



附录A 磁路

Electric Machine & Energy Conversion Lab
Love in Truth



附录A 磁路

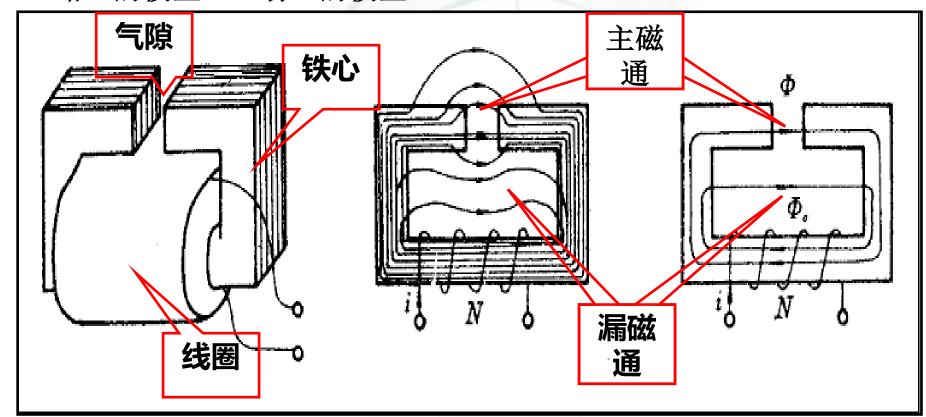
A.1 磁路及其基本定律

- A.2 铁磁物质的磁化特性
- A.3 磁阻与磁导
- A.4 恒定磁通磁路的计算
- A.5 正弦 电压作用下铁心磁场的磁通
- A.6 电流波形的畸变
- A.7铁内损耗
- A.8 正弦磁通磁路的计算
- A.9 铁心线圈及其电路模型



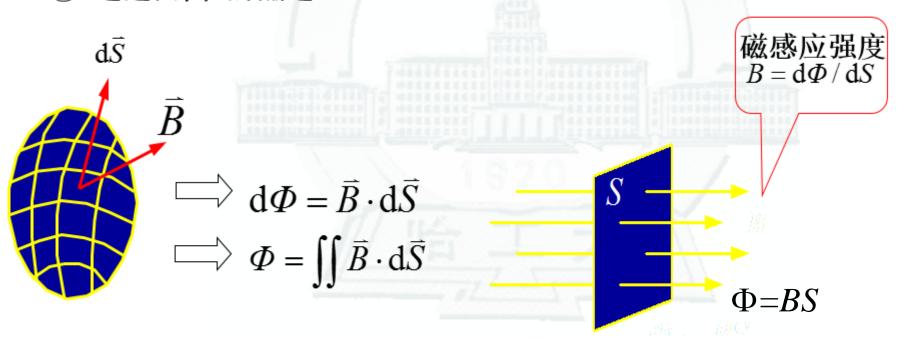
1. 磁路概述

"路"的模型,"场"的模型



- 2. 磁场中的物理量
- (1)磁感应强度 B
- (2) 磁通 Φ
 - ① 通过曲面 S的磁通

②通过平面 S的磁通为



(3)磁场强度 H

磁场强度H 是矢量,单位为A/m。

$$H = \frac{B}{\mu}$$
 μ 为磁导率,单位: H/m

▶真空的磁导率是常量记为 µ 。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \,\text{H/m}$$

▶ 铁磁性物质的磁导率可以是空气磁导率的数万倍。通常 把此倍数称为相对磁导率,即

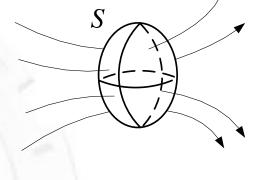
$$\mu_r = \mu / \mu_0$$



> 磁场的基本性质与磁路定律

1. 磁通连续性定律(基尔霍夫磁通定律) 磁场中穿出任意闭合面S的磁通之和等于零,即

$$\iint_{S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

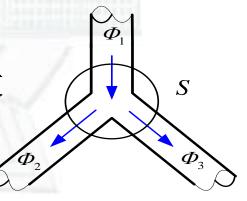


物理意义: 磁感应线总是闭合的。

基尔霍夫磁通定律:

在磁路中任选一闭合面,穿出此闭合面的各支路磁通代数和恒等于零。

$$\sum_{k \in \mathbb{R}_m} \Phi_k = -\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

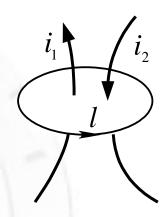


2. 安培环路定律(基尔霍夫磁位差定律)

安培环路定律:

磁场强度H沿任意闭合回路l的线积分等于穿 过该回路的电流代数和

$$\iint_{l} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \sum_{i} i$$
 磁通势
$$F_{m} = \sum_{i} i$$

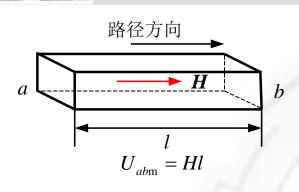


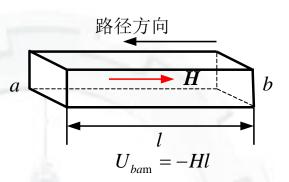
$$\iint_{l} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = i_{1} - i_{2}$$

