

1. 为什么要学习这门课程?

22-ppp

—控制系统与控制元件及线路

• 什么是控制(Control)?

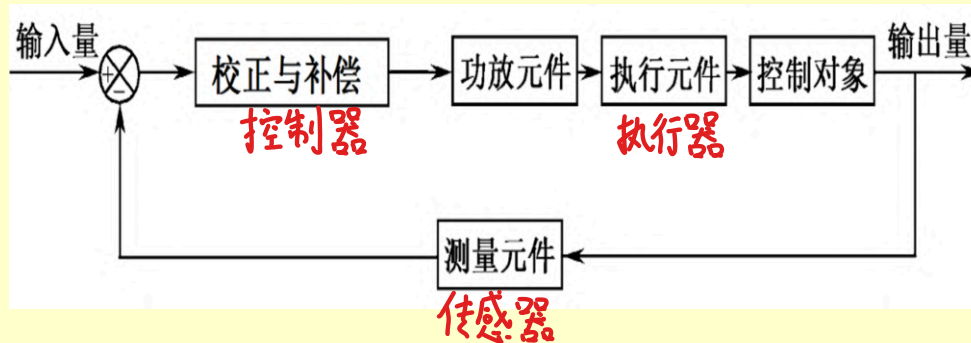
- **控制**: 主体按照给定的条件和目标, 对客体施加影响的过程和行为。即: 主体对客体施加影响, 通过改变或保持装置或体系内的变量, 达到最终的期望。

- **控制的五要素**: 主体, 客体, 条件, 目标, 手段。

- **控制系统**: 实现控制过程的装置、体系。常见的自动化控制系统是指由相应的硬件和软件构成的机构、设备。



控制系统的硬件组成和各部分的作用



1. **执行元件**：各类电机，驱动控制对象，改变被控量（输出量）。
- 2. **测量元件**：将被测量检测出来并转换成另一种容易处理和使用的量（例如电压）提供给MCU处理器识别。



1. 为什么要学习这门课程？

—控制系统与控制元件及线路

- 3. 功放元件：将控制驱动信号幅值放大，输出较大功率以驱动

执行元件动作。

保持输出信号的波形
与输入信号一致

线性功放/开关功放

线性功放	开关功放
优点： <u>电磁兼容性好</u> ； 电路简单，适于低成本简单应用。 电压电流纹波小	优点： <u>效率高</u> ； 适合于数字化控制 <u>适合于大功率驱动应用</u>
缺点： <u>效率低，仅用于小功率场合</u>	缺点： <u>有可能产生电磁兼容性问题</u>

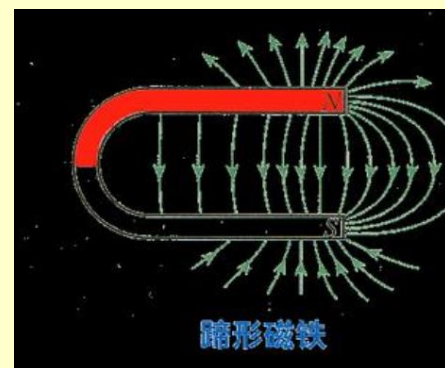
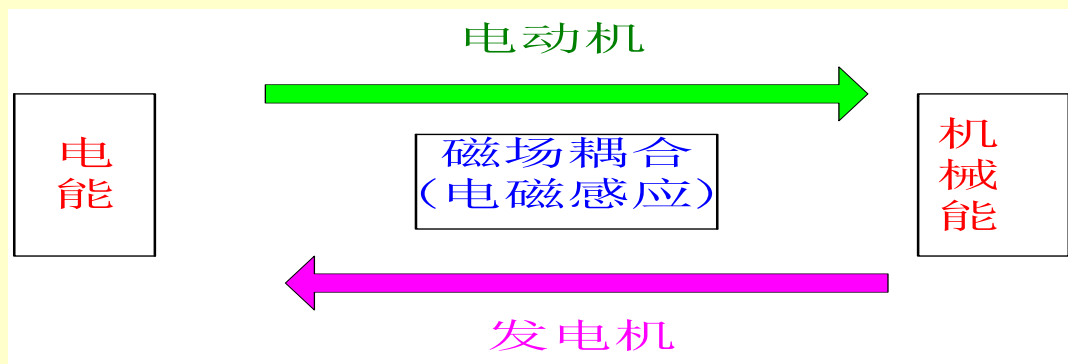
快速地切换开关状态，
通过改变输出脉冲的
宽度或频率来模拟输入
信号的变化

- 4. 校正元件（补偿元件）：实现高精度输出量的检测元件或校正算法。硬件一般是精密电位器；算法是对控制信号的运算，对功放元件输出驱动指令，确保系统稳定并达到规定的性能指标（超调量与响应时间）。



1 磁场基本理论

电磁元件是利用**磁场做媒介**来实现能量（或信息）转换（或传递）的装置。



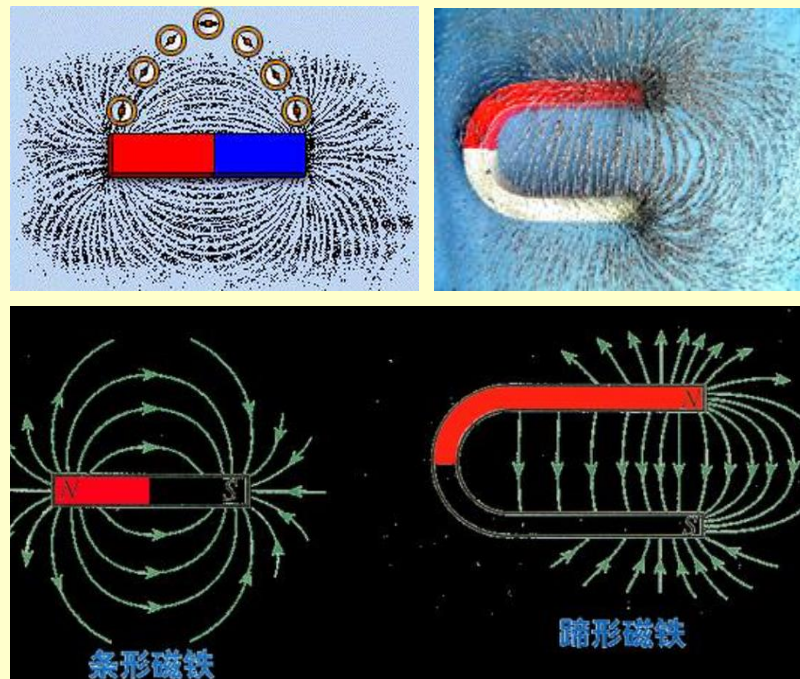
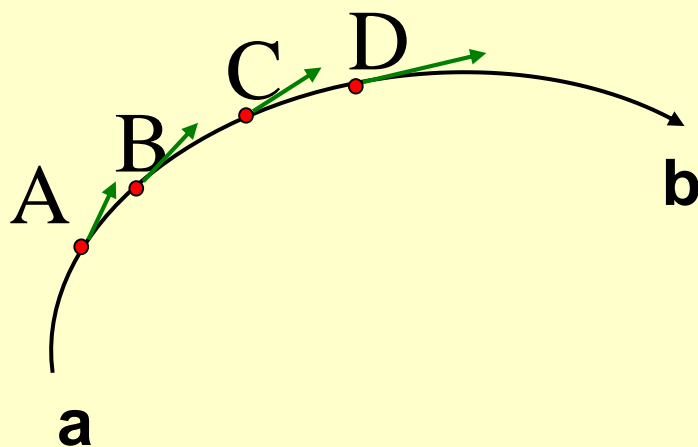
磁场产生： { 由永久磁铁产生
由电流产生

