



自动控制实践I

基础知识

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

目 录

1 基本磁常识

1.1 基本磁常识

1.2 磁路

1.3 电磁感应定律

1.4 电磁力与电磁转矩

1.5 磁性材料

2 基本电常识

2.1 线路和电缆

2.2 低压电器



1.1 基本磁常识

场：可用数和(或)量表示的某一现象的空间分布。

磁场：场的一种，由磁场强度 H 和磁通密度 B 这两个量组成的场。



公元1世纪初，东汉学者王充在《论衡》中记载“司南之杓，投之于地，其柢指南”



中国人很早就利用指南针在航海中指示方向

1.1 基本磁常识

○ 磁通密度 \mathbf{B}

表示磁场强弱的物理量(简称**磁密**，或称**磁感应强度**)，一般记为 **\mathbf{B}** 。单位：**T**特斯拉。

引入思路：与电场强度类似

力的大小=场源*场强

电场力：
$$\dot{\mathbf{F}}_e = q\dot{\mathbf{E}}$$

磁场力：
$$\dot{\mathbf{F}} = q\dot{\mathbf{v}} \times \dot{\mathbf{B}}$$

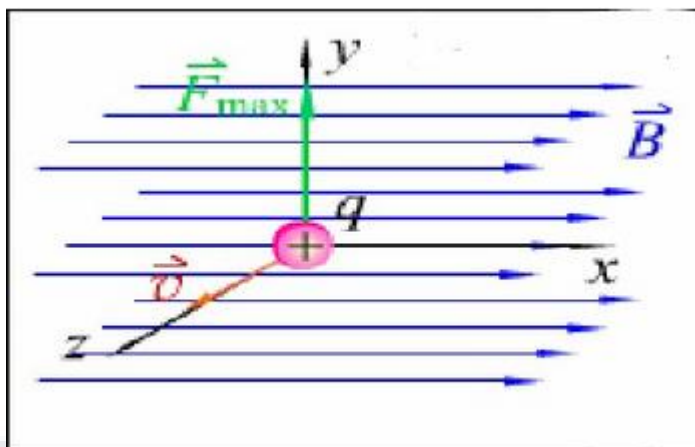
1.1 基本磁常识

磁场力: $\dot{\mathbf{F}} = q\dot{\mathbf{v}} \times \dot{\mathbf{B}}$

磁感应强度大小:

$$\mathbf{r} \dot{\mathbf{B}} = \frac{\dot{\mathbf{F}}}{q\dot{\mathbf{v}}}$$

电荷的电量;
电荷的速度;
电荷的受力;
速度与磁场的夹角。



方向: 将 $\dot{\mathbf{F}} \times \dot{\mathbf{v}}$ 在磁场中的方向定义为该点的磁感应强度方向。

1.1 基本磁常识

地球两级磁场:	$6 \times 10^{-4} \text{T}$
地球赤道磁场:	$3 \times 10^{-4} \text{T}$
永久磁铁磁场:	10^{-2}T
电机气隙磁场:	$0.4 \sim 0.8 \text{T}$
电机铁心磁场:	$1 \sim 1.8 \text{T}$
大型电磁铁磁场:	2T
超导材料磁场:	40T
某些原子核附近磁场:	10^4T

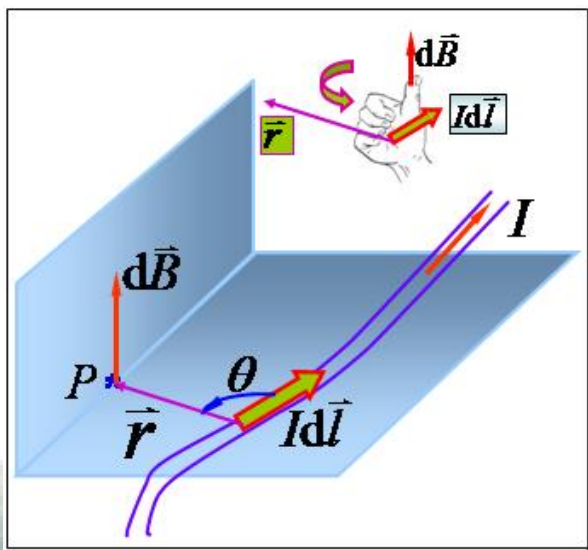
磁感应强度（磁密）是描述磁场强弱物理量。按其定义应称为“磁场强度”，但由于历史原因，该名称已用于**H**矢量。

1.1 基本磁常识

- 毕奥-萨伐尔定律：电流元 Idl 在 P 点产生的磁密 $d\mathbf{B}$ 的大小：
大小： 矢量表示：

$$dB = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}$$

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{e}_r}{r^2}$$



r 是电流元 Idl 到点 P 的距离
 α 为 Idl 与 r 之间小于 180° 的夹角
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 是真空磁导率
 μ_r 是相对磁导率

1.1 基本磁常识

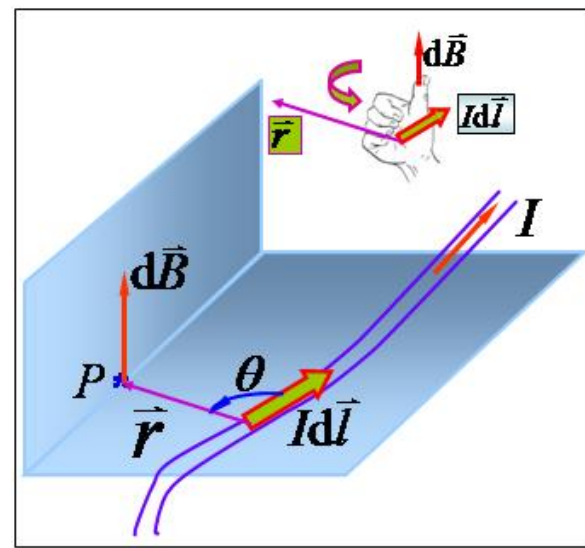
磁密满足叠加原理：

任意载流导线在点P处的磁密为

$$\begin{aligned}\dot{\vec{B}} &= \int d\dot{\vec{B}} \\ &= \int \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\vec{l} \times \vec{e}_r}{r^2}\end{aligned}$$

多根载流导线在点P处的磁密为

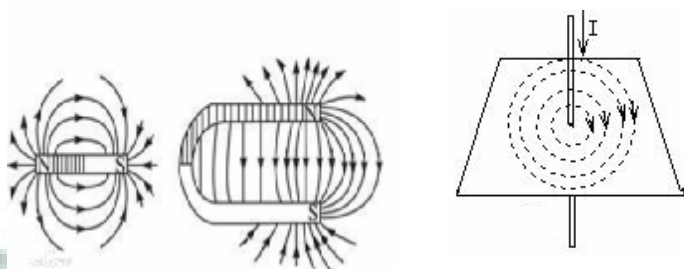
$$\dot{\vec{B}}_{\text{总}} = \sum \dot{\vec{B}}_i$$



1.1 基本磁常识

○ 磁力线：人们假象的曲线，以形象描述磁场分布。

磁力线特点：

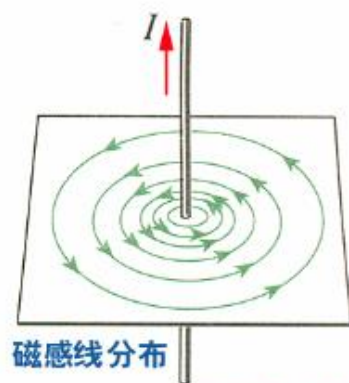


1. 磁体的磁力线由N极到S极(N出S入)
2. 磁力线的方向就是小磁针静止后北极所指的方向(即磁力线与磁场方向相同)
3. 磁力线的疏密表示磁场的强弱，越密表示该点磁场越强。
4. 在空间每一点只有一个磁场方向，所以磁力线不相交。
5. 磁力线是闭合的，每一条闭合的磁力线的回转方向和该闭合磁力线所包围的电流方向符合右手螺旋法则。

1.1 基本磁常识

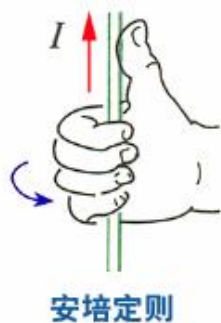
磁力线特点：

5. 磁力线是闭合的，每一条闭合的磁力线的回转方向和该闭合磁力线所包围的电流方向符合右手螺旋法则。

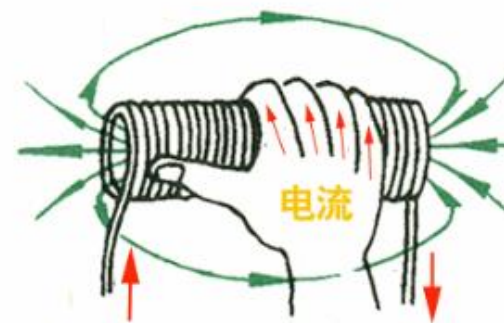
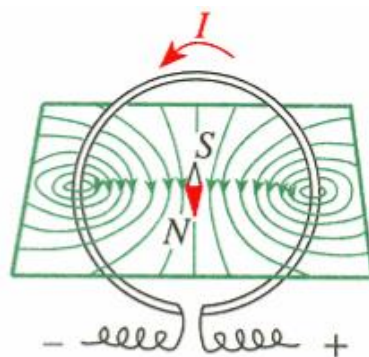


磁感线分布

直线电流的磁场



安培定则



1.1 基本磁常识

○ 磁通 Φ

n 定义:

通过磁场中某一曲面的磁感应线数叫做通过此曲面的磁通量

n 计算式:

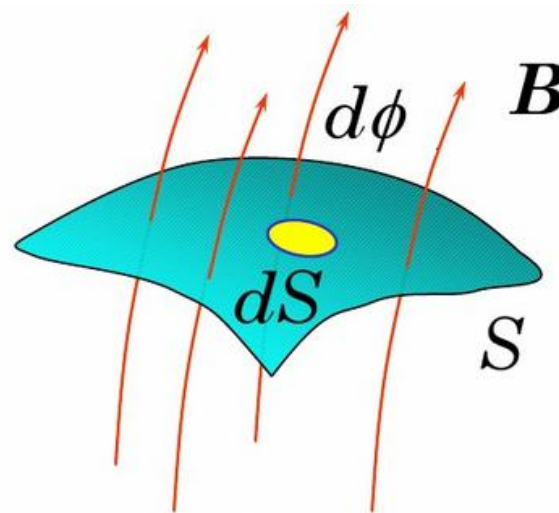
$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B \cos \theta dS$$