磁场强度H沿磁场中某一路径从a点至b点的线积分称为a,b两点的磁位差

$$U_{\rm m} = \int_a^b \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

磁位差是标量,其参考方向是从a到b。





沿任一回路,磁位差的代数和恒等于此回路中磁通势的代数和,即 __ _

$$\sum U_{\mathrm{m}j} = \sum N_k i_k = \sum F_{\mathrm{m}k}$$

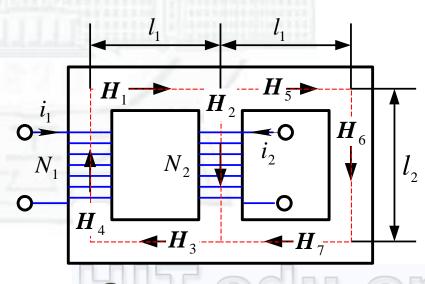
称为基尔霍夫磁位差定律

示例: 左边回路

$$H_1l_1 + H_2l_2 + H_3l_1 + H_4l_2 = N_1i_1 + N_2i_2$$

右边回路

$$-H_2l_2 + H_5l_1 + H_6l_2 + H_7l_1 = -N_2i_2$$





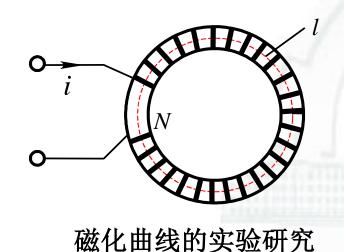
附录A 磁路

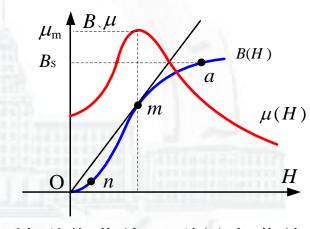
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
A.1 磁路及其基本定律
A.2 铁磁物质的磁化特性
A.3 磁阻与磁导
7 113 134 12 -3 134 13
1 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
A.4 恒定磁通磁路的计算
1人厂工业上厅从田下社 ~ 以口从以口
A.5 正弦电压作用下铁心磁场的磁通
A.6 电流波形的畸变
A.7 铁内损耗
A.8 正弦磁通磁路的计算
一个一个 1% 4% 足 4% 45 以 1 1 1 1
人人的人的因为什么的社会
A.9 铁心线圈及其电路模型



铁磁材料磁导率大, 其磁导率并不是常量。

磁化曲线:用B-H曲线来描述铁磁材料的磁化特性。





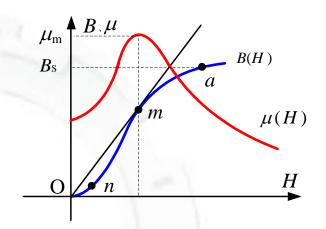
起始磁化曲线及磁导率曲线

通过改变线圈电流i,便可改变铁磁物质内的磁场强度H,

再测得此时的磁感应强度B,就可得到一组B-H数据。在B-H坐标系上逐点连接各测试点即得B-H曲线。

1. 起始磁化曲线

开始处有极短的一段增加较慢 随后B迅速上升,如nm段.



再以后则进入磁饱和区, B上升缓慢, 如ma段

a点称为饱和点.对应的磁感应强度称为饱和磁感应强度,记作 $B_{\rm S}$ 。

这条B-H曲线称为起始磁化曲线.

m点习惯上称为膝点。该点的切线通过原点,磁导率为最大,记作 μ_m

矫顽力

2. 磁滞回线

铁磁物质的磁化过程不可逆。

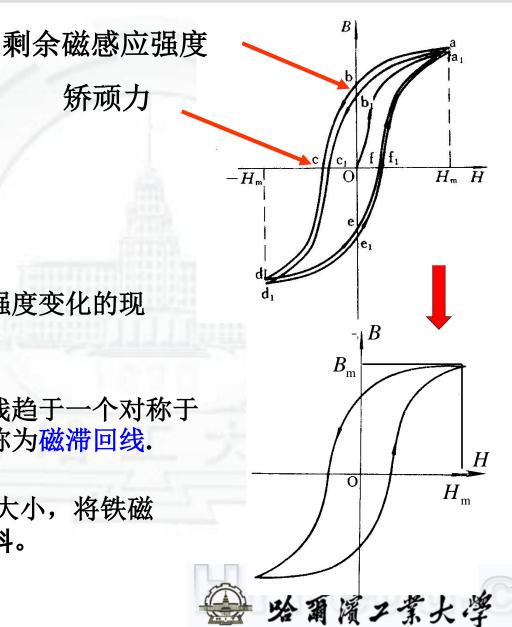
剩余磁感应强度B

矫顽力 H_c

磁感应强度变化滞后于磁场强度变化的现 象称为磁滞.

经过多个循环之后,磁化曲线趋于一个对称于 原点的闭合回线,这种回线称为磁滞回线.

工程上按矫顽磁场强度H。的大小,将铁磁 物质分为硬磁材料与软磁材料。

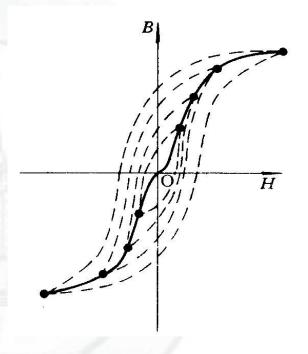


3. 基本磁化曲线

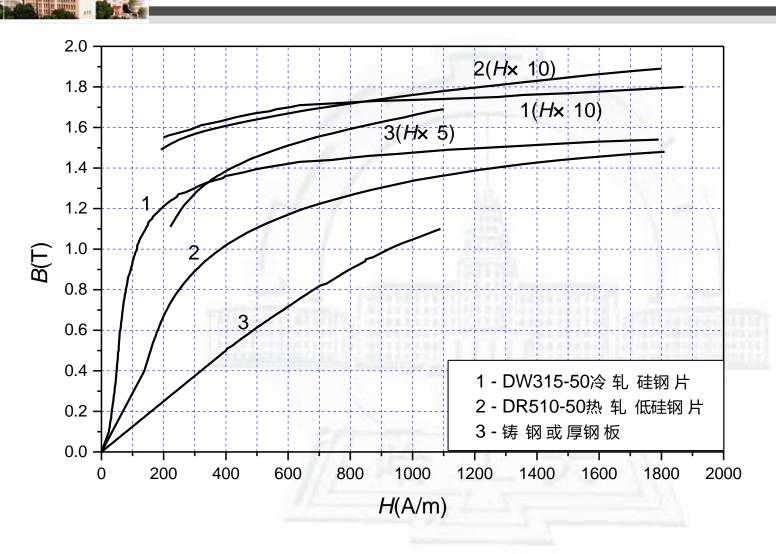
同一种材料在不同的 H_{m} 值下得到的磁滞回线的顶点 联成的曲线称为基本磁化曲线

一般给出曲线而未加声明的都是基本磁化曲线。通常计算时都用基本磁化曲线。

铁磁物质的主要特征是: 高导磁性、磁饱和性和磁滞性。



基本磁化曲线



三种铁磁物质基本磁化曲线示例





附录A 磁路

- A.1 磁路及其基本定律
- A.2 铁磁物质的磁化特性
- A.3 磁阻与磁导
- A.4 恒定磁通磁路的计算
- A.5 正弦电压作用下铁心磁场的磁通
- A.6 电流波形的畸变
- A.7 铁内损耗
- A.8 正弦磁通磁路的计算
- A.9 铁心线圈及其电路模型



