

# 第9章 磁路与铁芯线圈

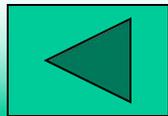
## 9.1 铁磁性物质

## 9.2 磁路与磁路定律

## 9.3 简单直流磁路的计算

## 9.4 交流铁芯线圈及等效电路

## 9.5 电磁铁





# 9.1 铁磁性物质



# 目的与要求

掌握铁磁性物质及其分类

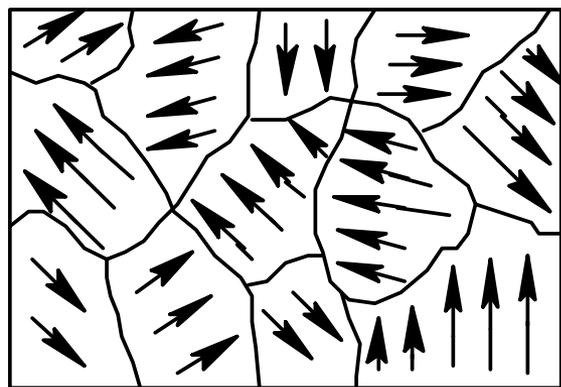
# 重点与难点

重点:磁化曲线

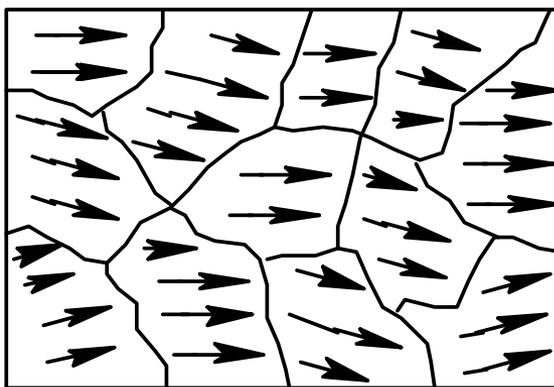
难点:磁化曲线

## 9.1.1 铁磁性物质的磁化

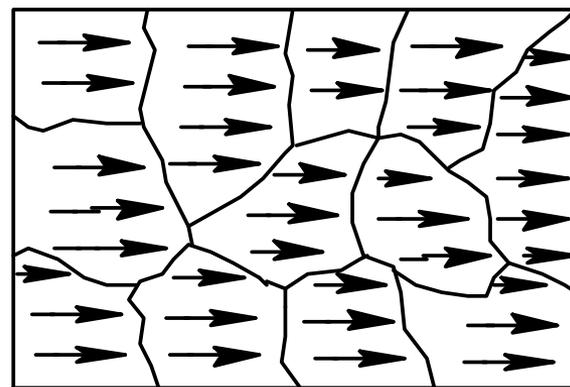
磁化:铁磁物质会在外加磁场的作用下,产生一个与外磁场同方向的附加磁场,这种现象叫做磁化。



(a)



(b)



(c)

