

§ 9.7 物质的磁性

前面几节中我们讨论了电流和运动电荷在真空中激发的磁场，如果磁场中有实物存在，则由于磁场和实物的相互作用，实物内部状态发生变化，从而改变原来的磁场分布，这些实物称为——磁介质

一. 磁介质及其分类

1. 磁介质——任何实物都是磁介质

在电场中，电场与电介质之间相互作用，结果是电介质发生极化并产生附加电场，即：

电介质放入外场 $\vec{E}_0 \longrightarrow \vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

类似的在磁场中，磁介质与磁场之间相互作用，磁介质被磁化并产生附加磁场，即：

磁介质放入外场 $\vec{B}_0 \longrightarrow \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

实验表明：不同磁介质产生的 \vec{B}' 大小和方向不同
引入物理量 $\mu_r = B/B_0$ —— 磁介质的相对磁导率
—— 反映磁介质对原场 \vec{B}_0 的影响程度

2. 磁介质的分类

抗磁质 $\mu_r < 1$ 抗磁质产生的附加磁场 \vec{B}' 与 \vec{B}_0 反向

➡ $B < B_0$ 减弱原场

如 锌、铜、水银、铅等

顺磁质 $\mu_r > 1$ 顺磁质产生的附加磁场 \vec{B}' 与 \vec{B}_0 同向

➡ $B > B_0$ 增强原场

如 锰、铬、铂、氧等

顺磁质和抗磁质 $|\vec{B}'| \ll |\vec{B}_0| \Rightarrow \mu_r \approx 1, B \approx B_0$

弱磁性物质

铁磁质 $\mu_r \gg 1$ ($10^2 \sim 10^4$) 通常不是常数

具有显著的增强原磁场的性质 —— 强磁性物质

二. 磁化机理

1. 安培分子环流的概念和方法

物质由原子或分子组成，原子或分子中的电子不停的参与两种运动：绕核的转动：形成轨道磁矩。

电子的自旋：形成自旋磁矩。

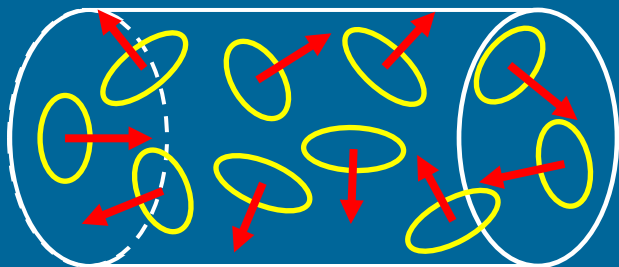
分子磁矩 —— 分子中所有电子磁矩的总和

分子电流：将分子磁矩（分子中所有电子运动产生的磁效应总和）看作是由一个等效圆电流产生的，

这个等效的圆电流称为分子电流 \vec{i}_m

研究发现：抗磁质 $\vec{P}_m = 0$ 无外场作用时，对外不显磁性

