



浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

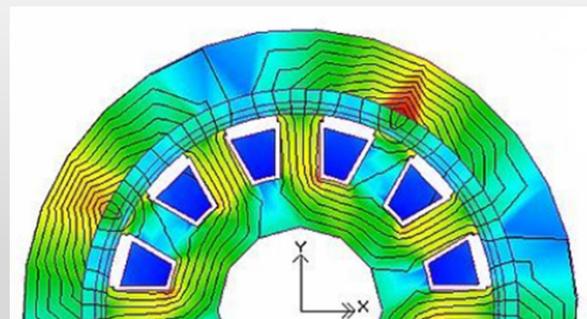
2

电机理论中常用的基本定律/电机中铁磁材料的特性

磁场、磁路

电在电机中以**路**的形式出现

磁在电机中以**场**的形式出现



磁场是电流、运动电荷、磁体或变化电场周围空间里存在的一种特殊形态的物质

基本特性是对场中运动带电粒子施加力，或对场中有磁矩的粒子及物体施加转矩

磁场过于复杂，在工程计算中经常简化为**磁路**（磁力线所通过的路径）

磁动势、磁场储能

磁场是一种特殊形式的物质，磁场中能够储存能量，在磁场建立过程中，能量由外部能源转换而来。

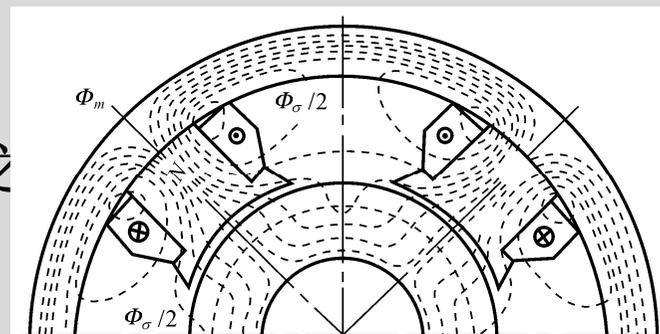
体积能量密度 $w_m = \frac{1}{2} BH$

电机通过**磁场储能**来实现机、电能量转换，磁场能量主要存储在气隙中。

磁动势 F (MMF) (Magnetic Motive Force)

磁路中磁场的源（**电励磁**或永磁），即安培-匝数之积。

$F = N \cdot i$ 单位：（安匝 ampere turns）



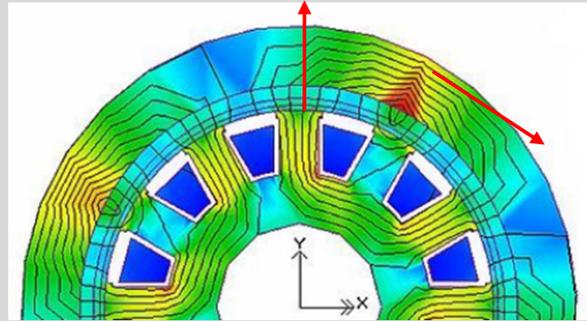
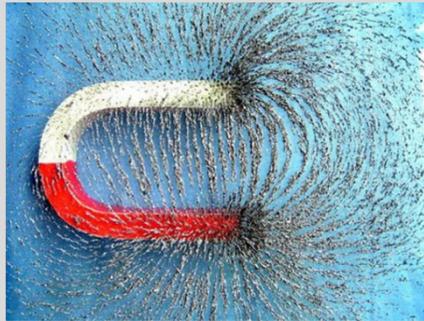
磁感应强度（磁通密度）

- B — Flux density, 矢量, 表示磁场的大小和方向

Teslas (T) or Gauss (Gs) : $1T = 10000 Gs$

用假想的曲线来表示磁场的分布, 称为**磁力线**

- 用磁力线上每点的切线方向规定 B 的方向
- 用磁力线的疏密程度表示 B 的大小



气隙磁密

齿部磁密

轭部磁密

磁通与磁链

- Φ —— Flux, 标量

通过磁场中某一面积的磁力线数称为通过该面积的**磁通量**简称磁通, 单位Wb

$$\Phi = BS \cos \theta$$

磁通连续
性定理

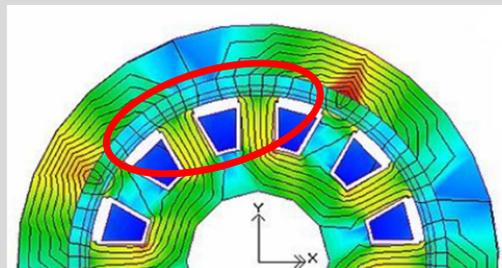
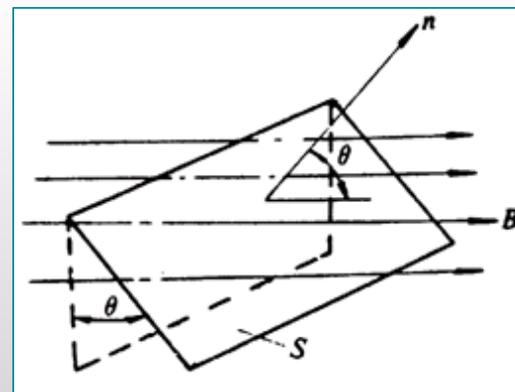
$$\Phi = \int_s d\Phi = \int_s B \cos \theta ds$$