图 9.1 铁磁性物质的磁化

## 9.1.2 磁化曲线（一）

磁化曲线:铁磁性物质的磁感应强度 $B$ 与外磁场的磁场强度 $H$ 之间的关系曲线,所以又叫 $B$ - $H$ 曲线。

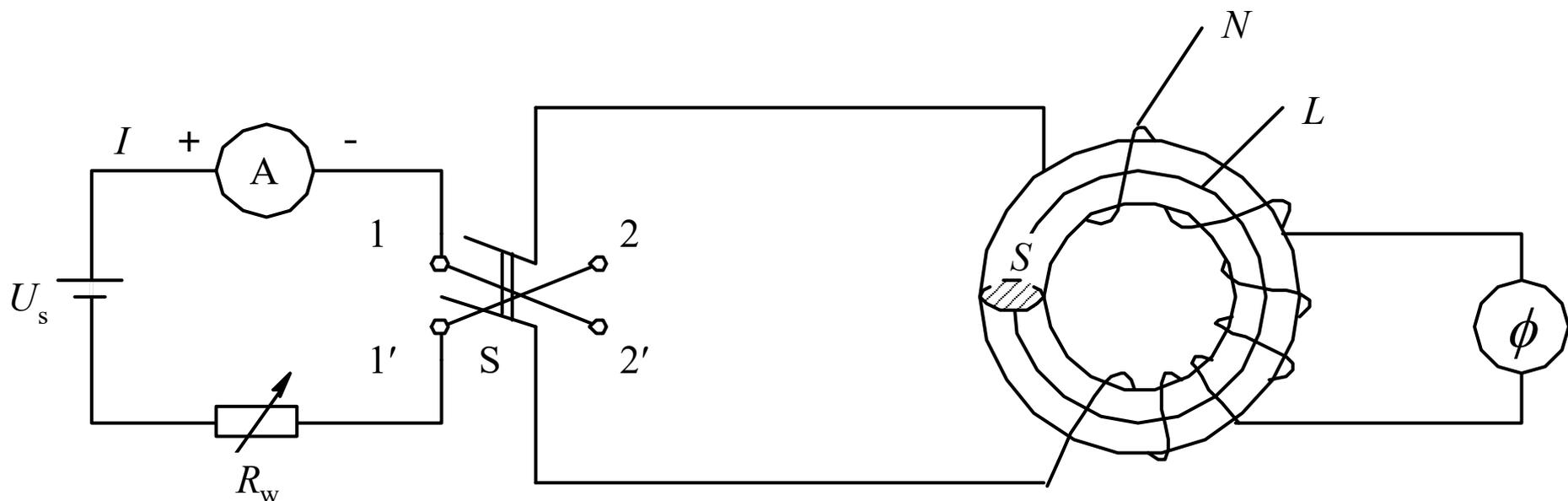


图 9.2  $B$ - $H$  曲线测量电路

## 9.1.2 磁化曲线 (二)

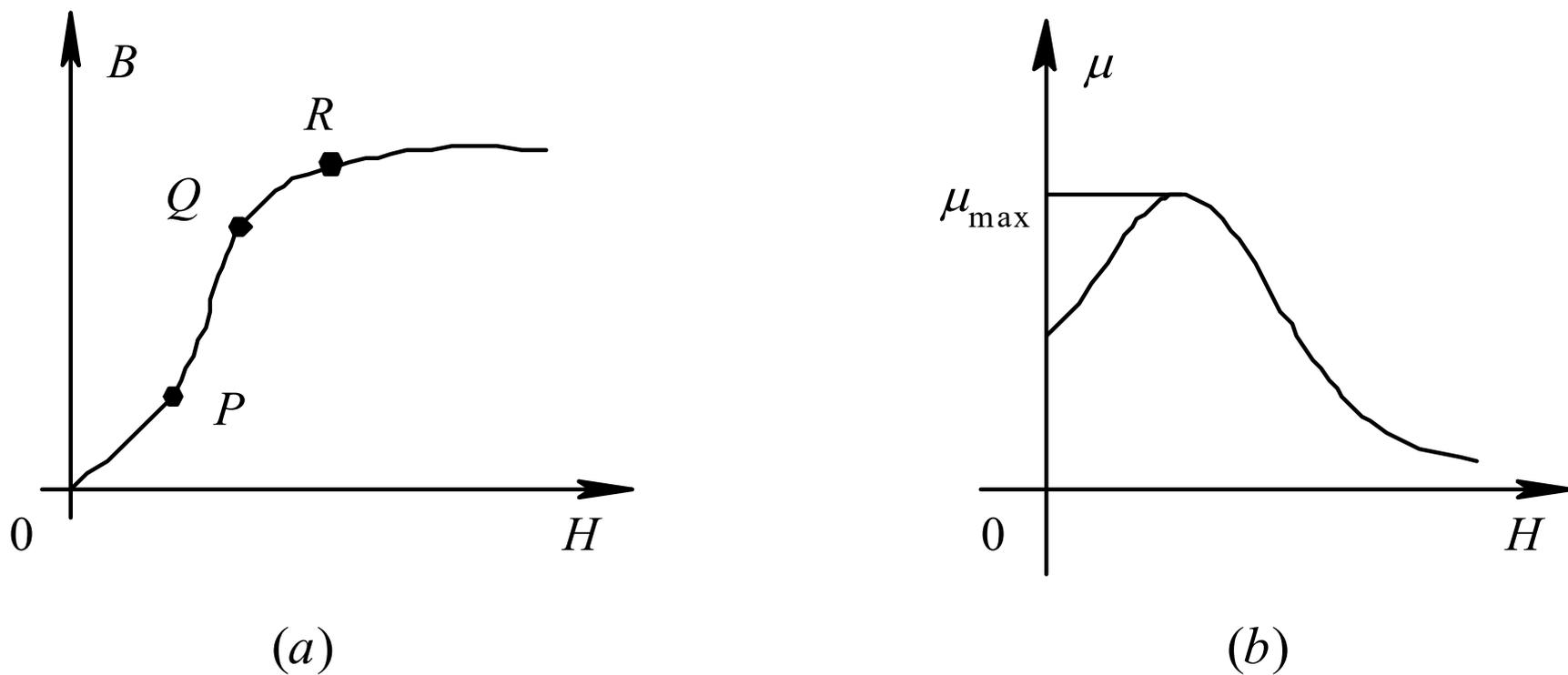


图 9.3 起始磁化曲线

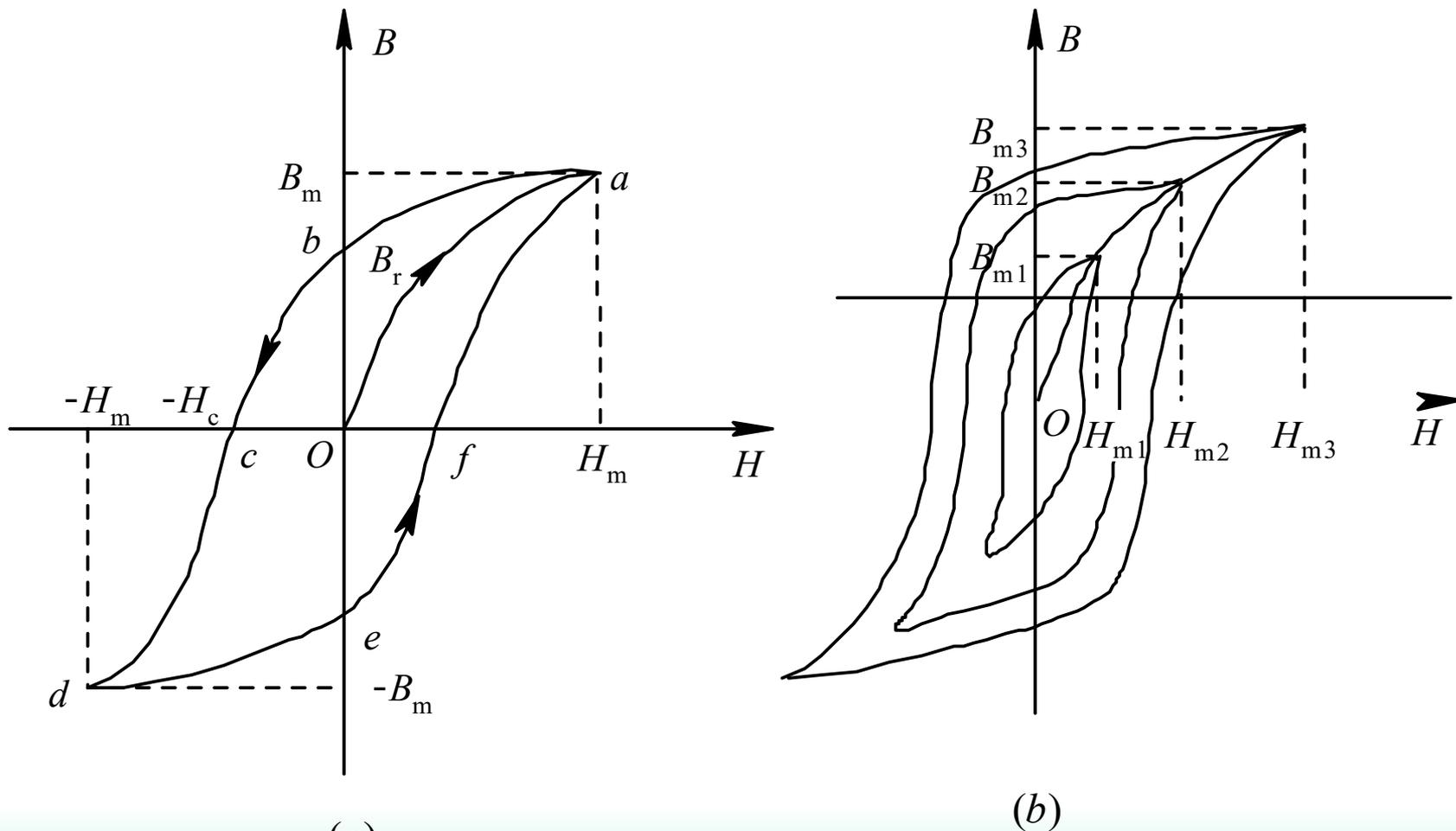
## 9.1.2 磁化曲线（三）

### 1. 起始磁化曲线

- (1) OP段
- (2) PQ段
- (3) QR段
- (4) R点以后

# 9.1.2 磁化曲线（四）

## 2. 磁滞回线



(a) 图9.4 交变磁化(磁滞回线)

## 9.1.3 铁磁性物质的分类（一）

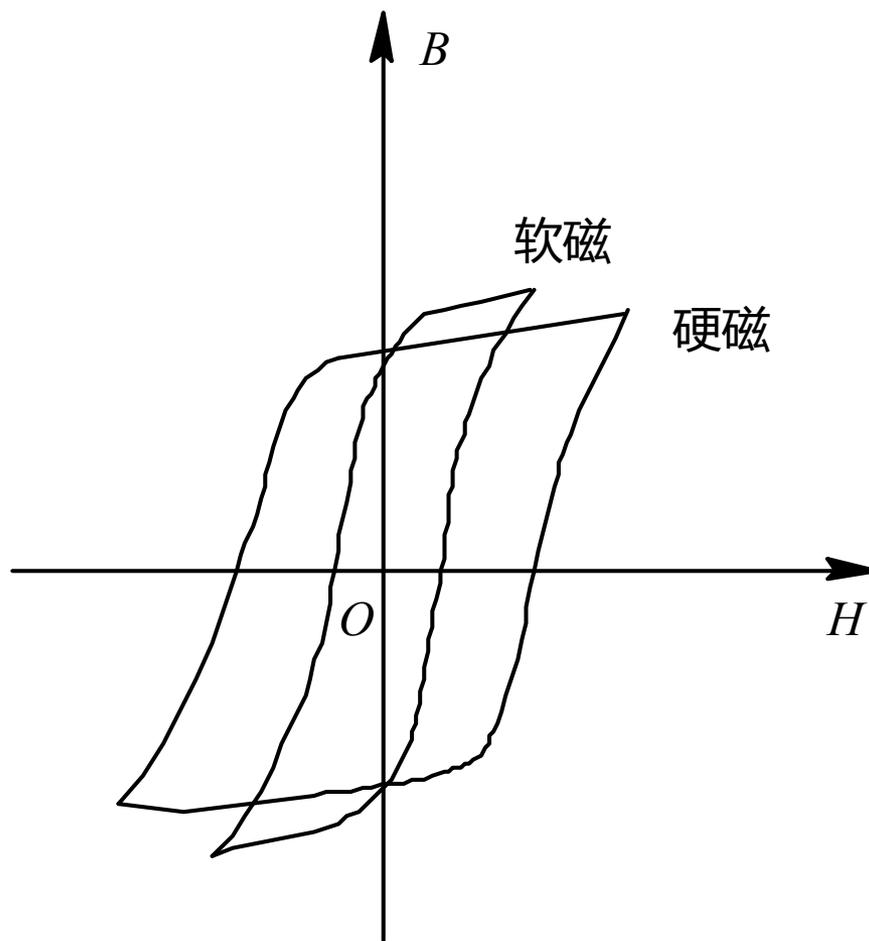


图9.5 软磁和硬磁材料的磁滞回线