顺磁质 $\vec{P}_m \neq 0$ 无外场作用时，由于热运动，对外也不显磁性



$$\sum \bar{P}_m = 0$$

2. 磁介质的磁化

抗磁效应：所有物质放入外磁场中受外磁场作用后，均产生一个和外磁场方向相反的附加磁场。

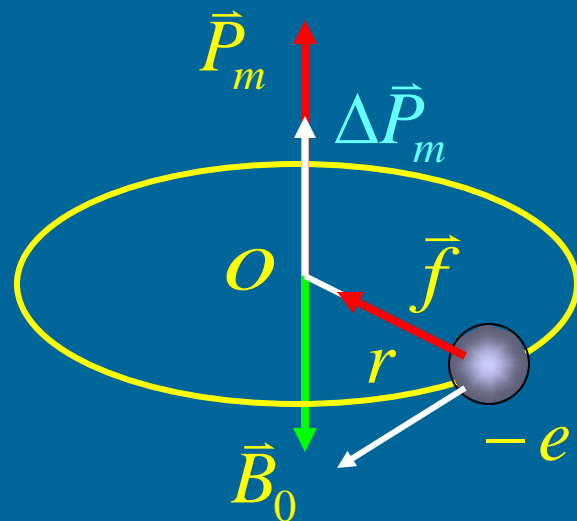
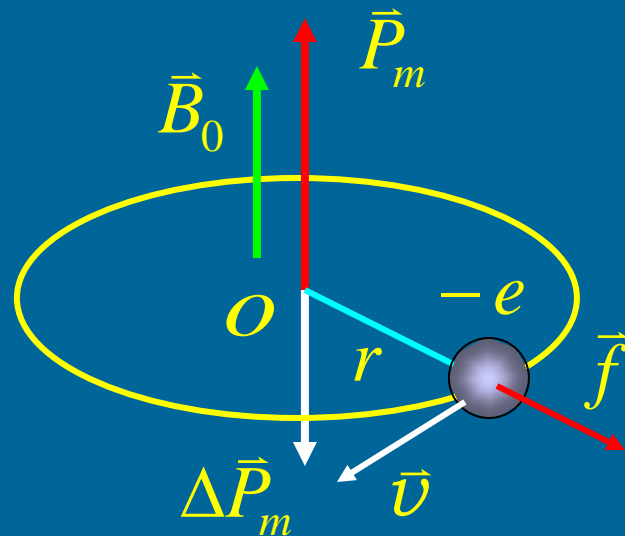
当外场方向与电子的磁矩方向相同时

$$\vec{f} \longrightarrow \omega \downarrow \longrightarrow \bar{P}_m \downarrow (\Delta \bar{P}_m)$$

电子轨道半径不变

当外场方向与电子的磁矩反方向时

$$\vec{f} \longrightarrow \omega \uparrow \longrightarrow \bar{P}_m \uparrow (\Delta \bar{P}_m)$$



结论： 在外场作用下，电子产生附加的转动，从而形成附加的 $\Delta \vec{P}_m$ ，附加磁矩（也称感应磁矩）总是与外场方向 \vec{B}_0 相反，即产生一个与外场反向的附加磁场 $\Delta \vec{B}'$

抗磁质磁化

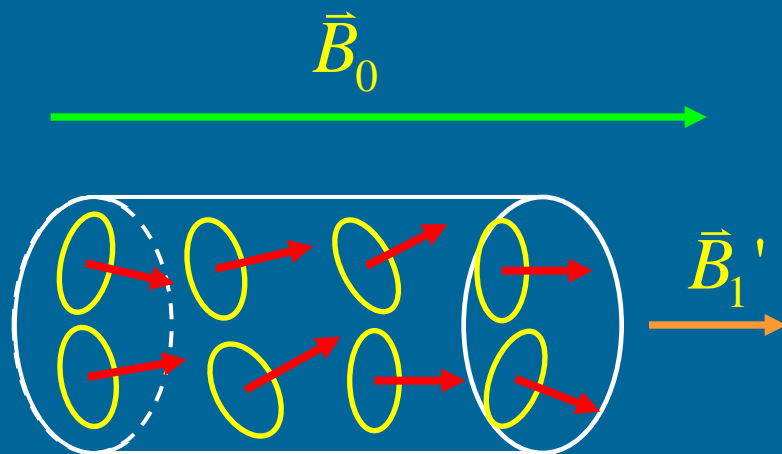
在外场作用下，每个分子中的所有电子都产生感应磁矩 $\Delta \vec{P}_m$

则磁介质产生附加磁场 $\vec{B}' = \sum \Delta \vec{B}' \longrightarrow$ 与外场方向相反

顺磁质磁化

将顺磁质放入外场 \vec{B}_0

分子环流在外场作用下，产生取向转动，分子固有磁矩将转向外场方向 —— 宏观上产生附加磁场 \vec{B}_1'



分子磁矩发生转向的同时，由于抗磁效应每个分子中的所有电子也都产生附加磁矩，即产生一个与外场反向的附加磁场 \bar{B}_2' 则磁介质产生总附加磁场 $\bar{B}' = \bar{B}_1' + \bar{B}_2' \approx \bar{B}_1'$

➡ 与外场方向相同

三. 有磁介质的磁高斯定理

磁介质存在时： $\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}'$ 即：总的磁感应强度 \bar{B} 为 \bar{B}_0 与磁介质磁化后的附加场 \bar{B}' 的和。

