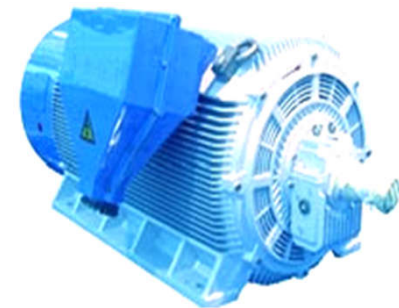


# 电力拖动自动控制系统

华侨大学信息科学与工程学院



# 1.1 电机的概述

---

- **电机的定义：**

**电机是一种利用电磁感应原理进行机电能量转换或信号传递的电器设备或机电元件。**

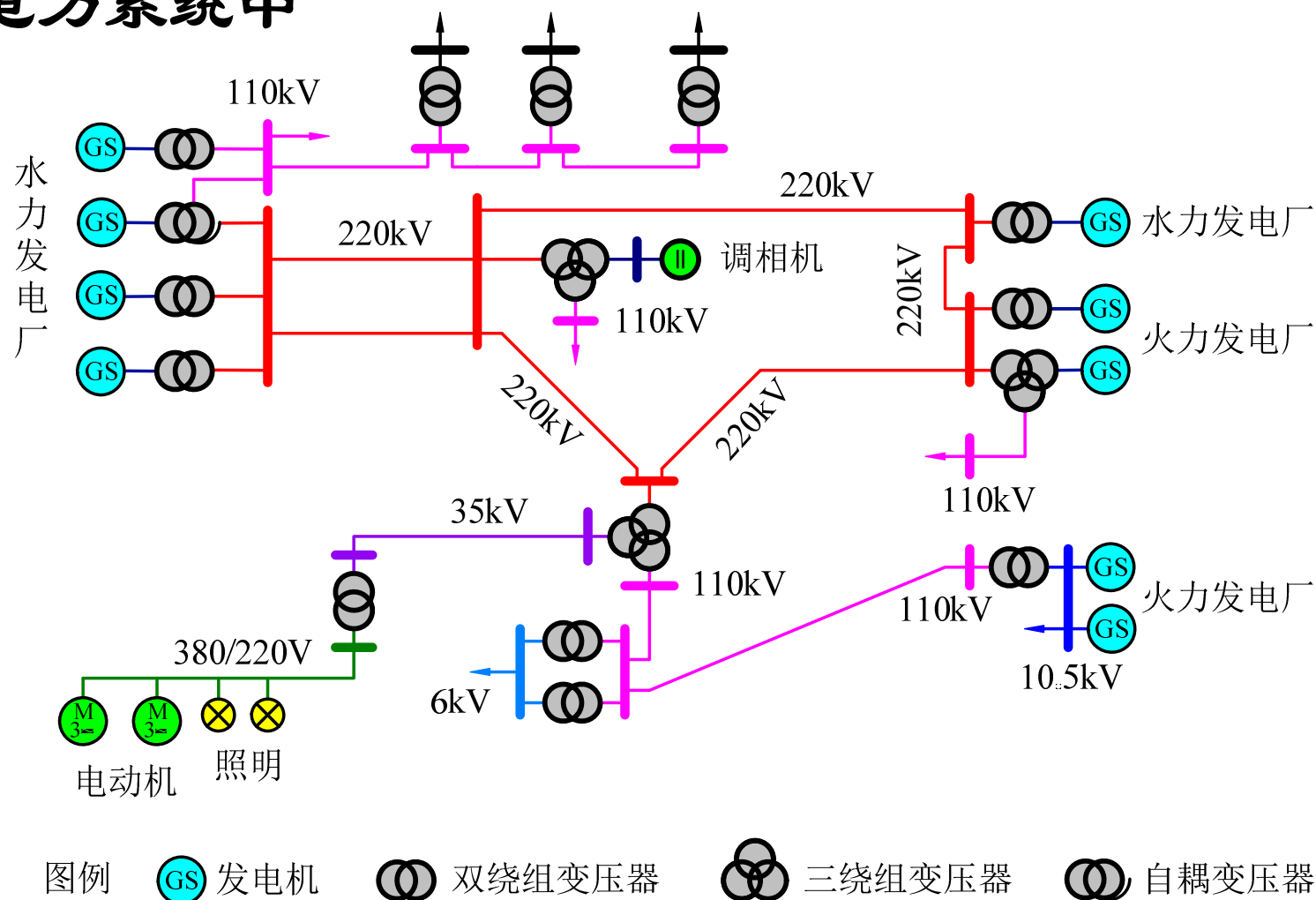
**理论基础：电磁基本定律**

**运行目的：能量转换或信号传递**

**构造原则：电路和磁路**

## 1.2 电机在国民经济中的应用

### ① 电力系统中



## 1.2 电机在国民经济中的应用

### ② 工业中



机加工车间



## 1.2 电机在国民经济中的应用

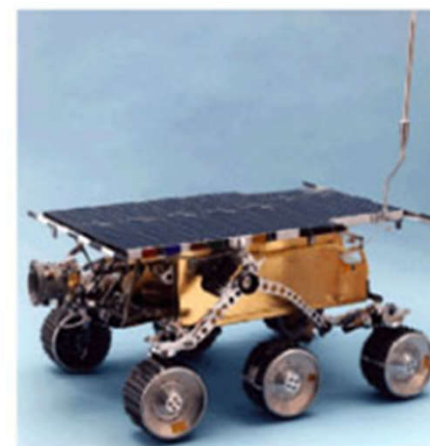
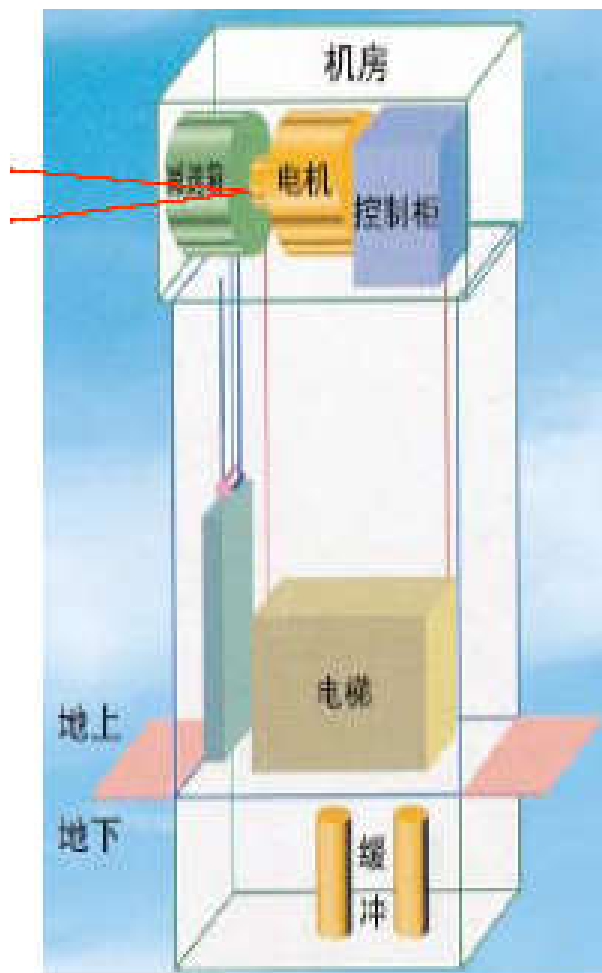
### 交通运输业



## 1.2 电机在国民经济中的应用

### 国防航空







混合动力车：

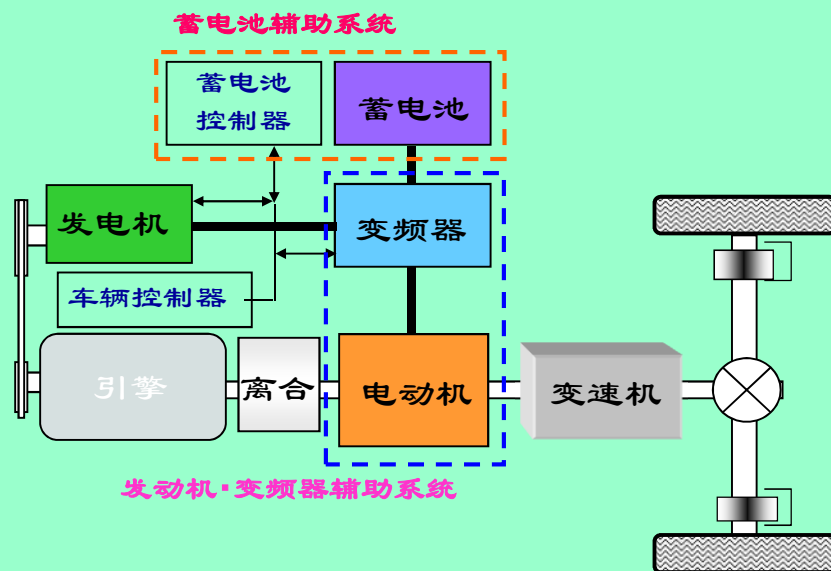
HEV:

Engine + Battery  
+Capacitor +Inverter

Toyota Prius: 燃耗为30km/L

至2002,10, 全球销售100,000

辆



混合动力系统



清华  
纯电动



比亚迪  
纯电动



## 纯电动车特斯拉 (Tesla)

---- 硅谷小子大战汽车巨头的神话

几个数据：

- 700多个电池，最大续航500km；
- 全充所需时间：5 hours (直流快充)
- 在中国售价：最低配置73万CNY，标配80万CNY。商业模式：豪华、自上而下。

几个特点：

- 采用通用技术集成 (如电池) /尽可能的采用碳纤维材料/炫：车体，内置...；
- 定位/现代的体验和销售
- 资本市场：成立不到10年，不过2款，一共交付约1万辆 (201303前)。但201305首次盈利后，一时为全球焦点。近一个月股价涨了约80%，正在向100美元冲刺，市值突破100亿美元。





“福特”级航母首舰“福特”号(CVN-78)目前正在建造中，有望于2015年9月交付美国海军。

CVN-79号是美国3艘“福特”级核动力航母中的第二艘舰，计划在2012年晚些时候全面展开建造工作，于2020年交付美国海军。

电磁弹射器：就是100多米长的直线感应电动机



电力拖动自动：



## 军事领域：无人飞机，无人战车，机器战士

美国计划到2015年，地面作战士兵的1/3由机器战士组成。许多动力部分由电动机系统实现。



“泰迪熊”机器人



美军MQ-9“收割者”无人机



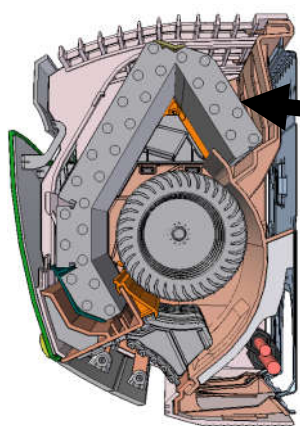
## 交流同步机的调速例子（电驱动空调）



室内  
壁挂机



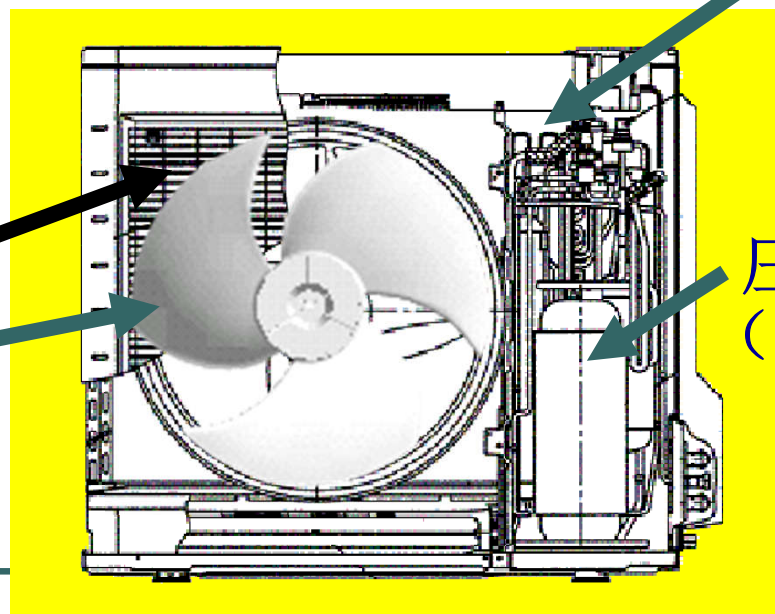
室外机



热交换器

风机和电机

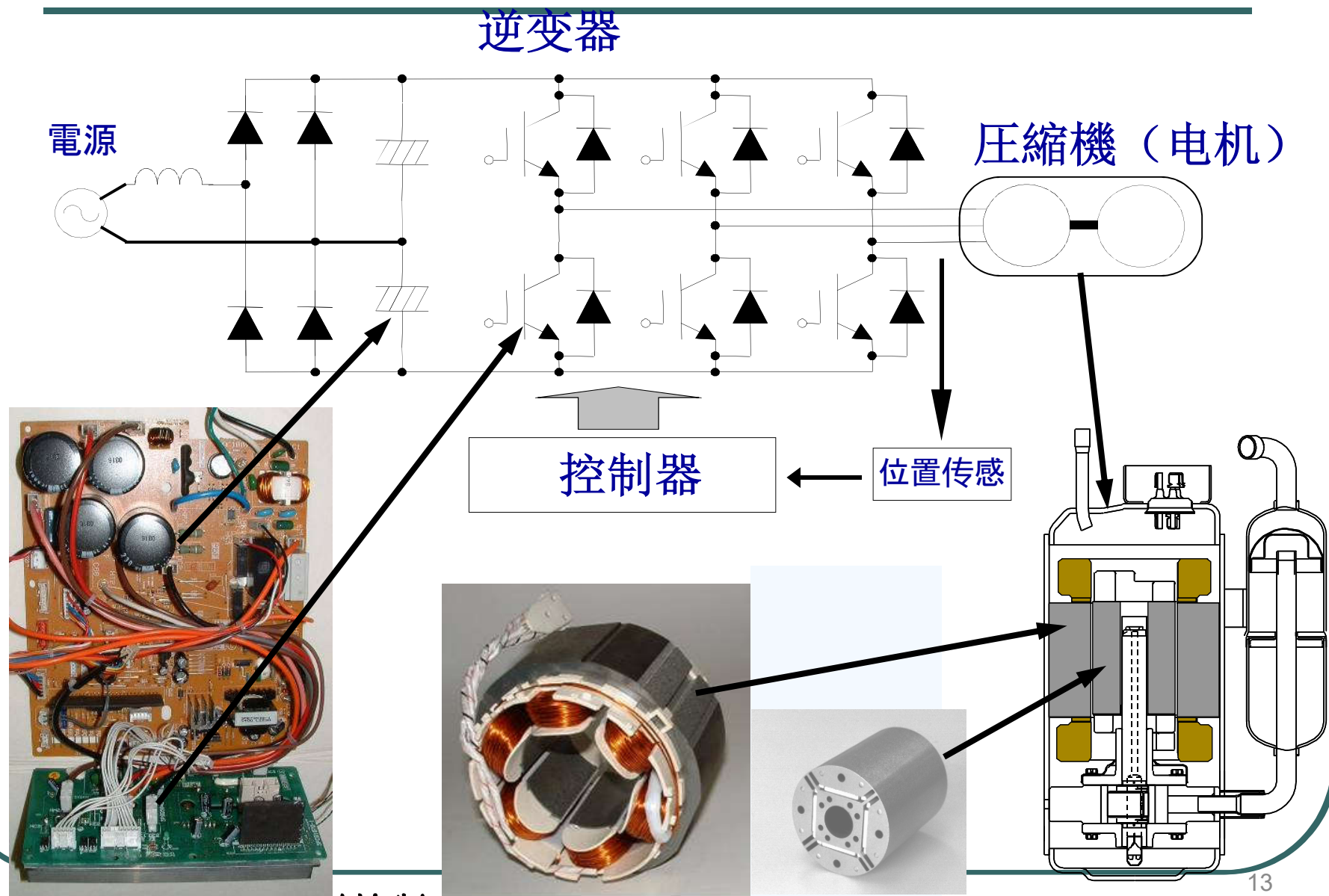
逆变器



压缩机  
(电机)



## 交流同步机的调速例子（电驱动空调）



有关系统的知识领域:

**控制与智能**

知识单元:

**控制、稳定性**与鲁棒性

可靠性与容错

**系统建模技术**

**自身的控制理论**

系统辨识、参数估计、自学习、最优

知识领域:

**执行与驱动**

知识单元:

光机电一体化

电力电子技术

效率、损耗

数字控制技术等

知识领域:

**电机原理与模型**

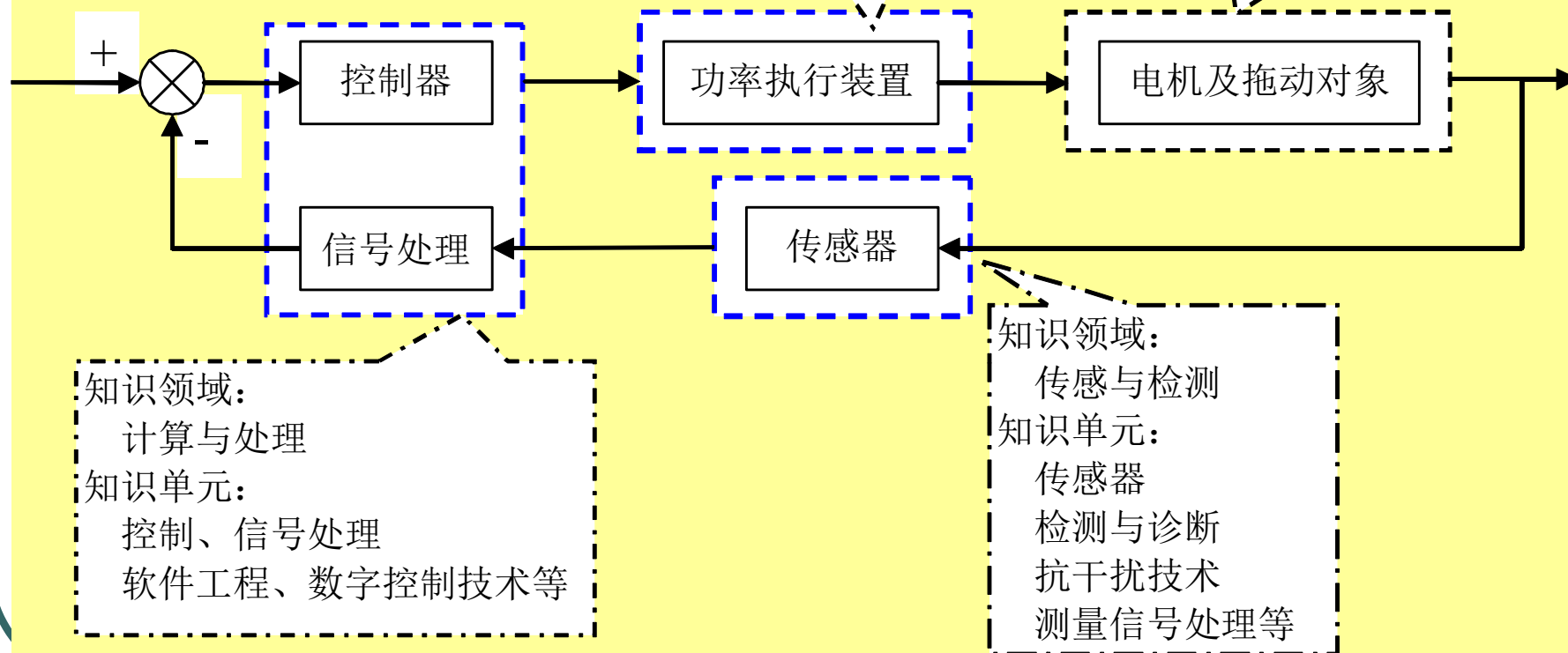
知识单元:

**机电能量变换原理**

**电机原理与传动**

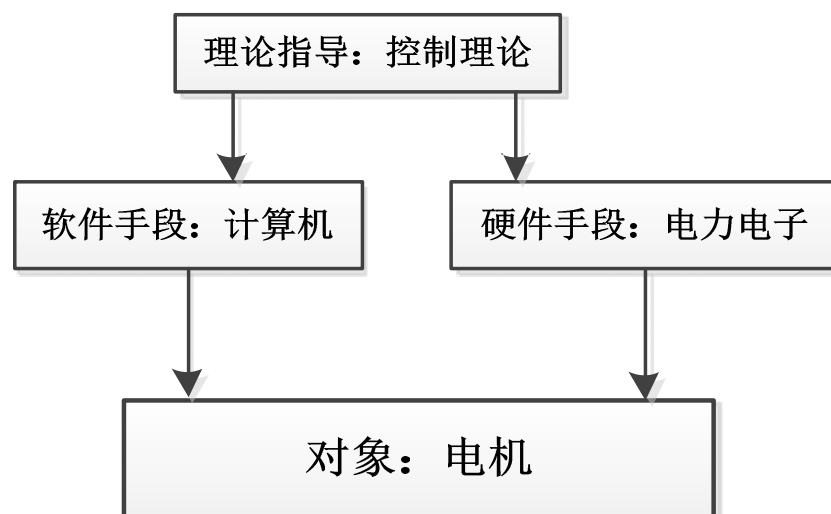
仿真技术

**效率、损耗等**



# 1.1 电机类系列课程关系

课程目的：**电机的调速与控制**



**1. 综合性**

**2. 理论与实践相结合**

# 1.1 电机类系列课程学时安排

电气工程专业：

《电机学》：72学时

我们的情况：

《电力拖动基础》：48学时

《电力拖动自动控制系统》：54学时

自动化专业：

《电机与拖动基础》：72学时

《电力拖动自动控制系统》：48学时

《电力拖动自动控制系统》：54学时

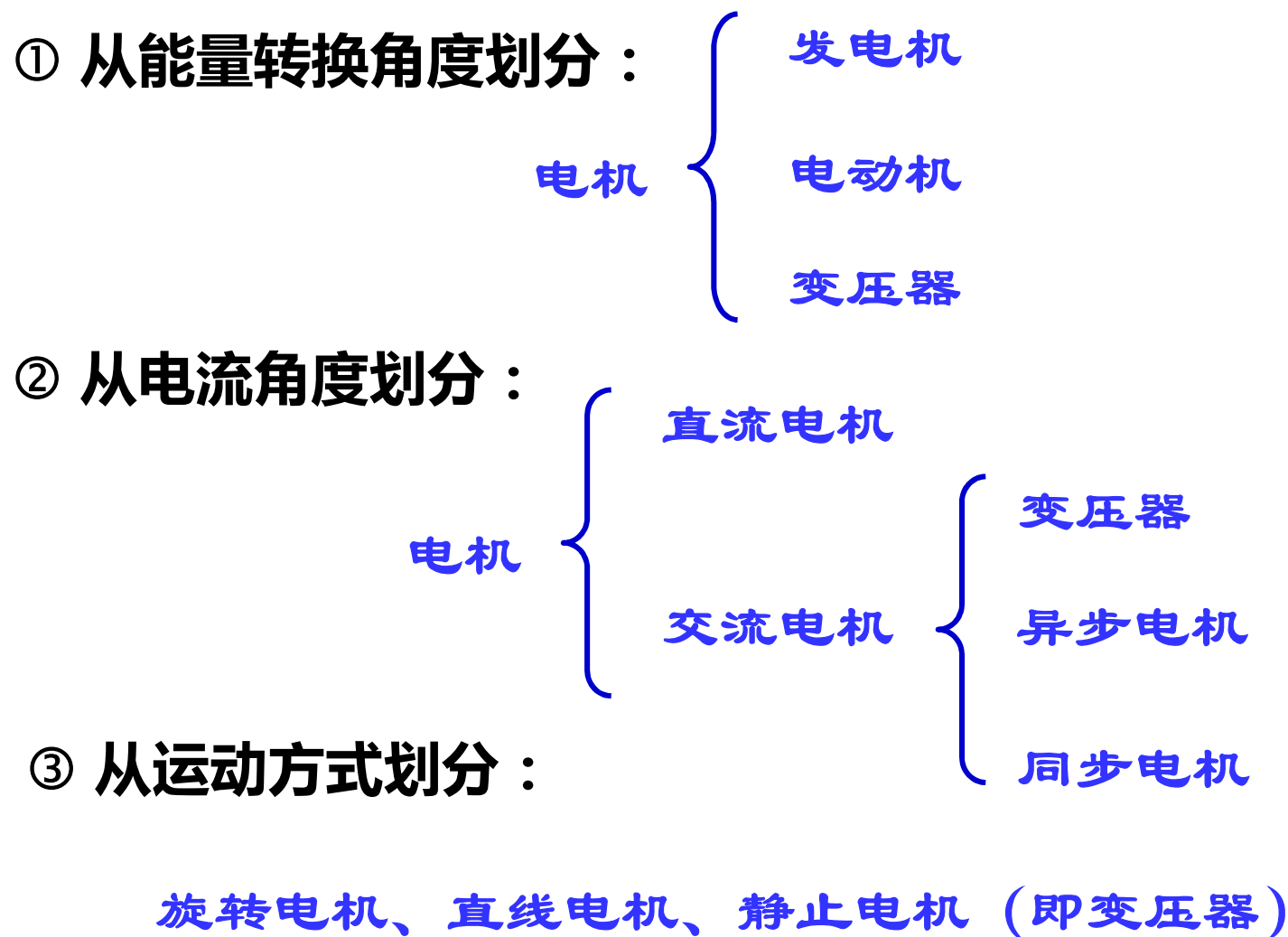


## 1.3 电机的发展史

### 1. 电机的发展初期

- $F = Bli$ ——1821年 Faraday
- 电磁感应定律的发现——1831年 Faraday
- 直流发电机——1831年 Pixii
- 1876年 单相交流电的应用——远距离传输
- 1885年 交流电动机
- 1889年 三相制——三相交流电的应用 三相电机