磁感应强度均匀分布的铁心磁路: 在各截面上B与H均为常量, 方向都垂直于截面。

磁阻:均匀磁路上磁位差与磁通之比记为 R_m

磁导:磁阻的倒数,记为 A

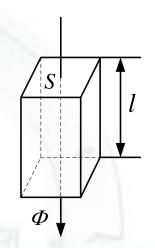
$$\begin{cases} \Phi = BS \\ U_{\rm m} = Hl \end{cases} \qquad R_{\rm m} = \frac{U_{\rm m}}{\Phi} = \frac{1}{\Lambda}$$

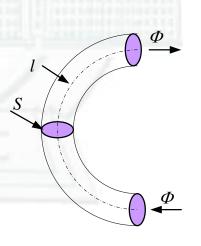
$$R_{\rm m} = \frac{l}{\mu S} = \frac{1}{\Lambda}$$

磁阻的SI单位为

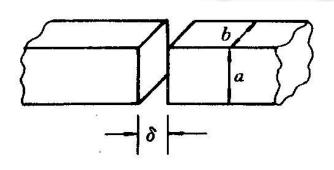
$$\frac{\mathbf{m}}{(\mathbf{H/m})\cdot\mathbf{m}^2} = \mathbf{H}^{-1}$$

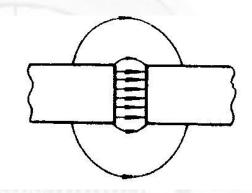
不均匀磁路,按中心线上的磁感应强度取平均计算。





磁路中有气隙时,存在边缘效应。





气隙截面按经验公式计算:

$$S = (a + \delta)(b + \delta)$$

表A.1 磁路与电路对比

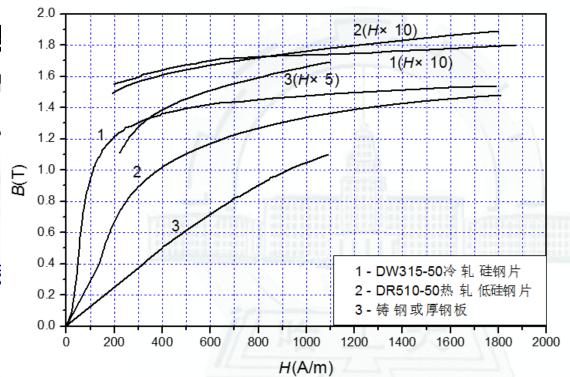
对比内容	磁路	电路
变	磁感应强度 B	电流密度 J
	磁通 Φ	电流 I
量	磁位差U _m	电压 U
	磁通势 F_m	电动势E
定 律	基尔霍夫定律 ΣΦ=0	基尔霍夫电流定律 $\Sigma I = 0$
	基尔霍夫磁位差定律 $\sum U_m = \sum F_m$	基尔霍夫电压定律 $\Sigma U = 0$
	磁路中的欧姆定律 $U_m = R_m \Phi$	电路中的欧姆定律 $U = RI$
参 数	磁导率 μ	电导率γ
	磁阻 R_m	电阻 $R = l/\gamma s$

A.3 磁阻」

例:图示部分磁路,长度热轧低硅钢片。分别求当磁阻及磁位差。

【解】
$$B_1 = 0.6$$
T 时,查磁

$$H_1 = 180 \text{A/m}$$
 $\mu_1 = \frac{B_1}{H_1}$



$$R_{\rm m1} = \frac{l}{\mu_1 S} = \frac{20 \times 10^{-2} \,\mathrm{m}}{(3.3 \times 10^{-3} \,\mathrm{H/m}) \times 30 \times 10^{-4} \,\mathrm{m}^2} \approx 20.2 \times 10^3 \,\mathrm{H}^{-1}$$

$$\Phi_1 = B_1 S = 0.6 \text{T} \times 30 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$U_{\text{m1}} = R_{\text{m1}} \Phi_1 = 20.2 \times 10^3 \,\text{H}^{-1} \times 1.8 \times 10^{-3} \,\text{Wb} \approx 36.4 \,\text{A}$$

磁感应强度为1.6T时,磁路饱和。

査磁化曲线2得
$$H_1 = 3800 \text{A/m}$$

$$\mu_2 = \frac{B_2}{H_2} = \frac{1.6}{3800} \approx 4.21 \times 10^{-4} \text{ H/m}$$

$$R_{\text{m2}} = \frac{l}{\mu_2 S} = \frac{20 \times 10^{-2} \text{ m}}{(4.21 \times 10^{-4} \text{ H/m}) \times 30 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \approx 1.58 \times 10^5 \text{ H}^{-1}$$

$$\Phi_2 = B_2 S = 1.6 \text{T} \times 30 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 4.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$U_{\text{m2}} = R_{\text{m2}} \Phi_2 = 1.58 \times 10^5 \text{ H}^{-1} \times 4.8 \times 10^{-3} \text{ Wb} \approx 758.4 \text{A}$$

$$U_{\text{m2}} = H_2 l = (37.8 \text{A/cm}) \times 20 \text{cm} = 756 \text{A}$$

当铁磁物质进入饱和段时,其磁导率明显下降,磁阻增大许多,磁位差增加的倍数远大于磁通增加的倍数 [1] [1] [2] [3]

哈爾濱工業大學



附录A 磁路

- A.1 磁路及其基本定律
- A.2 铁磁物质的磁化特性
- A.3 磁阻与磁导
- A.4 恒定磁通磁路的计算
- A.5 正弦电压作用下铁心磁场的磁通
- A.6 电流波形的畸变
- A.7铁内损耗
- A.8 正弦磁通磁路的计算
- A.9 铁心线圈及其电路模型



1. 已知磁通求磁通势

计算步骤(不计漏磁):