$$\oint_s B \cos \theta dS = 0$$

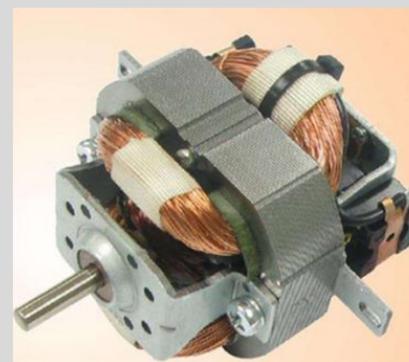
- ψ —— Flux linkage, 标量

导电线圈或电流回路所匝链的**磁通量**, 单位Wb

$$\psi = N\Phi$$



一极下的磁通



主讲: 浙江大学卢琴芬

- ψ — Flux linkage

为恒值时，磁链与流过线圈的电流之间有正比关系

$$\psi = Li$$

- L — Inductance (H), 单位电流所产生的磁链

电感与线圈匝数的平方成正比，和磁场介质的磁导亦成正比关系，而和线圈所加的电压、电流或频率无关。

- 电机的电感（电抗）与电机磁路的饱和有关
- 电机的电感(电抗)与电机的电、磁结构有关
- 对应不同的磁通需引用多种不同的电感

- ◆ 自感 self inductance
- ◆ 互感 mutual inductance
- ◆ 漏电感 leak inductance

正弦交流电 $\frac{U}{I} = \omega L = X_L$

磁路磁导率相关

磁场强度、磁导率

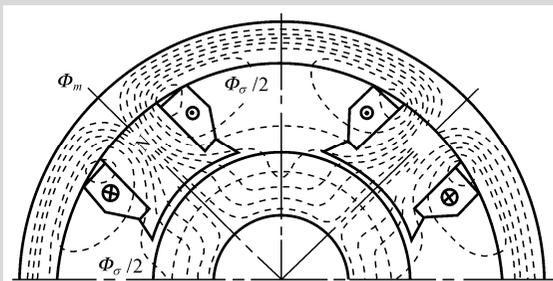
- H — Magnetic intensity, 矢量, A/m 或 Oe (奥斯特) $1\text{Oe} = 79.6\text{ A/m}$
- μ — Magnetic permeability, H/m, 由材料性质所决定

$$B = \mu H$$

在电机中使用的材料, 按照其**导磁性能**可分为:

- **非铁磁物质**如空气、铜、铝和绝缘材料等, 近似等于真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$
- **铁磁物质**如铁、镍、钴及其合金, 磁导率远大于真空磁导率达数千甚至上万倍。

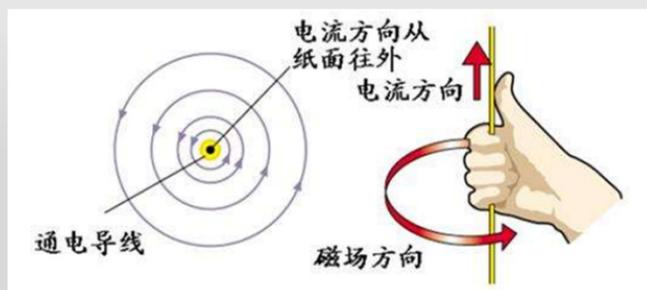
通常以相对磁导率 μ_r 表示铁磁物质的磁导率比真空磁导率增大的倍数



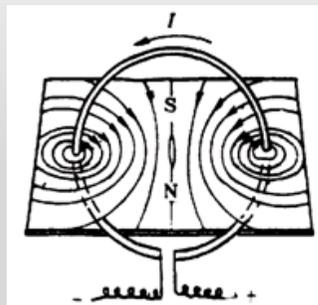
电机采用铁磁材料**导向**和**集束**磁场, 大部分磁通被**限制**在铁心中, 称为**主磁通**, 只有很小的一部分磁通“**泄漏**”到周围空间中, 称为**漏磁通**。

主讲: 浙江大学卢琴芬

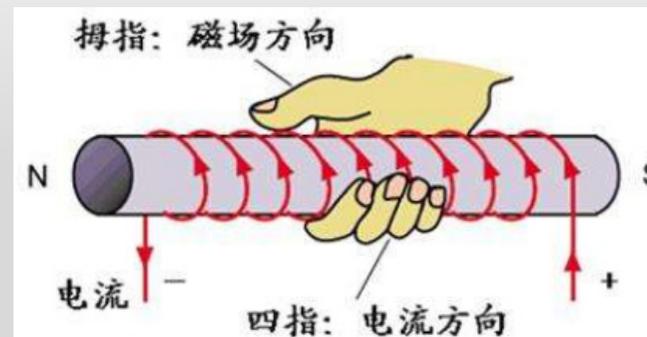
磁场方向与性质



长导线



环形导线



螺线管

- (1) 磁感应线的回转方向和电流方向之间的关系遵守**右手螺旋法则** (电励磁)
- (2) 磁场中的磁感应线不相交，每点的磁感应强度的方向确定唯一
- (3) 载流导线周围的磁力线都是围绕电流的闭合曲线，没有起点和终点