# 9.1.3 铁磁性物质的分类（二）

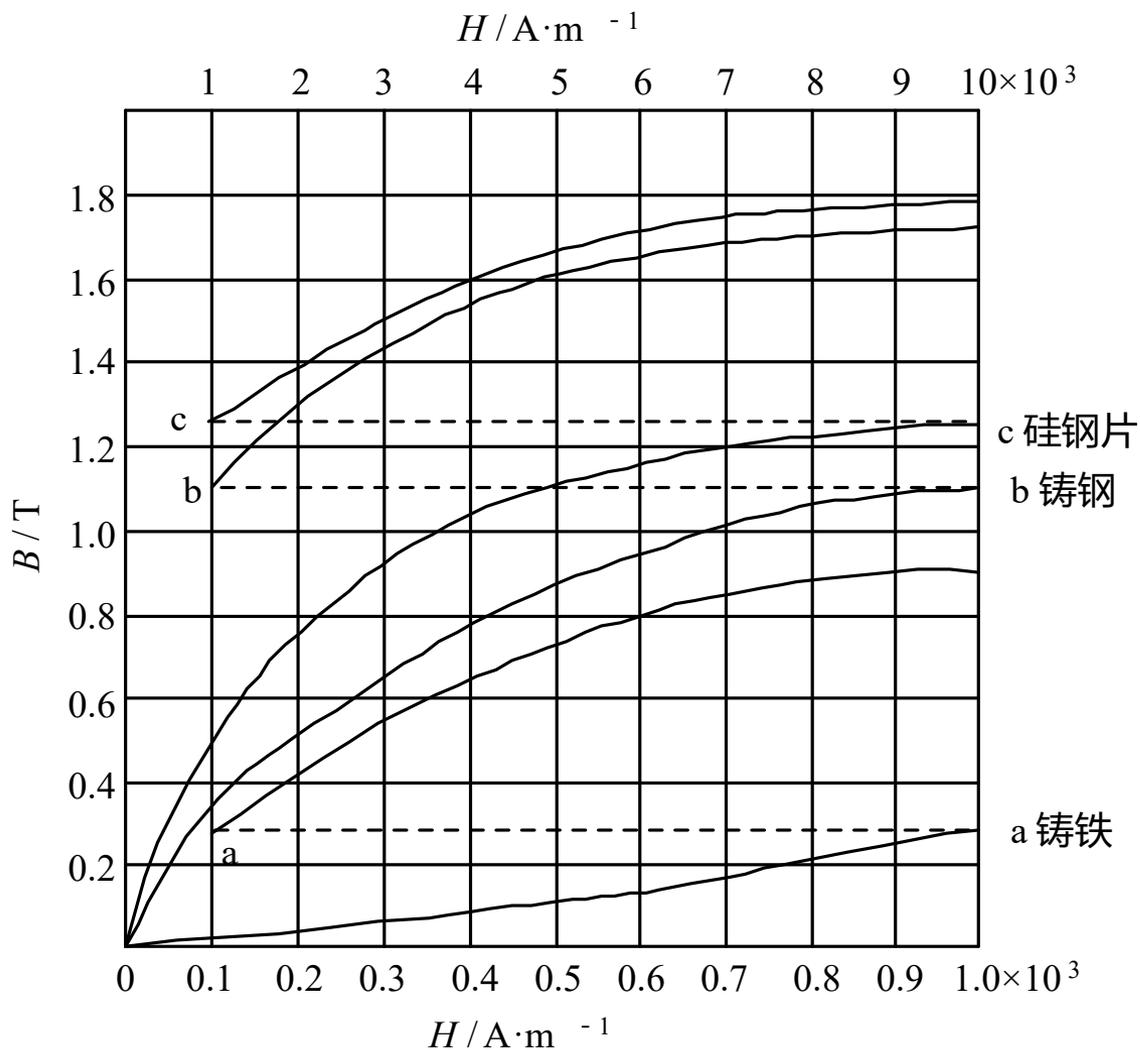
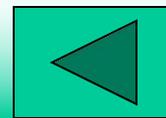


图 9.6 几种常用铁磁材料的基本磁化曲线





# 教学方法

联系实际讲解本节

# 思考题

1、铁磁性物质为什么会有高的导磁性能？

2、制造电喇叭时要用到永久磁铁，制造变压器时要用到铁心，试说明它们在铁磁性材料时有何不同？

3、什么是基本磁化曲线？什么是起始磁化曲线？

4、铁磁性材料的 $\mu$ 不是常数， $\mu$ 的最大值处在起始磁化曲线的哪个部位？



## 9.2 磁路和磁路定律

# 目的与要求

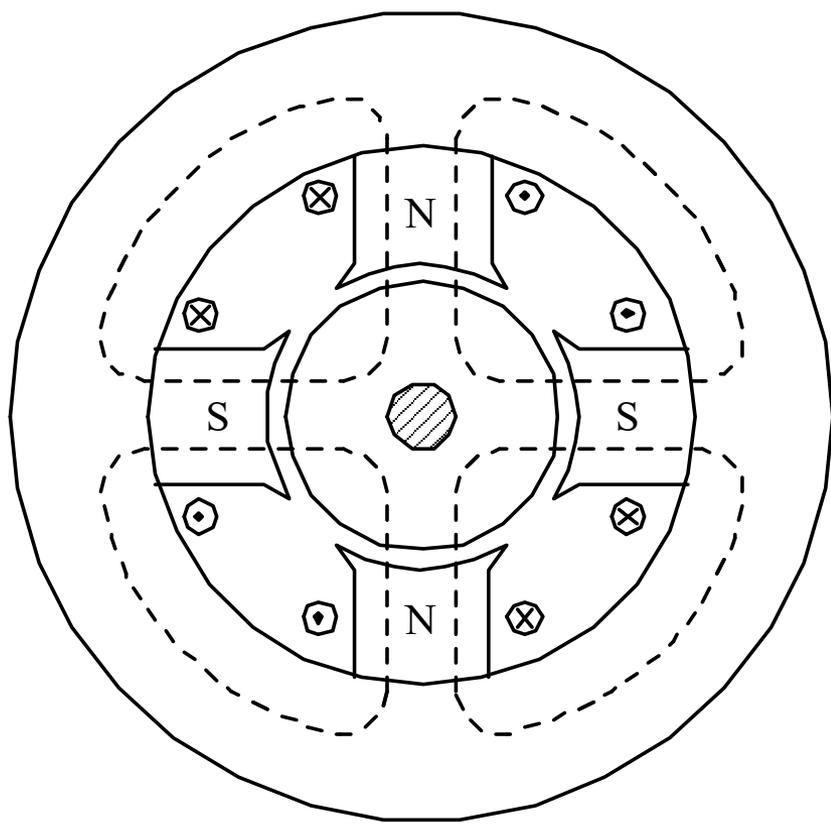
掌握磁路基尔霍夫定律，磁路欧姆定律

# 重点与难点

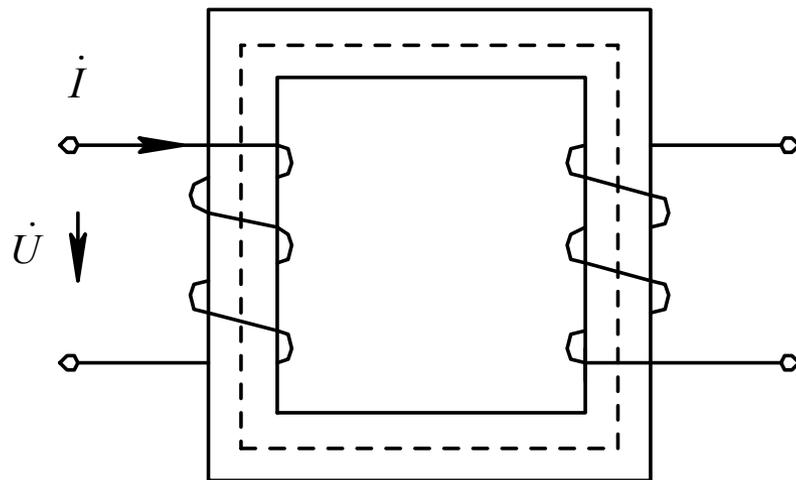
**重点：**磁路基尔霍夫定律，磁路欧姆定律

**难点：**磁路基尔霍夫定律，磁路欧姆定律

# 9.2.1 磁路 (一)



(a)