## 1.4 电机的分类



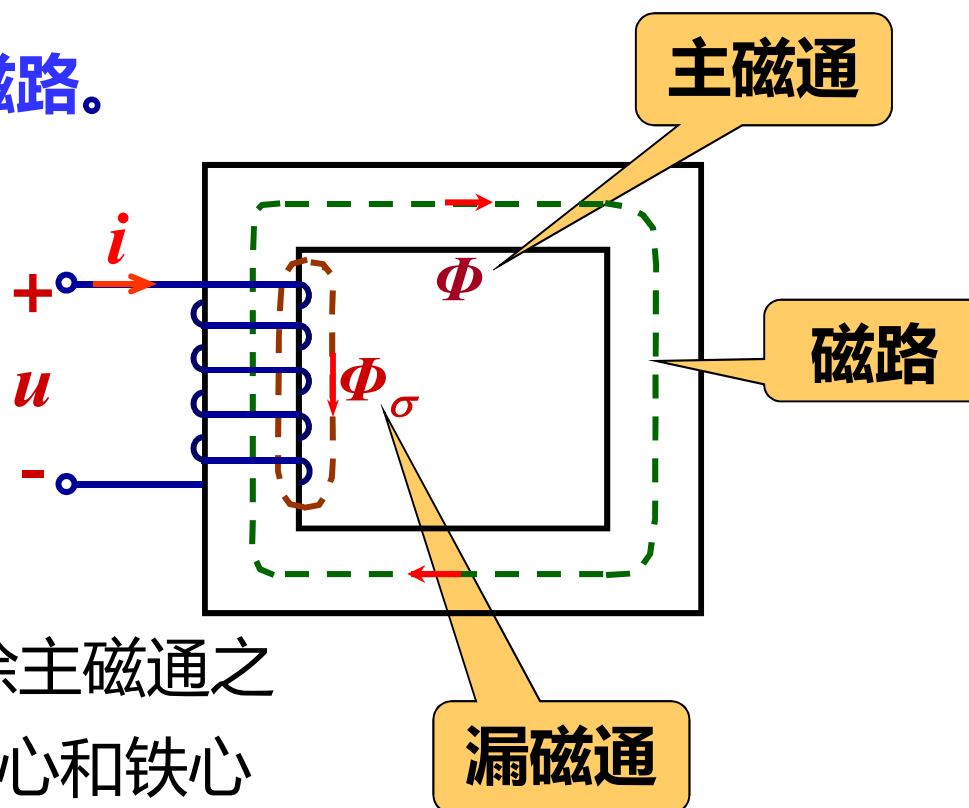
# 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

## (1) 磁路的概念：

磁通所通过的路径称之为**磁路**。

• **主磁通**：由于铁心的导磁性比空气要好得多，所以绝大部分磁通将在铁心内通过，这部分磁通称为主磁通。

• **漏磁通**：在电机的磁场中除主磁通之外，围绕载流线圈、部分铁心和铁心周围的空间，还存在少量分散的磁通，这部分磁通称为漏磁通。

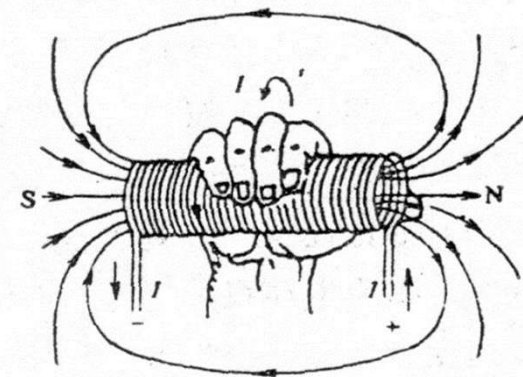
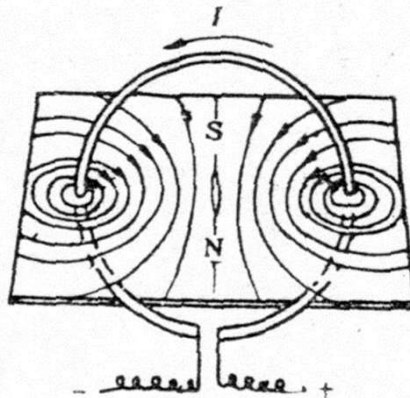
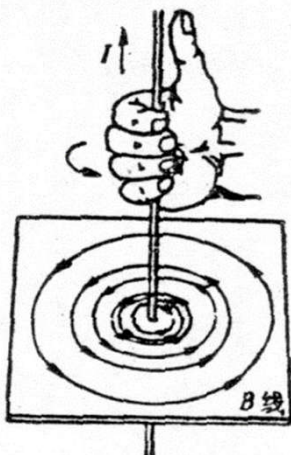


## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

① **磁感应强度  $B$** : 描述磁场强弱和磁场方向的物理量。

单位: 特斯拉(T), 或高斯(Gs).  $1\text{T}=10^4\text{Gs}$

**磁力线**是闭合曲线, 其方向与产生磁场的电流的方向满足右手螺旋关系。



电流磁场中的磁力线



## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

- ②**磁通 $\Phi$** ：穿过某一截面S的磁感应强度B的通量。
- 单位：韦伯（Wb）

$$\Phi = \int_S B \cdot dS$$

在均匀磁场中，若截面S与B垂直，则上式变为 $\Phi = BS$   
或  $B = \Phi/S$

$$1T = 1Wb / m^2$$

## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

- ③ **磁场强度H**, 是描述磁场强弱和方向的辅助物理量。
- 单位：安/米(A/m) .
- 它与磁感应强度的关系： $B = \mu H$

$\mu$  为导磁物质的磁导率，真空中磁导率为：

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

④ **磁势F**：线圈匝数与励磁电流的乘积。  $F = Ni$

单位：安匝，At

## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

- ③ **磁场强度H**, 是描述磁场强弱和方向的辅助物理量。
- 单位：安/米(A/m) .
- 它与磁感应强度的关系： $B = \mu H$

$\mu$  为导磁物质的磁导率，真空中磁导率为：

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

④ **磁势F**：线圈匝数与励磁电流的乘积。  $F = Ni$

单位：安匝，At

## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

- ③ **磁场强度H**, 是描述磁场强弱和方向的辅助物理量。
- 单位：安/米(A/m) .
- 它与磁感应强度的关系： $B = \mu H$

$\mu$  为导磁物质的磁导率，真空中磁导率为：

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

④ **磁势F**：线圈匝数与励磁电流的乘积。  $F = Ni$

单位：安匝，At



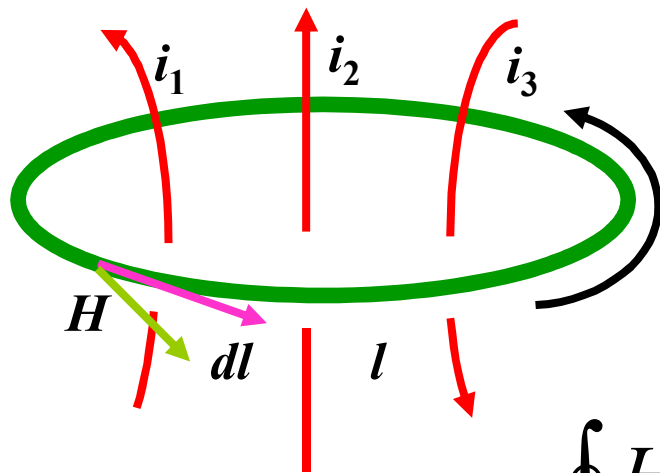
# 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

## (2) 磁路的基本定律：

### ①安培环路定律，（全电流定律）

磁场中沿任何一条闭合回路，磁场强度 $H$ 的线积分等于该闭合回路所包围的所有电流的代数和，即

$$\oint H \cdot dl = \sum Ni$$



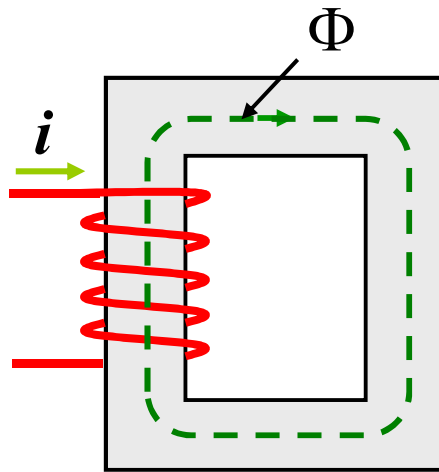
注意：电流 $i$ 的方向与回路 $l$ 的方向符合右手螺旋关系时为正，否则为负。

$$\oint H \cdot dl = i_1 + i_2 - i_3$$

# 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

## (2) 磁路的基本定律：

②磁路的欧姆定律：不分支磁路的磁通等于作用于该磁路的磁势与磁阻之比，即为磁路欧姆定律。



$$\Phi = \int B dS = BS$$

$$B = \mu H$$

$$Hl = Ni$$



$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m} \quad (R_m = \frac{l}{\mu S})$$

$$\Phi = Ni(\mu \frac{S}{l}) = F\Lambda_m$$

线圈匝数— $N$ ；线圈电流— $i$

铁心的截面积— $S$ ；磁路的平

均长度— $l$ ；材料的磁导率— $\mu$

$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$

$$\Phi = F\Lambda_m$$

## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律

### (2) 磁路的基本定律：

②磁路的欧姆定律  $\Phi = \frac{Ni}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m} = F \Lambda_m$