基本电磁定律

(1) 全电流定律

(2) 电磁感应定律

(3) 电磁力定律

(1)全电流定律 (电生磁的本质)

- 磁场强度矢量 H 沿任一闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径的限定面积中流过电流的代数和。且积分回路的绕行方向和产生该磁场的电流方向符合右手螺旋定则

$$\oint_l Hdl = \sum_{k=1}^n I_k$$

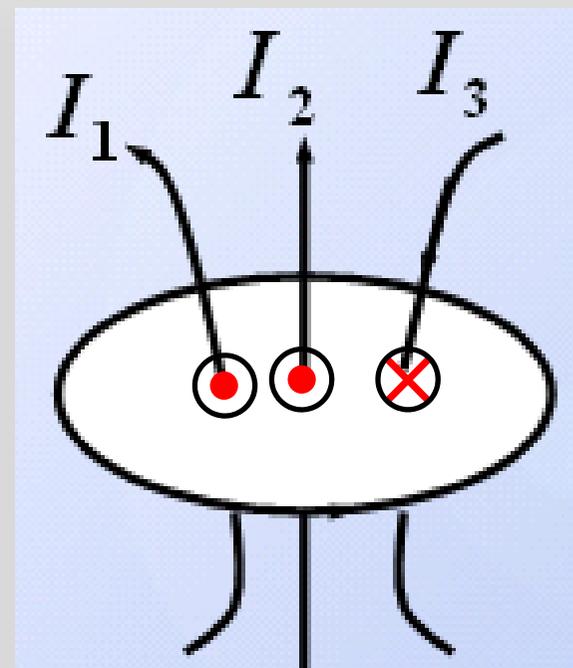
磁压降: H 沿一条路径 l 的线积分

$$U = \int_l Hdl$$

磁动势: 磁场回路所匝链的电流, F , 单位安匝

$$\sum U_i = \sum I_k = \sum F$$

沿着磁场任一闭合回路, 其总磁压等于总磁动势

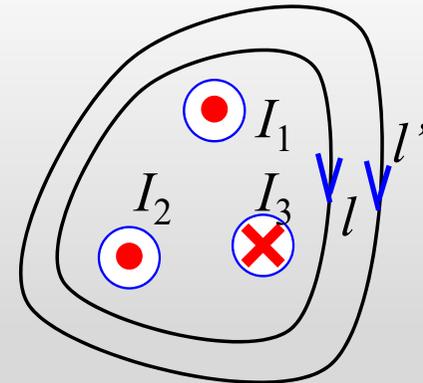
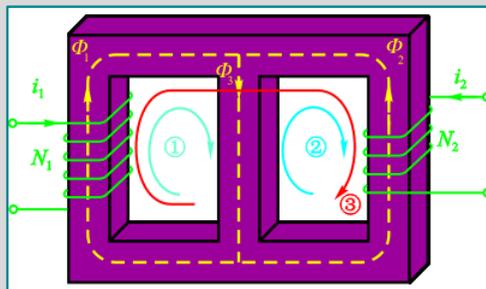


(1) 全电流定律 (电生磁的本质)

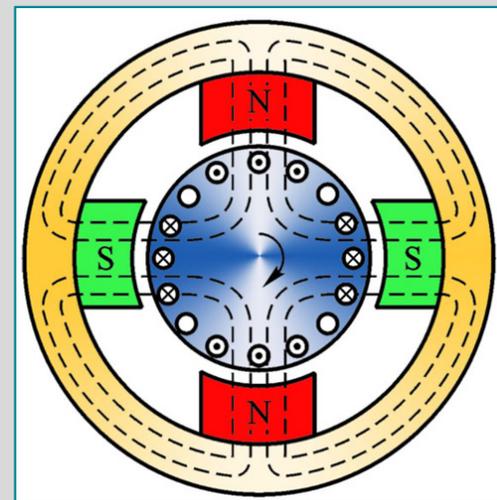
定义式: $\oint_l H \cdot dl = \sum I$

电机与变压器的分析中, 分段考虑, 把 H 、导磁材料及导磁面积 S 相同的作为一段。

$$\sum H_k l_k = \sum I = NI = F$$



$$\sum I = -I_1 - I_2 + I_3$$



主讲: 浙江大学卢琴芬

(1) 全电流定律 (电生磁的本质)