磁场分类： { 直流磁场
交流磁场



1-1 磁场的基本物理量

一、磁力线

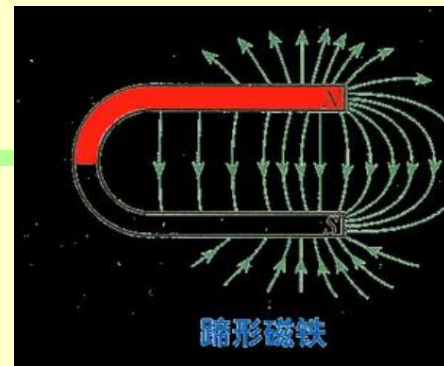


磁力线（或称磁感线）是用来**形象描述磁场分布的曲线**。

磁力线是三维的封闭曲线；

磁力线上任一点的切线方向即该点磁场的方向。

1-1 磁场的基本物理量



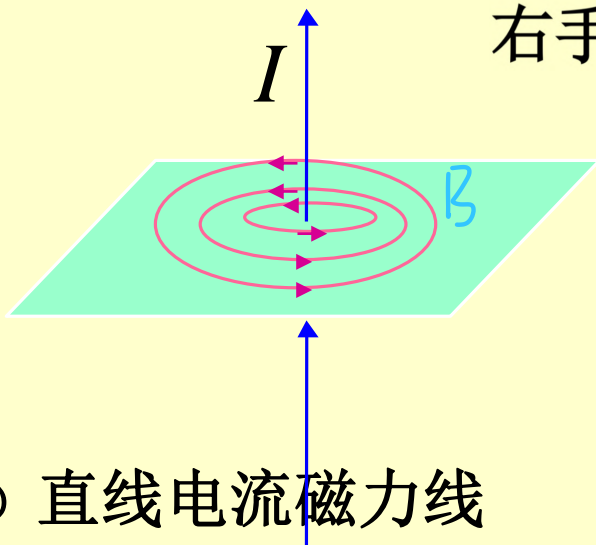
磁力线基本特征:

- 1) 所有磁力线都不交叉；磁力线的相对疏密表示磁场的相对强弱；
- 2) 任何磁场中每一条磁力线都是环绕电流的无头无尾的闭合曲线，即没有起点也没有终点（但是磁场有方向）；
- 3) 在任何磁场中，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（I-B方向关系）。