(b)

图9.7 直流电机和单相变压器磁路

## 9.2.1 磁路（二）

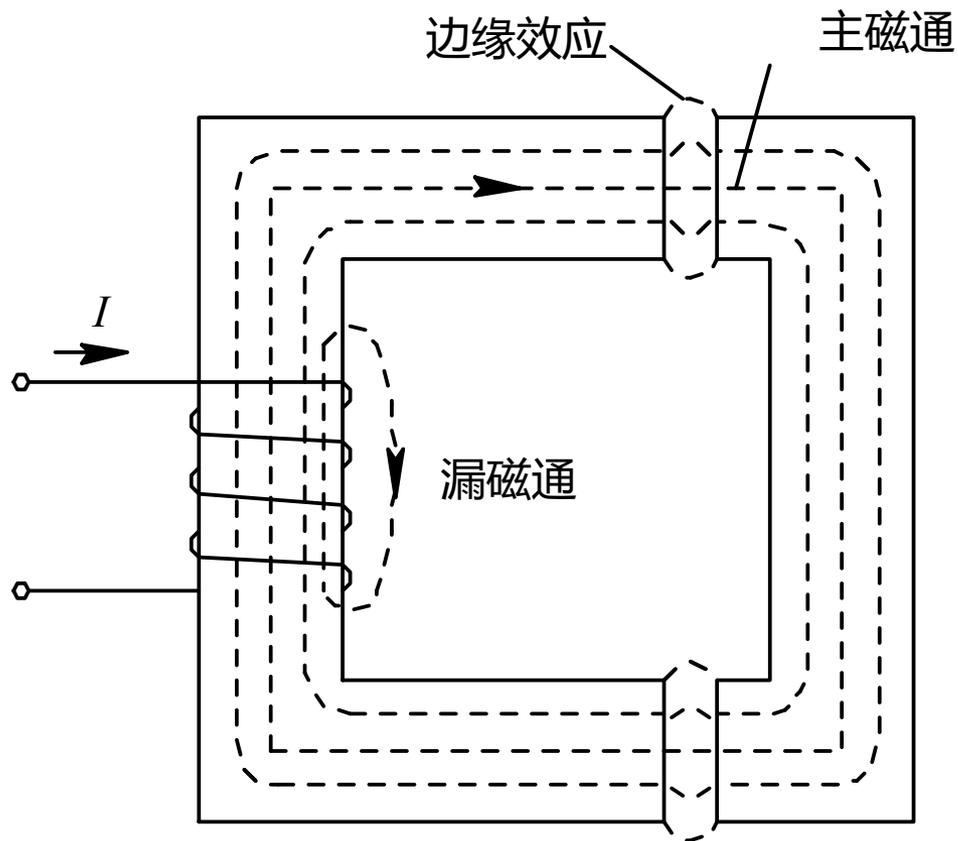


图 9.8 主磁通、漏磁通和边缘效应

## 9.2.2 磁路定律（一）

### 1. 磁路的基尔霍夫第一定律

$$\sum \Phi = 0$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

## 9.2.2 磁路定律（二）

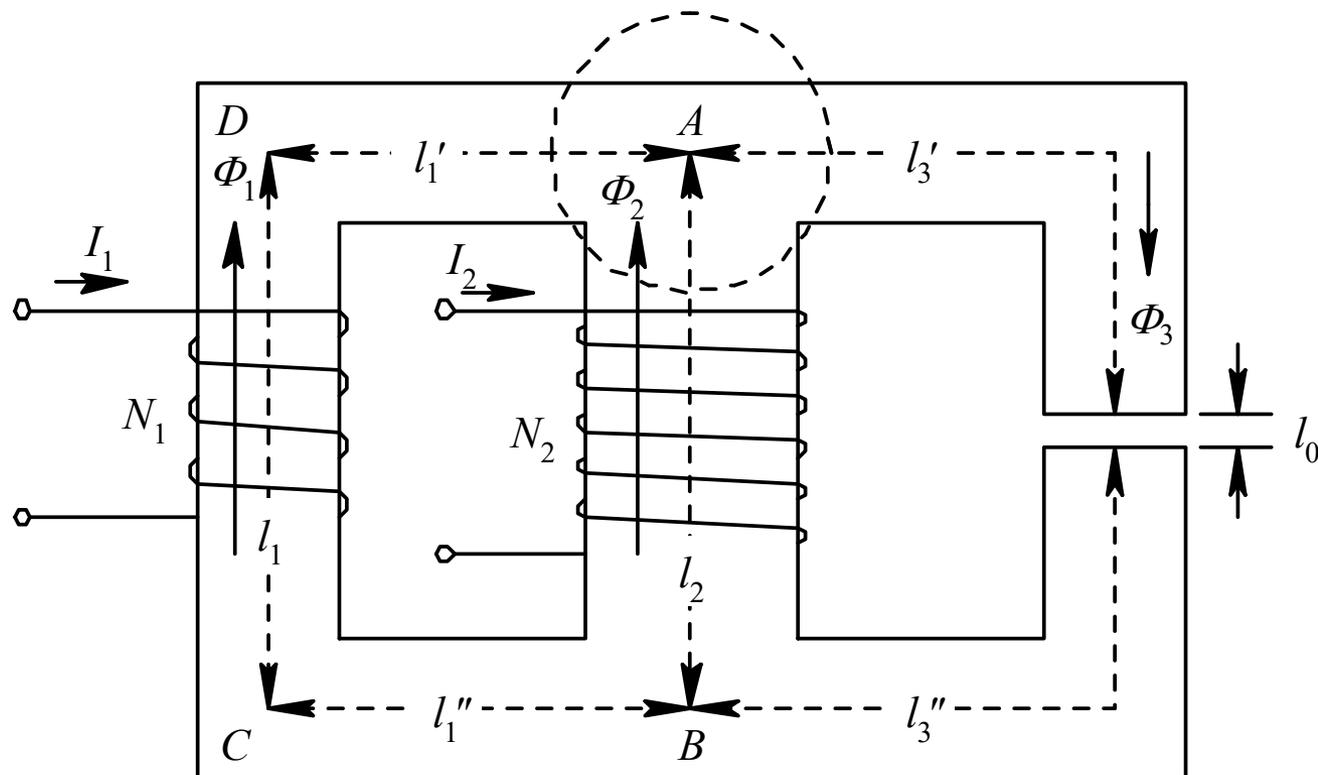


图 9.9 磁路示意图

## 9.2.2 磁路定律（三）

### 2. 磁路的基尔霍夫第二定律

$$\sum(Hl) = \sum(IN)$$

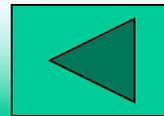
对于如图9.9所示的ABCD回路, 可以得出

$$H_1 l_1 + H_1' l_1' + H_1'' l_1'' - H_2 l_2 = I_1 N_1 - I_2 N_2$$

$$\sum U_m = \sum F_m$$

## 9.2.3 磁路的欧姆定律

$$\Phi = \mu HS = \frac{Hl}{\mu S} = \frac{U_m}{l \mu S} = \frac{U_m}{R_m}$$





# 教学方法

用比较的方法讲解本节

# 思考题

1、已知线圈电感 $L=\Psi/I=N\Phi/I$ ，试用磁路欧姆定律证明

$L=N^2\mu S/l$ ，并说明如果线圈大小、形状和匝数相同时，有铁心线圈和无铁心线圈的电感哪个大？

2、为什么空心线圈的电感是常数，而铁心线圈的电感不是常数？铁心线圈在未达到饱和与达到饱和时，哪个电感大？



## 9.3 简单直流磁路的计算



# 目的与要求

掌握恒定磁通磁路的计算

# 重点与难点

**重点：** 恒定磁通磁路的计算

**难点：** 恒定磁通磁路的计算

## 9.3 简单直流磁路的计算（一）

第一种是先给定磁通, 再按照给定的磁通及磁路尺寸、材料求出磁通势, 即已知 $\Phi$ 求 $NI$ ; 另一种是给定 $NI$ , 求各处磁通, 即已知 $NI$ 求 $\Phi$ 。本节只讨论第一种情况。

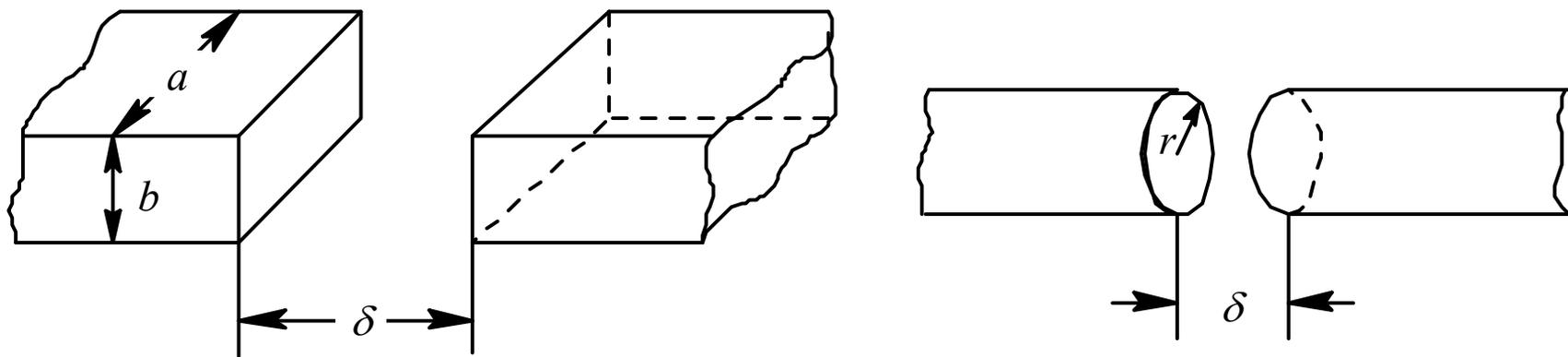
在计算时一般应按下列步骤进行:

- (1) 按照磁路的材料和截面不同进行分段, 把材料和截面相同的算作一段。
- (2) 根据磁路尺寸计算出各段截面积 $S$ 和平均长度 $l$ 。

## 9.3 简单直流磁路的计算（二）

$$S_a = (a + \delta)(b + \delta) \approx ab + (a + b)\delta$$

$$S_b = \pi\left(r + \frac{\delta}{2}\right)^2 \approx \pi r^2 + \pi r \delta$$



(a)

(b)

图9.11 空气隙有效面积计算

(a) 矩形截面； (b) 圆形截面

## 9.3 简单直流磁路的计算（三）

(3) 由已知磁通 $\Phi$ , 算出各段磁路的磁感应强度 $B=\Phi/S$ 。

(4) 根据每一段的磁感应强度求磁场强度, 对于铁磁材料可查基本磁化曲线(如图9.6所示)。

对于空气隙可用以下公式:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi \times 10^{-7}} \approx 0.8 \times 10^6 B_0 (A/m) = 8 \times 10^3 B_0 (A/cm)$$

## 9.3 简单直流磁路的计算（四）

(5) 根据每一段的磁场强度和平均长度求出 $H_1l_1$  ,  $H_2l_2$ .....。

(6) 根据基尔霍夫磁路第二定律, 求出所需的磁通势。

$$NI = H_1l_1 + H_2l_2 + \cdots$$

## 例9.1 (一)

已知磁路如图9.12所示, 上段材料为硅钢片, 下段材料是铸钢, 求在该磁路中获得磁通  $\Phi=2.0 \times 10^{-3} \text{ Wb}$  时, 所需要的磁动势? 若线圈的匝数为1000匝, 求激磁电流应为多大?

**解** (1) 按照截面和材料不同, 将磁路分为三段  $l_1, l_2, l_3$ 。

## 例9.1 (二)

(2) 按已知磁路尺寸求出:

$$l_1 = 275 + 220 + 275 = 770\text{mm} = 77\text{cm}$$

$$S_1 = 50 \times 60 = 3000\text{mm}^2 = 30\text{cm}^2$$

$$l_2 = 35 + 220 + 35 = 290\text{mm} = 29\text{cm}$$

$$S_2 = 60 \times 70 = 4200\text{mm}^2 = 42\text{cm}^2$$

$$l_3 = 2 \times 2 = 4\text{mm} = 0.4\text{cm}$$

$$S_3 \approx 60 \times 50 + (60 + 50) \times 2 = 3220\text{mm}^2 = 32.2\text{cm}^2$$

# 例9.1 (三)

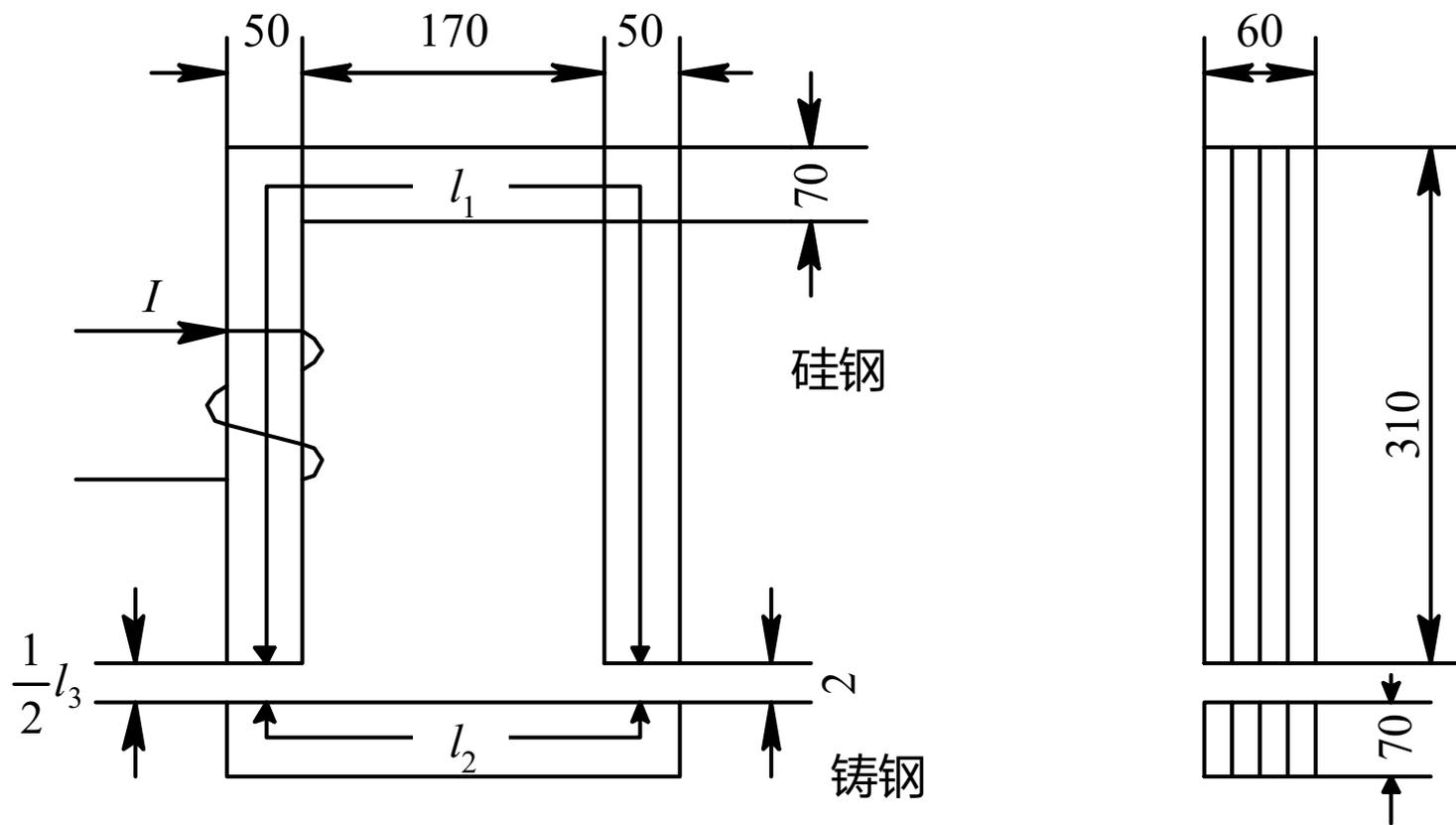


图9.12 例9.1图

## 例9.1 (四)

(3) 各段磁感应强度为

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{30} = 0.667 \text{ Wb/cm}^2 = 0.667 \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{42} = 0.476 \times 10^{-4} \text{ Wb/cm}^2 = 0.476 \text{ T}$$

$$B_3 = \frac{\Phi}{S_3} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{32.2} = 0.621 \times 10^{-4} \text{ Wb/cm}^2 = 0.621 \text{ T}$$

## 例9.1 (五)

(4) 由图9.6 所示硅钢片和铸钢的基本磁化曲线得

$$H_1 = 1.4 A / cm$$

$$H_2 = 1.5 A / cm$$

空气中的磁场强度为

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = \frac{0.621}{4\pi \times 10^{-7}} = 4942 A / cm$$

## 例9.1 (六)

(5) 每段的磁位差为

$$H_1 l_1 = 1.4 \times 77 = 107.8 A$$

$$H_2 l_2 = 1.5 \times 29 = 43.5 A$$

$$H_3 l_3 = 4942 \times 0.4 = 1976.8 A$$

(6) 所需的磁通势为

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = 107.8 + 43.5 + 1976.8 = 2128.1 A$$

激磁电流为

$$I = \frac{NI}{N} = \frac{2128.1}{1000} \approx 2.1 A$$





# 教学方法

用比较法

# 思考题

1、有两个相同材料的芯子（磁路无气隙），所绕的线圈匝数相同，通以相同的电流，磁路的平均长度 $l_1 = l_2$ ，截面 $S_1 < S_2$ ，试用磁路的基尔霍夫定律分析 $B_1$ 与 $B_2$ 、 $\Phi_1$ 与 $\Phi_2$ 的大小。

2、一磁路如图9.13所示，图中各段截面积不同，试列出磁通势和磁位差平衡方程式。

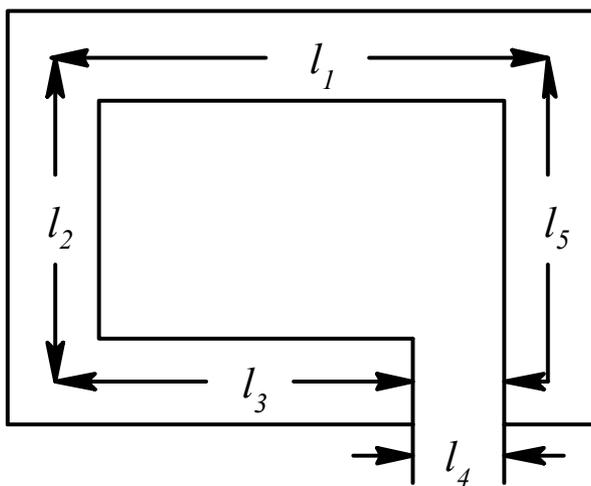


图 9.13 思考题 2 图

# 9.4 交流铁芯线圈 及等效电路



# 目的与要求

理解交流铁芯线圈及其等效电路

# 重点与难点

**重点：** 交流铁芯线圈及其等效电路

**难点：** 交流铁芯线圈的等效电路

## 9.4.1 电压、电流和磁通（一）

### 1. 电压为正弦量

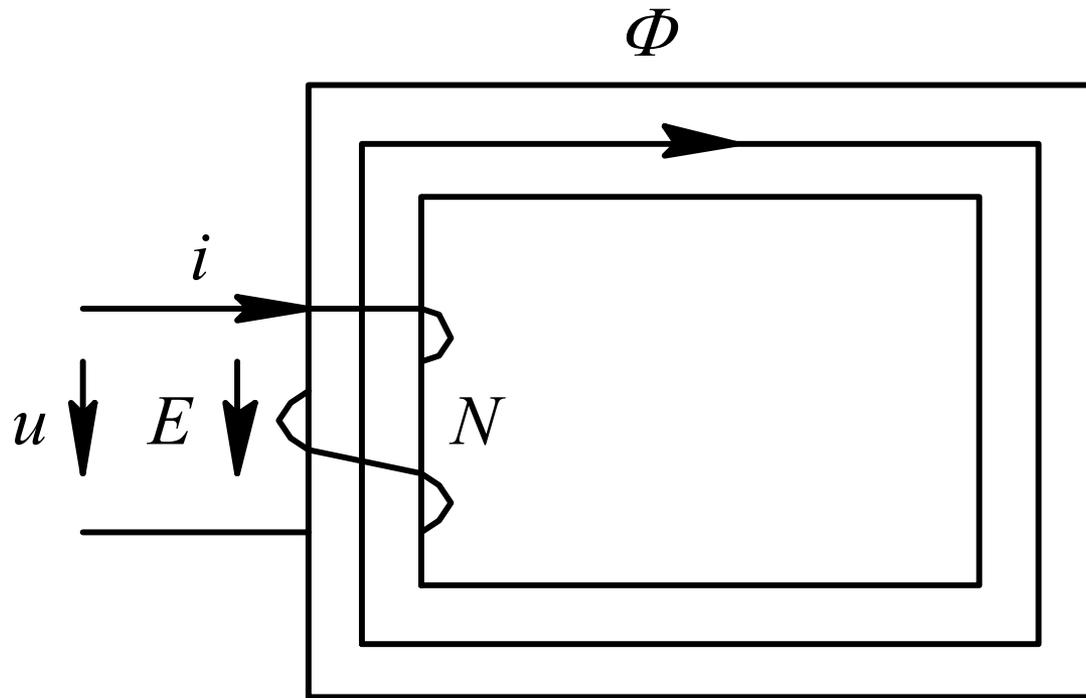


图9.14 交流铁芯线圈各电磁量参考方向

## 9.4.1 电压、电流和磁通（二）

$$u(t) = -e(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = N \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