例1 $\phi \rightarrow F = NI$

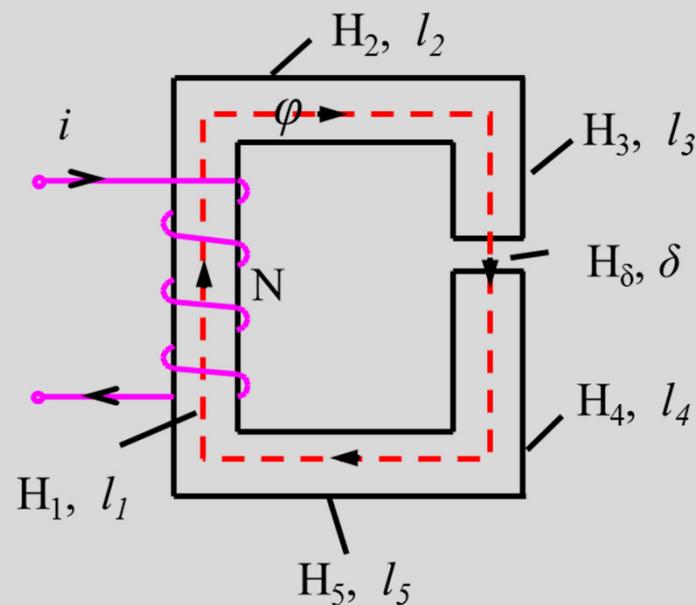
气隙 $\phi \rightarrow B_\delta = \frac{\phi}{S} \rightarrow H_\delta = \frac{B}{\mu_0} \rightarrow H_\delta \delta$

铁芯 $\phi \rightarrow B_k = \frac{\phi}{S_k} \rightarrow B-H \rightarrow H_k l_k$

$$H_\delta \delta + \sum H_k l_k = NI$$

磁阻

$$H_k l_k = \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{\phi}{S_k} l_k$$
$$= \phi \cdot \frac{l_k}{\mu_k \cdot S_k} = \phi R_{mk}$$



主讲：浙江大学卢琴芬

磁路基本定律——基尔霍夫定律

假设： 磁通完全在导磁体内部通过
铁芯柱截面上**B**为均匀分布

- 磁路的基尔霍夫第一定律

- 流入磁路节点的磁通的代数和应等于零

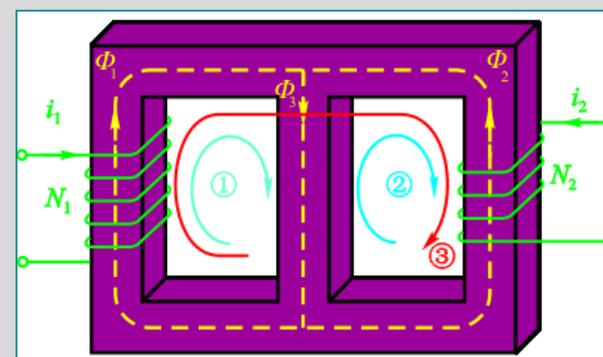
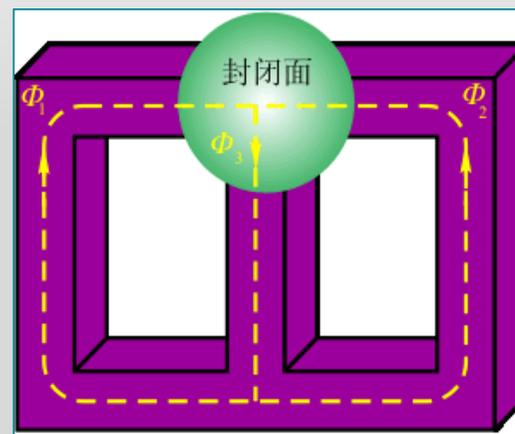
$$\sum \Phi = 0$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_3$$

- 磁路的基尔霍夫第二定律

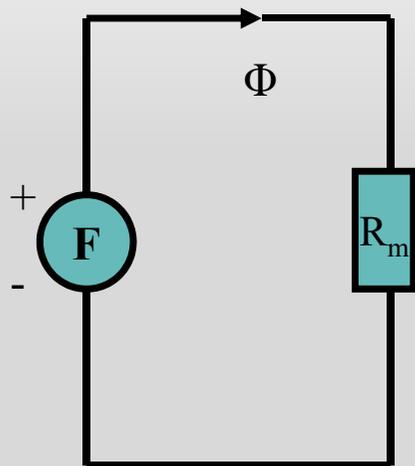
- 沿着任一闭合回路，其总磁压等于总磁势

$$\sum F = \sum Ni = \sum Hl = \sum \Phi R_m$$

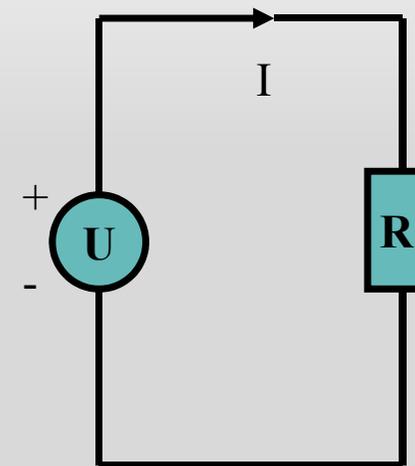


主讲：浙江大学卢琴芬

(1) 磁路与电路对比



磁路	电路
磁通 Φ	电流 i
磁动势 F	电动势 e
磁阻 R_m	电阻 R
磁压降 Hl	电压降 u
磁导 Δ_m	电导 G
欧姆定律 $\Phi = F/R_m$	欧姆定律 $i = u/R$
基氏第一定律 $\Sigma\Phi = 0$	基氏第一定律 $\Sigma i = 0$
基氏第二定律 $\Sigma F = \Sigma Hl = \Sigma\Phi R_m$	基氏第二定律 $\Sigma e = \Sigma u = \Sigma iR$