(1)分段:材料与截面积都相同的作为一段。

(2)计算尺寸:作出中心线,算出各段磁路截面积和平均长度。

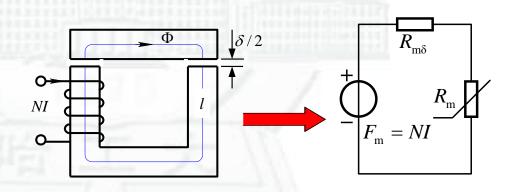
气隙截面积

$$S_{\delta} = (a + \delta)(b + \delta)$$

(3) 计算各段磁感应强度

铁心
$$B = \Phi / S$$

气隙
$$B_{\delta} = \Phi / S_{\delta}$$



(4) 确定磁场强度

气隙:
$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{B_{\delta}}{4\pi \times 10^{-7} \,\text{H/m}} \approx 8.0 \times 10^5 \,\text{(m/H)} B_{\delta}$$

铁心:须根据材料的B-H 曲线查出。

(5)计算各段磁路的磁位差:

铁心中
$$U_{\rm m} = Hl$$

气隙中
$$U_{\mathrm{m}\delta} = H_{\delta}\delta$$

(6)计算磁通势:根据磁位差定律计算。

$$F_{\rm m} = NI = \sum U_{\rm mj} = \sum H_{\rm j} l_{\rm j}$$

例:图示磁路磁路截面积 $S = 16 \text{cm}^2$,铁心平均长度 l = 50 cm 线圈匝数 N = 1000,气隙长度 $\delta = 1 \text{mm}$ 。如要求磁通 $\Phi = 2.4 \times 10^{-3} \text{Wb}$,求电流多大?不考虑边缘效应,材料为**DR510**.

【解】 对铁心

$$B = \Phi / S = 2.4 \times 10^{-3} / 1.6 \times 10^{-3} = 1.5 \text{T}$$

查曲线

$$H = 2000 \text{A/m}$$

对气隙

$$\begin{array}{c|c}
\hline
 & & & \\
\hline$$

$$H_{\delta} = (8 \times 10^{5} \text{ m/H}) \times B = (8 \times 10^{5} \text{ m/H}) \times 1.5 \text{T} = 1.2 \times 10^{6} \text{ A/m}$$

 $NI = Hl + H_{\delta} \delta = 2000 \times 0.5 + 1.2 \times 10^{6} \times 10^{-3}$
 $= 1000 + 1200 = 2200$

$$I = 2200/1000 = 2.2A$$

例:图示磁路励磁线圈200匝。尺寸单位为mm。磁路用0.5mm厚的"DR510"硅钢片叠成。由于考虑到叠片两面涂有绝缘漆膜,计算截面时应乘以叠片系数 k=0.91。要求建立 $\Phi = 3 \times 10^{-3}$ Wb 的磁通,求所需磁化电流,不考虑边缘效应。

【解】

- 1. 绘出中心线磁路划分为4段:
- 2. 各段长度:

$$l_1 = l_3 = [(240 - 40/2 - 40/2 - 1)/2] \text{mm}$$

$$= 9.95 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$l_2 = [(240 - 40/2 - 40/2) + 2(190 - 40/2 - 60/2)] \text{mm} = 0.48 \text{m}$$

有效厚度为 $b = 55k = 55 \text{mm} \times 0.91 \approx 50 \text{mm} = 5 \text{cm}$

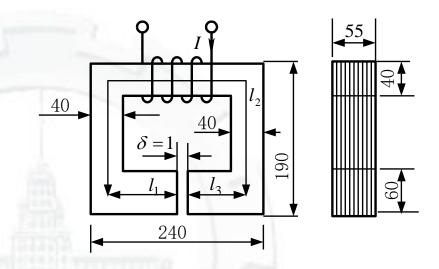
各段的截面积

$$S_1 = S_3 = (5 \times 6) \text{cm}^2 = 3 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$S_2 = (5 \times 4) \text{cm}^2 = 2 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$S_{\delta} = (5.5 \times 6) \text{cm}^2 = 3.3 \times 10^{-3} \text{m}^2$$





$$B_1 = B_3 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{3 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{3 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 1\text{T}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{3 \times 10^{-3} \,\text{Wb}}{2 \times 10^{-3} \,\text{m}^2} = 1.5 \text{T}$$

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{S_{s}} = \frac{3 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{2}} \approx 0.91\text{T}$$

4. 根据 "DR510"钢的磁化曲线查出铁心中各段磁场强度

$$H_1 = H_3 = 380 \text{ A/m}, H_2 = 2000 \text{ A/m}$$

气隙磁场强度为

$$H_{\delta} = (8 \times 10^5 \,\text{m/H}) \times B_{\delta} = (8 \times 10^5 \,\text{m/H}) \times 0.91 \text{T} = 7.28 \times 10^5 \,\text{A/m}$$

5. 用基尔霍夫磁位差定律求磁通势:

$$F_{\rm m} = NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_\delta \delta$$

$$= (380 \times 9.95 \times 10^{-2} \times 2 + 2000 \times 0.48 + 7.28 \times 10^5 \times 10^{-3}) A$$

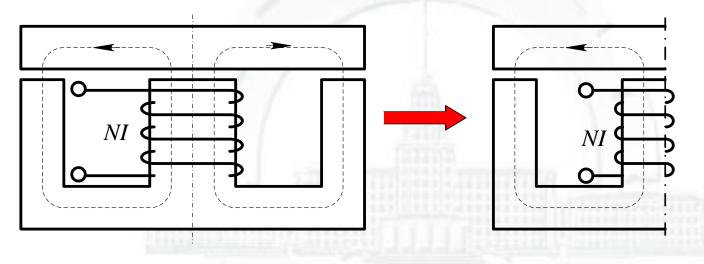
$$= (75.62 + 960 + 728) A$$

$$= 1763.62 A$$

$$I = \frac{F_{\rm m}}{N} = \frac{1763.62A}{200} \approx 8.82A$$



如果磁路含有对称回路,可以利用对称性简化计算。



对称分支磁路的计算

例如图所示,可以用单回路磁路的分析方法进行分析。两边磁路 是并联关系,剖开后磁通势NI应保持不变。



附录A 磁路

A.1 磁路及其基本定律	
A.2 铁磁物质的磁化特性	
A.3 磁阻与磁导	
A.4 恒定磁通磁路的计算	
A.5 正弦电压作用下铁心磁场的磁通	
A.6 电流波形的畸变	
A.7 铁内损耗	
A.8 正弦磁通磁路的计算	
A.9 铁心线圈及其电路模型	