设  $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$ , 则有

$$\begin{aligned} u(t) = -e(t) &= N \frac{d\Phi(t)}{dt} = N \frac{1}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) \\ &= \omega N \Phi_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

$$U = E = \frac{\omega N \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \Phi_m$$

## 9.4.1 电压、电流和磁通（三）

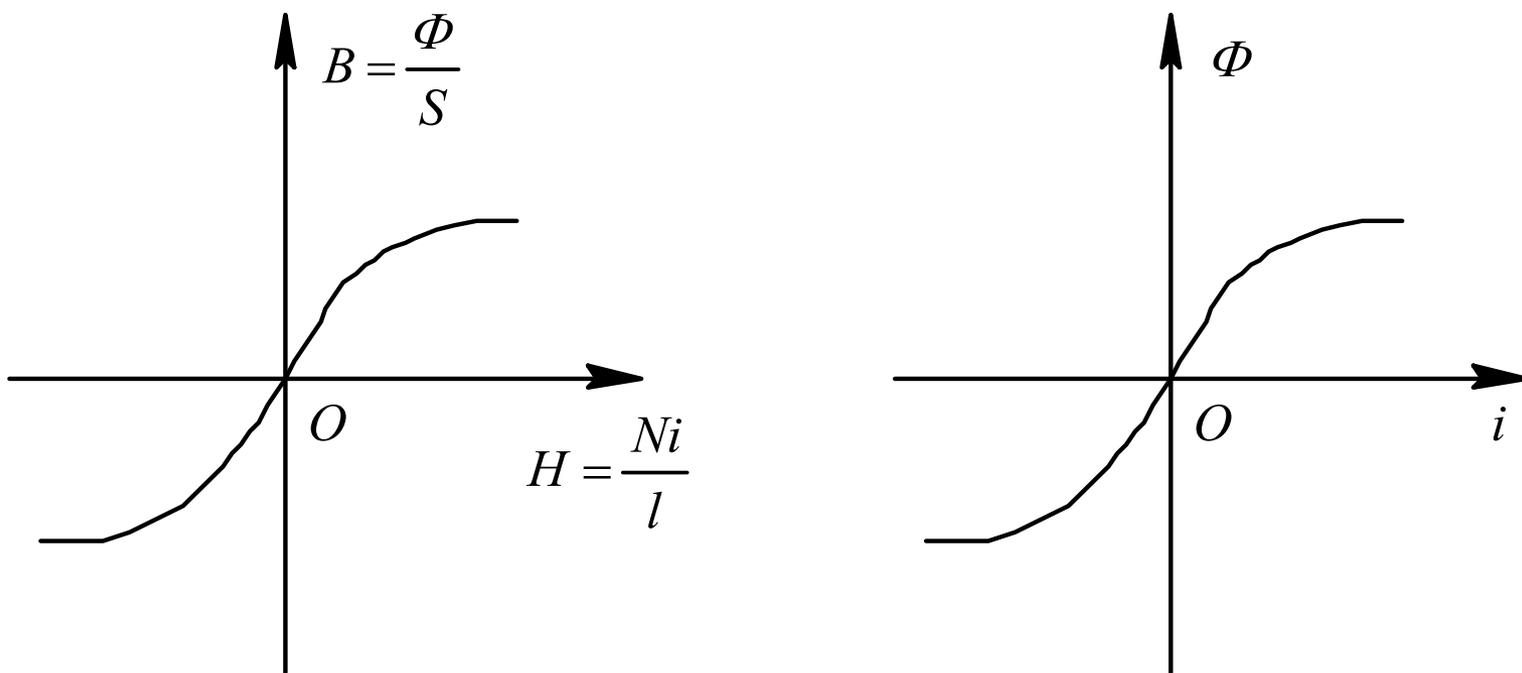


图 9.15  $B$ - $H$ 曲线与 $\Phi$ - $i$ 曲线

## 9.4.1 电压、电流和磁通（四）

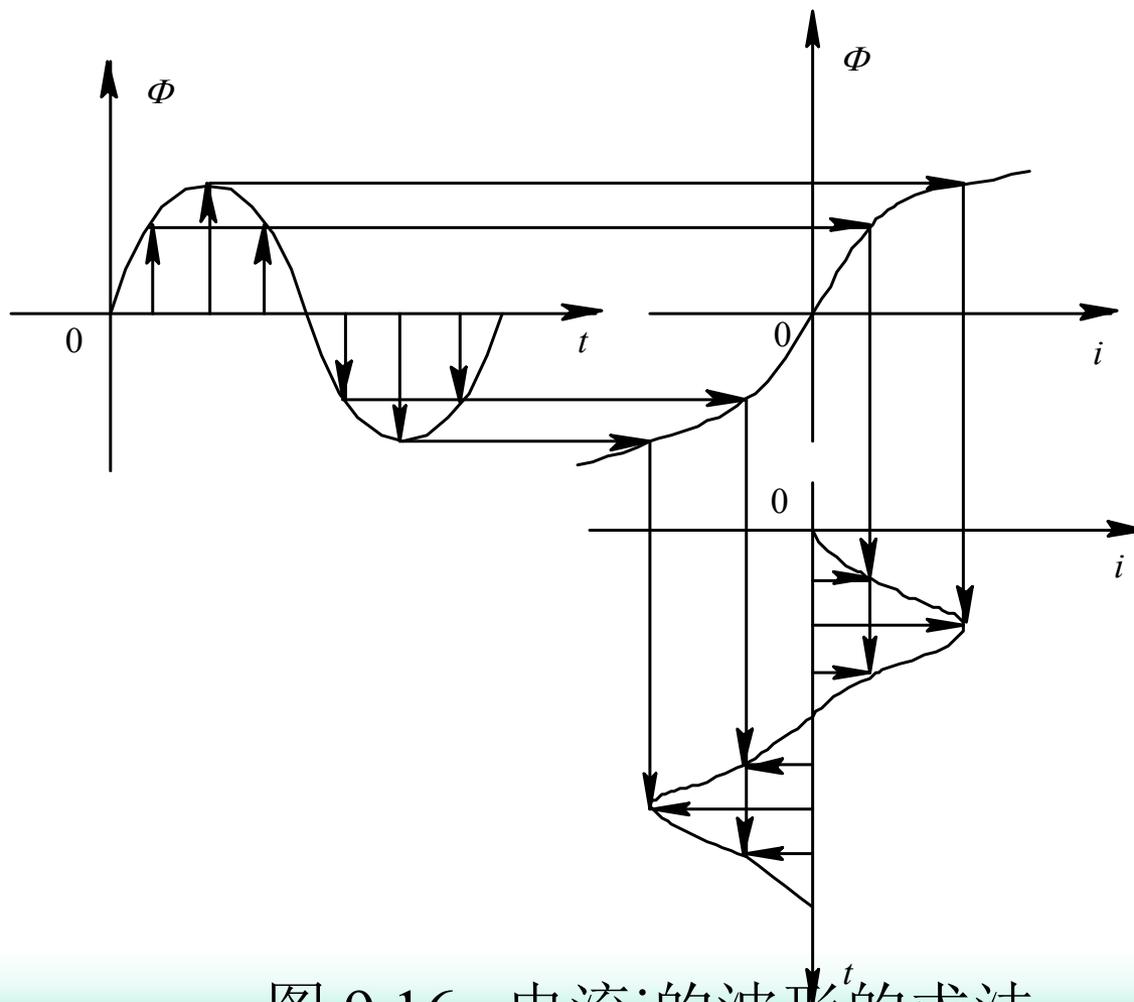


图 9.16 电流*i*的波形的求法

## 9.4.1 电压、电流和磁通（五）

$$\Phi_m = \Phi_m \angle 0^\circ$$

$$U = -E = j4.44 fN\Phi_m$$

$$\dot{I}_m = I_m \angle 0^\circ$$

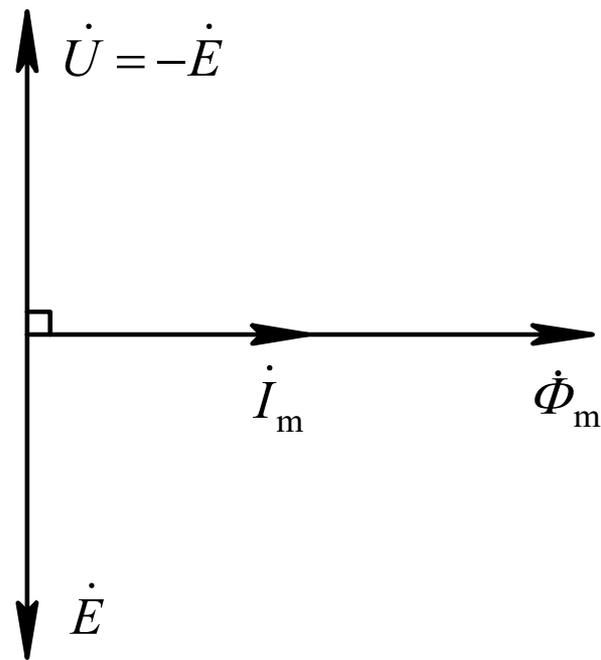


图9.17 电压、电流相量图

## 9.4.1 电压、电流和磁通（六）

## 2. 电流为正弦量

设线圈电流为  $i(t) = I_m \sin \omega t$

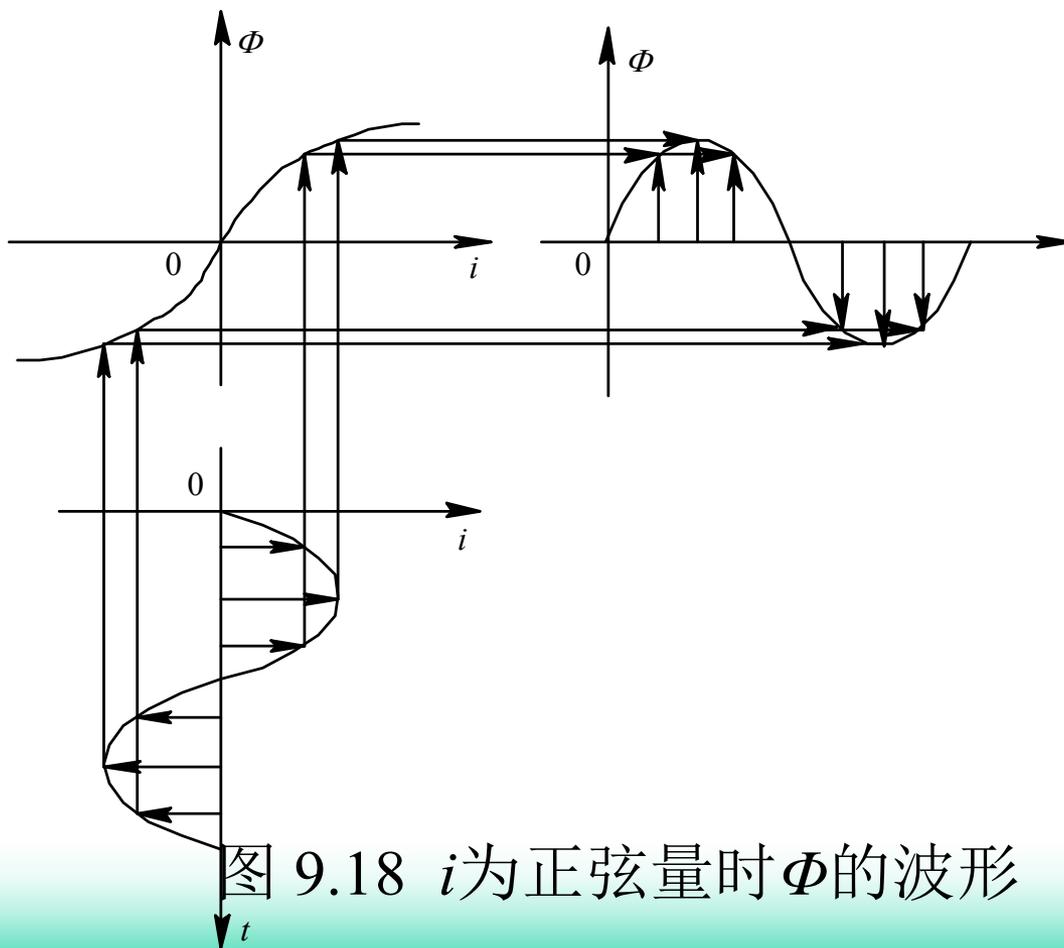


图 9.18  $i$  为正弦量时  $\Phi$  的波形

## 9.4.2 磁滞和涡流的影响

铁芯的磁滞损耗 $P_Z$ 和涡流损耗 $P_W$ 可分别由下式计算:

$$P_Z = K_Z f B_m^n V \quad (W)$$

$$P_W = K_W f^2 B_m^2 V \quad (W)$$

$$P_{Fe} = P_Z + P_W$$

## 9.4.3 交流铁芯线圈的等效电路（一）

### 1. 不考虑线圈电阻及漏磁通的情况

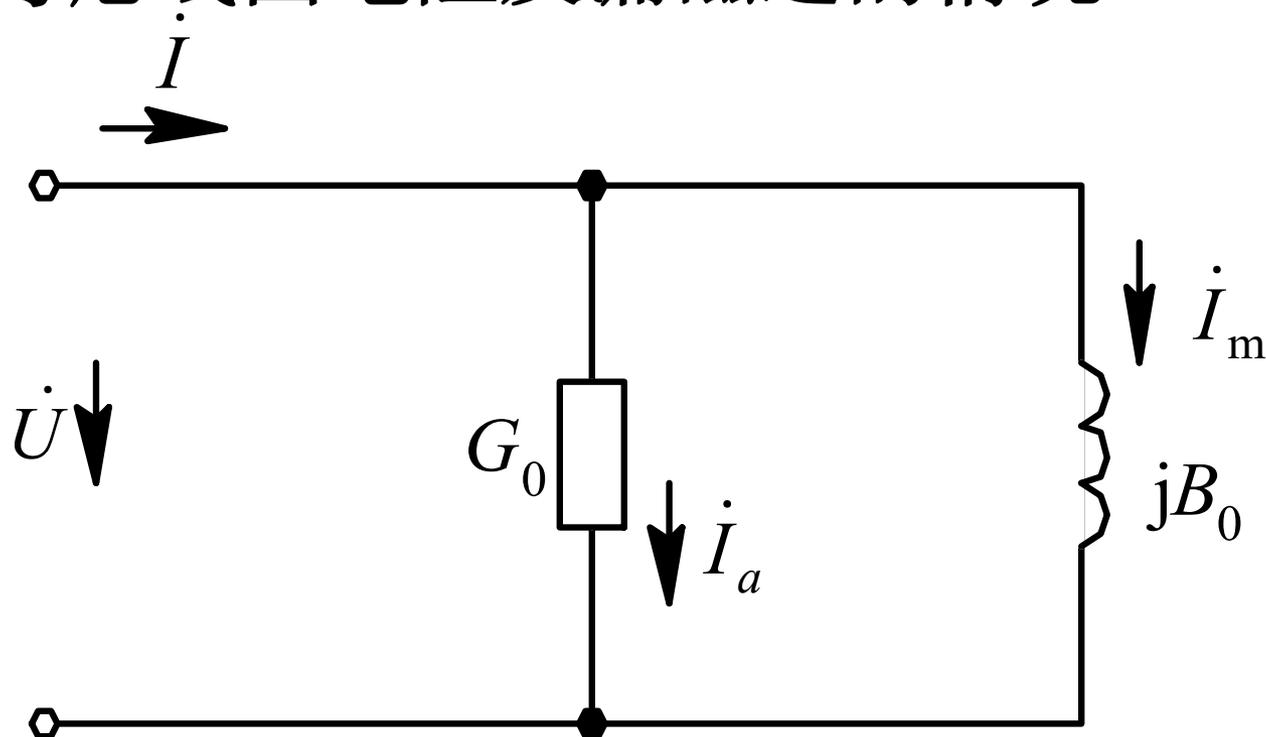


图9.19 考虑磁饱和、磁滞、涡流影响的等效电路

## 9.4.3 交流铁芯线圈的等效电路 (二)

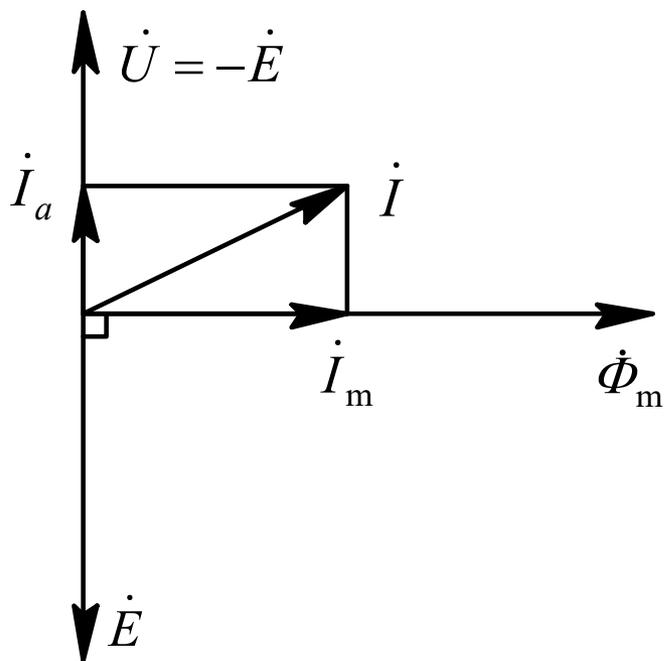


图 9.20 图 9.19的相量图

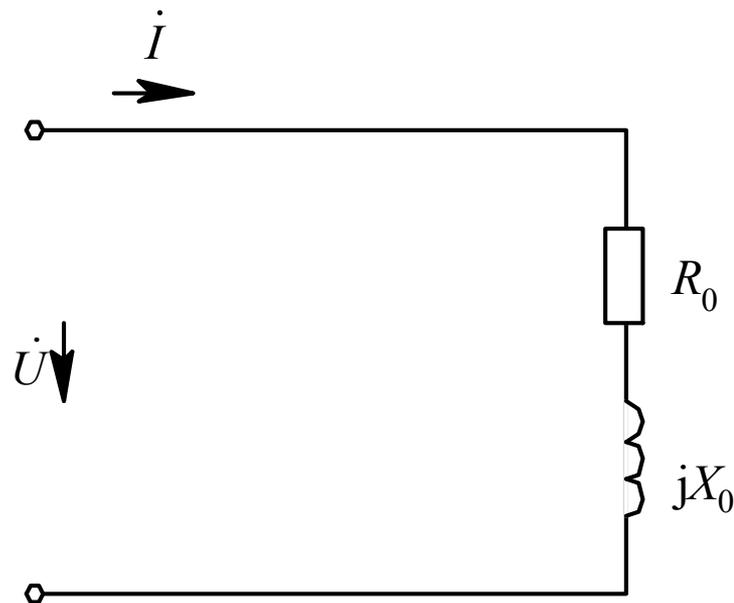


图9.21 串联等效模型

$$\dot{I}_a = G_0 \dot{U}, \dot{I}_m = jB_0 \dot{U}, \dot{I} = \dot{I}_0 + \dot{I}_m$$

## 例9.2 (一)

将一个匝数 $N=100$ 的铁芯线圈接到电压 $U_s=220\text{V}$ 的工频正弦电源上,测得线圈的电流 $I=4\text{A}$ ,功率 $P=100\text{W}$ 。不计线圈电阻及漏磁通,试求铁芯线圈的主磁通 $\Phi_m$ ,串联电路模型的 $Z_0$ ,并联电路模型的 $Y_0$ 。

## 例9.2 (二)

解 由  $U_s = 4.44fN\Phi_m$  得

$$\Phi_m = \frac{U_s}{4.44fN} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 100} = 9.91 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\begin{aligned} Z_0 &= R_0 + jX_0 = \frac{U}{I} \angle \arccos \frac{P}{UI} = \frac{220}{4} \angle \arccos \frac{100}{220 \times 4} \\ &= 55 \angle 83.48^\circ = 6.245 + j54.64 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_0 &= G_0 + jB_0 = \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{55 \angle 83.48^\circ} = 0.01818 \angle -83.48^\circ \\ &= 2.065 \times 10^{-3} - j18.06 \times 10^{-3} \text{ S} \end{aligned}$$

# 9.4.3 交流铁芯线圈的等效电路 (三)

## 2. 考虑线圈电阻及漏磁通

$$P = P_{Fe} = I^2 R = P_{Fe} + P_{Cu}$$

$$L_s = \frac{\Psi_s}{i}$$

$$u = Ri + L_s \frac{di}{dt} + N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\dot{U} = R\dot{I} + jX_s \dot{I} + \dot{U}'$$

$$\dot{U}' = -\dot{E} = j4.44 fN\Phi_m$$

$$\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_m$$

$$X_s = \omega L_s$$

# 例9.3 (一)

在例9.2中, 如考虑线圈电阻为 $1\Omega$ , 漏磁电抗 $X_s=2\Omega$ , 试求主磁通产生的感应电动势 $E$ 及磁化电流 $I_m$ 。