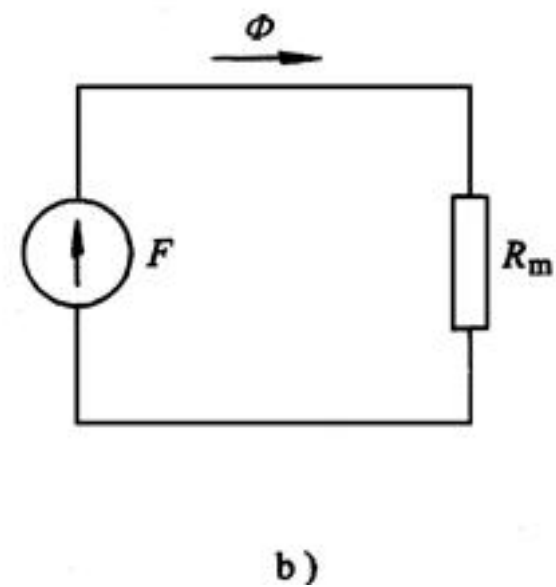
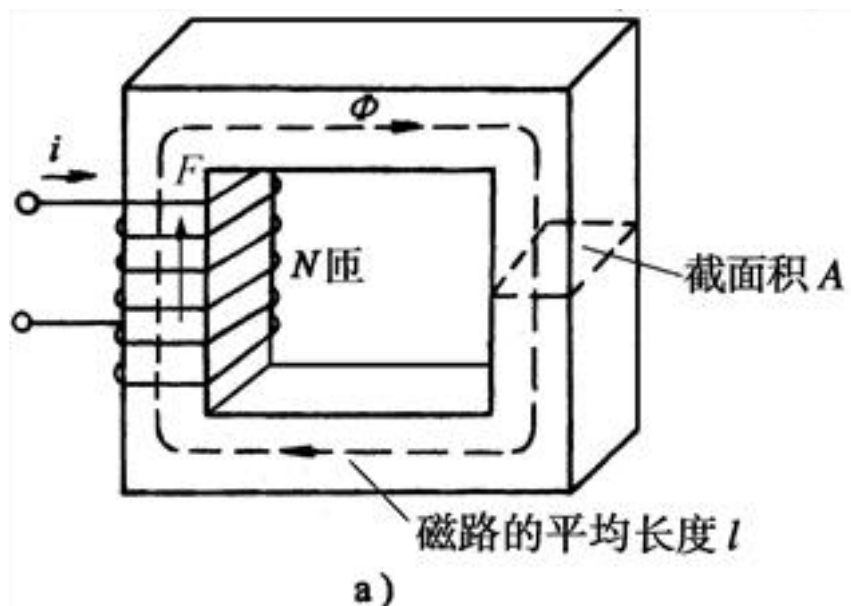
式中， $F = Ni$  ——作用在磁路上的磁动势；

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \text{ ——磁路的磁阻；}$$

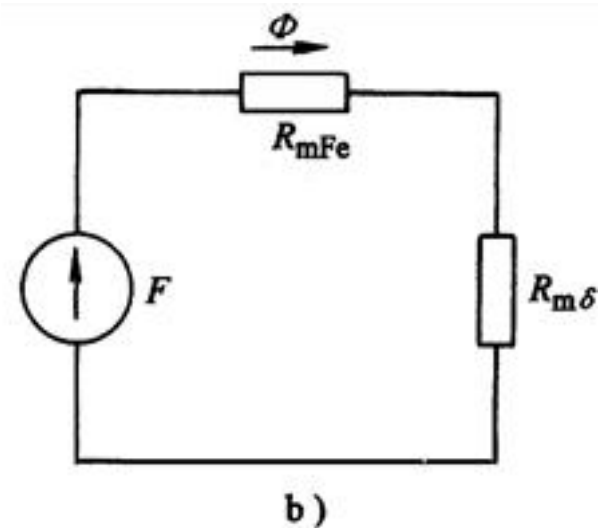
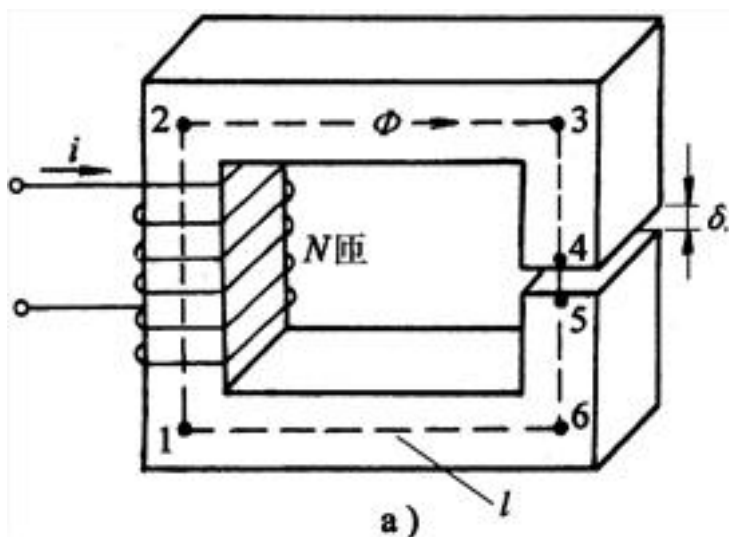
$$\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l} \text{ ——磁路的磁导。}$$

磁路中通过的磁通等于磁路上的磁动势除以磁路的磁阻。

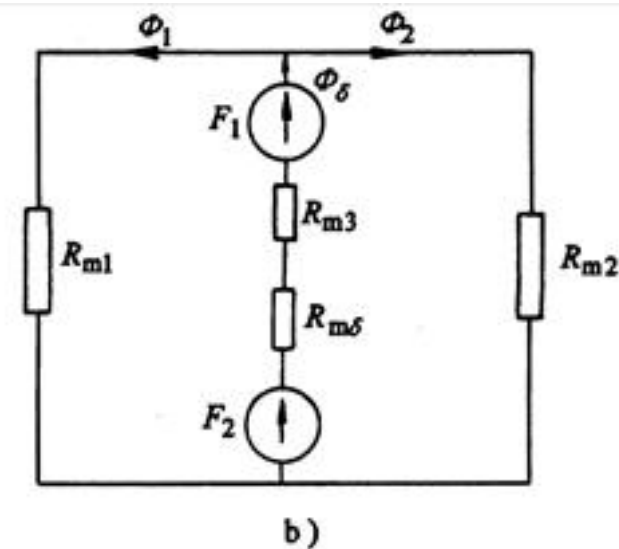
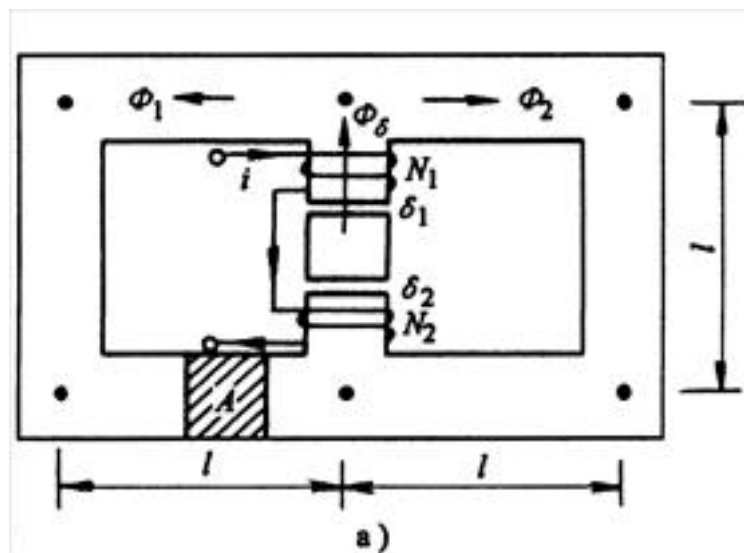
## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律



## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律



## 1.5 电机学中常用的基本概念和定律





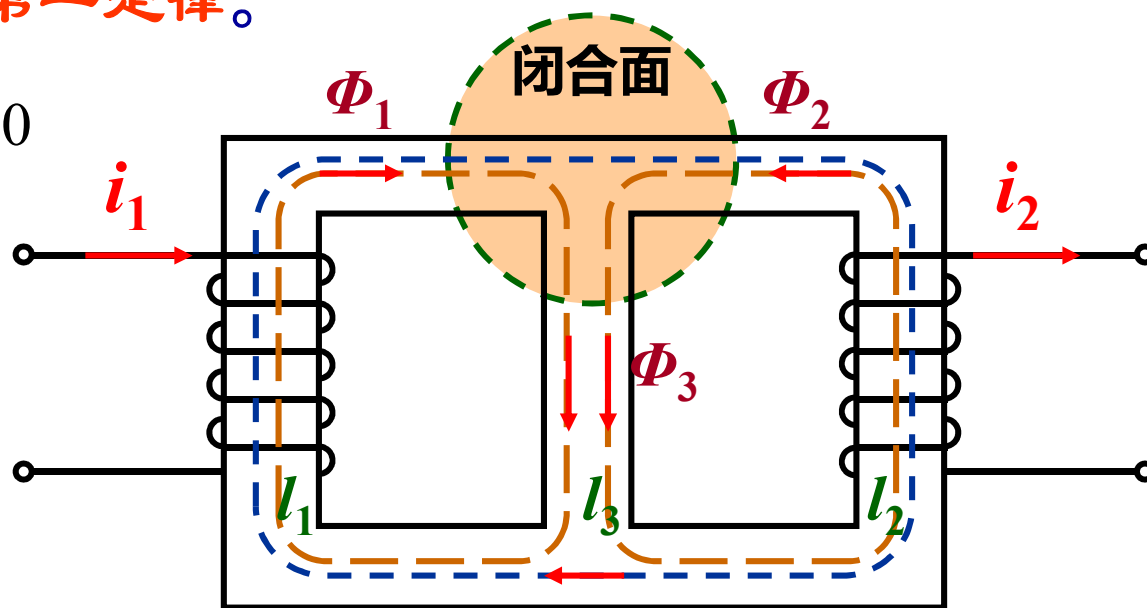
## 1.6 电机学中常用的基本概念和定律

### (2) 磁路的基本定律：

③磁路的基尔霍夫第一定律：任取一闭合面，根据磁通连续性原理，进入闭合面的磁通，必等于流出闭合面的磁通，即穿过闭合面的磁通的代数和为零，该定律称为磁路的基尔霍夫第一定律。