因磁感应线仍是一系列无头无尾的闭合曲线，不论对 \bar{B}_0 还是

\bar{B}' 都有： $\oiint_S \bar{B}_0 \cdot d\vec{S} = 0$ $\oiint_S \bar{B}' \cdot d\vec{S} = 0$ S 为任意闭合曲面

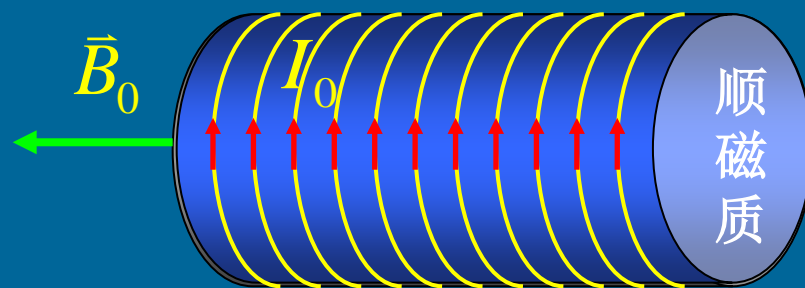
$$\Rightarrow \oiint_S \bar{B} \cdot d\vec{S} = \oiint_S \bar{B}_0 \cdot d\vec{S} + \oiint_S \bar{B}' \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\boxed{\oiint_S \bar{B} \cdot d\vec{S} = 0} \quad (\text{含磁介质的磁高斯定理})$$

四. 有磁介质时的安培环路定理

1. 束缚电流（磁化电流） 以无限长螺线管为例说明磁化电流

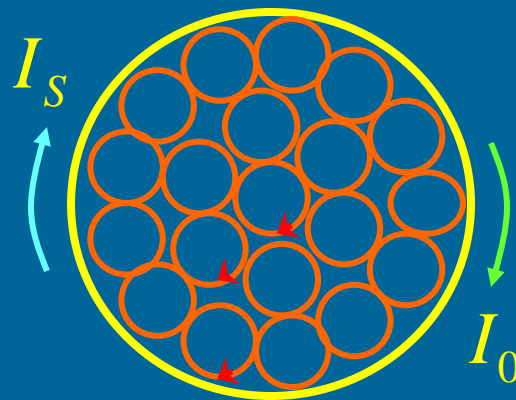
传导电流 I_0 在环内产生磁场 \vec{B}_0
使顺磁质中的分子磁矩转向 \vec{B}_0
方向，如图是一横截面上各分子
子电流的排列情况。



在磁介质内部的任一小区域：
相邻的分子环流的方向相反
在磁介质表面处各点：

分子环流未被抵消

形成沿表面流动的面电流 I_s ——束缚电流



如果介质为顺磁质，则 I_s 与 I_0 方向相同

如果介质为抗磁质，则 I_s 与 I_0 方向相反

结论：介质中磁场由传导和束缚电流共同产生。

2. 磁介质中的安培环路定理

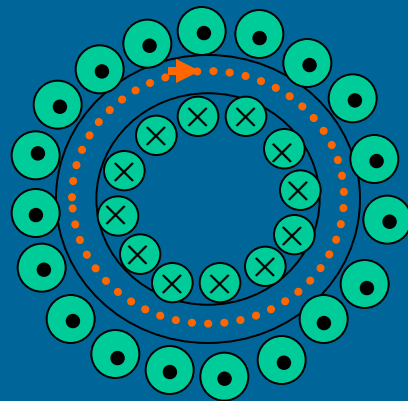
(下面从螺绕环这一特例推出介质中的安培环路定理)