θ 为 dS 的法线方向与该点处的磁密向量之间的夹角。

n 单位:

Wb 韦伯

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$$



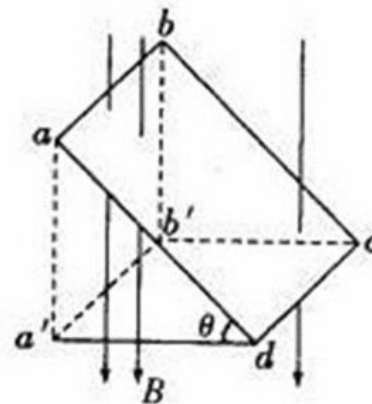
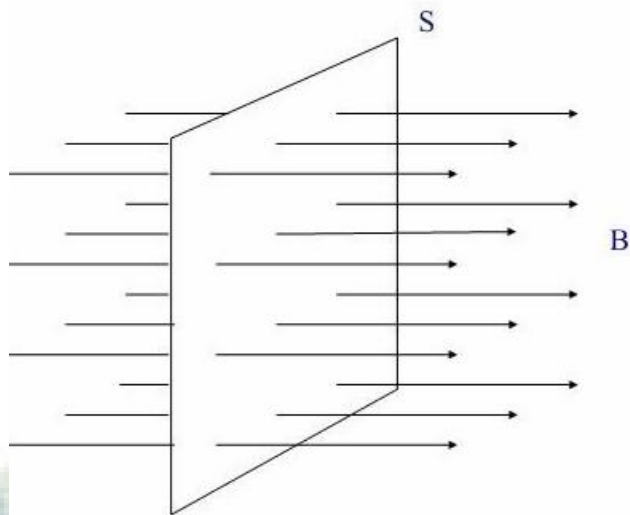
1.1 基本磁常识

均匀磁场中的磁通量:

$$\Phi = BS \cos q$$

面积为定值的任一平面:

$$\Phi = \Phi_m \cos q$$



1.1 基本磁常识

○ 磁场强度 H

磁场强度 H 是计算磁场时所引用的一个物理量，它是一个矢量。

在任何介质磁场中，某一点的磁感应强度 B 和同一点上介质磁导率 μ 的比值，即：

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu$$

或

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

单位： A/m 安每米

1.1 基本磁常识

○ 磁导率 μ

n 定义:

用来表示物质导磁能力大小的物理量称为导磁系数或磁导率。

n 计算式:

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

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

空气的磁导率: 近似等于真空磁导率。

相对磁导率: $\mu_r = \mu / \mu_0$ (无单位)

n 单位:

H/m 亨/米

n 说明:

在工程中, 除了铁磁物质外, 其余物质的磁导率均认为等于真空磁导率; 铁磁物质的磁导率不仅比真空磁导率大很多, 而且与磁场强度和历史状态有关, 它不是一个常数。

1.1 基本磁常识

○ 磁感应强度B和磁场强度H的区别

磁场强度H：基于磁荷观点(类似于电荷)

1785年，库伦仿照电场的研究方法，确立了磁库伦定律

$$F = \frac{Kq_{m1}q_{m2}}{r^2}$$



$$H = \frac{F}{q_m}$$

两磁荷间的引力和斥力大小与磁荷强度的乘积成正比，与其之间的距离成反比

某点磁场强度等于单位正磁荷所受到的磁场力

然而，真正的磁荷并不存在

1.1 基本磁常识

○ 磁感应强度B和磁场强度H的区别

磁场感应强度B:

1820年，奥斯特发现了电流的磁效应。

1822年，安培假说:

(1)一切磁现象都起源于电流(或运动电荷)。

(2)一切物质的磁性都起源于构成物质的分子中存在的环形电流。

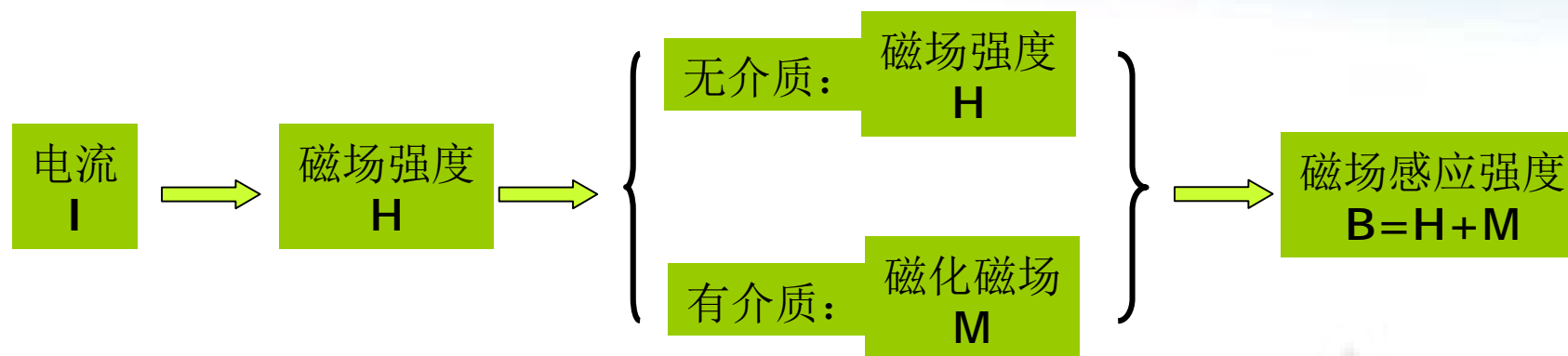
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{q\vec{v}}$$

1.1 基本磁常识

○ 磁感应强度 B 和磁场强度 H 的区别



(1) H 是电流 I 产生的磁场， B 是电流元感受到的磁场。

(2) H 是外场， B 是总场，即磁感应强度 B 应是电流产生的磁场 H 和磁介质被磁化产生的磁场 M 的矢量和。

(3)磁化磁场 M 和介质的磁导率有关。

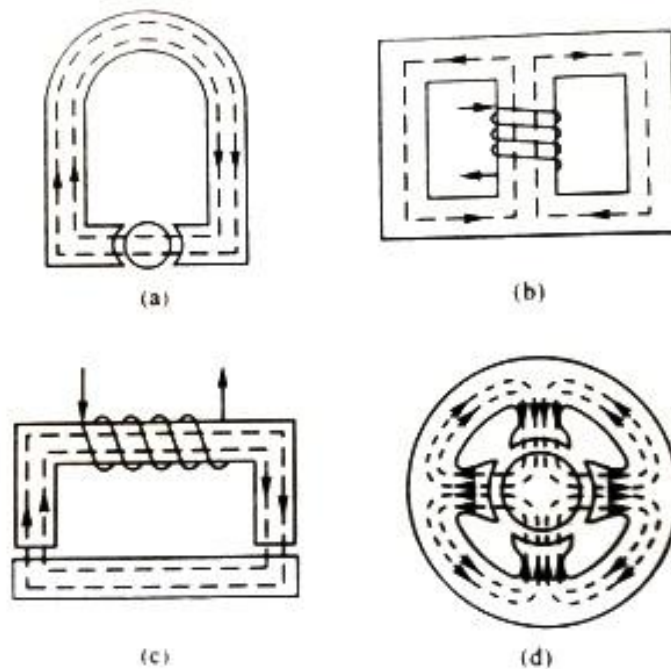


为什么电机有铁心？？？

1.2 磁路

○ 磁路

- n 概念：如同把电流流过的路径称为电路一样，磁通所通过的路径称为磁路
- n 磁路可以是铁磁物质也可以是非铁磁物质



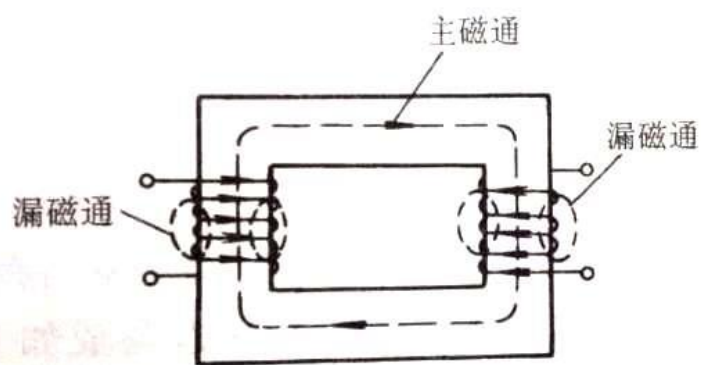
1.2 磁路

○ 磁路

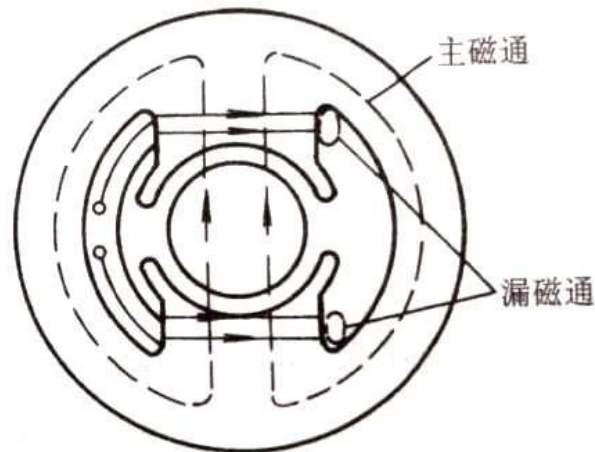
n 铁心 \rightarrow 磁导率大 \rightarrow 磁密 B 大 \rightarrow 导磁性能好 \rightarrow 绝大部分磁场在铁心中通过

n 主磁通 \rightarrow 主磁路

n 漏磁通 \rightarrow 漏磁路



a)



b)

1.2 磁路

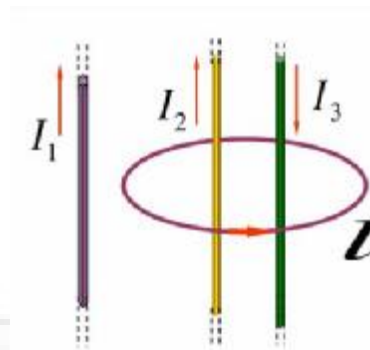
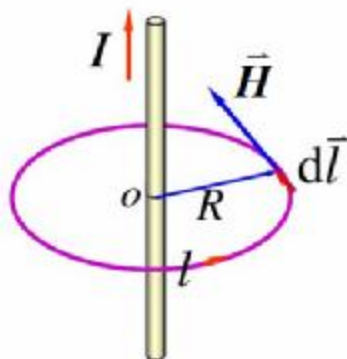
○ 安培环路定理

n 定理叙述:

在磁场中, 沿任一闭合路径 l 磁场强度向量 \vec{H} 的线积分, 等于该闭合回路所包围的各电流的代数和

n 表达式:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum I$$



1.2 磁路

○ 安培环路定理

n 说明:

(1) 电流 I 与 L 成右手螺旋时, I 为正, 反之为负;

(2) H 指环路 L 上各点的 H , 是环路内外所有电路激发的总磁场强度, 但是, 只有 L 内的电流才对 H 沿 L 的环流有贡献;

n 其他:

磁通所通过的区域称为磁路。在实际的电机磁路中, 常将磁路分成若干段, 每一段磁路的磁场强度是常数, 于是上述表达式变为

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = NI$$

或

$$\sum_{i=1}^n H_i l_i = NI$$

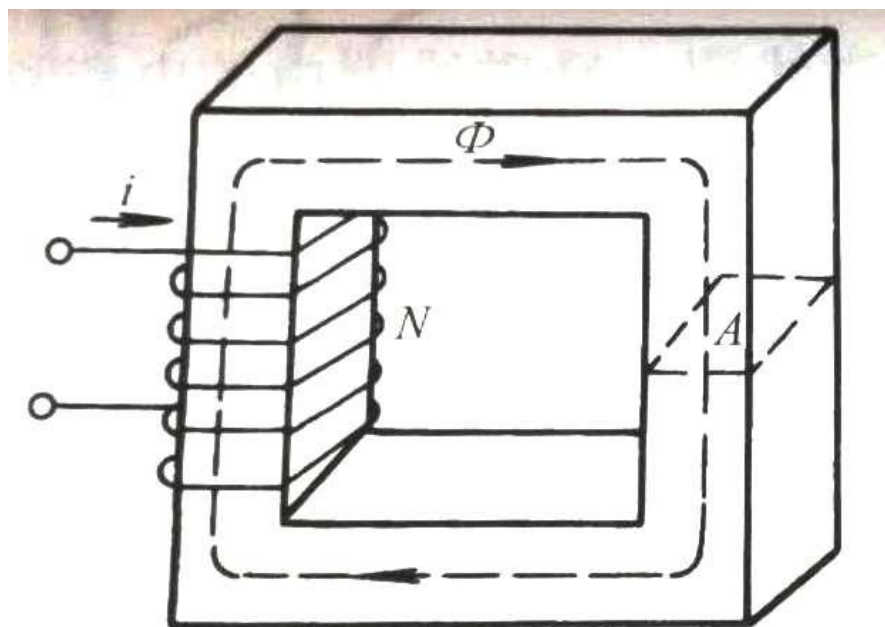
其中 H_i 为第 i 段磁路的磁场强度; l_i 为第 i 段磁路的平均长度; $H_i l_i$ 为第 i 段磁路的磁压降或磁势; N 为磁通回路所包围的导体总数, 即线圈匝数; I 为每一段导通中的电流。

1.2 磁路

○ 磁路的欧姆定律

条件:

- (1) 没有漏磁通;
- (2) 各面上的磁密均匀且垂直截面;
- (3) 磁导率为 μ
- (4) 磁路平均长度为 l



1.2 磁路

○ 磁路的欧姆定律

$$\Phi = \int B dA = BA$$



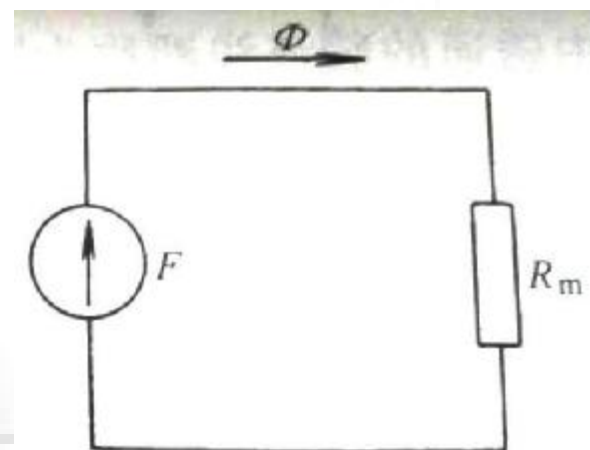
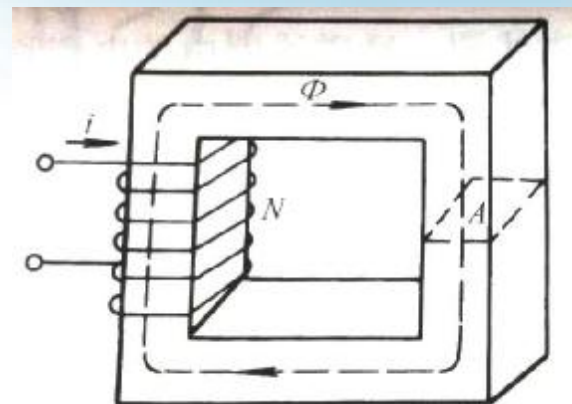
$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_0 N A}$$



$$Ni = Hl = \Phi \frac{l}{\mu_0 N A}$$



$$F_m = \Phi R_m$$



1.2 磁路

○ 磁路的欧姆定律

$$F_m = \Phi R_m = \Phi / G_m$$

$$F_m = Ni$$

作用在铁心磁路上的安匝数，称为磁路的磁势，单位**A**；

$$R_m = l / \mu A$$

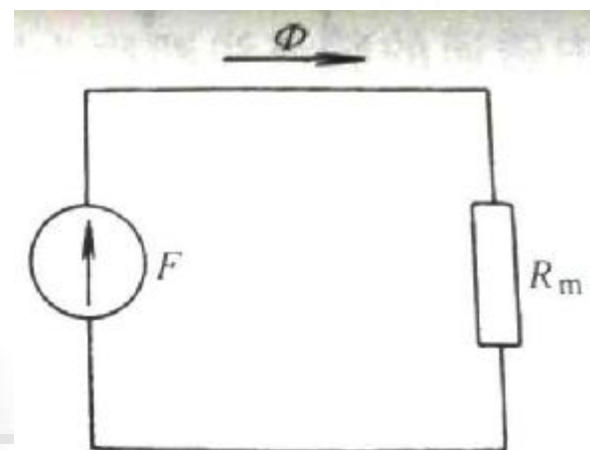
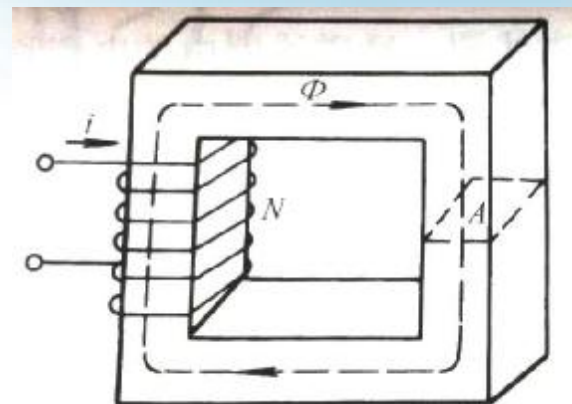
磁路的磁阻，取决于磁路的尺寸和材料的磁导率，单位**H⁻¹**，
1H⁻¹ = 1A/Wb；

$$G_m = 1 / R_m$$

磁路的磁导，磁阻的倒数，单位**H**，**1H = 1Wb/A**；

对应电路的欧姆定律：

$$U = IR \quad R = r \frac{l}{A} \quad G = \frac{1}{R}$$



1.2 磁路

○ 磁路的欧姆定律

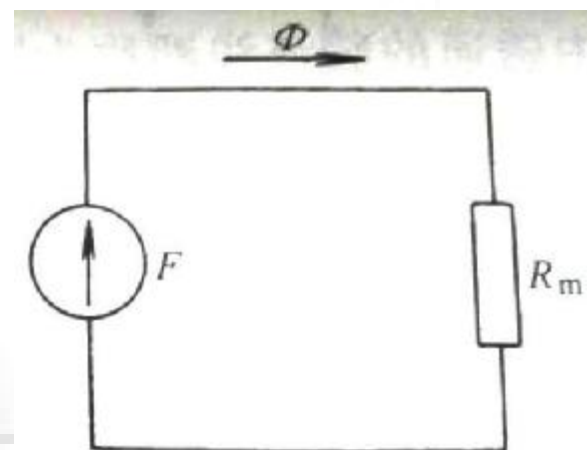
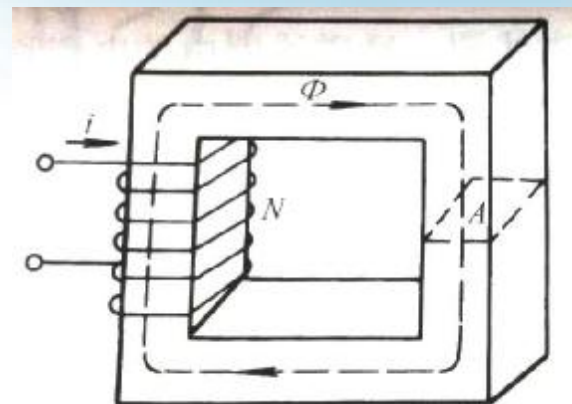
$$F_m = \Phi R_m = \Phi / G_m$$