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

$$\text{即 } \sum \Phi = 0$$

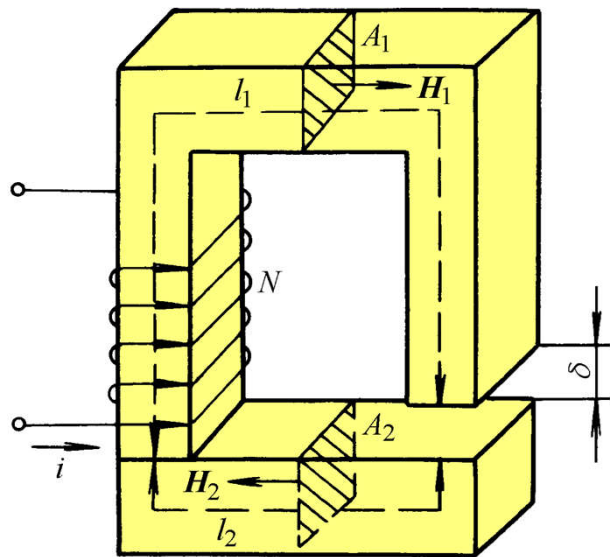


## 1.6 电机学中常用的基本概念和定律

### (2) 磁路的基本定律：

**磁路的基尔霍夫第二定律：**沿任何闭合磁路的总磁动势等于各段磁压降的代数和。该定律称为**磁路的基尔霍夫第二定律**。

$$\sum Ni = \sum Hl$$



对于左图，有

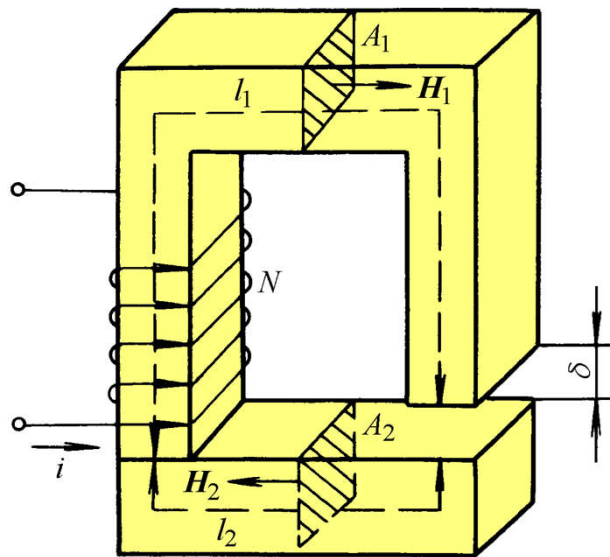
$$Ni = \sum_{k=1}^3 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta \delta$$

## 1.6 电机学中常用的基本概念和定律

### (2) 磁路的基本定律：

**磁路的基尔霍夫第二定律：**沿任何闭合磁路的总磁动势等于各段磁压降的代数和。该定律称为**磁路的基尔霍夫第二定律**。

$$\sum Ni = \sum Hl$$



对于左图，有

$$Ni = \sum_{k=1}^3 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta \delta$$

## 1.6 电机学中常用的基本概念和定律

电 路		磁 路	
基本物理量及表达式	单位	基本物理量及表达式	单位
电流: $I$	A	磁通: $\Phi$	Wb
电动势: $E$	V	磁动势: $F=NI$	A
电压降: $U=RI$	V	磁压降: $\Phi R_m=Hl$	A
电阻: $R=\rho\frac{l}{A}$	$\Omega$	磁阻: $R_m=\frac{l}{\mu A}$	$H^{-1}$
电阻率: $\rho$		磁导率: $\mu$	H/m
电路欧姆定律: $E=IR$		磁路欧姆定律: $F=\Phi R_m$	
基尔霍夫第一定律: $\Sigma I=0$		基尔霍夫第一定律: $\Sigma \Phi=0$	
基尔霍夫第二定律: $\Sigma E=\Sigma RI$		基尔霍夫第二定律: $\Sigma F=\Sigma \Phi R_m=\Sigma Hl$	

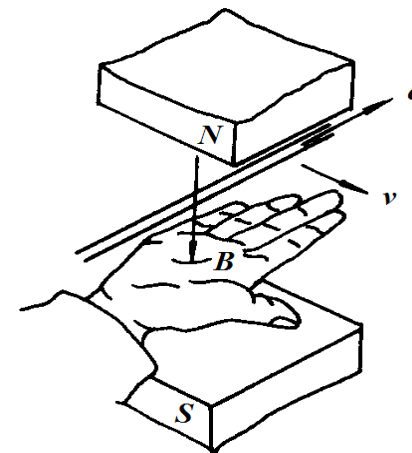
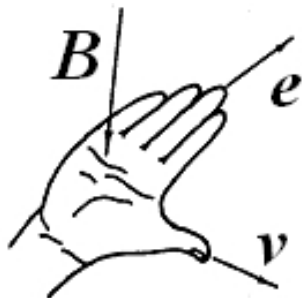
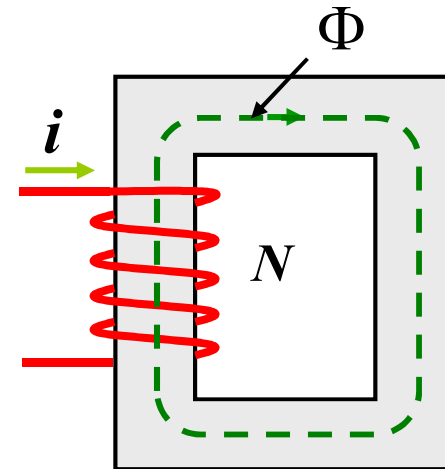
## 1.6 电机学中常用的基本概念和定律

### (3) 基本的电磁定律：

#### ①、电磁感应定律

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N\frac{d\phi}{dt}, \text{ 伏特}(V)$$

$$e = Blv, \text{ 伏特}(V)$$



## 1.6 电机学中常用的基本概念和定律

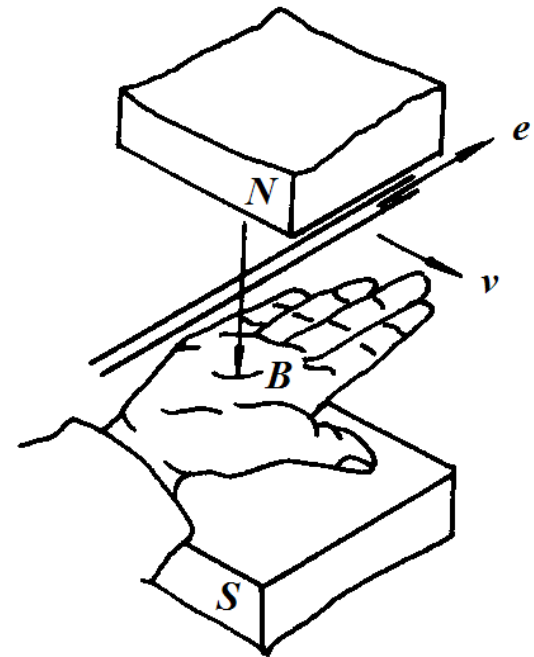
- **变压器电动势**：线圈和磁场相对静止，由于和线圈交链的磁通本身随时间变化而产生的感应电动势。

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N\frac{d\phi}{dt}$$

- **运动电动势**：由于线圈和磁场之间存在相对运动导致线圈中磁链发生变化而产生的感应电动势，也称为切割电动势。

$$e = Blv$$

运动电动势的方向用右手定则确定。





## 1.6 电机学中常用的基本概念和定律

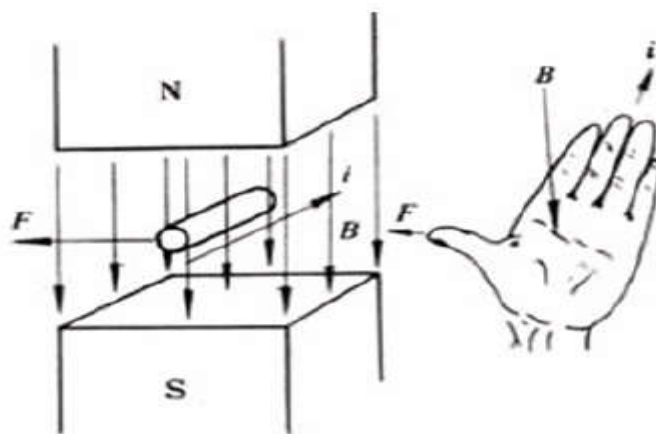
### (3) 基本的电磁定律：

#### ②、电磁力定律

载流导体在磁场中会受到力的作用，当导体和磁场互相垂直时，作用在导体上的电磁力为： $f = Bli$

方向由左手定则判定（电动机准则）。

电磁转矩：导体上所受的电磁力乘以从导体至转轴的距离



# 1.7 常见的铁磁材料及其特性

## 1. 铁磁物质的概念

### 1) 磁导率

• **磁导率**：表征物质导磁能力的物理量，用符号 $\mu$ 表示。

真空的磁导率为  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

• **相对磁导率**：任何一种物质的磁导率与真空磁导率的比称为该物质的相对磁导率，用 $\mu_r$ 表示，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