设传导电流为 I ，束缚电流为 I_s

螺绕环总匝数为 N ，磁介质的

相对磁导率为 μ_r 。

取以 r 为半径的闭合同心圆周为积分路径。如图绕行方向顺时针



利用真空中的安培环路定理

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(NI + I_s) \quad (1)$$

式中 $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

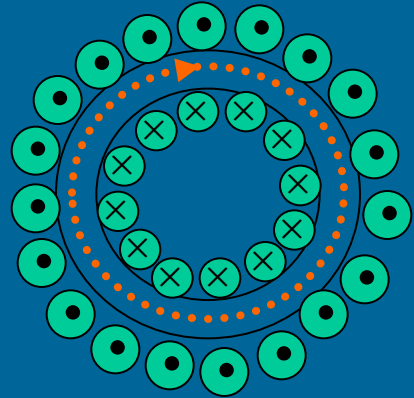
由上式 $B \cdot 2\pi r = \mu_0(NI + I_s)$

无介质时: $B_0 2\pi r = \mu_0 NI$

$$\Rightarrow \frac{B}{B_0} = \mu_r = \frac{NI + I_s}{NI}$$

$$\Rightarrow NI + I_s = \mu_r NI \quad \text{代入 (1) 式}$$

$$\Rightarrow \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r NI$$



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r NI$$

$$\text{令 } \mu = \mu_0 \mu_r$$

NI 为闭合路径所包围的传导电流代数和, 记为: $\sum_{\text{内}} I$

$$\Rightarrow \oint_L \frac{\vec{B}}{\mu} \cdot d\vec{l} = \sum_{\text{内}} I$$

$$\text{令 } \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{H}$$

\vec{H} ——称为磁场强度矢量。

$$\Rightarrow \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{\text{内}} I$$

——介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{\text{内}} I \quad \text{——介质中的安培环路定理}$$

\vec{H} 矢量沿任一闭合路径的线积分，等于闭合路径所包围的传导电流的代数和，与束缚电流及闭合路径之外的传导电流无关。



讨论

(1) \vec{H} 与电场的 \vec{D} 一样，是一辅助物理量，它与介质有关，只要是各向同性介质， \vec{H} 与 \vec{B} 总是同方向的。

\vec{H} 单位是 A/m 。

(2) 有介质存在的情况下，可用安培环路定理求解磁场强度，然后再求解磁感应强度。

例：铜导线 R_1 I ，外包一层磁介质 R_2 μ_r

已知： $\mu_{\text{铜}} \approx \mu_0$

求： \vec{H} \vec{B}

解： $r < R_1$

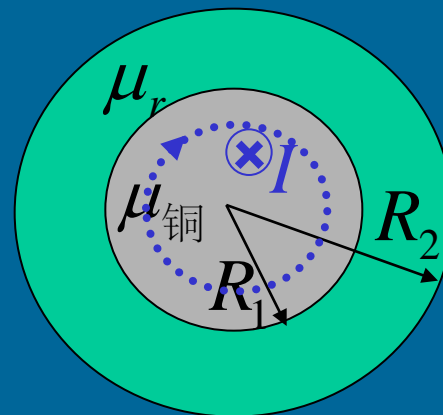
$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = \frac{I}{\pi R_1^2} \pi r^2$$

$$H = \frac{Ir}{2\pi R_1^2} \quad B = \mu_{\text{铜}} H \approx \mu_0 H = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R_1^2}$$