(1) 铁磁材料磁导率和磁阻均不是常数，它随着磁密 \mathbf{B} 的饱和程度大小而变化

(2) 铁磁材料的磁阻是非线性的

(3) 上式只适用对磁路的定性分析。

电流增加一倍，磁通变化不是一倍的关系



1.2 磁路

○ 磁路的欧姆定律

$$F_m = \Phi R_m = \Phi / G_m$$

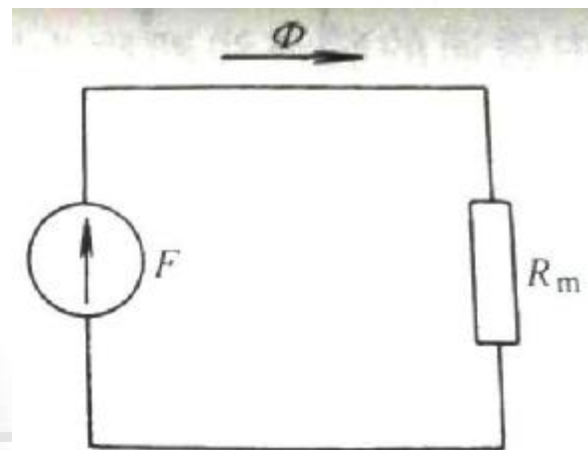
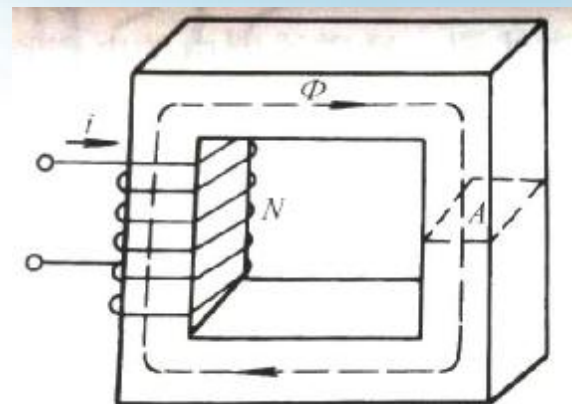
分段计算磁阻：

$$R_{mi} = \frac{l_i}{\mu_i S_i}$$

$$R_m = \sum_{i=1}^n R_{mi}$$

当闭合磁路由铁心和空气隙串联组成时，一般情况下，气隙磁阻远大于其他部分磁阻，整个磁路磁阻主要由气隙磁阻决定。

工程上，对于铁磁材料，由**B**求**H**或者由**H**求**B**，一般不通过 **$B = \mu H$** 通过材料的磁化曲线求得。



1.2 磁路

○ 磁路的基尔霍夫第一定律(磁场高斯定律)

n 定律描述:

通过磁场中任意闭合曲面的磁通量等于零

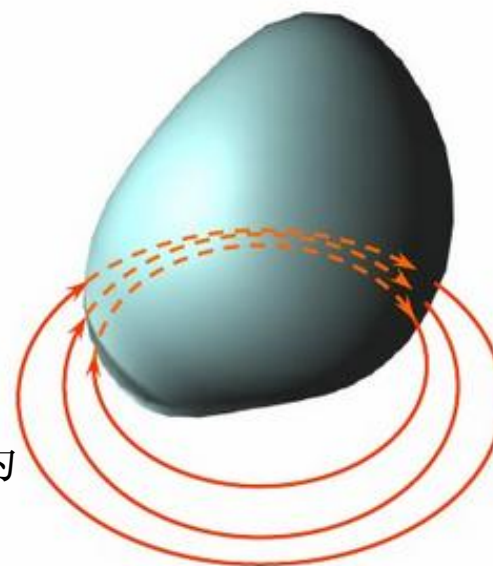
n 表达式:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

n 说明:

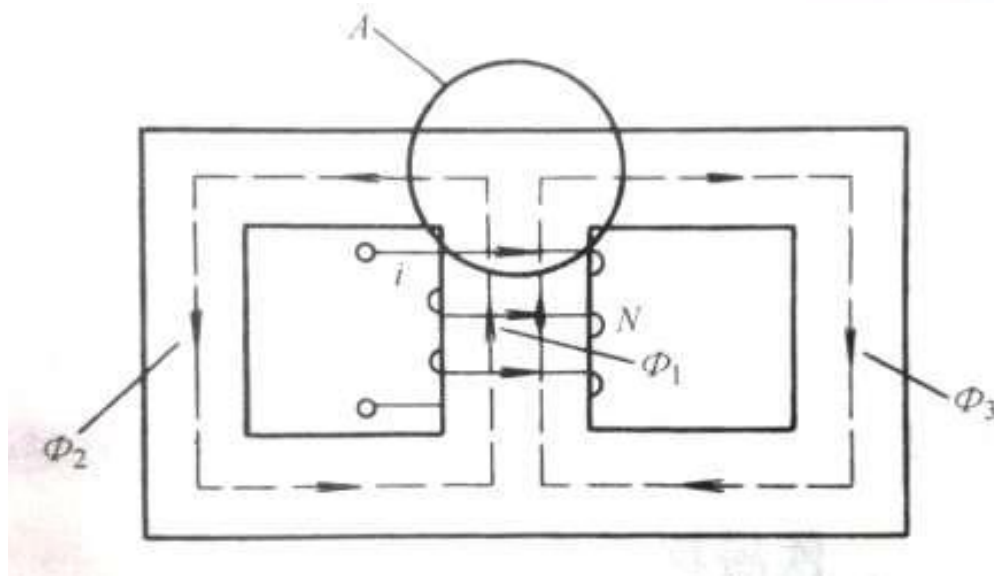
(1) \vec{B} 是总磁感应强度, 虽然 \vec{B} 在 S 面上的通量为零, 但在 S 面上 \vec{B} 不一定为零。

(2) 该定律表明了磁场是一种无源场。



1.2 磁路

○ 磁路的基尔霍夫第一定律(磁场高斯定律)



磁路:

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

$$\sum \Phi = 0$$

电路:

$$\sum i = 0$$

1.2 磁路

○ 磁路的基尔霍夫第二定律

n 定律描述:

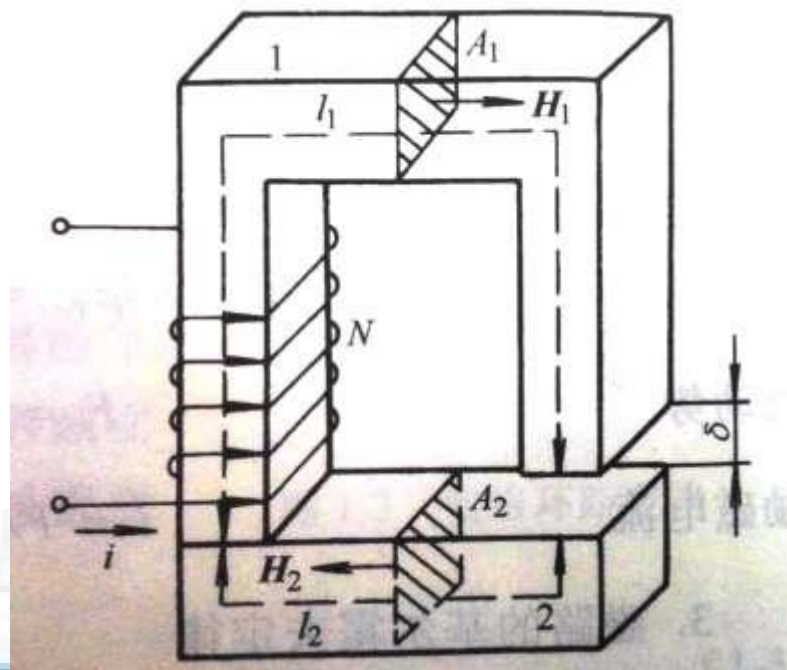
沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁动势的代数和。

n 表达式:

$$Ni = \sum_{i=1}^n H_i l_i = \sum_{i=1}^n \Phi_i R_{mi}$$

$$\begin{aligned} Ni &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_d l_d \\ &= \Phi_1 R_{m1} + \Phi_2 R_{m2} + \Phi_d R_{md} \end{aligned}$$

安培环路定理的另一种表达形式



1.2 磁路

○ 磁路与电路的对比

电路	磁路
电动势 E [V]	磁动势 F_m [A]
电流 I [A]	磁通 Φ [Wb]
电导率 g [S/m]	磁导率 μ [H/m]
电阻 $R = l / \sigma S$ [Ω]	磁阻 $R_m = l / \mu S$ [H^{-1}]
电导 $G = 1 / R$ [Ω^{-1}]	磁导 $G_m = 1 / R_m$ [H]
欧姆定律 $E = IR$	磁路欧姆定律 $F_m = \Phi R_m$
基尔霍夫第一定律 $\sum I = 0$	基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$
基尔霍夫第二定律 $\sum E = \sum I_i R_i$	基尔霍夫第二定律 $\sum F_m = \sum \Phi_i R_{mi}$

1.2 磁路

○ 磁路与电路的区别

n 电路中有电流 I 时，就有功率损耗 I^2R ；在直流磁路中，维持一定的磁通，铁心中没有损耗；

n 电路中可认为电流全部流过导线；磁路中漏磁很严重，在电磁机构中，一般主磁通约占全部磁通的80%；

n 电路中导体电阻率在一定温度下是不变的；磁路中铁心的磁导率不是常值，随铁心的磁饱和程度大小而变化；

n 线性电路，计算时可用叠加原理；铁心磁路，计算时不能应用叠加原理，因为铁心饱和时磁路为非线性。

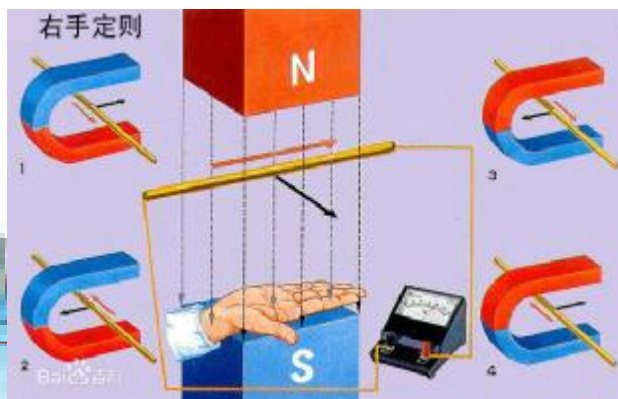
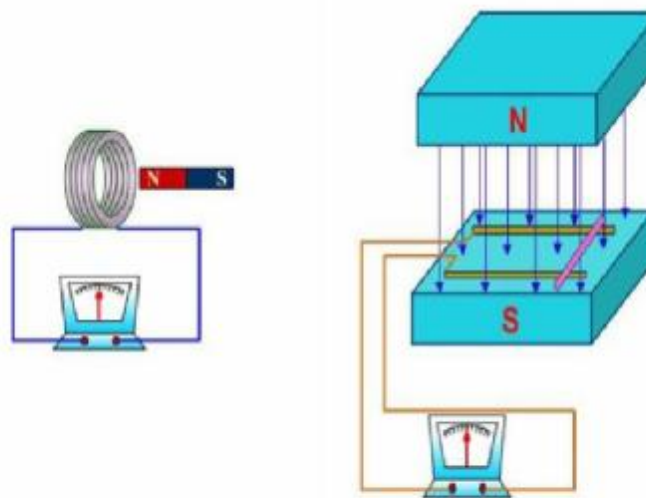
1.3 电磁感应定律