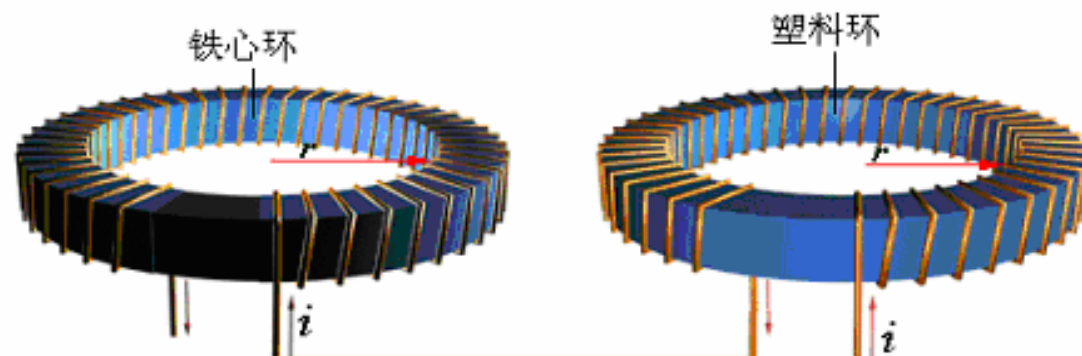
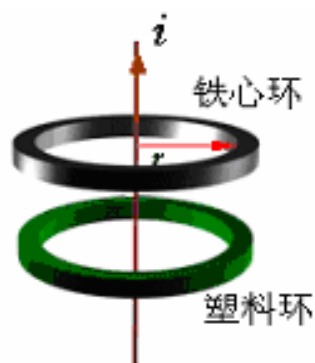
# 1.7 常见的铁磁材料及其特性

## 1. 铁磁物质的概念

### 2) 磁介质的分类

- 按磁导率分类：非铁磁物质、铁磁物质
- 非铁磁物质：如空气、铜、铝和绝缘材料等，磁导率近似等于真空磁导率
  - 非铁磁物质： $\mu_r \approx 1$
- 铁磁物质：如铁、钴、镍及它们的合金等，磁导率远大于真空磁导率达数千甚至上万倍。
  - 铁磁物质： $\mu_r \gg 1$

## 1.7 常见的铁磁材料及其特性

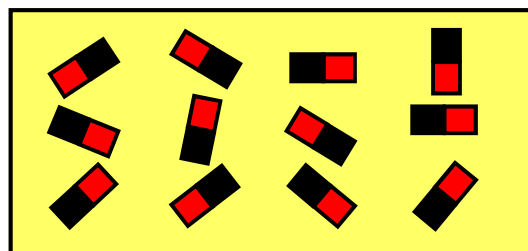


# 1.7 常见的铁磁材料及其特性

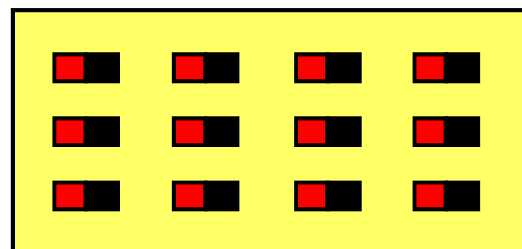
## 2. 铁磁物质的磁化

1) **概念**：将铁磁物质放入磁场后，磁场会显著增强。铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性，这一现象称为铁磁物质的磁化。

2) **磁化机理**：铁磁物质内部有许多称为磁畴的天然磁化区，在未放入磁场时，磁畴的排列杂乱无章，其磁效应相互抵消对外不呈现磁性。当放入磁场后，各磁畴沿外磁场方向转动而趋向一致，形成一附加磁场叠加在外磁场上。



磁畴（未磁化）

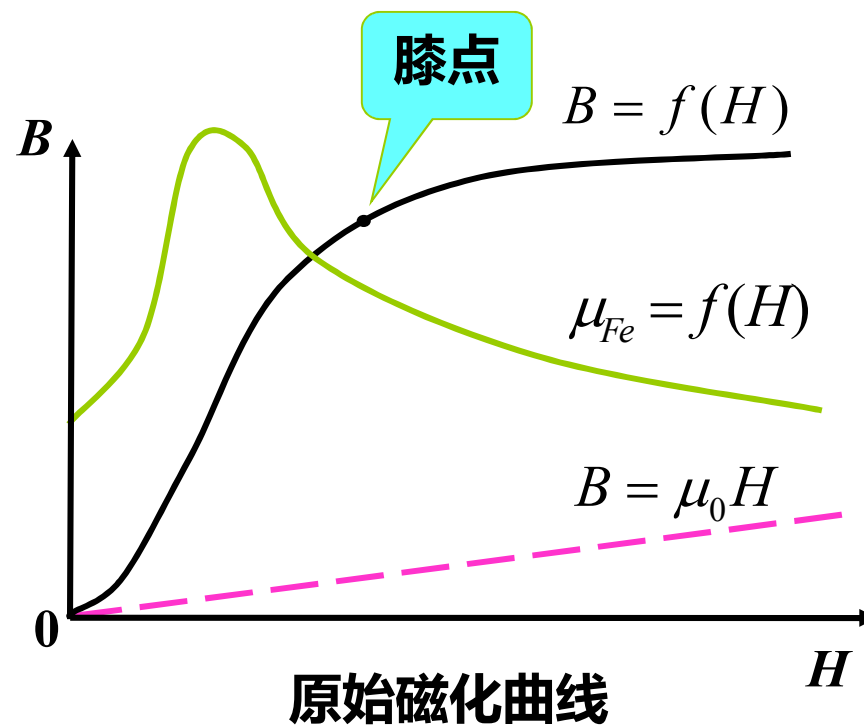


磁畴（磁化）

## 1.7 常见的铁磁材料及其特性

3. 原始磁化曲线：将一块尚未磁化的铁磁物质进行磁化，当磁场强度 $H$ 由零逐渐增大时，磁通密度 $B$ 将随之逐渐增大，曲线 $B=f(H)$ 称为原始磁化曲线。

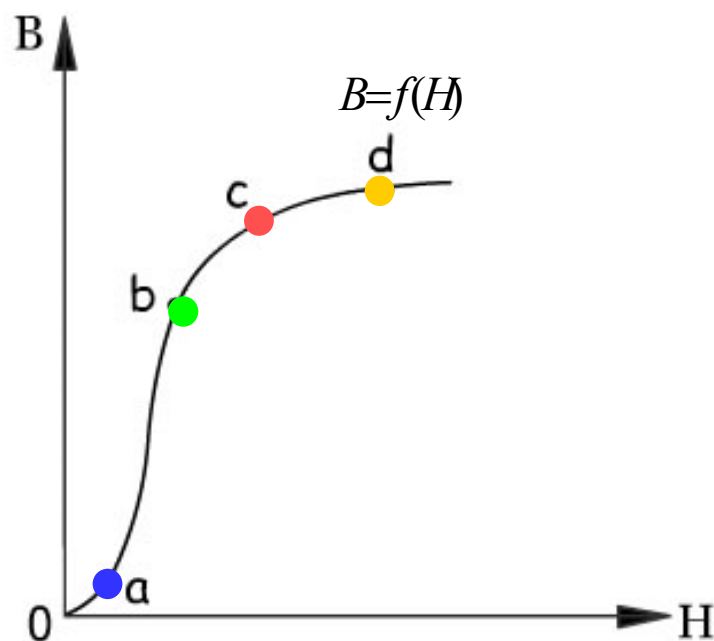
• 磁饱和现象：对铁磁材料进行磁化时，当外磁场强度增加到一定程度后，随 $H$ 的增加， $B$ 的增加逐渐变慢的现象。