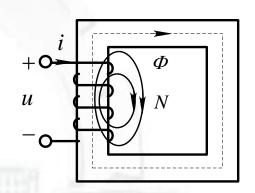
A.5正弦电压作用下铁心磁场的磁通

基本要求: 掌握正弦电压作用下铁心线圈磁通与电压的关系。

交变磁通磁路:磁通随时间交替变化的磁路,铁心变压器、异步电机。

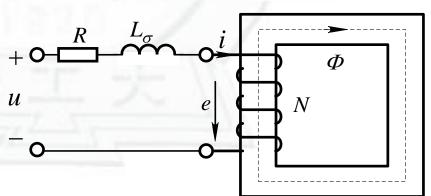
线圈两端施加正弦电压

$$u = \sqrt{2}U\cos(\omega t)$$



电磁感应现象:交变磁通在线圈引起感应电动势。 铁磁物质在交变磁化时,存在磁滞与涡流现象,并引起功率损耗。

$$u = Ri + L_{\sigma} \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + N \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$



A.5正弦电压作用下铁心磁场的磁通

忽略线圈电阻和漏磁

$$u = N \frac{\mathrm{d} \Phi}{\mathrm{d} t}$$

当电压为正弦量时, 磁通也是正弦量。

相量形式为

$$\dot{U} = j\omega N(\dot{\Phi}_{\rm m}/\sqrt{2}) = j\sqrt{2}\pi fN\dot{\Phi}_{\rm m} \approx j4.44 fN\dot{\Phi}_{\rm m}$$

或
$$\dot{\Phi}_{\rm m} = -j \frac{\dot{U}}{4.44 \, fN}$$

电压有效值与磁通最大值关系为: $U=4.44 fN\Phi_{m}$

忽略线圈电阻与漏磁的条件下,磁通的最大值决定于外加正弦电压的有效值。

A.5正弦电压作用下铁心磁场的磁通

例:交变磁通磁路,忽略线圈电阻与漏磁,磁路截面积为 $S = 40 \text{cm}^2$,外加正弦电压为 $u = 220\sqrt{2} \cos(2\pi ft) \text{V}$ 。 分别计算当频率f为我国工频(即50 Hz)和北美洲工频(即60 Hz)时磁路中磁感应强度的最大值。N = 200

【解】
$$f = 50$$
Hz 时

磁通最大值为
$$\Phi_{\rm m} = \frac{U}{4.44 \, fN} = \frac{220 \,\text{V}}{4.44 \times 50 \,\text{s}^{-1} \times 200} = 4.95 \times 10^{-3} \,\text{Wb}$$

磁感应强度最大值为
$$B_{\rm m} = \frac{\Phi_{\rm m}}{S} = \frac{4.96 \times 10^{-3} \,\text{Wb}}{40 \times 10^{-4} \,\text{m}^2} = 1.238 \,\text{T}$$

$$f = 60$$
Hz 时 $B_{\rm m} = \frac{50}{60} \times 1.238$ T = 1.032T

当电压有效值不变,频率越低,磁路中的磁感应强度越大。为避免饱和,需加大磁路横截面积。



附录A 磁路

- A.1 磁路及其基本定律
- A.2 铁磁物质的磁化特性
- A.3 磁阻与磁导
- A.4 恒定磁通磁路的计算
- A.5 正弦电压作用下铁心磁场的磁通
- A.6 电流波形的畸变
- A.7 铁内损耗
- A.8 正弦磁通磁路的计算
- A.9 铁心线圈及其电路模型



A.6 电流波形的畸变

基本要求:掌握在正弦电压下,线圈电流波形的畸变规律。

电流畸变

铁磁物质中B与H的关系是非线性的,所以 Φ 与i之间也是非线性关系。如磁通为正弦波,磁化电流将成为非正弦波,即出现电流波形畸变现象。

导致电流波形畸变的主要原因: 磁饱和与磁滞

A.6 电流波形的畸变

1. 磁饱和对电流波形的影响

$$\Phi = BS$$
$$i = Hl/N$$

 $\Phi - i$ 曲线的形状与基本磁化曲线相似。

当外加正弦电压且不计线圈电阻和漏感时

 $\Phi(t)$ 为正弦波。由于磁饱和的影响电流i为尖顶波

 $\Phi(t)$ (b) (a) Ф u (c)

三次谐波为最大,其它次谐波较小



A.6 电流波形的畸变

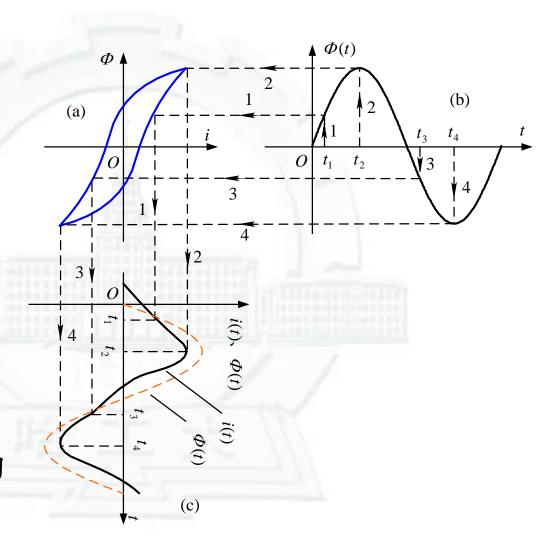
2. 磁滯对电流波形的影响

实际上B与H是按磁滞 回线的关系变动。

由于磁滞和磁饱和的共同影响,电流波形变成前坡后陡的尖顶波。

电流最大值与不计磁滞时的最大值相同。

i 超前于Φ, 故i比外加u滞后的时间小于1/4周期





附录A 磁路

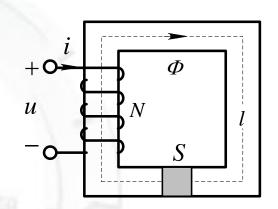
- A.1 磁路及其基本定律
- A.2 铁磁物质的磁化特性
- A.3 磁阻与磁导
- A.4 恒定磁通磁路的计算
- A.5 正弦 电压作用下铁心磁场的磁通
- A.6 电流波形的畸变
- A.7 铁内损耗
- A.8 正弦磁通磁路的计算
- A.9 铁心线圈及其电路模型



铁心的交变磁化会产生功率损耗,称为铁内损耗。

1. 磁滞损耗:

铁磁性物质在交变磁化下,由于其内部的磁 畴在不断改变排列方向而造成的能量损耗称 为磁滞损耗。



通过计算铁心线圈吸收功率来分析磁滞损耗。

不计线圈电阻与漏磁时,线圈输入的瞬时功率为

$$p = ui = N \frac{d\Phi}{dt} \times \frac{Hl}{N} = SlH \frac{dB}{dt} = VH \frac{dB}{dt}$$

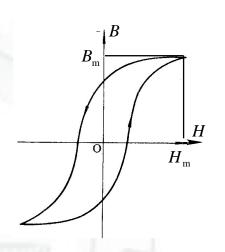
瞬时功率在一个周期内的平均值就是磁滞损耗

$$P_{h} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} p dt = \frac{V}{T} \oint H dB = V f \oint H dB$$

单位体积的磁滞损耗为

$$P_{h0} = \frac{P_h}{V} = f \oint H dB = \frac{1}{T} \oint H dB$$

♦ HdB 是磁滯回线包围的面积



矫顽力和剩余磁感应强度越大,磁滞回线面积就越大,为了减少磁滞损耗尽可能选软磁材料。

磁滞损耗可按经验公式来计算

$$P_{h0} = \sigma_h f B_m^n$$

 σ_h 与铁磁物质有关的系数,由实验确定

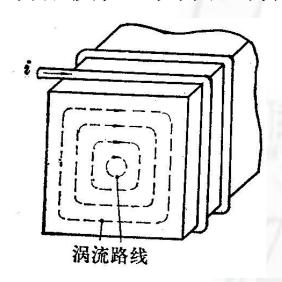
$$B_m < 1$$
T 指数 n 可取**1.6**, $B_m > 1$ T n 可取**2**



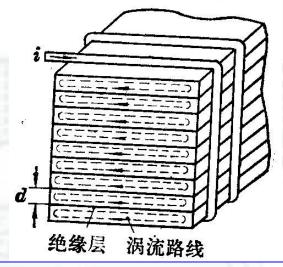
2. 涡流损耗

铁磁物质交变磁化时,在磁感应线所穿过的回路内要产生感应电动势,并形成电流称为涡流。

为减小涡流损耗, 其铁心都用互相绝缘的硅钢片叠成.



单位体积涡流损耗 电导率 ₂

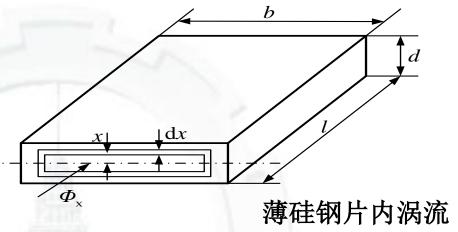


$$P_{\rm e0} = \frac{P_{\rm e}}{V} = (\pi^2/6) f^2 B_{\rm m}^2 d^2 \gamma$$

交变磁通按正弦规律变动,涡流回路 感应电动势有效值为

$$E_{\rm x} = 4.44 f \Phi_{\rm xm} = \sqrt{2} \pi f \left(2xbB_{\rm m}\right)$$

涡流回路的电导 $dG_x \approx \gamma \frac{l dx}{2h}$



涡流回路长度近似取 2b

 γ 一硅钢片电导率, ldx 一回路截面 涡流回路的功率损耗为

$$dP_{e} = E_{x}^{2}dG_{x} = (\pi\sqrt{2}fB_{m} \times 2xb)^{2} \frac{\gamma l}{2b} dx = 4\pi^{2} f^{2}B_{m}^{2} \gamma lbx^{2} dx$$

整个硅钢片涡流损耗

$$P_{\rm e} = 4\pi^2 (fB_{\rm m})^2 \gamma lb \int_0^{d/2} x^2 dx = (\pi^2 / 6)(fB_{\rm m})^2 \gamma lb d^3 = (\pi^2 / 6)f^2 B_{\rm m}^2 d^2 \gamma V$$

单位体积涡流损耗为

$$P_{\rm e0} = \frac{P_{\rm e}}{V} = (\pi^2 / 6) f^2 B_{\rm m}^2 d^2 \gamma$$



工程计算时,将磁滞损耗和涡流损耗统一考虑。

铁心单位质量的损耗称为比损耗。

当B为0.75T、1.0T和1.5T,频率为50Hz时的比损耗

记作
$$P_{7.5/50}$$
 $P_{10/50}$ $P_{15/50}$

其它值时, 按经验公式计算每千克硅钢片的铁损

$$P_{\text{Fe0}} = P_{10/50} B_{\text{m}}^{n} \left(\frac{f}{50 \text{Hz}}\right)^{1.3}$$

$$B_m < 1$$
T n \mathbb{R} 1.6 1.0 T $< B_m < 1.6$ T n \mathbb{R} 2

例:图示磁路由0.5mm的"DR510"硅钢片叠成,磁路截面积S = 10 cm,铁心平均长度l = 40 cm。线圈匝数N = 200正弦电压频率f = 50 Hz,有效值U = 62 V。不计线圈电阻与漏磁,求磁路的铁损。给定 $P_{10/50} = 2.2 \text{W/kg}$

【解】 磁通最大值为

$$\Phi_{\rm m} = \frac{U}{4.44 \, fN} = \frac{62 \,\text{V}}{4.44 \times 50 \,\text{s}^{-1} \times 200} \approx 1.40 \times 10^{-3} \,\text{Wb}$$

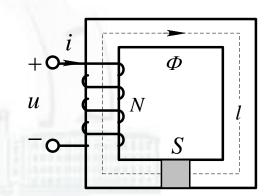
磁感应强度最大值为

$$B_{\rm m} = \frac{\Phi_{\rm m}}{S} = \frac{1.40 \times 10^{-3} \,\text{Wb}}{10 \times 10^{-4} \,\text{m}^2} = 1.4 \,\text{T}$$

计算比损耗:

$$B_{\rm m} = 1.4 {\rm T} > 1 {\rm T}$$
 $\mathbb{R} n = 2$

$$P_{\text{Fe0}} = P_{10/50} B_{\text{m}}^2 \left(\frac{f}{50 \text{Hz}}\right)^{1.3} = 2.2 \times 1.4^2 \times \left(\frac{50}{50}\right)^{1.3} \text{W/kg} = 4.312 \text{W/kg}$$