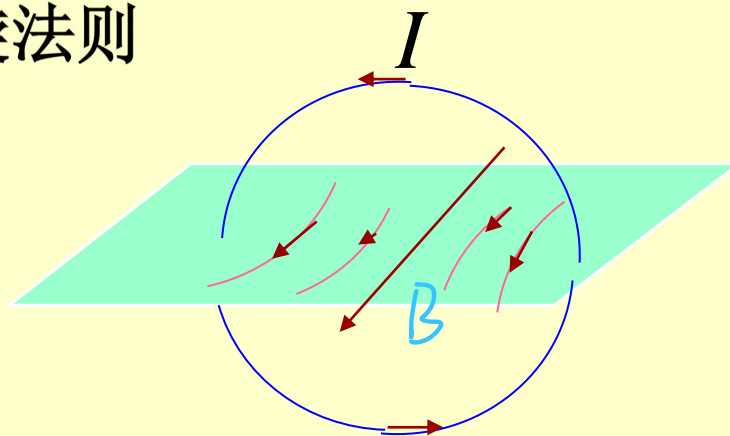


1-1 磁场的基本物理量

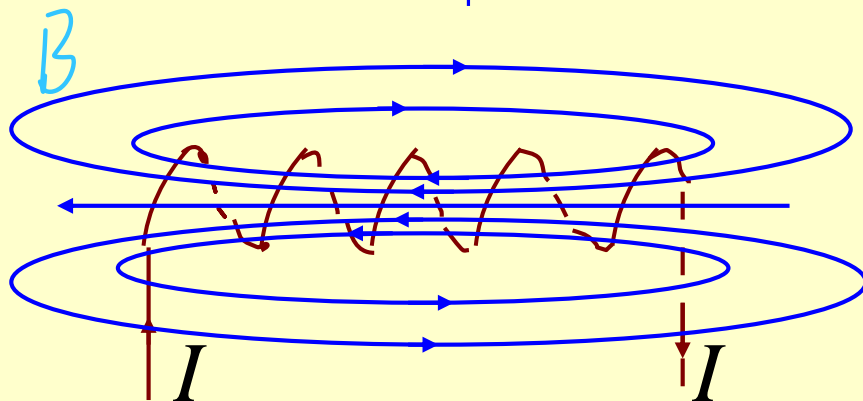
右手螺旋法则



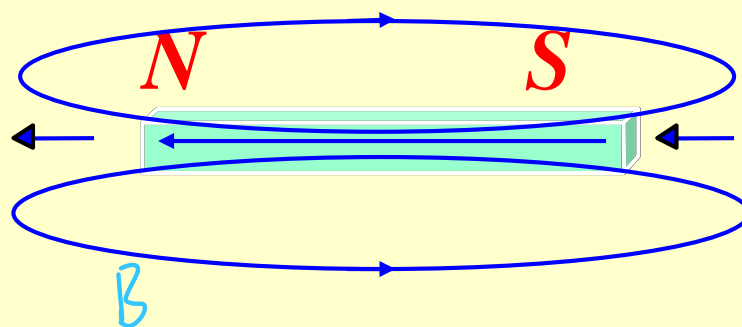
(a) 直线电流磁力线



(b) 圆电流磁力线



(c) 螺线管电流的磁力线



注意磁铁内、外部的磁场方向

(d) 永久磁铁的磁力线



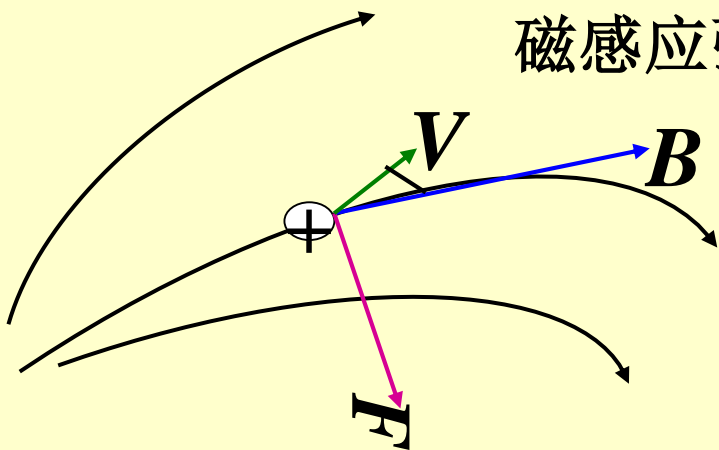
1-1 磁场的基本物理量

二、磁感应强度 B (单位: 特斯拉T)

定义：表示在空间某点磁场强弱和方向的物理量，是一个空间矢量。

通俗的说，磁感应强度（强弱）为通过某单位面积的磁力线的条数。所以磁感应强度也称为磁密（磁通密度）。 $B = \frac{\Phi}{S}$

磁感应强度的方向：为该点磁场的方向。



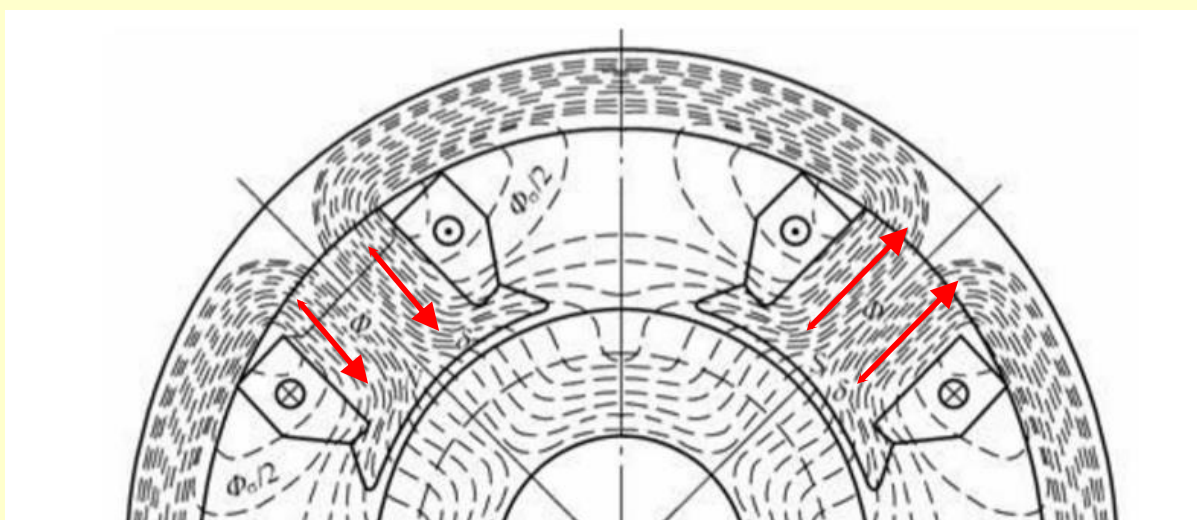
1-1 磁场的基本物理量

三、磁通 Φ (单位: 韦伯 Wb) $\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$

磁路: 电磁元件中, 磁通所经过的闭合回路称为磁路。

通过电磁元件工作磁路路径的磁通称为主磁通,

另外还有少量的磁通不在此路径通过, 称为漏磁通。



1-1 磁场的基本物理量

四、磁场强度 H (A/m)

↑记忆方法. $NI=HL$
 $A=l \text{ m}$

定义：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：

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

单位： H — 安培每米 (A/m) 或安每厘米 (A/cm)



1-1 磁场的基本物理量

五、磁导率 μ — 物质的实际磁导率

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。单位：亨每米 (H/m)

推导： $\Phi = LI \Rightarrow W_b = H \cdot A$
 $\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow () = \frac{T}{A \cdot m^{-1}} = \frac{W_b \cdot m^{-1}}{A \cdot m^{-1}} = H \cdot m^{-1}$

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

真空和空气的相对磁导率为1

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)

非铁磁性物质的 μ 近似等于 μ_0 .
而铁磁性物质的磁导率很高
, $\mu \gg \mu_0$



1-2 磁路的基本定律

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

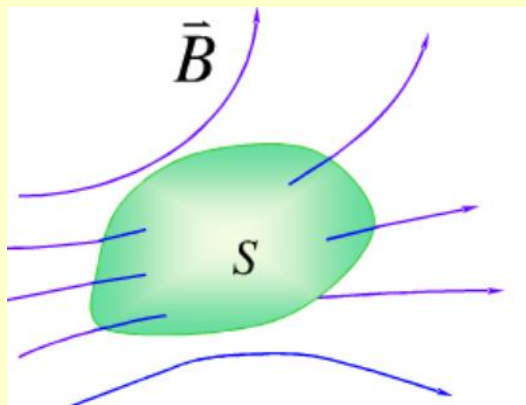
一、高斯定律（磁通连续性定律） $\sum_i \Phi_i = 0$ 类比·KCL

通过磁场中封闭曲面的总磁通量为零

- (1) 假设： 磁场中有一个封闭的曲面
- (2) 规定： 垂直于曲面而向外的方向为正方向

(3) 公式： $\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \oint_A B \cos \theta dA = 0$