铁磁材料 $\mu \neq const$ $R_m \neq const$ 磁路非线性

非铁磁材料及气隙 $\mu_0 = const$ $R_{m\delta} = const$ 磁路线性

(2) 电磁感应定律

当处在磁场中的线圈交链的磁链(Flux Linkage) $\Psi = N \cdot \Phi$ 发生变化时，在线圈中就会产生感应电动势。

$$\psi = N\phi \rightarrow \Delta\psi \rightarrow e$$

定义式：

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

e 与 ϕ 的参考方向符合右手螺旋定制

大小： 等于磁链的变化率。

方向： 由楞次定律决定。即感应电动势的实际方向总是企图在线圈内产生感应电流，感应电流所建立的磁通阻止线圈中原磁通的变化。

磁场发生变化，而导体与磁场位置不发生变化：**变压器电动势**

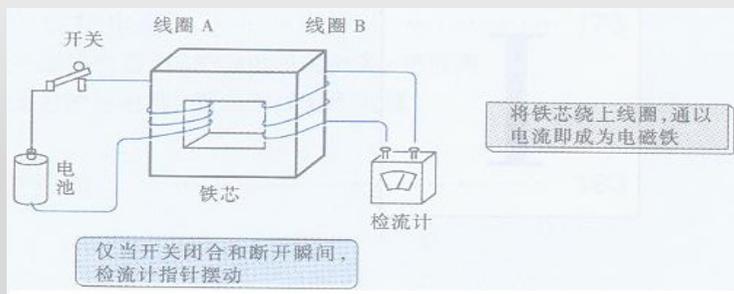
磁场不变，而导体或磁场位置发生变化：**旋转电动势**

(2) 电磁感应定律

(1) 变压器电动势

$$\Psi = N \cdot \Phi$$

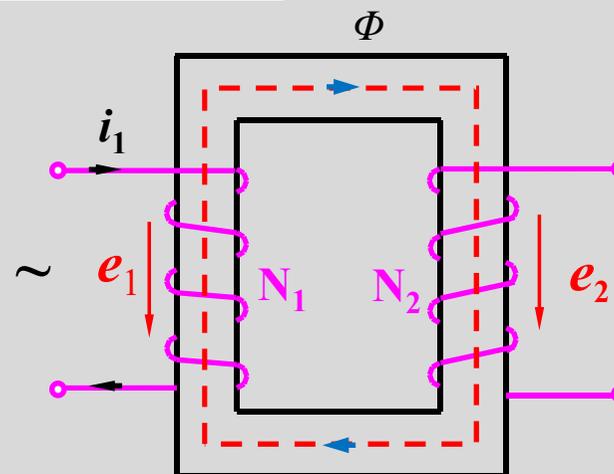
直流磁场



交变磁场

i_1 交变 \rightarrow Φ 交变

$$\rightarrow \begin{cases} e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ (自感电势)} \\ e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \text{ (互感电势)} \end{cases}$$

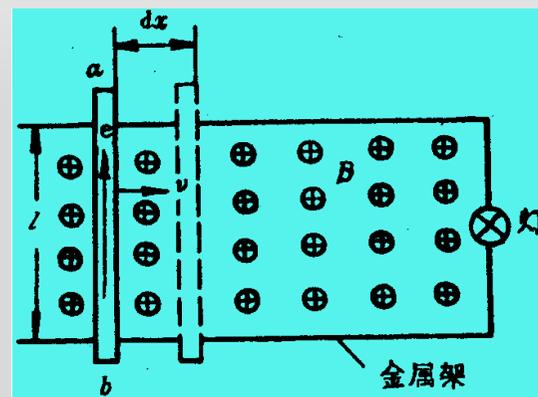
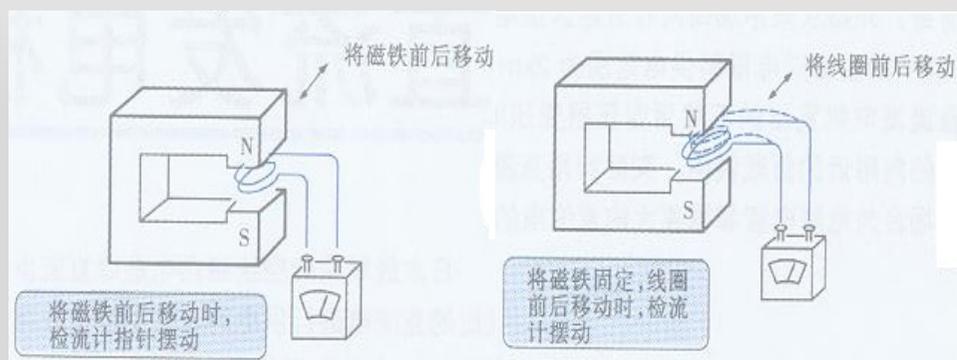