铁心体积
$$V = Sl = 10 \text{cm}^2 \times 40 \text{cm} = 400 \text{cm}^3$$

铁心质量
$$m = \rho V = 7.8 (g/cm^3) \times 400 cm^3 = 3120g = 3.12 kg$$

磁路的铁损为

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{Fe0}}m = (4.312\text{W/kg}) \times 3.12\text{kg} = 13.45\text{W}$$



附录A 磁路

- A.1 磁路及其基本定律
- A.2 铁磁物质的磁化特性
- A.3 磁阻与磁导
- A.4 恒定磁通磁路的计算
- A.5 正弦电压作用下铁心磁场的磁通
- A.6 电流波形的畸变
- A.7 铁内损耗
- A.8 正弦磁通磁路的计算
- A.9 铁心线圈及其电路模型



基本要求:理解等效正弦波的概念,掌握用等效正弦波计算正弦磁通磁路的方法。

问题:给定线圈的外加电压u,求电流i。

电压为正弦波,不计线圈电阻与漏磁的影响,则磁通是正弦波,而电流是非正弦波;实际上总是存在线圈电阻与漏磁通,所以磁通也只能是近似的正弦波,电流仍为非正弦波。

工程上要寻求简便的近似计算方法。用等效正弦波来代替非正弦波,以使含有非正弦电流的问题仍可使用相量法来分析。

非正弦电流的等值正弦波须满足三个条件(工程计算简便方法):

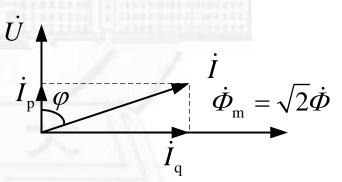
- 1等效正弦波与非正弦波有相同频率。
- 2 等效正弦波与非正弦波有相同的有效值。
- 3 等效正弦波电流与外加正弦电压产生的功率应等于实际的功率。

用等效正弦波表示电流i, 则正弦量u、 Φ 和i都可用相量来表示, 其相位关系如图所示。

电流相量分解为两个分量:

 $I = I_{\alpha} + I_{\beta}$ 无功分量 有功分量

不计铁损产生磁通所需电流



铁心线圈电压电流相量图

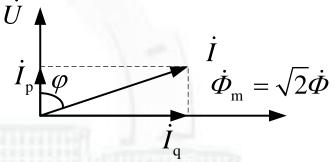
线圈吸收平均功率=铁损



复磁阻抗

由存在铁损,磁通势相量NI不与磁通相量 $\dot{\Phi}$ 同相,二者之比为复磁阻抗。

$$Z_{\rm m} = \frac{N\dot{I}}{\dot{\Phi}_{\rm m} / \sqrt{2}} = \frac{N(\dot{I}_{q} + \dot{I}_{p})}{\dot{\Phi}_{\rm m} / \sqrt{2}} = R_{\rm m} + jX_{\rm m} \qquad \dot{I}_{\rm p} = 0$$



实部是磁阻,虚部是磁抗。

$$N\dot{I} = Z_{\rm m}\dot{\Phi}_{\rm m} / \sqrt{2} = R_{\rm m}\dot{\Phi}_{\rm m} / \sqrt{2} + jX_{\rm m}\dot{\Phi}_{\rm m} / \sqrt{2} = N\dot{I}_{\rm q} + N\dot{I}_{\rm p}$$

$$\dot{I}_{\rm q} = R_{\rm m}\dot{\Phi}_{\rm m} / (\sqrt{2}N) \qquad \qquad \dot{I}_{\rm p} = jX_{\rm m}\dot{\Phi}_{\rm m} / (\sqrt{2}N)$$

在正弦磁通磁路中,磁阻不耗能,而磁抗是耗能的。

无功分量有效值 I_a 的计算

与已知磁通求磁通势的计算方法基本相同。

1. 已知 $\Phi_{\rm m}$,求电流 $i_{\rm q}(t)$ 的最大值 $I_{\rm m}$

$$\Phi_{\rm m} \xrightarrow{B_{\rm m} S} B_{\rm m}$$
 查曲线 $NI_{\rm m} = H_{\rm m}l$ $I_{\rm m}$

- 2. 根据 $I_{\rm m}$ 确定 $i_{\rm q}(t)$ 的有效值 $I_{\rm q}$ 。
 - 1) 铁心未饱和时, $i_q(t)$ 接近正弦波 $I_q = I_m / \sqrt{2}$
 - 2) 铁心饱和时, $i_a(t)$ 为尖顶波,要加以修正

$$I_{\rm q} = \frac{I_{\rm m}}{\xi \sqrt{2}}$$

 ξ 与材料及所在磁路中的 B_m 值有关的修正系数

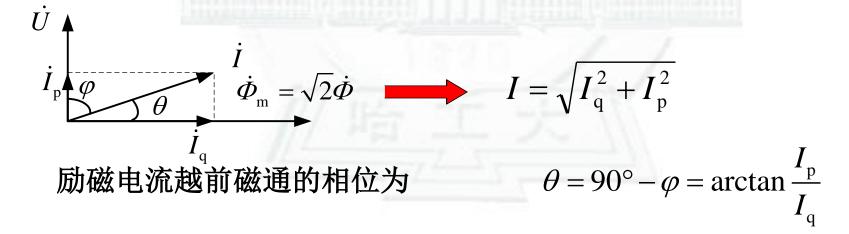


有功分量有效值 I_p 的计算

先根据材料的比损耗算出铁损 P_{Fe} 后,再由

$$I_{\rm p} = \frac{P_{\rm Fe}}{U} = \frac{P_{\rm Fe}}{4.44 \, fN \, \Phi_{\rm m}}$$

3. 励磁电流的计算



例:在例题A.7的磁路中建立一个正弦磁通 Φ , $\Phi_m = 1.4 \times 10^{-3}$ Wb, 频率 f = 50Hz, 线圈匝数 N = 500. 求线圈中的电流。波形 修正系数取 $\xi = 1.3$

【解】
$$B_{\rm m} = \frac{\Phi_{\rm m}}{S} = \frac{1.4 \times 10^{-3} \,\text{Wb}}{10 \times 10^{-4} \,\text{m}^2} = 1.4 \,\text{T}$$