(4) 图示：

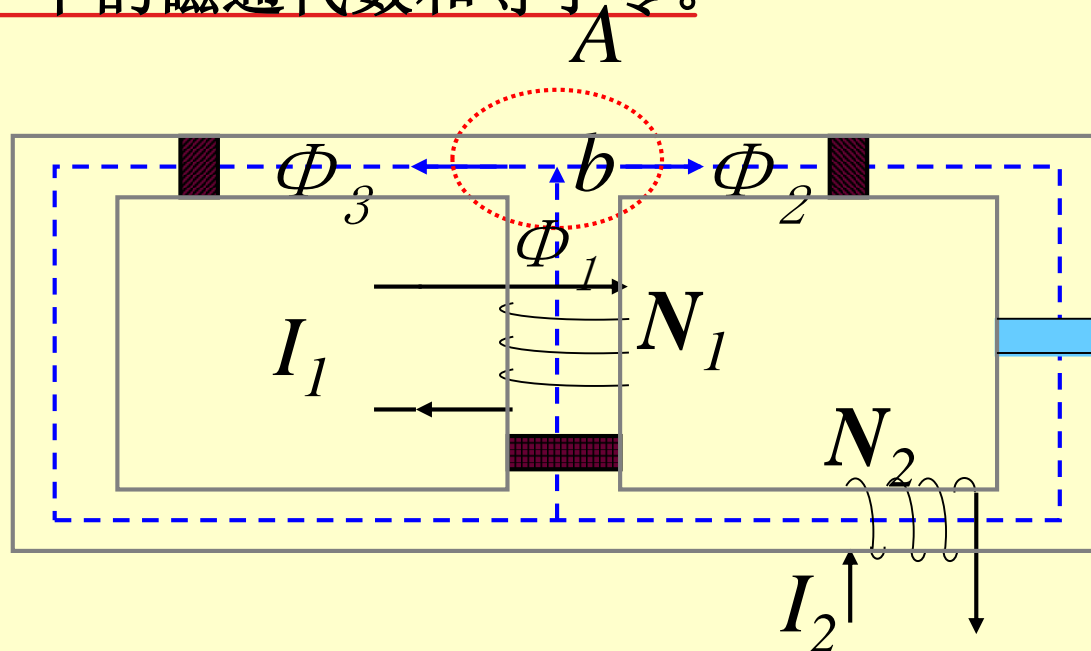


规定闭合曲面上所有矢量面元的单位法矢量一律指向外，且实验表明：磁感应线是无头无尾的。所以如果有磁感应线穿过闭合曲面的话，一定会出现某些地方穿出、另一些地方穿进



1-2 磁路的基本定律

根据高斯定律可得到：汇集在一点（b点）的多条磁路（分支磁路）中的磁通代数和等于零。



磁路基尔霍夫第一定律： $\Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_1 = 0$

$$\text{即：} \sum \Phi_i = 0$$



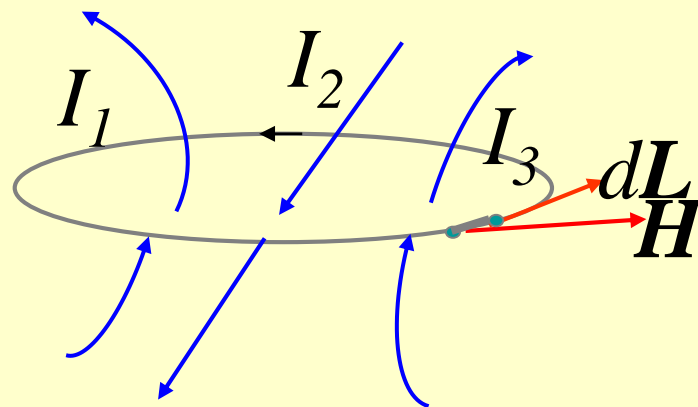
1-2 磁路的基本定律

二、安培环路定律（全电流定律）

空间中磁场强度 H 沿任意一条闭合路径 L 的线积分，
等于这个闭合路径所包围的各传导电流的代数和。

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \sum_i I_i$$

图中 $= I_1 + I_3 - I_2$

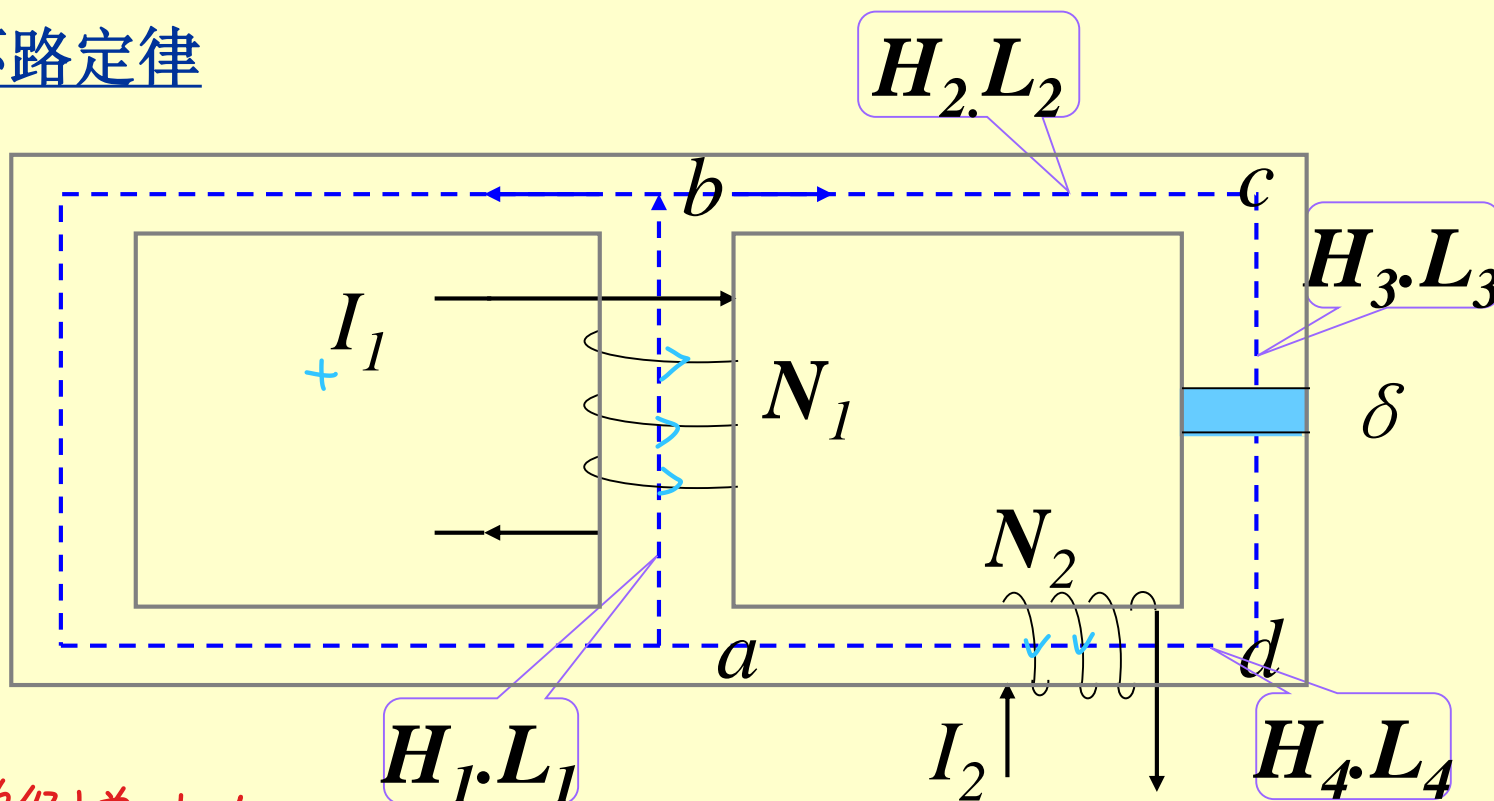


方向：电流方向和闭合路径方向符合右手定则为正，否则为负。



1-2 磁路的基本定律

安培环路定律



设闭合路径 L 为 $abcd a$

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = H_1 L_{ab} + H_2 L_{bc} + H_3 (L_{cd} - \delta) + H_\delta L_\delta + H_4 L_{ad} \\ = I_1 N_1 - I_2 N_2$$