e 与 ϕ 的参考方向符合右手螺旋

主讲：浙江大学卢琴芬

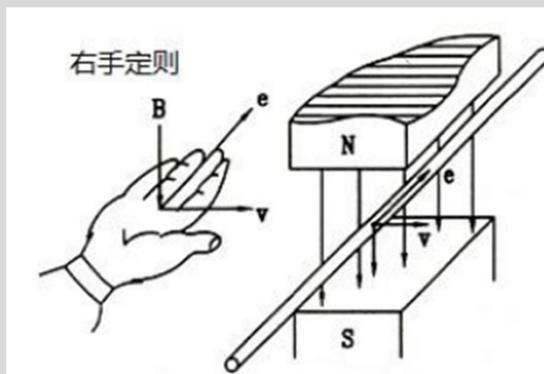
(2) 旋转电动势（速率电动势）

导体与磁场相对运动，导体（线圈）切割磁力线产生感应电动势



$$e = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -\frac{-Bl dx}{dt} = Bl \frac{dx}{dt} = Blv$$

方向：右手定则



主讲：浙江大学卢琴芬

(3) 电磁力定律

载流导体在磁场中会受到的作用力（**电磁力**）

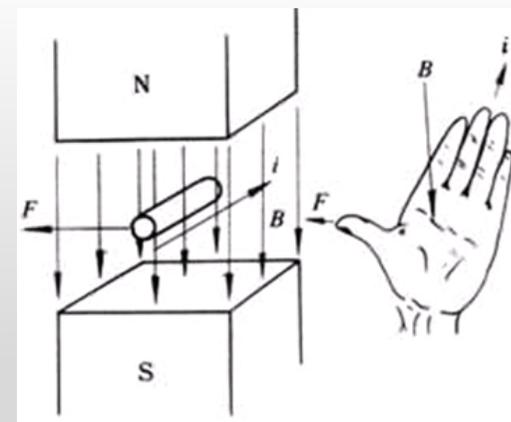
若磁场与导体相互垂直，则作用在导体上的电磁力：

大小： $f = BIl$

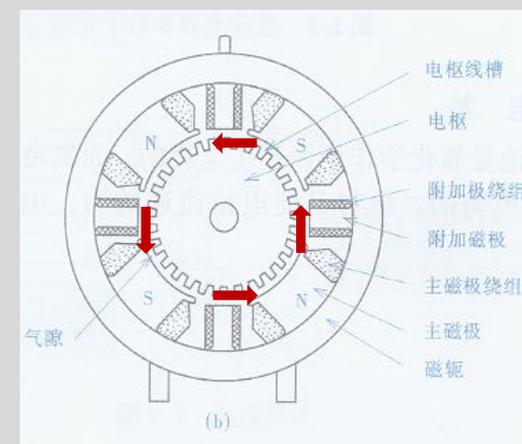
方向：左手定则

电磁转矩—electromagnetic torque

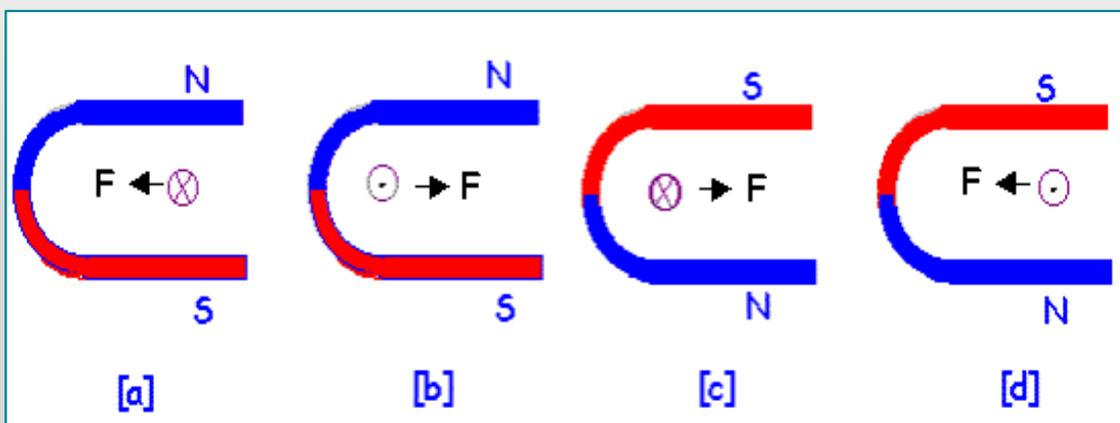
导体上所受的电磁力，乘以从导体至旋转轴之间的距离



Electromagnetic force



主讲：浙江大学卢琴芬



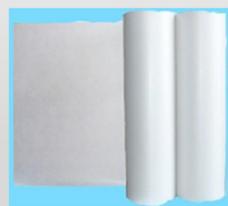
若改变磁场方向、电流方向中的一个，则受力方向随之改变；若磁场方向、电流方向同时变化，则受力方向不变化。