○ 电磁感应定律

法拉第电磁感应定律：当通过闭合导电回路所包围面积内的磁通量 Φ 发生变化时，在回路上产生感应电动势 e ，其与磁通量对时间 t 的变化率的负值成正比。

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- n 大小：与磁通的变化率成正比；
- n 方向：楞次定律和右手定则；



19:14:12

32



哈尔滨工业大学
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

1.3 电磁感应定律

○ 电磁感应定律

n 磁链：通过一个线圈的磁通 Φ 与线圈匝数 W 的乘积，记为 Ψ (psai)

$$\Psi = W\Phi$$

n 某一部分磁通 Φ_i ， W_i 为 Φ_i 所通过的匝数，则总磁链为

$$\Psi = \sum W_i \Phi_i$$

则感应电动势为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}$$

1.3 电磁感应定律

○ 电磁感应定律

n 磁通本身由交流电产生，空间中任一点的磁通随时间变化。

n 空间中各点磁通不变，但线圈位置变化时，通过线圈的磁通变化。

因此磁链可以看成是时间和位移的函数，即 $\Psi = \Psi(t, x)$

$$d\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx$$

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} - V \frac{\partial \Psi}{\partial x} = e_T + e_R$$

1.3 电磁感应定律

○ 磁链变化的原因

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - V\frac{\partial\Psi}{\partial x} = e_T + e_R$$

n 变压器电势: $e_T = -\frac{\partial\Psi}{\partial t}$

变压器的线圈静止不动，线圈中的感应电势仅有变压器电势。

n 旋转电势或速度电势: $e_R = -V\frac{\partial\Psi}{\partial x}$

直流电机空间内任一点的磁通对时间为恒定不变，线圈中的感应电势只有速度电势。

1.3 电磁感应定律

n 导线切割磁力线，当 B ， l ， v 相互垂直时：

$$e = Blv$$

n 线圈感应电势

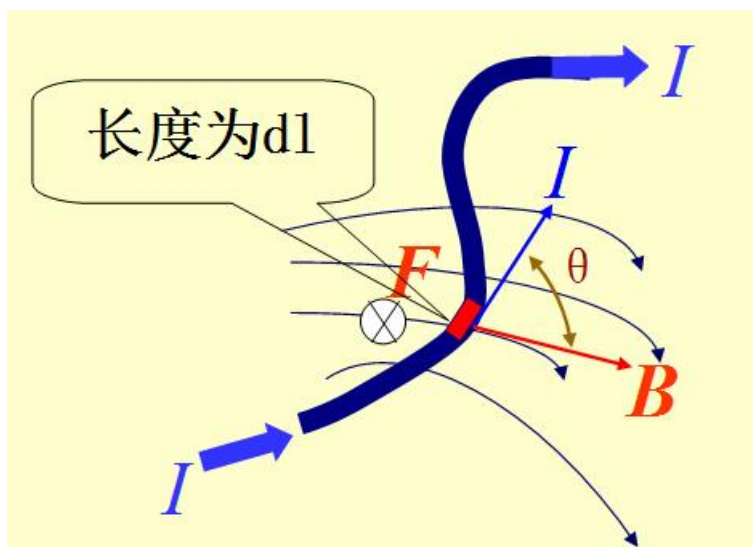
$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$$

若为空心线圈，周围没有铁磁材料，则 L 是常数，其与电流无关，则为线性电感。

若线圈周围有铁磁材料， L 的大小随电流变化而变化，则为非线性电感。但若磁通回路上有气隙，气隙磁阻远大于其他段磁阻，磁势有磁链引起的电感仍可看成是线性电感。

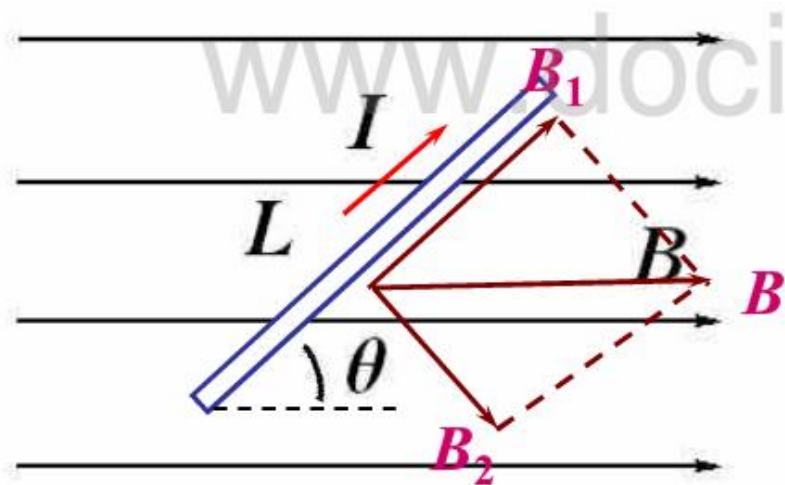
1.4 电磁力与电磁转矩

○ 磁场中载流导体所受的电磁力(安培力)



导线在任意磁场中的受力

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

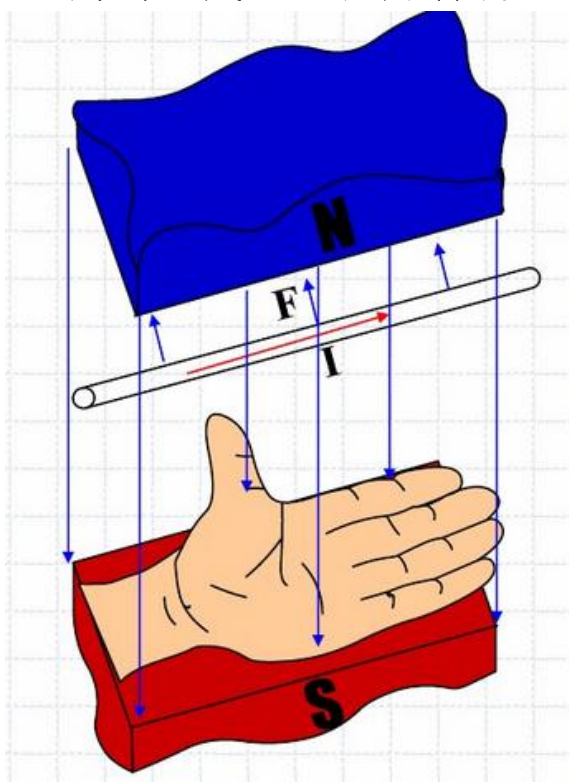


导线在均匀磁场中的受力

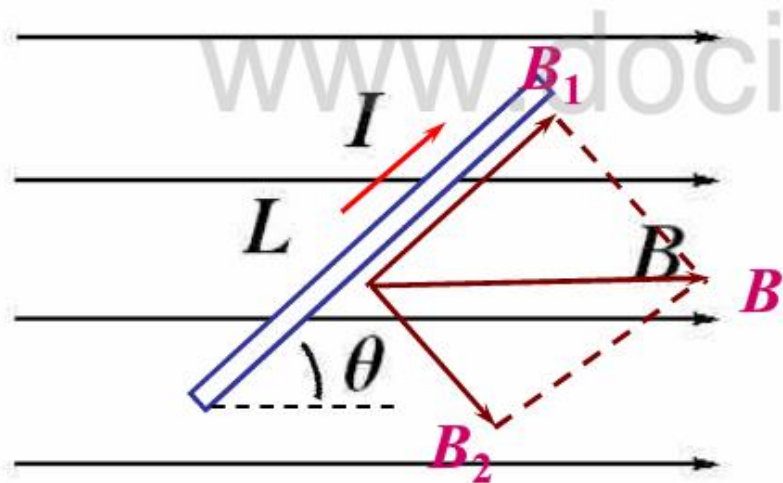
$$F = B l \sin \theta$$

1.4 电磁力与电磁转矩

○ 磁场中载流导体所受的电磁力(安培力)



方向：左手定则



导线在均匀磁场中的受力

$$F = BIl \sin \theta$$

1.4 电磁力与电磁转矩

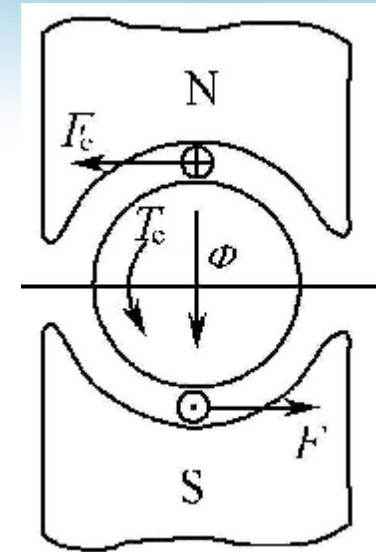
○ 电机电磁转矩

n 由受力计算:

$$T_e = Blr$$

n 由功率计算:

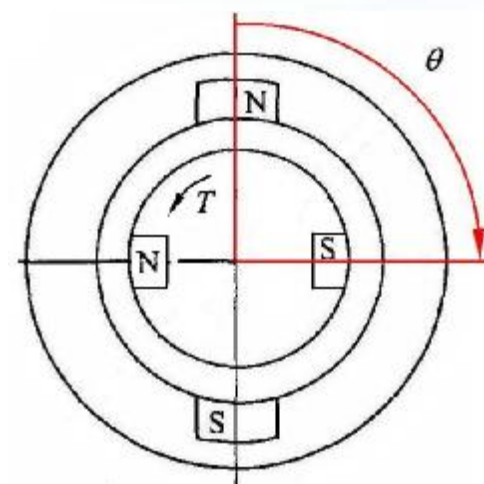
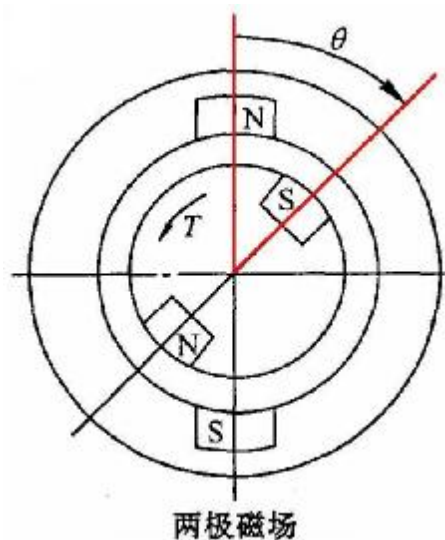
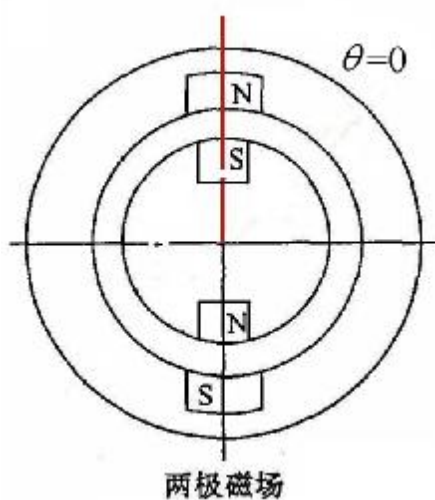
$$T_e = \frac{P}{\omega}$$