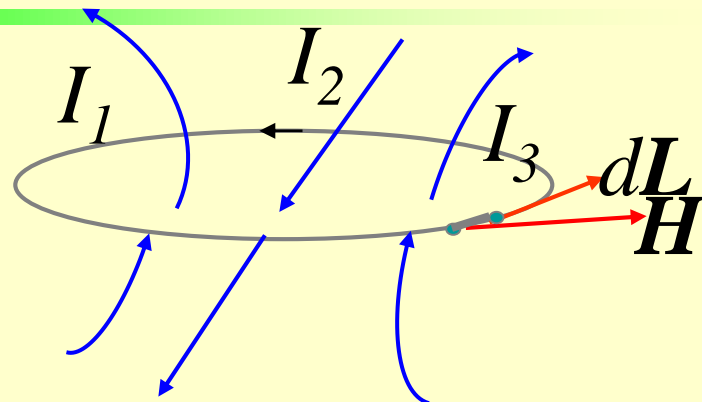
1-2 磁路的基本定律

$$\sum H_i L_i = \sum I_k N_k$$

定义:

磁路磁压降 $U_{mi} = H_i L_i$, 其方向与磁场 H_i 方向相同。

磁路磁动势 $F_{mk} = I_k N_k$, 其方向与电流 I 方向一致。

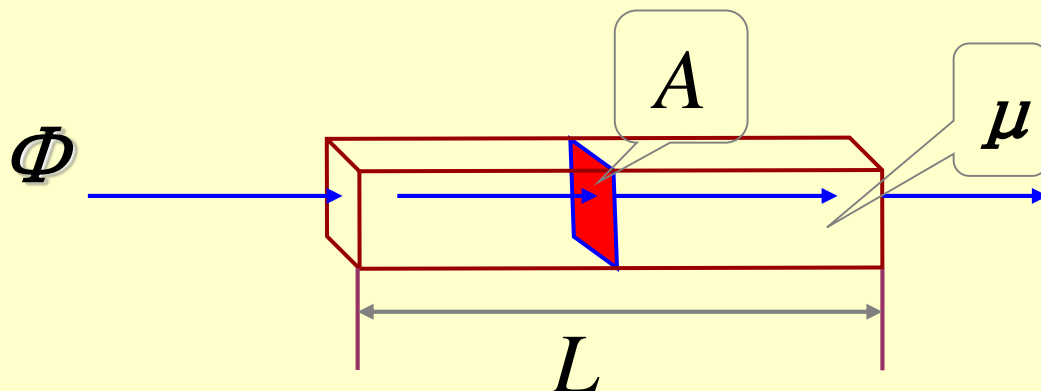


磁路基尔霍夫第二定律:

$$\underline{\sum_i U_{mi} = \sum_k F_{mk}}$$

1-2 磁路的基本定律

三、磁路欧姆定律



$$H = \frac{B}{\mu}, B = \frac{\Phi}{A}$$

磁路（磁压降）的欧姆定律： $U_m = HL = \frac{\Phi}{\mu A} L = \Phi R_m$

其中： $R_m = L / (\mu A)$ 称为该段磁路的磁阻，单位为 $1/H$

或 A/Wb；注：1. $R_m = \frac{U_m \leftarrow A}{\Phi \leftarrow Wb}$ $\Phi = LI$
 $Wb = HA$

$\Lambda = 1/R_m$ 称为磁导，单位为 H（亨）



1-2

磁路的基本定律

	磁路	电路
变量	磁感应强度 \vec{B} (T) 磁通 $\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$ (Wb) 磁位差 $U_m = \int_a^b \vec{H} \cdot d\vec{l} \rightarrow Hl$ 磁通势 $F_m = \sum i \rightarrow NI$ (A)	电流密度 \vec{J} (A/m ²) 电流 $I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$ (A) 电压 $U = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$ (V) 电动势 E (V)
定律	基尔霍夫磁通定律 $\sum \Phi = 0$ 基尔霍夫磁位差定律 $\sum U_m = \sum F_m$ 欧姆定律 $U_m = R_m \Phi$	基尔霍夫电流定律 $\sum I = 0$ 基尔霍夫电压定律 $\sum U = 0$ 欧姆定律 $U = RI$
参数	磁导率 μ (H/m) 磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ (1/H) 磁导 $\lambda = \frac{1}{R_m}$ (H)	电导率 γ (S/m) 电阻率 ρ 电阻 $R = \frac{l}{\gamma S} = \frac{\rho l}{S}$ (Ω) 电导 $G = \frac{1}{R}$ (S)

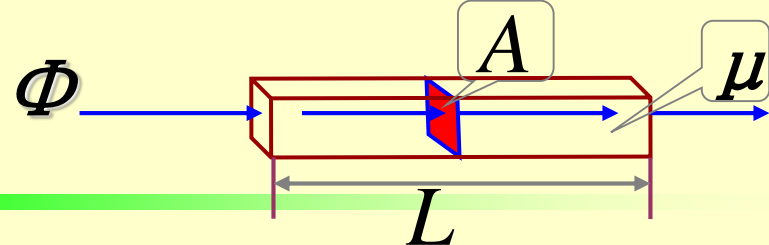
1-2 磁路的基本定律

磁路与电路的差别:☆

- 1) 直流磁路（内部）无损耗，直流电路有 i^2R 的损耗；
- 2) 磁路中的漏磁比电路中严重得多，电磁机构中，一般主磁通约占全部磁通的80%，漏磁通约占全部磁通的20%。
- 3) 对常用的铁磁材料，磁导率 μ 由B-H曲线决定，呈显著的非线性，而电阻率 ρ 一般可近似为常值；
- 4) 对线性电路可应用叠加定律，磁路一般呈显著的饱和非线性，一般不能应用叠加定律。