当导体中电流方向与磁场方向平行时，导体不受力的作用。

铁磁材料的特性

电机的材料



— 导电材料、导磁材料、绝缘材料、结构材料

绝缘漆、薄膜、纤维编织带、环氧树脂、云母片等

绝缘等级：

A	E	B	F	H	C
↓	↓	↓	↓	↓	↓
105°	120°	130°	155°	180°	>180°

$$\phi R = F = NI$$

$$R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k \cdot S_k}$$

导磁性能良好的铁磁材料

铁、钴、镍及其合金（**硅钢片**）



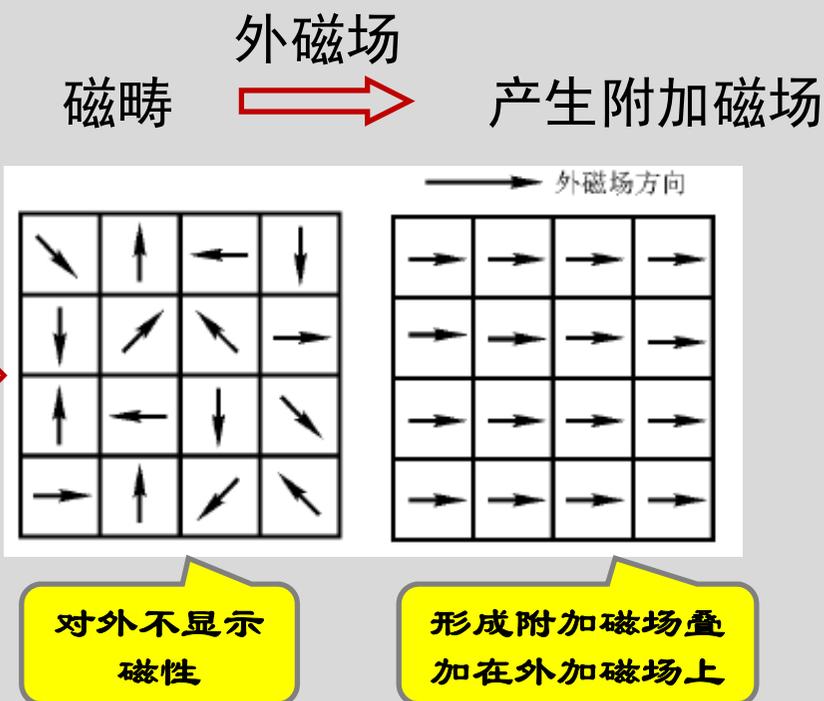
主讲：浙江大学卢琴芬

铁磁材料的特性

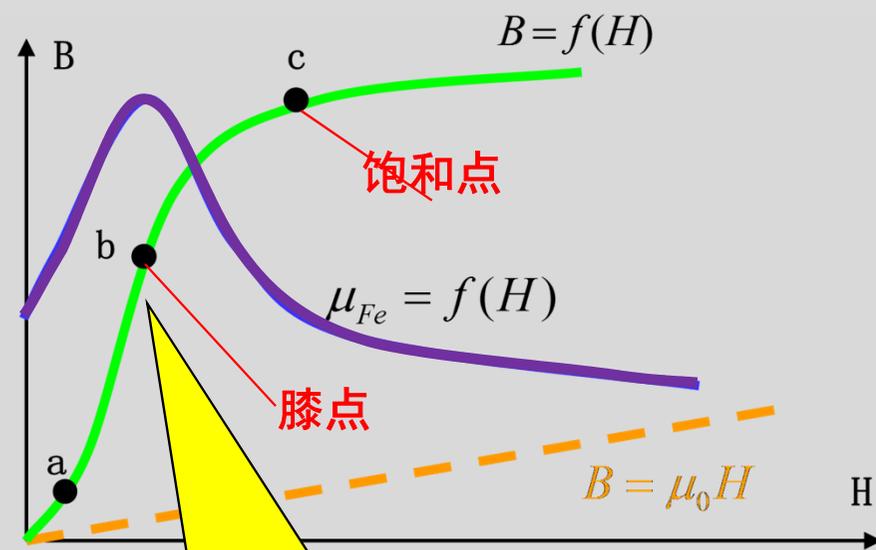
- 良好的导电性

- 高导磁性能

$$\mu_{Fe} \approx (2000 \sim 6000)\mu_0$$



非线性磁化曲线

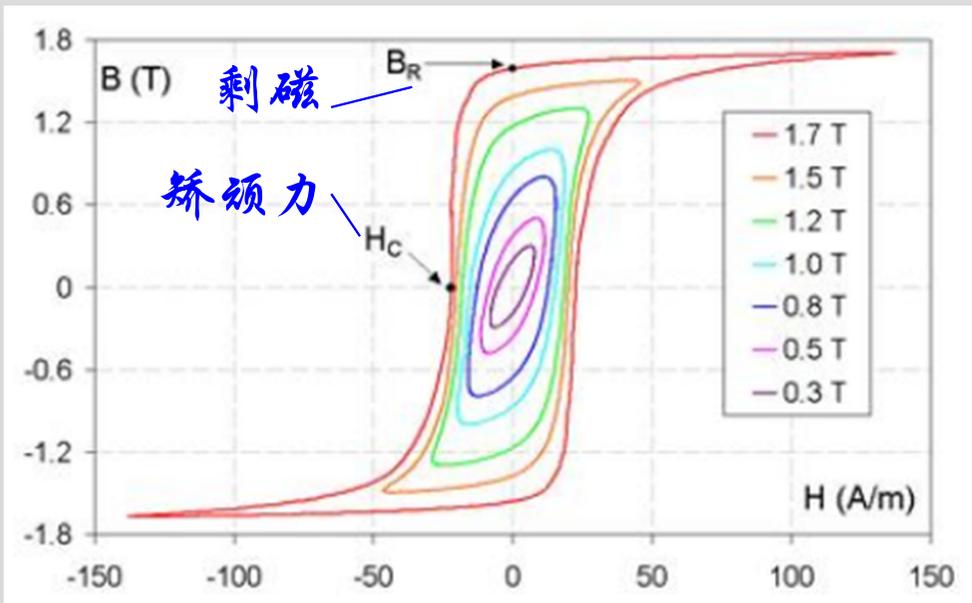


常把铁心工作点设计在“膝点”附近

主讲：浙江大学卢琴芬

磁滞现象

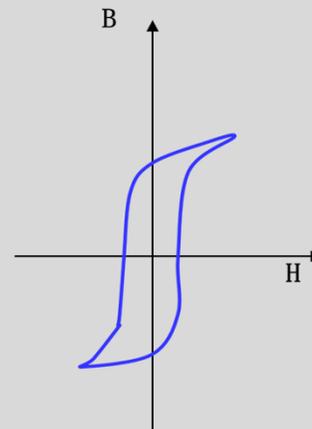
上升磁化曲线与下降磁化曲线不重合，下降时 B 的变化总是滞后于 H 的变化，这种现象称为“磁滞现象”，呈现磁滞现象的 B - H 闭合曲线称为“磁滞回线”。