1.4 电磁力与电磁转矩

○ 圆柱面磁场间的力矩

1对磁极



$q:$ 0

$0^\circ - 90^\circ$

90°

$T:$ 0

+

+

1.4 电磁力与电磁转矩

○ 圆柱面磁场间的力矩

1对磁极



$q:$ $90^\circ - 180^\circ$

180

$180^\circ - 360^\circ$

$T:$ +

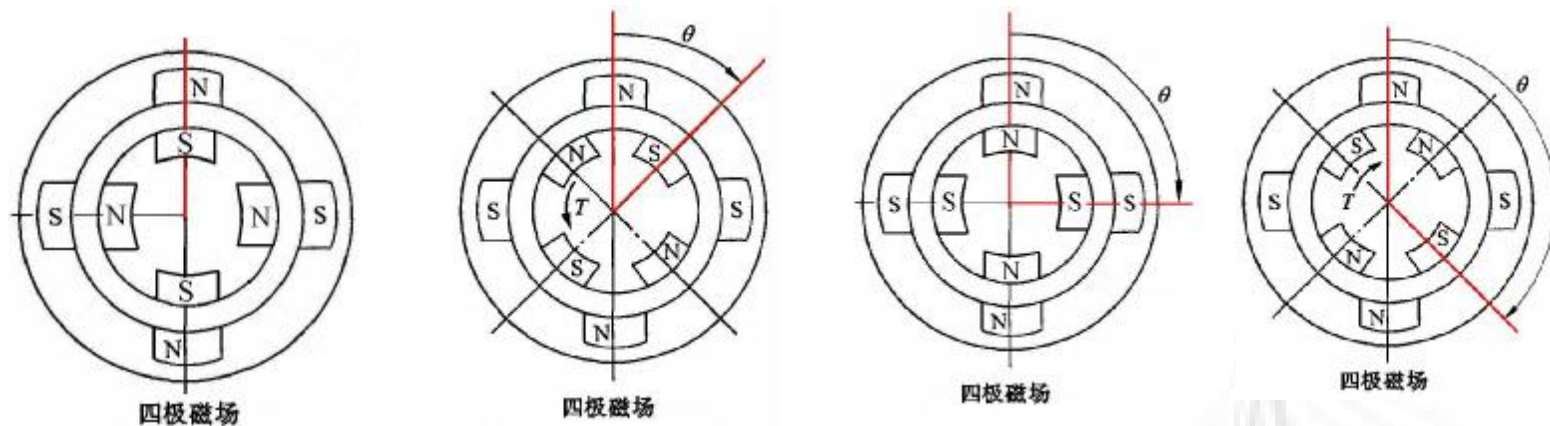
0

-

1.4 电磁力与电磁转矩

○ 圆柱面磁场间的力矩

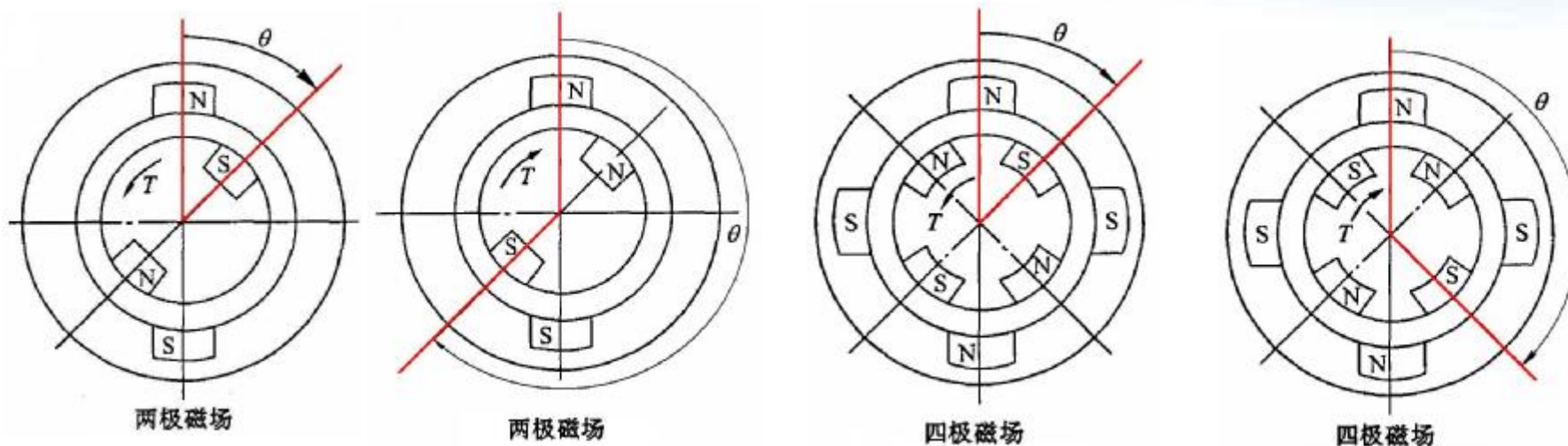
2对磁极



$q:$	0°	$0^\circ - 90^\circ$	90°	$90^\circ - 180^\circ$
$T:$	0	+	0	-

1.4 电磁力与电磁转矩

○ 圆柱面磁场间的力矩



极对数 p	q	0°	~	90°	~	180°	~	270°	~	360°	周期
1	T	0	+	+	+	0	-	-	-	0	360°
2	T	0	+	0	-	0	+	0	-	0	180°

$$\text{周期} = 360^\circ / p$$

1.4 电磁力与电磁转矩

○ 圆柱面磁场间的力矩

根据傅立叶级数理论，可将转矩写成转角的一系列正弦函数之和，其中基波为：

1对极($p=1$):

$$T = K \sin q$$

2对极($p=2$):

$$T = K \sin 2q$$

p 对极:

$$T = K \sin pq$$

大部分电机中力矩的产生都可以用上述圆柱面磁场来解释。
电机中的力矩 T 与磁场间的夹角 θ 的关系近似符合上面公式。

1.5 磁性材料

○ 磁性物质

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$$

- n 顺磁物质：磁导率 μ 略大于真空磁导率 μ_0 ；
- n 抗磁物质：磁导率 μ 略小于真空磁导率 μ_0 ；
- n 铁磁物质：磁导率 μ 远远大于真空磁导率 μ_0 ；对于电机和变压器铁心来说， μ 为 μ_0 的**2000-6000**倍。
- n 在工程上，除了铁磁物质外，其余材料的磁导率都认为是真空磁导率。

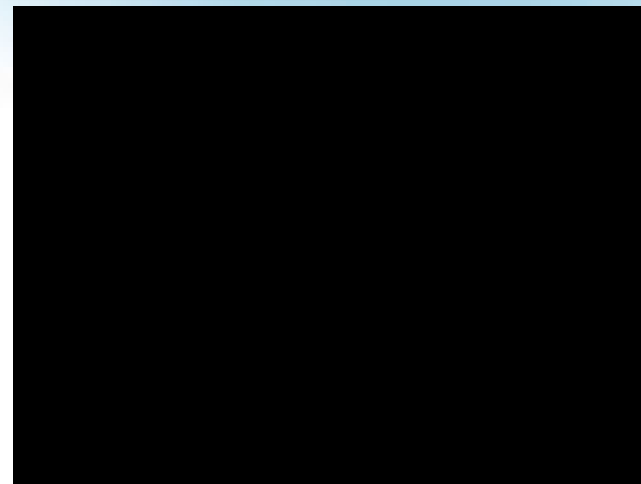
1.5 磁性材料

○ 铁磁物质

$$Ni = Hl$$

$$B = \mu H \quad \longrightarrow \quad \Phi = \frac{Ni}{l} mS$$

$$\Phi = BS$$



电机和变压器的铁磁采用铁磁材料：增加磁通

- n B与H具有复杂的函数关系， μ 不是恒量，随磁场强度H变化；
- n 在外磁场停止作用后，很多铁磁物质仍有较强的磁性；
- n 每种铁磁材料对应一个临界温度，在这个温度下，磁性会发生突变。高于此温度，磁导率与磁场强度无关，铁磁物质转化为顺磁物质。(居里点)