1-2 磁路的基本定律



- [例1] 有一闭合铁心磁路，铁心的截面积处处相等，磁路的平均长度 $L=0.3\text{m}$ ，铁心的相对磁导率为 ^{μ_r} 5000，套装在铁心上的励磁绕组为 ^{N} 500匝。试求在铁心中产生 ^{B} 1T的磁通密度时，所需的励磁磁动势和励磁电流。

磁通密度即磁感应强度 B
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$

解 用安培环路定律来求解。 磁场强度

$$H = \frac{B}{\mu F_{Fe}} = \frac{1}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 159 \text{ A/m}$$

磁动势 $F = \underbrace{HL}_{\text{磁压降 } U} = 159 \times 0.3 = 47.7 \text{ A}$

励磁电流 $I = F/N = 47.7/500 = 0.095 \text{ A}$

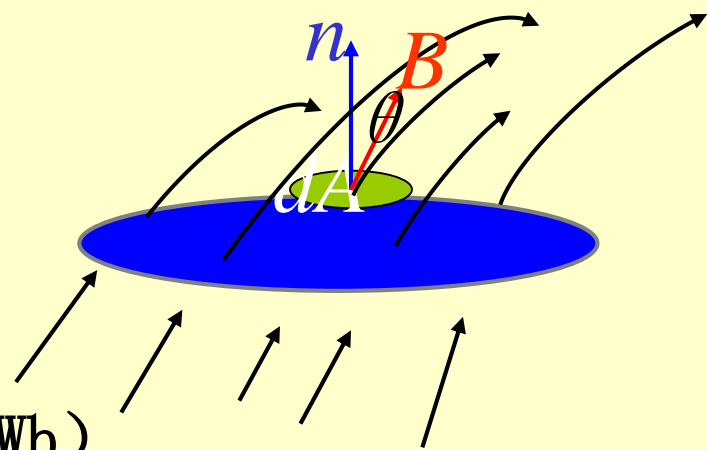


1-2 磁路的基本定律

四、法拉第定律（电磁感应定律）

当通过闭合导电回路所包围的面积内的磁通量 Φ 发生变化时，在回路上产生的感应电动势 e_i 总是与磁通量对时间 t 的变化率的负值成正比。

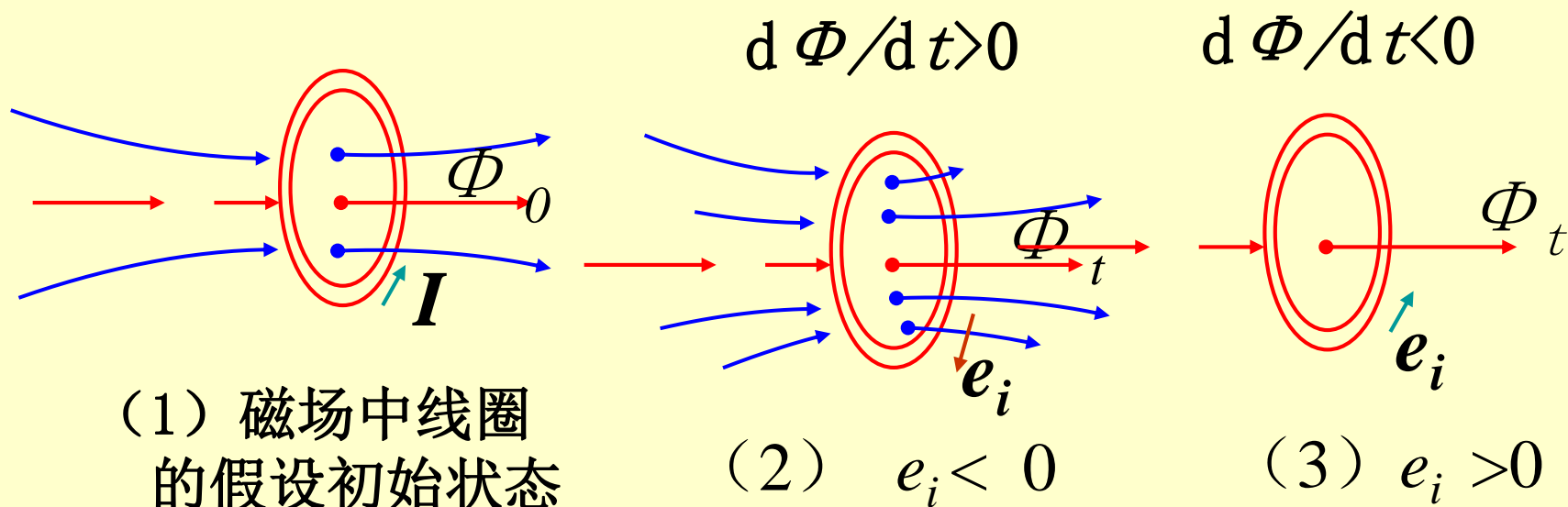
$$\underline{e_i = -\frac{d\Phi}{dt}}$$



其中：磁通 —— 单位为韦伯 （符号：Wb）
时间 —— 单位为秒 （符号：S）
电动势 — 单位为伏 （符号：V）



1-2 磁路的基本定律



线圈的总磁链

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

感应电势

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



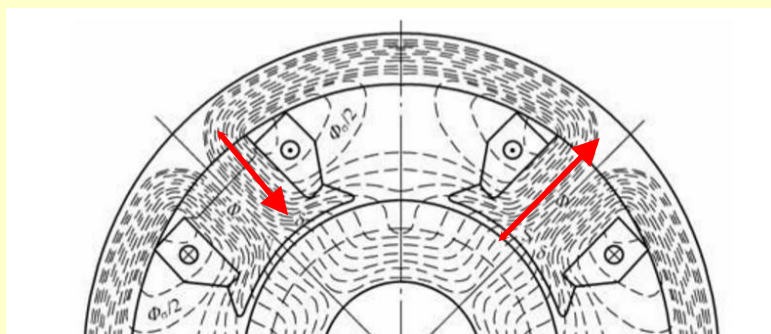
1-2 磁路的基本定律

引起磁链（磁通）变化的原因：

- (1) 磁通由交流电流产生，空间中任一点的磁通随时间变化；
- (2) 空间中各点磁通不变化，但线圈位置变化，磁链相应变化。

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

所以磁链的变化有



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

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



1-2 磁路的基本定律

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

变压器部分电势/感生电动势
(位置固定)

$$e_T = -\frac{\partial\psi}{\partial t}$$

旋转部分电势/动生电动势
(位置不同)

$$e_R = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} = -V \frac{\partial\psi}{\partial x}$$



