I = \frac{U}{R}$$

线圈消耗的功率只有电阻消耗的功率:

$$P = I^2 R = UI$$

1.4.2 交流铁心线圈电路

推导见课本

1. 电磁关系: 设交流电压 u , 线圈中通过的电流 i , 则交流电压在铁心中产生交变磁通, 记其中主磁通 Φ , 漏磁通 Φ_σ , 主磁通漏磁通在线圈中产生电动势 e 和 e_σ , 线圈电阻 R 。由基尔霍夫电压定律:

$$u = -e - e_\sigma + Ri$$

写做相量

$$\dot{U} = -\dot{E} - \dot{E}_\sigma + R\dot{I}$$

由于漏磁通的路径为非磁性物质，则磁导率为常数， Φ_σ 和 i 成正比，漏磁通对应的线圈电感

$$L_\sigma = \frac{N\Phi_\sigma}{i}$$

为常数，在交流电路中的电抗称为漏电抗，简称漏抗：

$$X = \omega L_\sigma = 2\pi f L_\sigma$$

又电感的电压和电感电动势相位相反：

$$\dot{E}_\sigma = -jX\dot{I}$$

则有电动势平衡方程：

$$\dot{U} = -\dot{E} + (R + jX)\dot{I} = -\dot{E} + Z\dot{I}$$

式中：

$$Z = R + jX$$

为线圈的漏阻抗。

主磁通由于磁导率会变化，不能用以上的处理方式，直接用电磁感应定律分析，得到结果

$$\dot{E} = -j4.44Nf\dot{\Phi}_m$$

在忽略 R 和 X 时

$$U = E = 4.44Nf\Phi_m$$

说明在电压 U 和频率 f 不变时，主磁通 Φ_m 几乎不变

2. 功率关系

交流铁心线圈有功功率： $P = UI \cos \varphi$ ，有功功率包括铜损耗和铁损耗

铜损耗： $P_{Cu} = RI^2$ ，就是线圈电阻的功率损耗

铁损耗: 包括两部分: 磁滞损耗 P_h , 涡流损耗 P_e

1) 磁滞损耗: 由磁化过程中磁畴相互摩擦造成, 经验公式:

$$P_h = K_h f B_m^\alpha V$$

K_h 为磁滞损耗系数, 取决于材料, V 是铁心体积, α 取决于材料。

选用软磁物质可减小改损耗

2) 涡流损耗: 由于涡旋电流产生的损耗, 经验公式:

$$P_e = K_e d^2 f^2 B_m^2 V$$

K_e 为磁滞损耗系数, 大小和材料的电阻率成反比, d 为钢片厚度, V 是铁心体积

选用电阻率大的磁性材料减小该损耗; 使用多片硅钢片叠加可以减小该损耗

铁损耗是两者损耗的和

$$P_{Fe} = P_h + P_e$$

经验公式:

$$P_{Fe} = K_{Fe} f^\beta B_m^2 m$$

K_{Fe} 铁心的损耗系数, β 频率系数, m 铁心质量。恒定磁通的磁路无铁损耗

工程上采用损耗曲线计算铁损耗

3. 等效电路

目的: 将交流铁心线圈电路简化为单纯电路问题

$$\begin{aligned}\dot{E} &= -j4.44Nf\dot{\Phi} = -j4.44Nf\frac{\dot{F}_m}{Z_m} = -j4.44Nf\frac{\sqrt{2}NI}{R_m + jX_m} \\ &= -4.44\sqrt{2}N^2f\left(\frac{X_m}{R_m^2 + X_m^2} + j\frac{R_m}{R_m^2 + X_m^2}\right)\dot{I}\end{aligned}$$

$$R_0 = 4.44\sqrt{2}N^2f\frac{X_m}{R_m^2 + X_m^2}$$

$$X_0 = 4.44\sqrt{2}N^2f\frac{R_m}{R_m^2 + X_m^2}$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0$$

$R_0 X_0 Z_0$ 分别是励磁电阻, 励磁电抗, 励磁阻抗, 则

$$\dot{E} = -(R_0 + jX_0)\dot{I} = -Z_0\dot{I}$$

由于 U, f 不变时 Φ_m 基本不变, 近似 $R_0 X_0 Z_0$ 为常数, 则电动势平衡方程改写为:

$$\dot{U} = (R_0 + jX_0)\dot{I} + (R + jX)\dot{I} = (Z + Z_0)\dot{I}$$

得到交流铁心线圈电路的等效电路图课本图 1.4.4

电流 I 通过 R 和 R_0 的功率是有功功率

$$P_{Cu} = RI^2$$

$$P_{Fe} = R_0 I^2$$

R_0 代表铁损耗的等效电阻， X 代表漏磁通电感形成的电抗， X_0 代表主磁通电感形成的电抗
产生主磁通的电流为励磁电流，由于 $R_0 \gg R, X_0 \gg X$, 则可认为 I 是励磁电流