1.5 磁性材料

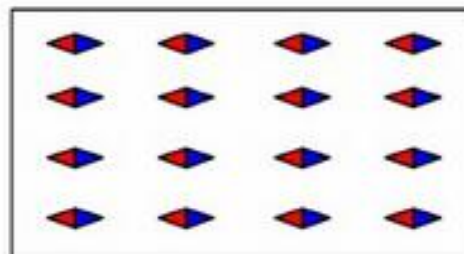
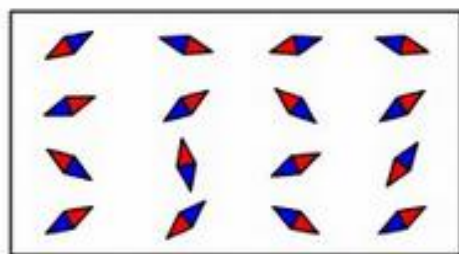
○ 铁磁物质的磁化

n 磁化：本来不具备磁性的物质，由于受到磁场的作用而具有了磁性的现象称为该物质被磁化。只有铁磁物质才能被磁化。

n 被磁化的原因：

(1) 内因：铁磁物质是由许多被称为磁畴的磁性小区域组成的，每一个磁畴相当于一个很小的磁铁

(2) 外因：有外磁场的作用



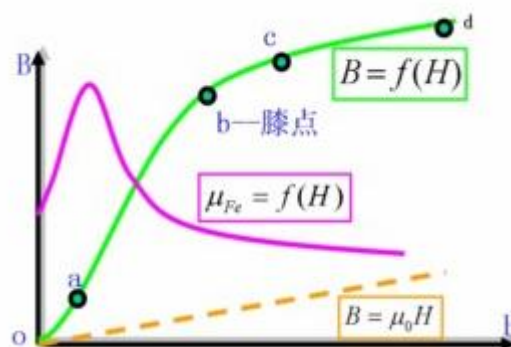
1.5 磁性材料

○ 磁化曲线

磁化曲线：表示磁场强度 H 与磁通密度 B 之间关系的特性曲线，可以表示材料的磁化特性

n 起始磁化曲线

将一块未磁化的铁磁材料进行磁化，当磁场强度逐渐增大时，磁通密度将随之增大。此时 H - B 曲线称为起始磁化曲线。



1.5 磁性材料

○ 磁滞回线

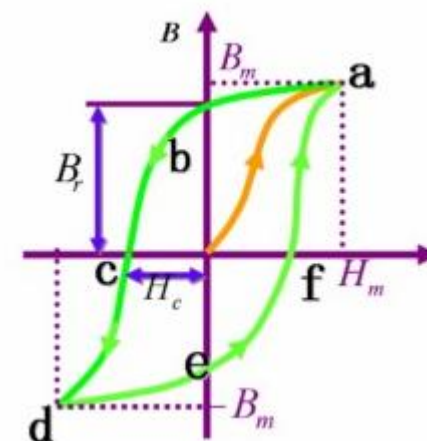
若将铁磁材料进行周期磁化，**B**和**H**之间的关系变化就会成右图所示。

铁磁材料所具有的这种磁通密度**B**的变化滞后于磁场强度**H**变化的现象叫**磁滞**。

呈现磁滞现象的**B-H**闭合回线，称为**磁滞回线**。

B_r 称为剩余磁通密度，简称剩磁

H_c 称为矫顽力

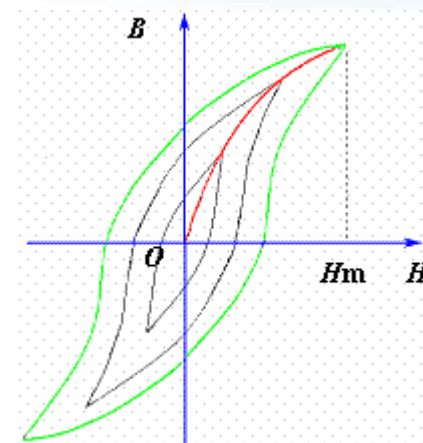


1.5 磁性材料

○ 基本磁化曲线

对同一铁磁材料，选择不同的磁场强度值反复进行磁化时，可得不同的磁滞回线，将各条回线的定点连接起来，所得曲线称为**基本磁化曲线**或**平均磁化曲线**。

基本磁化曲线与原始磁化曲线相差较小。

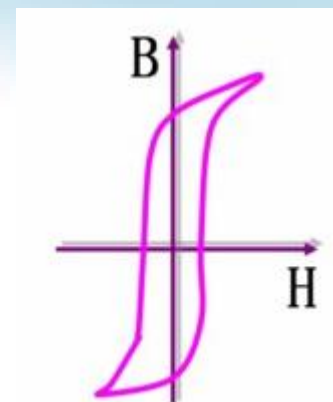


1.5 磁性材料

○ 软磁材料与硬磁材料

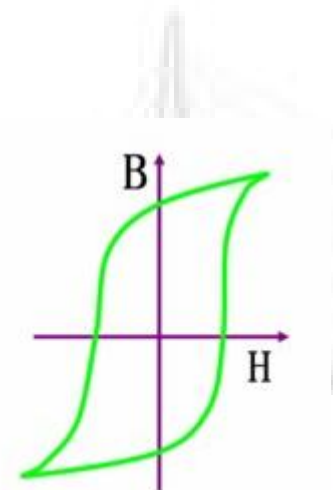
n 软磁材料

磁滞回线较窄，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小的材料；
软磁材料磁导率高，可用于电机、变压器铁心；
常用的软磁材料有电工硅钢片、铸铁、铸钢等。



n 硬磁材料

磁滞回线较宽，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都大的材料；
硬磁材料剩磁 B_r 大，可制成永磁体；
常用的硬磁材料有铝镍钴、铁氧体、稀土钴、
钕铁硼等。



1.5 磁性材料

○ 铁心损耗

n 磁滞损耗 p_h

铁磁材料置于交变磁场中，材料被反复交变磁化，磁畴相互不停的摩擦而消耗能量，并以热量的形式表现出来，造成损耗称为磁滞损耗。

n 表达式

与磁场交变频率、铁心体积和磁滞回线面积成正比

$$p_h = fV \oint H dB$$

磁滞回线面积与最大磁密的 n 次方成正比

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

C_h 为磁滞损耗系数，与材料性质有关；一般电工硅钢片 $n=1.6\sim 2.3$ 。由于硅钢片的磁滞面积较小，故电机和变压器的铁心常用硅钢片叠片制成。

1.5 磁性材料

○ 涡流损耗

n 涡流损耗 p_e

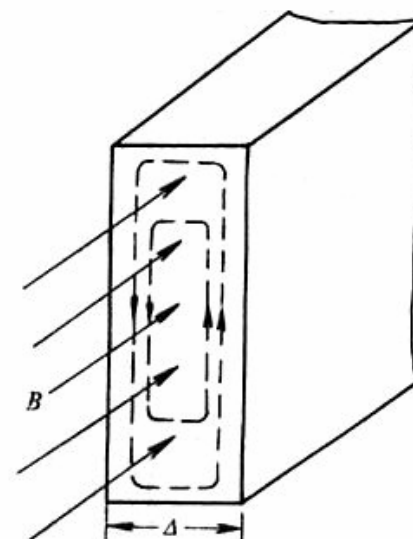
当通过铁心的磁通随时间变化时，由电磁感应定律，铁心中将产生电动势，引起环流。这些环流在铁心内部作漩涡状流动，称为**涡流**。涡流在铁心中引起的损耗，称为**涡流损耗**。

n 表达式

$$p_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V$$

C_e 为涡流系数，其大小取决于材料的电阻率； Δ 为硅钢片的厚度； V 铁心体积； f 为频率； B_m 为最大磁密。

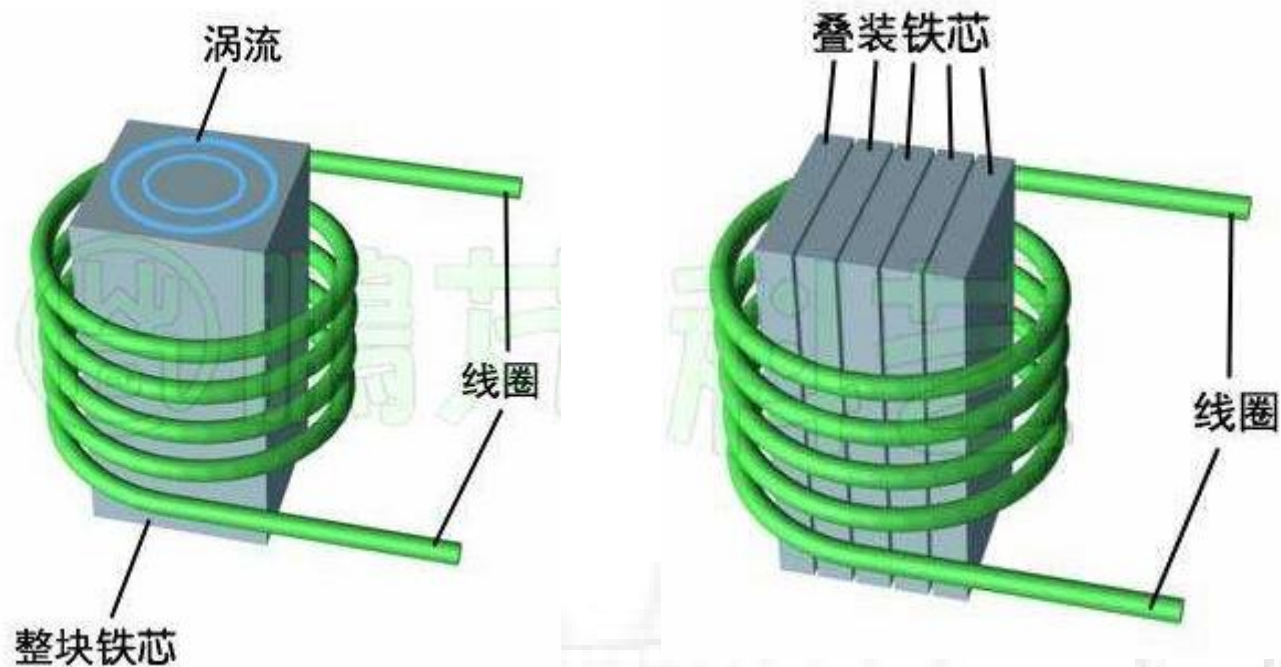
铁心的电阻率越大，涡流损耗就越小。



1.5 磁性材料

○ 涡流损耗

为了减小涡流损耗，电机和变压器铁心都采用含硅较高的硅钢片叠成。



1.5 磁性材料

○ 铁心损耗

n 铁心损耗 p_{Fe}

磁滞损耗与涡流损耗之和，称为铁心损耗。

n 表达式

$$p_{Fe} = p_h + p_e = (C_h f B_m^n + C_e \Delta^2 f^2 B_m^2) V$$



220V50Hz的变压器输入220V100Hz的交流信号是否可以？

2.1 线路和电缆

○ 我国电压等级

n 安全电压：通常**36V**以下

n 低压：**220V**和**380V**

n 高压：**10KV-220KV**

n 超高压：**330KV-750KV**

n 特高压：**1000KV**

n 在大多数用电行业及人们的日常生活中，一般都是用低压设备，采用低压供电

2.1 线路和电缆

○ 低压配电系统接地制式

n 为了确保配电系统及其电气设备的安全使用，通常将配电系统的中性点或电气设备外壳接地，也可以通过导线连接到配电系统已知的中性点上。配电系统可以直接接地或不接地，也可以通过阻抗接地。

n 电气设备和配电系统的几种接地组合称为**配电系统的接地制式**

n 按照**IEC**(国际电工委员会)规定，接地制式一般由两个字母组成，必要时可加后续字母。接地制式划分的配电系统有**TN-C**、**TN-S**、**TN-C-S**、**TT**、**IT**等。