1-2 磁路的基本定律

对于电磁元件的速度/感生电动势：感应电动势方向由右手定则确定。并且：

导线切割磁力线产生电势 $e = Blv$

单位：磁感应强度 —— 特斯拉（符号：T）

长度 —— 米（符号：m）

速度 —— 米每秒（符号：m/s）

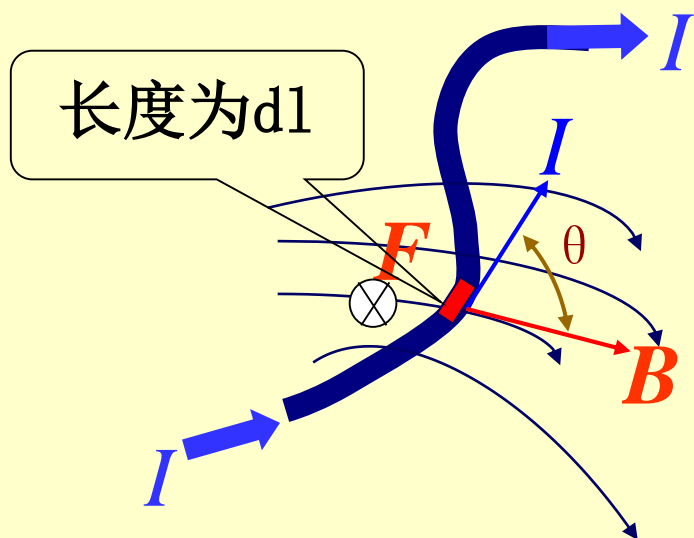
感应电势 —— 伏（符号：V）

对电感不变的线圈 $e = -L \frac{dI}{dt}$

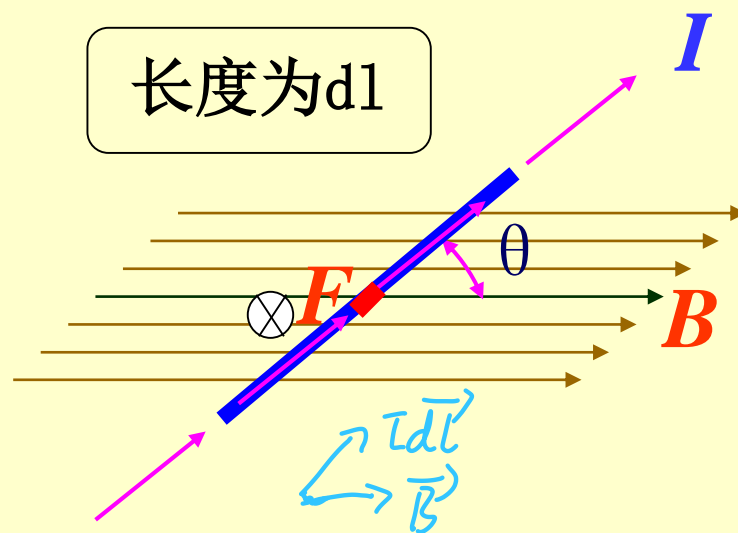


1-2 磁路的基本定律

五、安培电磁力定律



(a) 导线在任意磁场中受力



(b) 导线在均匀磁场中受力

$$\underline{dF = Idl \times B} = IdlB \sin \theta$$

(空间磁场中的导线受力)

1-2 磁路的基本定律

(均匀磁场中的导线受力)

$$F = BIL \sin \theta$$

当 B, I, L 三者垂直时 $F = BIL$

电磁力方向由左手定则确定。

若用叉乘 $d\vec{F} = I d\vec{r} \times \vec{B}$, 则应用右手来确定

单位:

B —— 单位为特斯拉 (符号: T)

I —— 单位为安培 (符号: A)

L —— 长度单位为米 (符号: m)

F —— 单位为牛顿 (符号: N)

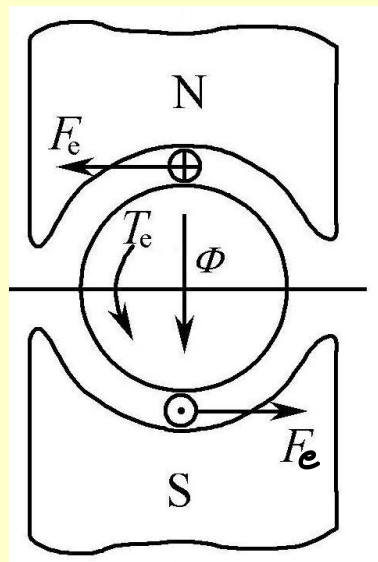


1-2 磁路的基本定律

电磁力与电磁转矩

- 1) 磁场中的载流导体所受的电磁力和力矩为

$$F_e = B l I \quad T_e = B l I r$$



- 2) 铁心表面的磁力

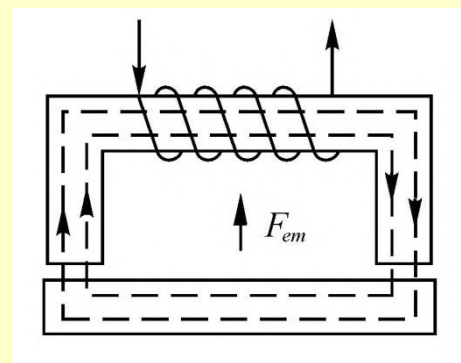
$$F_{em} = \frac{1}{2} \Phi_{\delta}^2 \frac{dR_{\delta}}{d\delta} = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 S}{\delta^2} I^2 N^2$$