$$R_1 < r < R_2$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = I$$

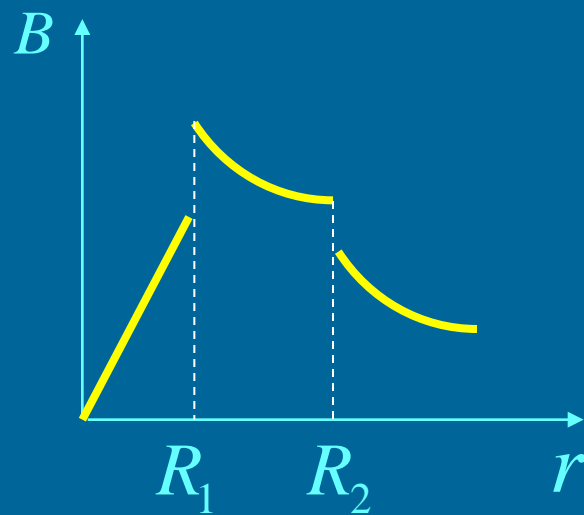
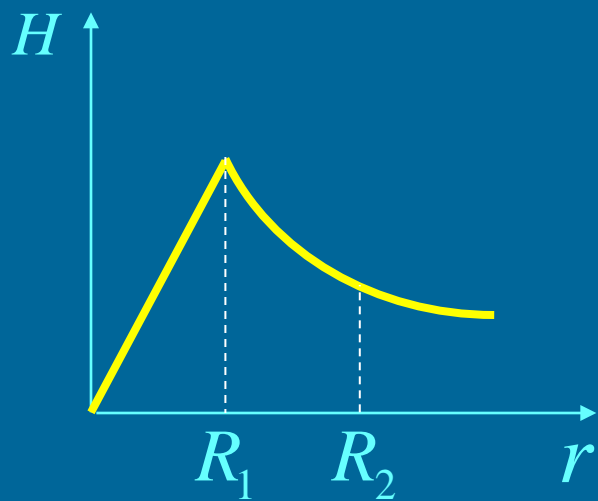
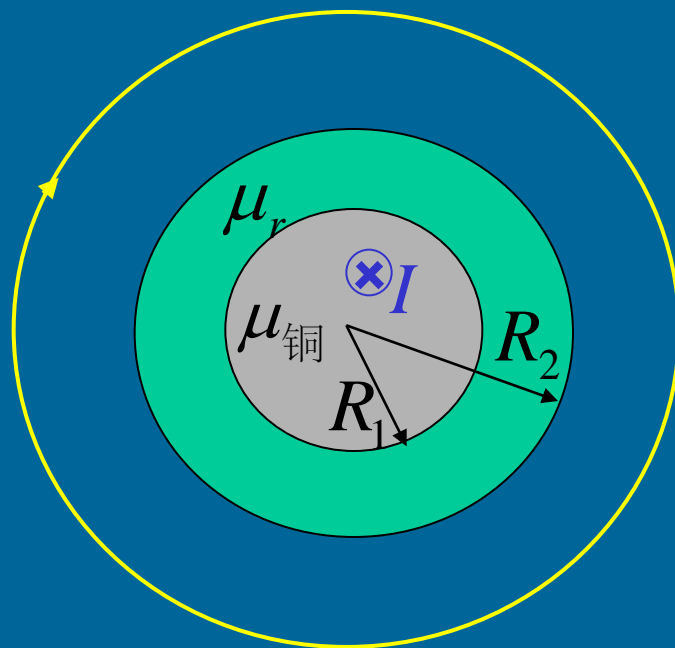
$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \mu_0 \mu_r H = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r}$$



$$r > R_2$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



五. 铁磁质

主要特征 { 在外场中，铁磁质可使原磁场大大增强。
撤去外磁场后，铁磁质仍能保留部分磁性。

1. 磁畴理论 —— 磁铁被磁化微观机理

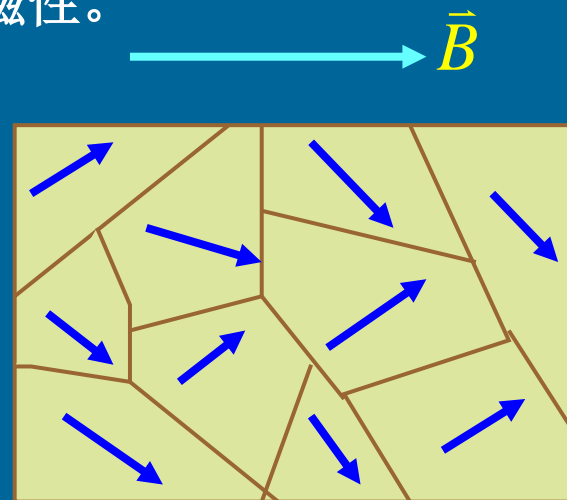
铁磁质中，磁性主要来源于电子的自旋磁矩，相邻电子之间相互作用很强烈，在这种作用下，铁磁质中自发形成一些小区域叫磁畴，磁畴中电子的自旋磁矩整齐排列。对外表现出磁性。