2.1 线路和电缆

○ 接地制式分类

n 第一个字母表示电源接地点对地的关系

T——表示直接接地；

I——表示不接地或通过阻抗与大地相连；

n 第二个字母表示电气设备的外露导电部分与地的关系

T——表示独立于电压接地点的直接接地；

N——表示直接与电源系统接地点或与该点引出的导体相连接

n 后续字母表示中性线与保护线之间的关系

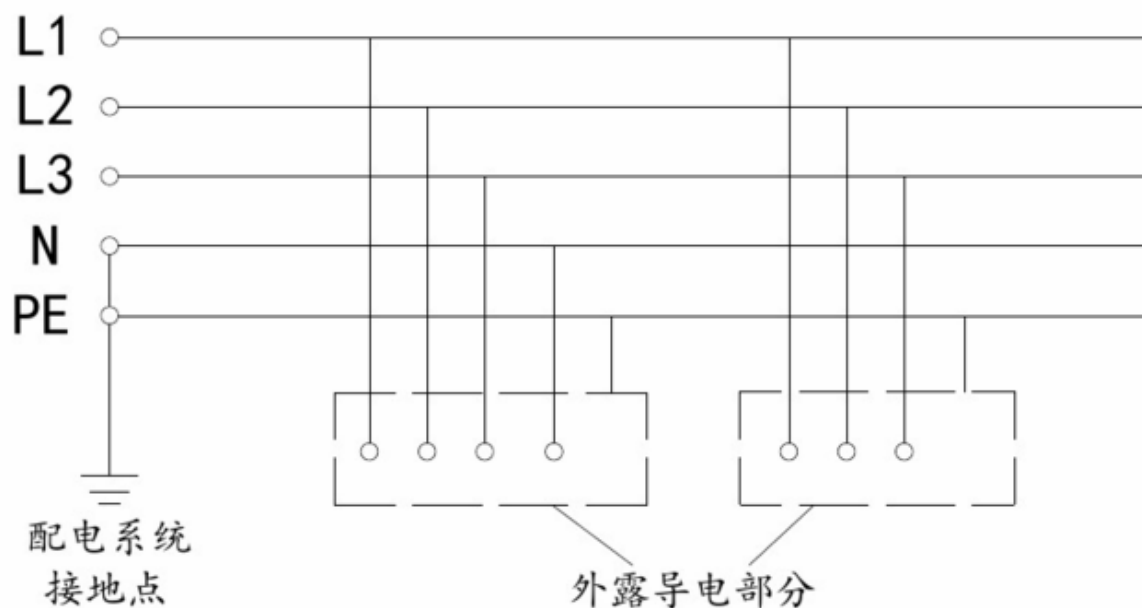
C——表示中性线N与保护线PE合并为PEN线

S——表示中性线与保护线分开

C-S——表示在电源侧为PEN线，从某点分开为N线及PE线

2.1 线路和电缆

- 实验室等教学、科研场所多采用**TN-S**配电制式，俗称三相五线制



T——表示电源接地点直接接地；

N——表示电气设备的外露导电部分直接与电源系统接地点或与该点引出的导体相连接

S——表示中性线与保护线分开

2.1 线路和电缆

○ 电线电缆

- n 电线电缆用以传输电(磁)能，信息和实现电磁能转换的线材产品。
- n 常用的电缆分类有：裸电线、绕组线、电力电缆、通信电缆等。
- n 一般铜导线的安全截面积流量为**5-8A/平方毫米**，铝导线的安全流量为**3-5A/平方毫米**

单相：

$$I = P / (U \times \cos \Phi)$$

P-功率(W); U-电压(220V); $\cos \Phi$ -功率因素; I-相线电流(A)

三相：

$$I = P / (U \times 1.732 \times \cos \Phi)$$

P-功率(W); U-电压(380V); $\cos \Phi$ -功率因素; I-相线电流(A)

一般来说，在单相电路中每**1平方毫米**铜导线可承受**1KW**功率载荷，三相平衡电路可承受**2-2.5KW**的功率载荷。

2.1 线路和电缆

○ 电缆常见型号:

R——连接用软电缆（电线），软结构

B——平型（扁型）

S——双绞型

A——镀锡或镀银

F——耐高温

P——编制屏蔽

P2——铜带屏蔽

P22——钢带铠装

V——聚氯乙烯绝缘或护套

ZR——阻燃型

NH——耐火型

WDZ——无卤低烟阻燃型

WDN——无卤低烟耐火型

2.2 低压电器

○ 接触器

n 接触器(Contactor)是指工业电中利用线圈流过电流产生磁场，使触头闭合，以达到控制负载的电器。

n 接触器按被控电流种类分为直流接触器和交流接触器。

n 可快速切断交流与直流主回路，可频繁地接通或断开大电流电路，可实现中远距离控制。

n 可应用高于电机控制系统，也可作用于工厂设备、电热器、电焊机和各样电力机组等电力负载。是控制系统中的重要元件之一。



2.2 低压电器

○ 断路器

n 断路器(circuit breaker)是一种既有手动开关作用，又能自动进行失压、欠压、过载和短路保护作用。

n 空气开关又称为空气断路器。

n 断路器 可用来分配电能，对电源线路及用电设备实行保护，当他们发生严重的过载或者短路及欠压等故障时，能自动切断电路，其功能相当于熔断式开关与过欠热继电器等的组合。

n 断路器按使用范围分为高压断路器和低压断路器。



2.2 低压电器

○ 继电器

n 继电器(relay)是一种电控器件，是当输入量的变化达到规定要求时，在电气输出电路中使被控量发生预定的阶跃变化的一种电器。

n 继电器通常应用于自动化的控制电路中，实际上是用小电流去控制大电流运作的一种“自动开关”。故在电路中起着信号隔离、信号转换、增加输出电路等。

n 继电器按输入量不同可分为：电压继电器、电流继电器、时间继电器、温度继电器、速度继电器。



2.2 低压电器

○ 主令电器

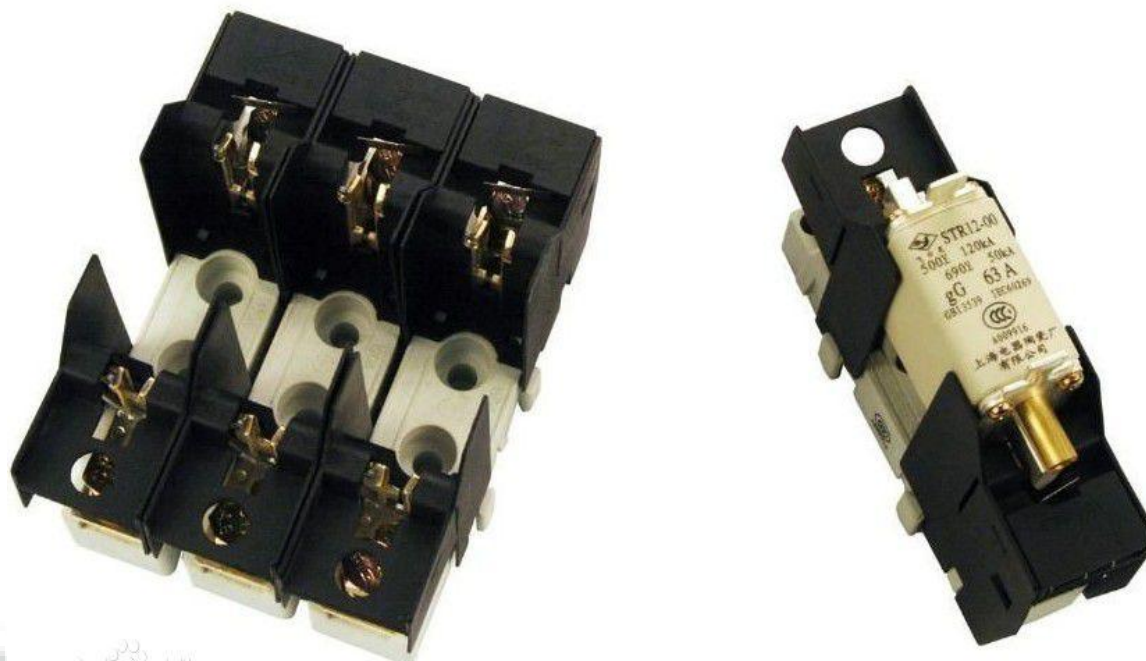
n 主令电器是用作闭合或断开控制电路、以发出指令或作程序控制的开关电器。包括：按钮，凸轮开关、行程开关、指示灯、指示塔等。另外还有踏脚开关、接近开关、紧急开关等。



2.2 低压电器

○ 熔断器

n 熔断器(fuse)是指当电流超过规定值时，以本身产生的热量使熔体熔断，断开电路的一种电器。是一种最简单有效且廉价的短路和过电流的保护器。



小结

○ 磁基本常识

- n 磁通密度：表示磁场强弱的物理量
- n 磁力线：人们假象的曲线，以形象描述磁场分布
- n 磁通：通过磁场中某一曲面的磁感应线数
- n 磁场强度：计算磁场时所引用的一个物理量
- n 磁导率：用来表示物质导磁能力大小的物理量
- n 磁通密度与磁场强度的区别

○ 磁路

- n 安培环路定理：

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum I$$

- n 磁路欧姆定律

$$F_m = \Phi R_m$$

- n 磁路基尔霍夫第一定律

$$\oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

- n 磁路基尔霍夫第二定律

$$Ni = \sum_{i=1}^n H_i l_i = \sum_{i=1}^n \Phi_i R_{mi}$$

小结

○ 电磁感应定律

n 感应电动势

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}$$

$$e = Blv$$

○ 电磁力与电磁转矩

n 磁场中载流导体所受的电磁力

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$F = BIl$$

n 圆柱面磁场间的力矩

$$T = K \sin pq$$

小结

○ 磁性材料

- n 磁性物质：顺磁物质，抗磁物质，铁磁物质
- n 铁磁物质的磁化
- n 磁化曲线：起始磁化曲线、磁滞回线、基本磁化曲线
- n 软磁材料与硬磁材料
- n 铁心损耗：磁滞损耗、涡流损耗