B_r : 没有外加磁场下磁感应强度

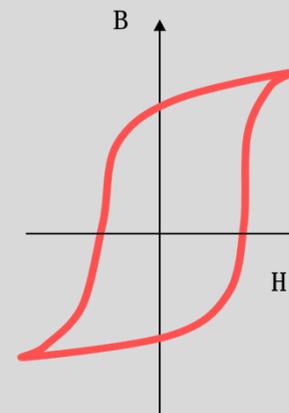
H_c : 抗退磁能力。

- 软磁材料—磁滞回线窄， H_c 及 B_r 小
- 硬磁材料—磁滞回线宽， H_c 及 B_r 大



软磁材料的磁滞曲线

普通铁磁材料



硬磁材料的磁滞曲线

永磁材料： H_c 及 B_r 大，难退磁

主讲：浙江大学卢琴芬

铁耗

• 磁滞损耗

B 交变时

$$p_n \propto f B_m^a$$

$$B=1.0\sim 1.6 \text{ 时, } a=2$$



• 铁耗 = 磁滞损耗 + 涡流损耗

$$P_{Fe} = P_n + P_w$$

单位重量

$$P_{Fe} \propto f^\beta B_m^2$$

$$\beta = 1.2 \sim 1.6$$

• 涡流损耗

B 变化 \Rightarrow e \Rightarrow i

B 交变时, 产生损耗, P_w

$$p_w \propto f^2 B_m^2 d^2 / r_w$$

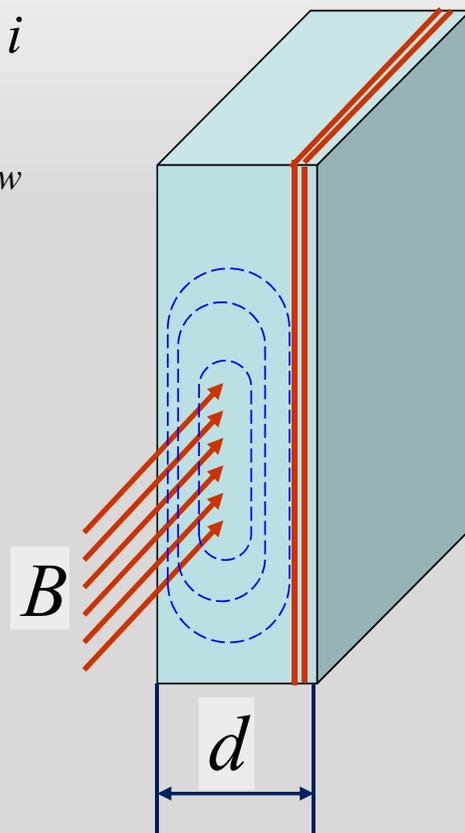
$$P_w \downarrow \quad d \downarrow \quad r_w \uparrow$$

硅钢片

0.35mm \ 0.5mm

硅钢片涂绝缘漆, 阻断涡流

加4%硅



主讲: 浙江大学卢琴芬



浙江大学电气工程学院

T H A N K S

主讲：浙江大学卢琴芬