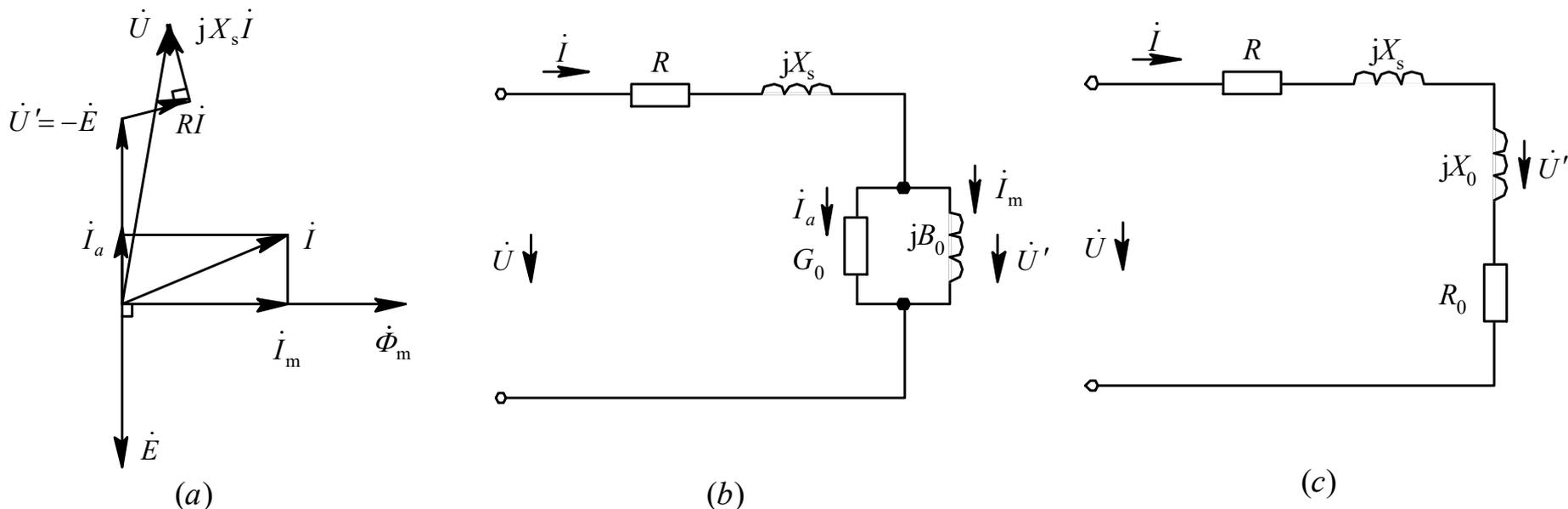


图9.22 交流铁芯线圈模型  
(a) 矢量图; (b) 并联模型; (c) 串联模型

## 例9.3 (二)

解 原来不计 $R$ 、 $X_s$ , 励磁阻抗为 $Z_0=6.245+j54.64\Omega$ , 按图9.22(c), 计入 $R=1\Omega$ ,  $X_s=2\Omega$ 后的励磁阻抗为

$$Z_0' = R_0' + jX_0'$$

$$(R + R_0') + j(X_s + X_0') = 6.245 + j54.64\Omega$$

$$\begin{aligned} Z_0' &= R_0' + jX_0' = (6.245 - 1) + j(54.64 - 2) \\ &= 5.245 + j52.64 = 59.9 \angle 84.31^\circ \Omega \end{aligned}$$

## 例9.3 (三)

$$E = |Z'_0| \cdot I = 52.9 \times 4 = 211.6V$$

$$I_m = |B'_0| E$$

$$\begin{aligned} Y'_0 = G'_0 + jB'_0 &= \frac{1}{Z'_0} = \frac{1}{52.9/84.31^\circ} \\ &= 1.874 \times 10^{-3} + j(-18.81) \times 10^{-3} S \end{aligned}$$

将 $B'_0 = -18.81$ 代入 $I_m = |B'_0| E$ , 得

$$I_m = 18.81 \times 10^{-3} \times 211.6 = 3.98A$$

## 9.4.4 伏安特性和等效电感

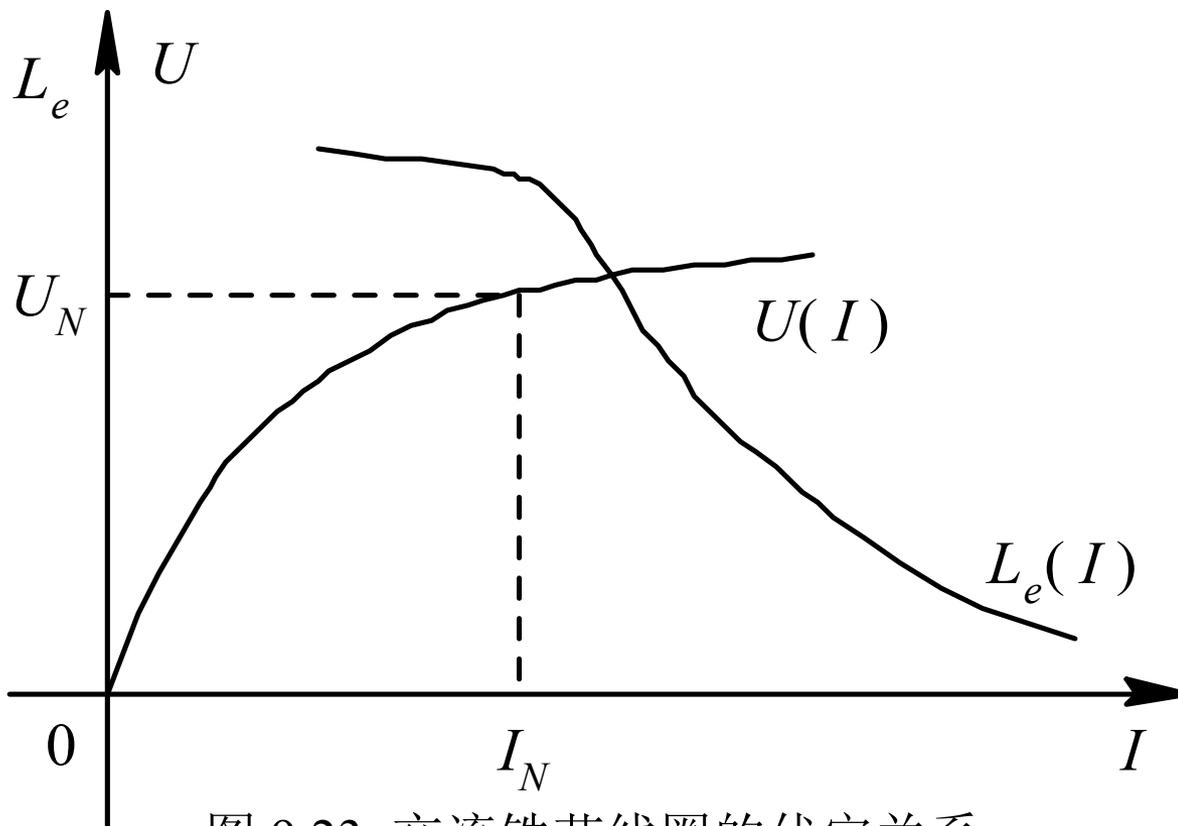
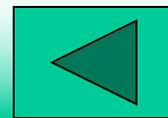


图 9.23 交流铁芯线圈的伏安关系

$$L_e = \frac{U}{\omega L}$$





# 教学方法

## 思考题（一）

1、将一个空心线圈先接到直流电源和交流电源上，然后在这个线圈在插入铁心，如果交流电压和直流电压相等，分析这种情况下通过线圈的电流和功率的大小，并说明理由。

2、将铁心线圈接在直流电源上，当发生下列情况时，铁心中的电流和磁通有何变化？

(1) 铁心截面增大，其它条件不变；

(2) 线圈匝数增加，线圈电阻及其它条件不变；

(3) 电源电压降低，其它条件不变。

## 思考题（二）

- 3、将铁心线圈接在交流电源上，当发生上题中所述情况时，铁心中的电流和磁通又如何变化？
- 4、为什么变压器的铁心要用硅钢片制成？用整块铁行不行？
- 5、一台变压器在修理后，铁心中出现较大气隙，这对于铁心的工作磁通以及空载电流有何影响？



# 9.5 电磁铁



# 目的与要求

了解交、直流电磁铁及其区别

# 重点与难点

**重点：**交、直流电磁铁及其区别

**难点：**交、直流电磁铁的区别

# 9.5.1 直流电磁铁

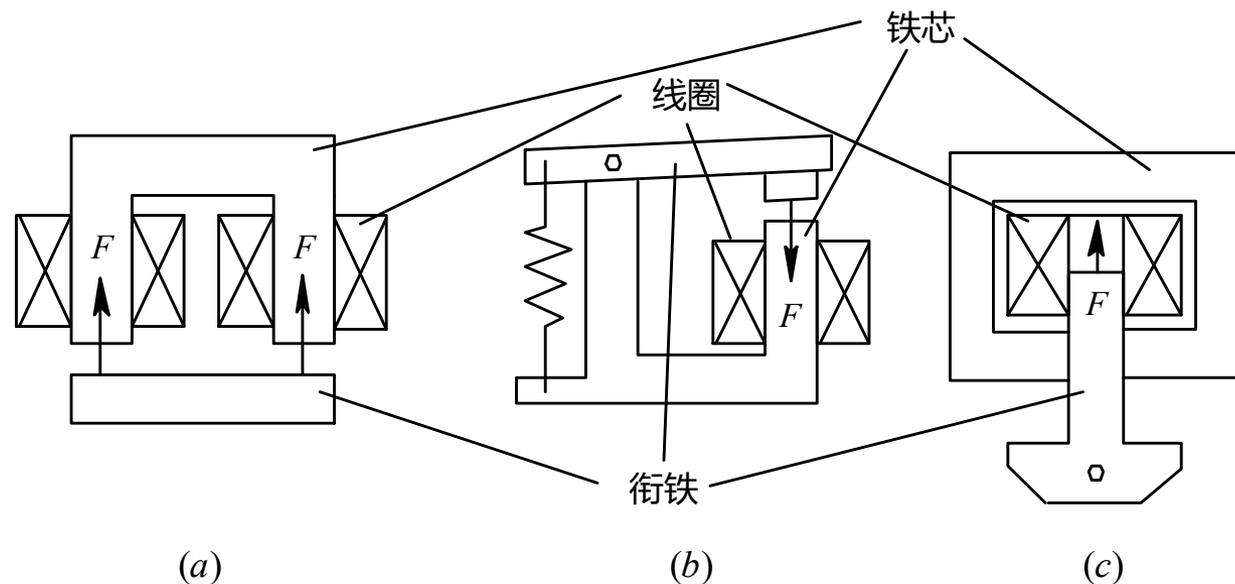


图9.24 电磁铁的几种结构形式  
 (a) 马蹄式； (b) 拍合式； (c) 螺管式

$$F = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S = \frac{B_0^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7}} S \approx 4B_0^2 S \times 10^5$$

## 例9.4 (一)

如图9.25所示的直流电磁铁, 已知线圈匝数为4000匝, 铁芯和衔铁的材料均为铸钢, 由于存在漏磁, 衔铁中的磁通只有铁芯中磁通的90%, 如果衔铁处在图示位置时铁芯中的磁感应强度为1.6T, 试求线圈中电流和电磁吸力。