- 3) 磁极间的力

气隙磁阻

↪ $\frac{d}{d\delta} (\frac{\delta}{\mu_0 S}) = \frac{1}{\mu_0 S}$

↪ $\Phi = BS = \mu_0 HS = \frac{N I \mu_0 S}{\delta}$



同性相斥，异性相吸，与距离平方成反比。

1-2

磁路的基本定律

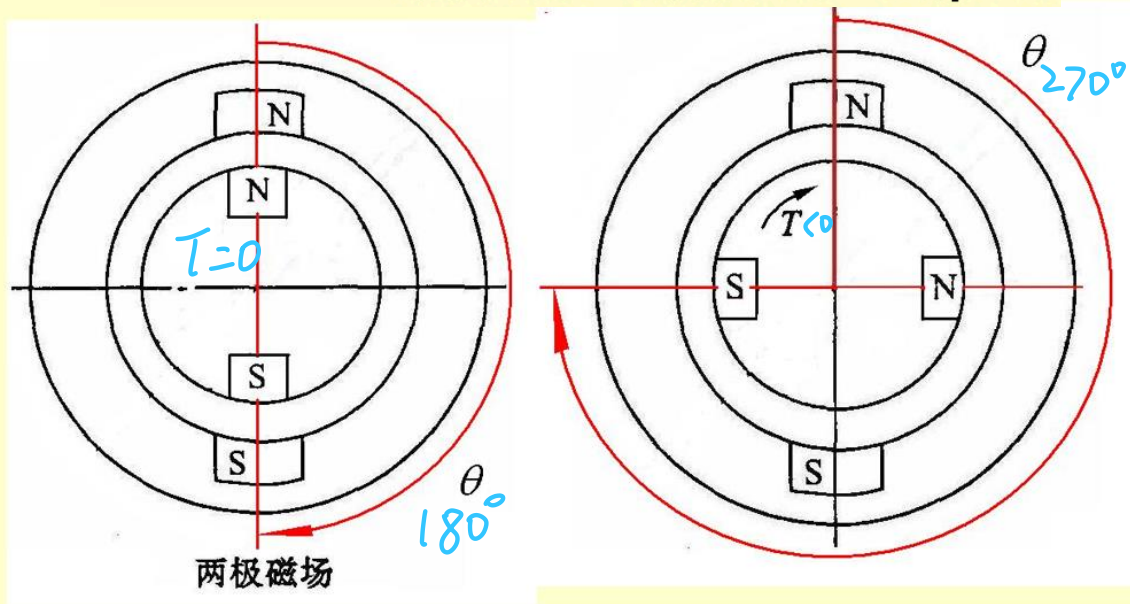
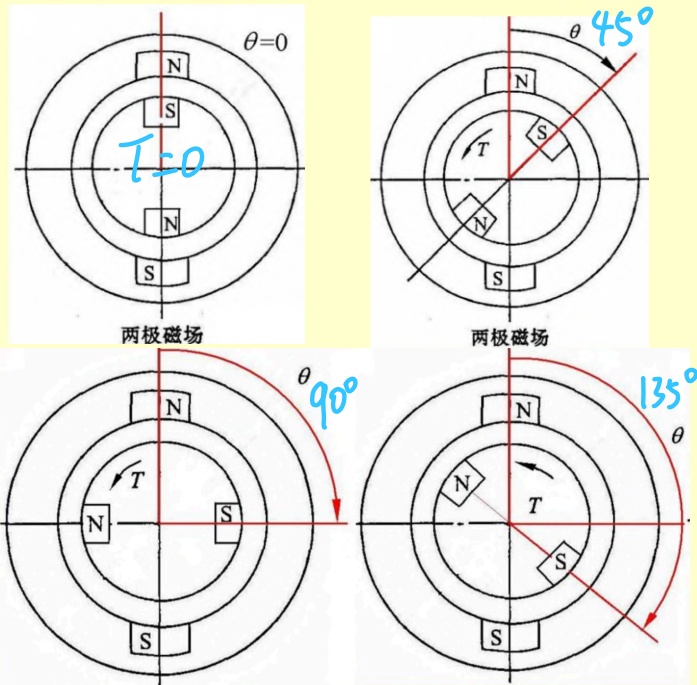
$T = K \sin(p\theta)$, p 为极对数, 极数 $P = 2p$
周期为 $\frac{360^\circ}{p}$

同步电机模型

圆柱面磁场间的力矩

圆柱面磁场间的力矩

【定子NS一对, 转子NS一对, $p=1$ 】



θ $0^\circ \sim 90^\circ \sim 180^\circ$ $\sim 270^\circ \sim 360^\circ$

$p=1$ 0 + + + 0 - - - 0

转子力矩T方向

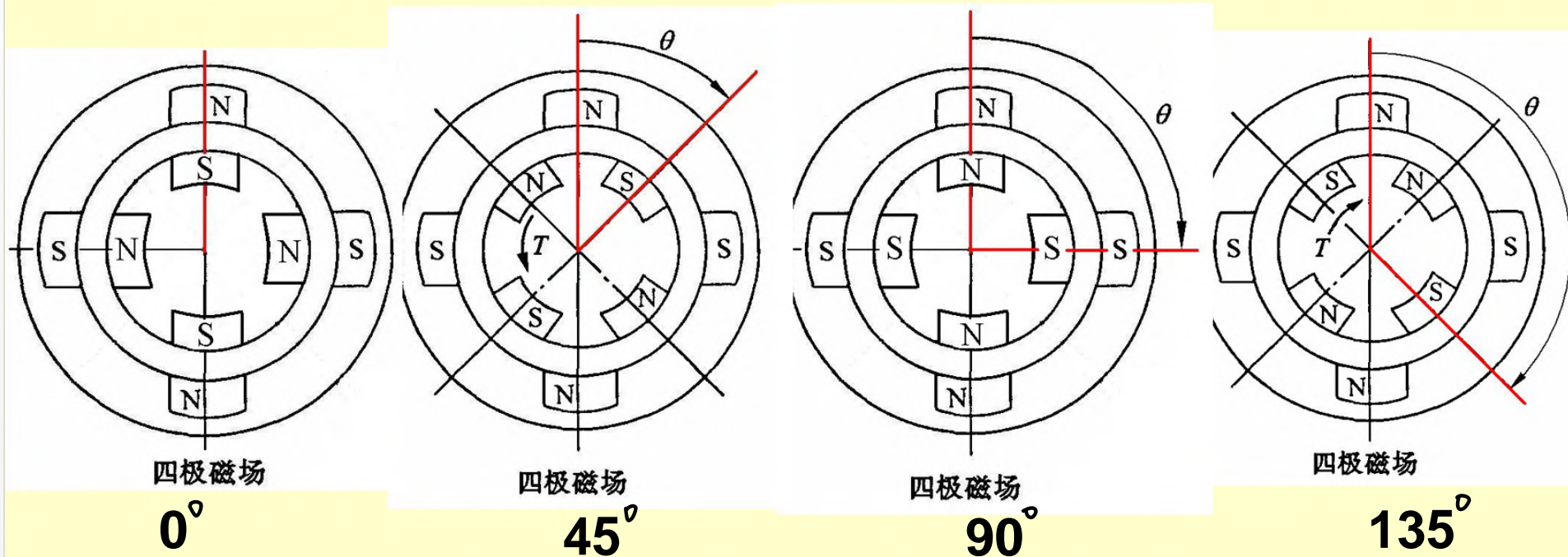
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1-2 磁路的基本定律

【定子NS一对（固定），
转子NS 2对， $p=2$ 】

圆柱面磁场间的力矩



θ	0°	\sim	90°	\sim	180°	\sim	270°	\sim	360°
$p = 2$	0	+	0	-	0	+	0	-	0