查磁化曲线2

$$H_{\rm m} = 1260 {\rm A/m}$$

 $i_{\rm q}$ 的最大值为

$$I_{\rm m} = \frac{H_{\rm m}l}{N} = \frac{(1260\text{A/m}) \times 0.40\text{m}}{500} = 1.01\text{A}$$

利用修正系数计算 i_a 的有效值为

$$I_{\rm q} = \frac{I_{\rm m}}{\xi\sqrt{2}} = \frac{1.01A}{1.3\sqrt{2}} \approx 0.55A$$

此磁路的铁损已在例题A.7中算出

$$P_{\rm Fe} = 13.45 {\rm W}$$



线圈电压的有效值为

$$U = 4.44 fN\Phi_{\rm m} = 4.44 \times 50 \text{Hz} \times 500 \times 1.4 \times 10^{-3} \text{Wb} \approx 155.4 \text{V}$$

i。的有效值为

$$I_{\rm p} = \frac{P_{\rm Fe}}{U} = \frac{13.45 \text{W}}{155.4 \text{V}} \approx 0.087 \text{A}$$

励磁电流的有效值

$$I = \sqrt{I_{\rm q}^2 + I_{\rm p}^2} = \sqrt{0.55^2 + 0.087^2} \,\text{A} \approx 0.56 \text{A}$$



附录A 磁路

A.1 磁路及其基本定律	
A.2 铁磁物质的磁化特性	
A.3 磁阻与磁导	
A.4 恒定磁通磁路的计算	
A.5 正弦电压作用下铁心磁场的磁通	
A.6 电流波形的畸变	
A.7 铁内损耗	A-Southern Haller
A.8 正弦磁通磁路的计算	
A.9 铁心线圈及其电路模型	100



A.9 铁心线圈及其电路模型

不计线圈电阻和漏磁时

$$\dot{U} = -\dot{E} = j\omega N\dot{\Phi}_{\rm m} / \sqrt{2}$$

铁心线圈的电路模型应由感抗 X_0

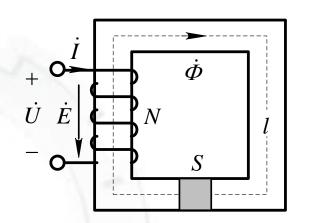
和电阻 R_0 并联组成

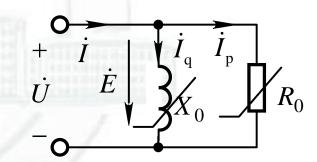
$$\begin{cases} X_0 = \frac{U}{I_q} \\ R_0 = \frac{U}{I_p} = \frac{U^2}{P_{Fe}} \end{cases}$$

$$L = \frac{X_0}{\omega} = \frac{U}{2\pi f I_q}$$

$$U = 4.44 f N \Phi_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N S B_m$$

$$I_q = \frac{I_m}{\xi \sqrt{2}} = \frac{H_m l}{\xi \sqrt{2} N}$$





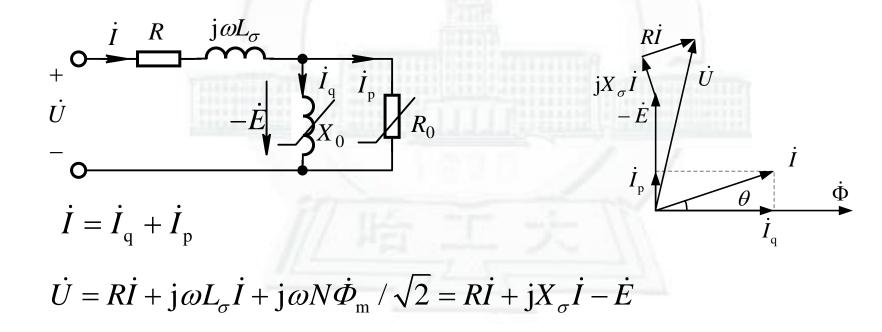
$$L = \frac{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} fNSB_{\rm m}}{2\pi f \frac{H_{\rm m}l}{\xi\sqrt{2}N}} = \frac{N^2}{\frac{1}{\xi} \frac{l}{\mu S}}$$



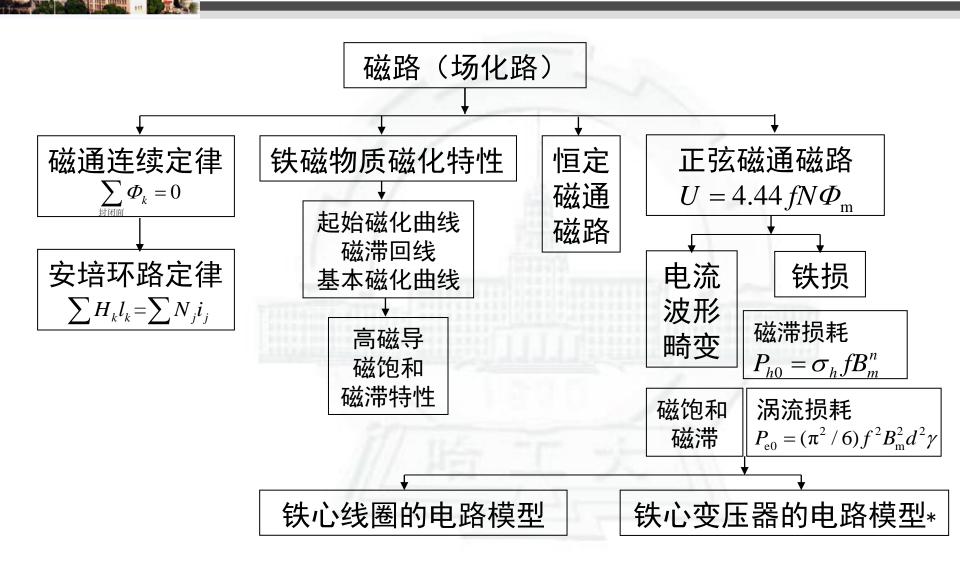
A.9 铁心线圈及其电路模型

$$R_{\rm m} = \frac{l}{\mu S} \qquad L = \frac{N^2}{R_{\rm m}/\xi}$$

由于 µ不是常量,故L是非线性电感 考虑线圈电阻与漏磁电路模型及相量图



本章小结





本章完

谢谢!

fzhao@hit.edu.cn