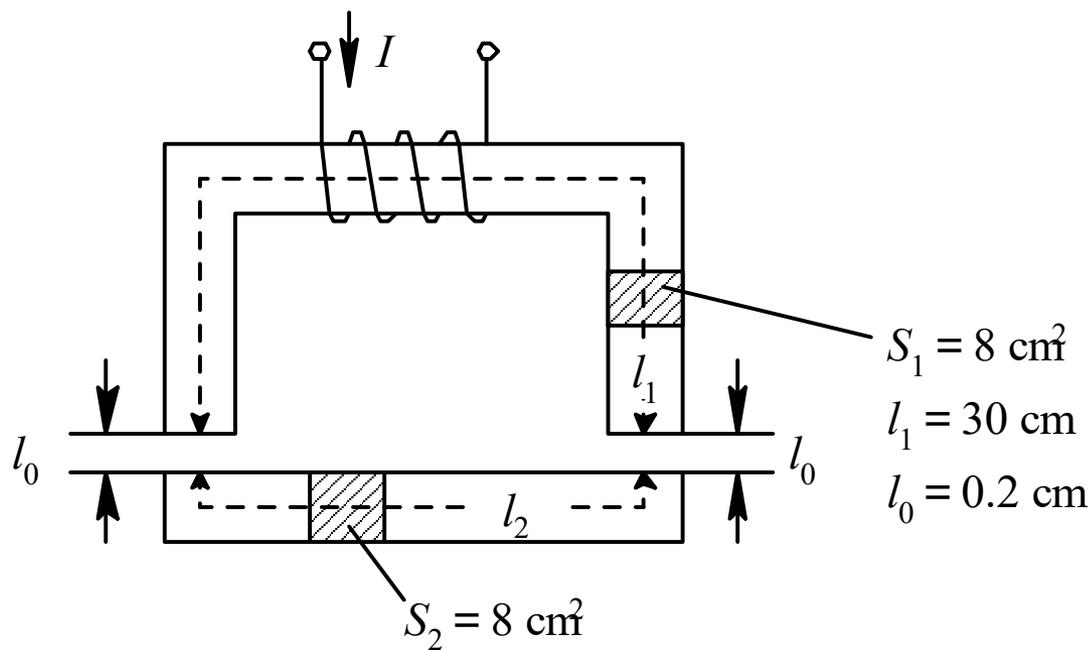


图9.25 例9.4图

## 例9.4 (二)

解 查图9.6, 铁芯中磁感应强度 $B=1.6\text{T}$ 时, 磁场强度 $H_1=5300\text{A/m}$ 。

铁芯中的磁通

$$\Phi_1 = B_1 S_1 = 1.6 \times 8 \times 10^{-4} = 1.28 \times 10^{-3} \text{Wb}$$

气隙和衔铁中的磁通

$$\Phi_2 = 0.9\Phi_1 = 0.9 \times 1.28 \times 10^{-3} = 1.152 \times 10^{-3} \text{Wb}$$

不考虑气隙的边缘效应时, 气隙和衔铁中的磁感应强度为

$$B_0 = B_2 = \frac{1.152 \times 10^{-3}}{8 \times 10^{-4}} = 1.44 \text{T}$$

## 例9.4 (三)

查图9.6衔铁中的磁场强度为  $H_2 = 3500 \text{ A/m}$  。

气隙中的磁场强度为  $H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1.44}{47 \times 10^{-7}} = 1.146 \times 10^6 \text{ A/m}$

线圈的磁势

$$\begin{aligned} NI &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2H_0 l_0 \\ &= 5300 \times 30 \times 10^{-2} + 3500 \times 10 \times 10^{-2} + 2 \times 1.146 \times 10^6 \times 0.2 \times 10^{-2} \\ &= 6524 \text{ A} \end{aligned}$$

线圈电流为

$$I = \frac{NI}{N} = \frac{6524}{4000} = 1.631 \text{ A}$$

电磁铁的吸力

$$F = 4B_0^2 S \times 10^5 = 4 \times 1.44^2 \times 2 \times 8 \times 10^{-4} \times 10^5 = 1327 \text{ N}$$

## 9.5.2 交流电磁铁（一）

交流电磁铁由交流电励磁，设气隙中的磁感应强度为

$$B_0(t) = B_m \sin \omega t$$

电磁铁吸力为

$$f(t) = \frac{B_0^2(t)}{2\mu_0} S = \frac{B_m^2 S}{2\mu_0} \sin^2 \omega t = \frac{B_m^2 S}{2\mu_0} (1 - \cos 2\omega t)$$

$$F_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{B_m^2 S}{2\mu_0} (1 - \cos 2\omega t) dt$$

$$= \frac{B_m^2 S}{4\mu_0} \approx 2B_m^2 S \times 10^5$$

$$F_{\max} = \frac{B_m^2 S}{2\mu_0}$$

## 9.5.2 交流电磁铁 (二)

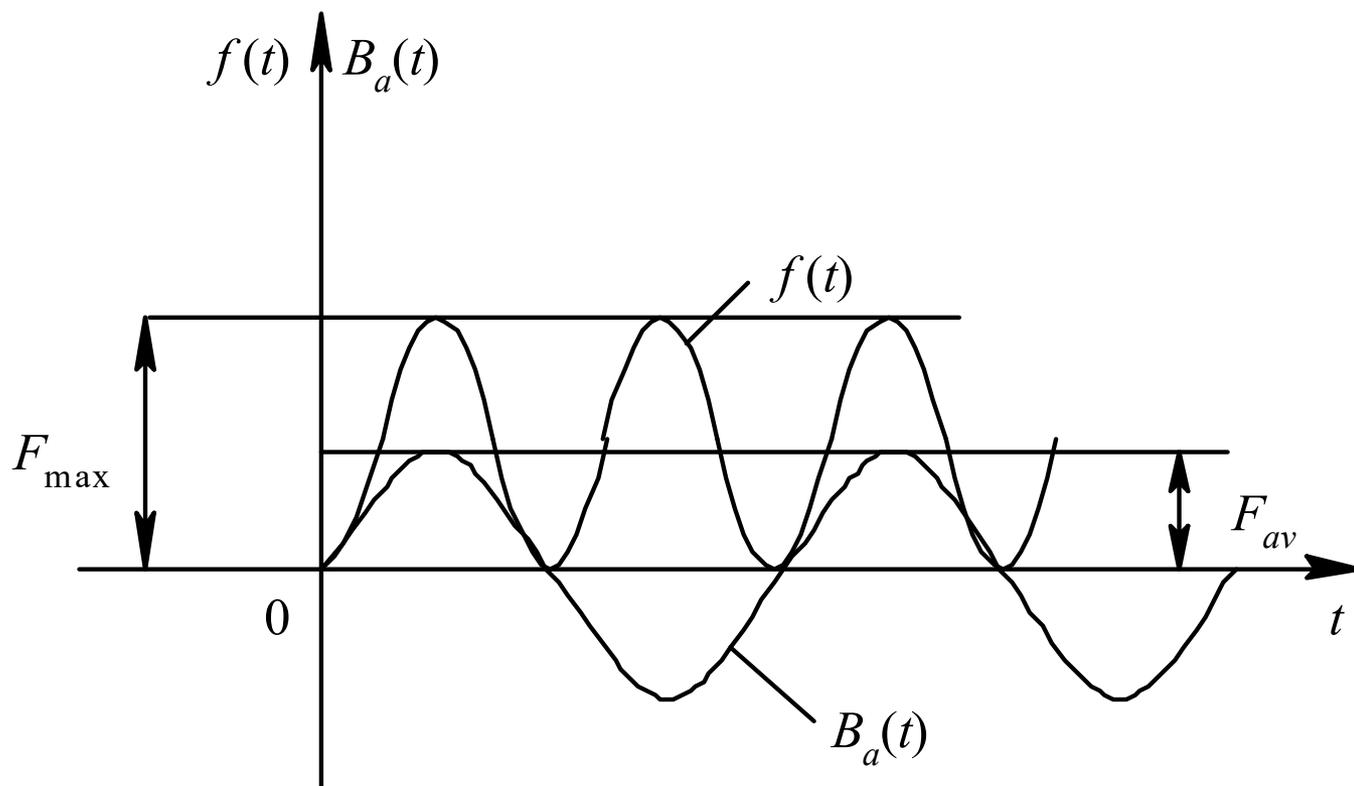


图9.26 交流电磁铁吸力变化曲线

## 9.5.2 交流电磁铁 (三)

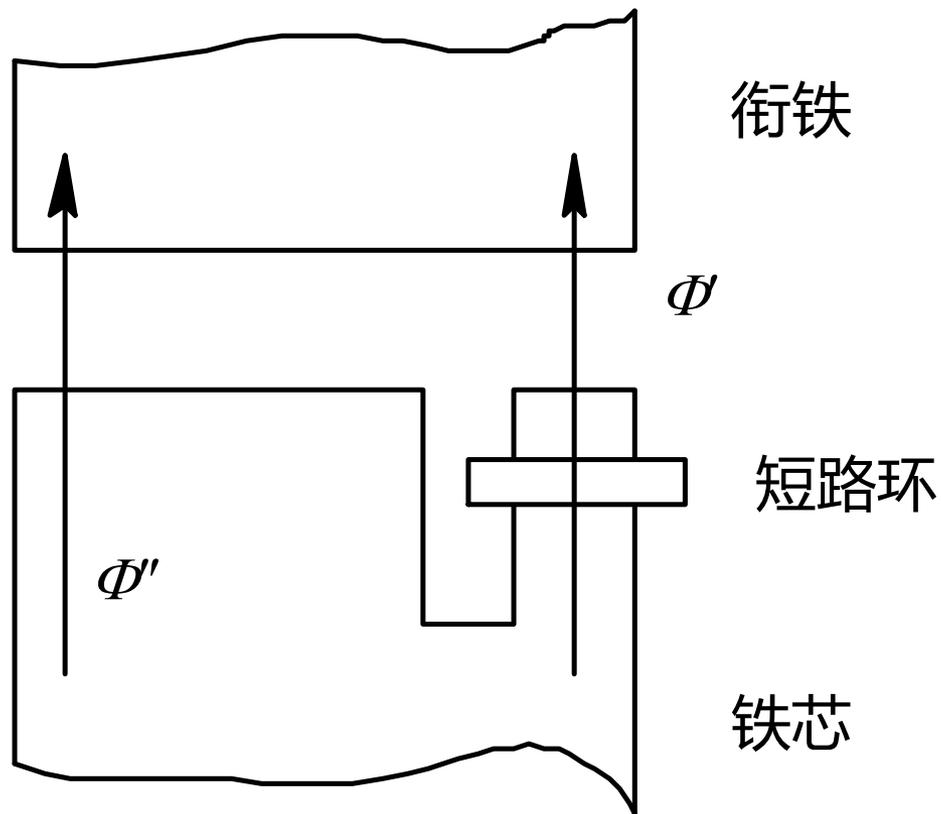
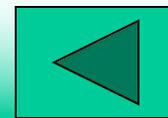


图9.27 有短路环时的磁通

## 9.5.3 交流电磁铁的特点

表 9.1 直流电磁铁与交流电磁铁比较

内 容	直流电磁铁	交流电磁铁
铁芯结构	由整块软钢制成, 无短路环	由硅钢片制成, 有短路环
吸合过程	电流不变, 吸力逐渐加大	吸力基本不变, 电流减小
吸合后	无振动	有轻微振动
吸合不好时	线圈不会过热	线圈会过热, 可能烧坏





# 教学方法

结合实际讲解本节

## 思考题（一）

- 1、如何根据电磁铁的结构来判断它是直流电磁铁还是交流电磁铁？
- 2、如果把交流电磁铁误接到电压相同的直流电源上，会有什么结果？为什么？
- 3、交流电磁铁在吸合时，若衔铁长时间被卡住不能吸合，会有什么结果？为什么？直流电磁铁若发生上述情况又如何？

## 思考题（二）

4、如果一个直流电磁铁吸合后的电磁吸力与一个交流电磁铁吸合后的平均吸力相等，那么在下列情况下它们的吸力是否仍然相等？为什么？

- (1) 将它们的电压都减小一半；
- (2) 将它们的励磁线圈的匝数都增加一倍；
- (3) 在它们的衔铁与铁心之间都填进同样厚的木片。