# 1.7 常见的铁磁材料及其特性

分析磁化曲线，分四段

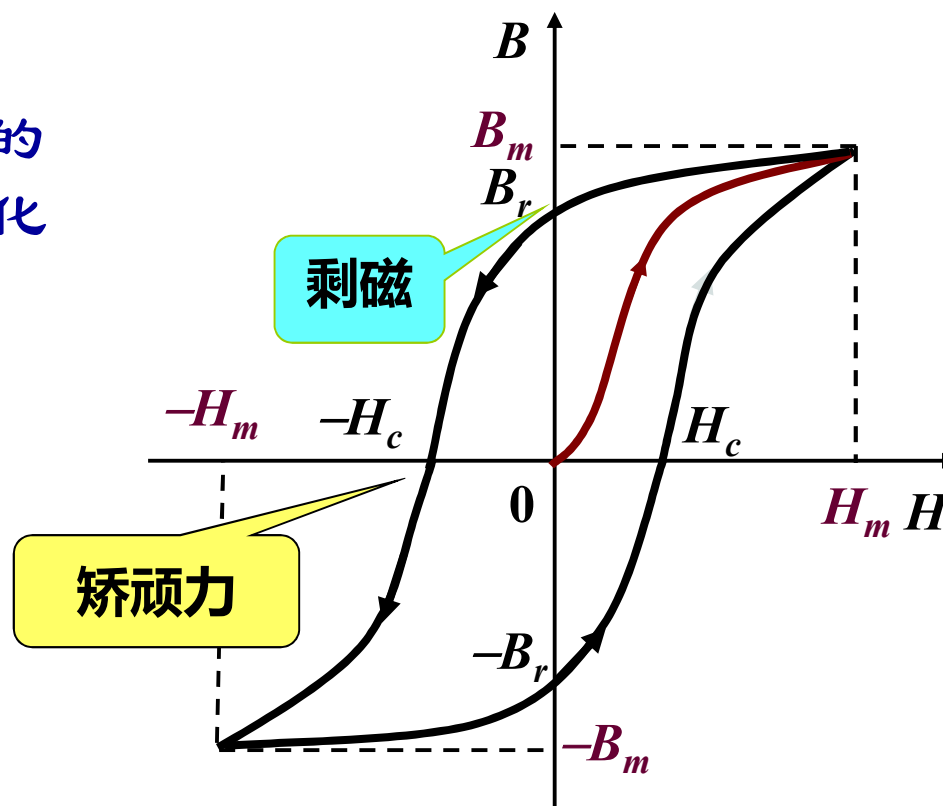


- 在oa段：当 $H$ 增大 $\rightarrow B$ 增大，但 $B$ 增大速度较慢
- 在ab段：当 $H$ 增大 $\rightarrow B$ 增大， $B$ 增大速度快；
- 在bc段： $B$ 随 $H$ 增大的速度又较慢；
- 在cd段：为磁饱和区（又呈直线段）。其中**拐弯点b称为膝点**；**c点为饱和点**。
- 过了饱和点c，铁磁材料的磁导率趋近  $\mu_0$ 。

## 1.7 常见的铁磁材料及其特性

4. 磁滞回线：对铁磁材料进行周期性磁化时所得到的磁化曲线是一条具有单方向性的闭合曲线，称为磁滞回线。

• 磁滞：在铁磁材料的磁化过程中， $B$ 的变化总是滞后于 $H$ 的变化，这种现象称为磁滞。



铁磁材料的磁滞回线

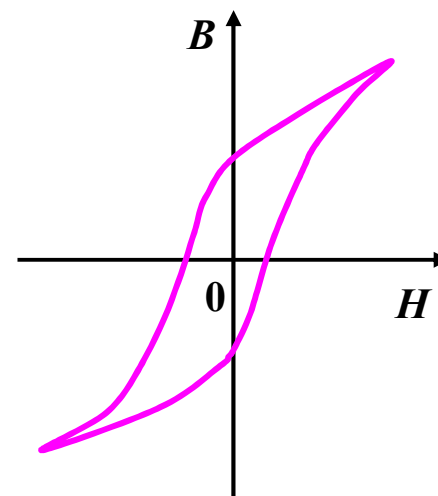
# 1.7 常见的铁磁材料及其特性

## 5. 铁磁材料的分类

### 1) 软磁材料

磁滞回线窄、剩磁 $B_r$ 和矫顽力 $H_c$ 小。

- 铸铁、铸钢、硅钢片、坡莫合金等。
- 磁导率较高, 用于制造电机和变压器的铁心。

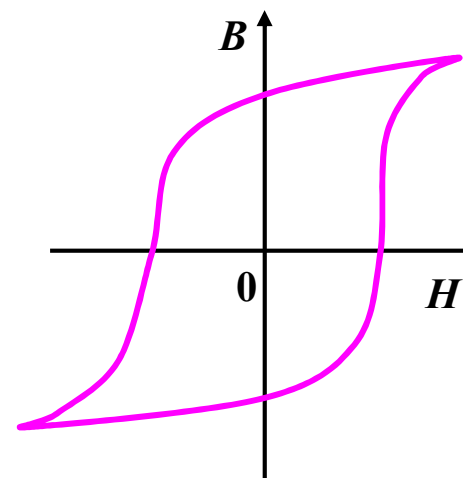


软磁材料的磁滞回线

### 2) 硬磁材料

磁滞回线宽、剩磁 $B_r$ 和矫顽力 $H_c$ 大。

- 铝镍钴、稀土钴、钕铁硼等。
- 剩磁 $B_r$ 大, 可以用于制造永久磁铁。

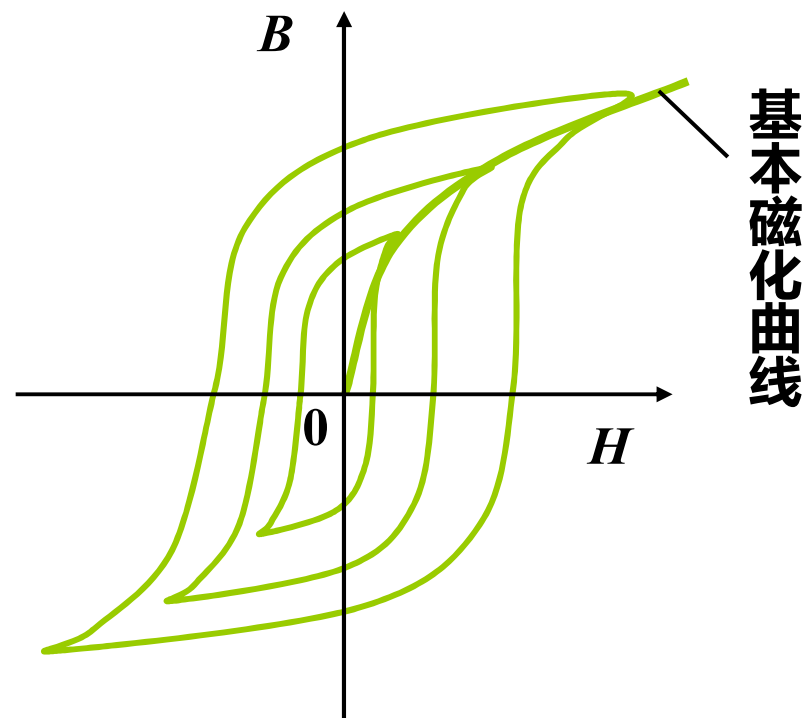


硬磁材料的磁滞回线

## 1.7 常见的铁磁材料及其特性

### 6. 基本磁化曲线

对同一铁磁材料，选择不同的 $H_m$ 进行反复磁化，可得一系列大小不同的磁滞回线，将各磁滞回线在第一象限内的顶点联接起来得到的曲线称为**基本磁化曲线**。



# 1.7 常见的铁磁材料及其特性

## 7. 磁滞损耗与涡流损耗

### 1) 磁滞损耗

铁磁材料置于交变磁场中时，被反复交变磁化，磁畴来回翻转，相互间不停地摩擦消耗能量，产生磁滞损耗。

磁滞损耗与磁滞回线包围的面积、磁通交变频率 $f$ 、铁磁材料体积 $V$ 成正比。

$$p_h = fV \int HdB$$

磁滞回线包围的面积与 $B_m$ 的 $n$ 次方成正比，故有

$$p_h = C_h f B_m^n V$$

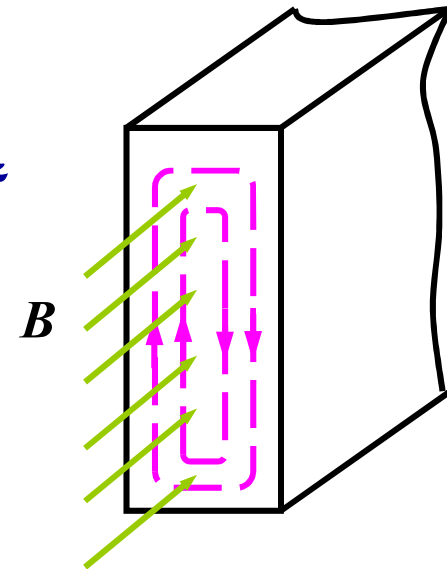
式中， $C_h$ —磁滞损耗系数，取决于材料性质；对一般电工硅钢片， $n=1.6\sim 2.3$ 。

# 1.7 常见的铁磁材料及其特性

## 7. 磁滞损耗与涡流损耗

### 2) 涡流损耗

当铁心内的磁通交变时，铁心中将产生感应电动势，该电动势在铁心内形成漩涡状电流，称为**涡流**。涡流在铁心中引起的损耗，称为**涡流损耗**。



- 一块体积为  $V$  的铁磁材料的涡流损耗  $p_e$  为

$$p_e = \frac{\pi^2 d^2 f^2 B_m^2 V}{6\rho} = C_e d^2 f^2 B_m^2 V$$

式中， $C_e$ —涡流损耗系数，取决于材料的电阻率； $d$ —钢片厚度。



## 1.7 常见的铁磁材料及其特性

### 3) 铁心损耗

- 当铁心中的磁通交变时，同时会产生磁滞损耗与涡流损耗。这两部分损耗称为铁心损耗。
- 对于一般的电工钢片，在正常的工作磁通密度范围内 ( $1\text{T} < B_m < 1.8\text{T}$ )，有

$$p_{Fe} \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G$$

式中， $C_{Fe}$ —铁心的损耗系数；

$G$ —铁心重量。

# 本章结束！