无 \vec{B}_0 —— 整个铁磁质的总磁矩为零

有 \vec{B}_0 { 磁化方向与 \vec{B}_0 同向的磁畴扩大
磁化方向转向 \vec{B}_0 的方向

→ 使磁场大大增强

外场撤去，被磁化的铁磁质受体内杂质和
内应力的阻碍，不能恢复磁化前的状态。



有外磁场

2. 铁磁质的磁化规律 磁化曲线

一般磁介质： $B = \mu H$ μ 为常数

$B \sim H$ 为线性关系。

铁磁质的 $B \sim H$ 关系为非线性， μ 不为常数。

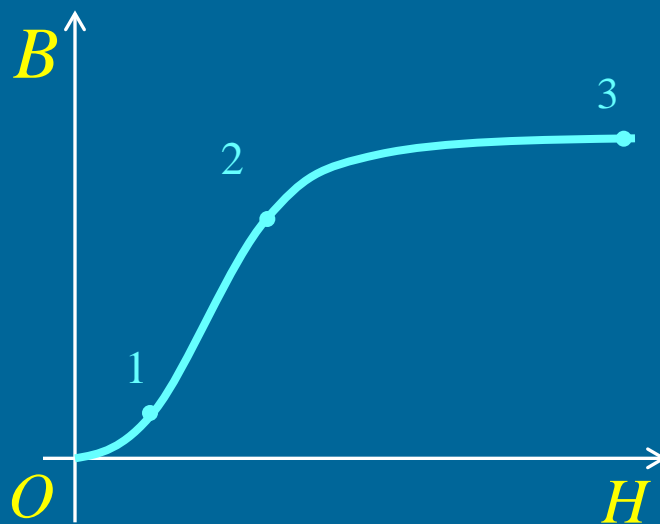
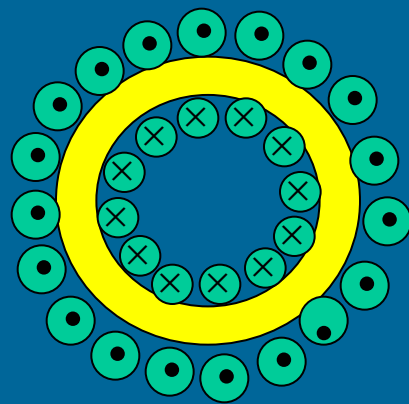
用待测的铁磁质制成如图所示的螺绕环，通以变化的电流 I ，可控制螺绕环中的磁场强度 H

$$H = nI$$

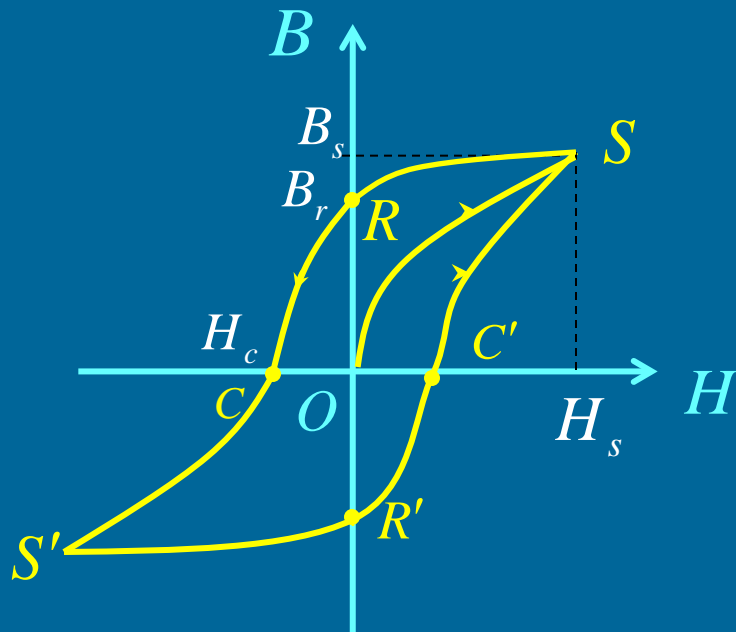
再测出 B ，即可画出 $B \sim H$ 曲线。

随着 H 增大，在01段， B 缓慢增加，在12段， B 急剧增加，从2到3， B 增加缓慢并达到饱和。

从 $0 \rightarrow 3$ 这一段 $B \sim H$ 曲线称为铁磁芯的起始磁化曲线。



磁滞回线 ($B \sim H$ 回线)



明确两个概念：

(1) 剩磁

$$H = 0, B = B_r \neq 0$$

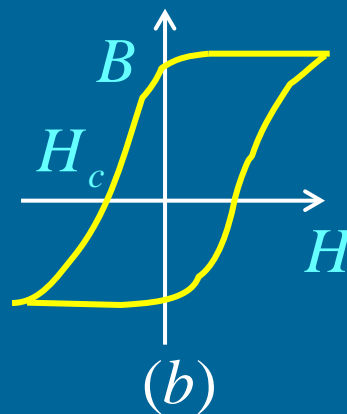
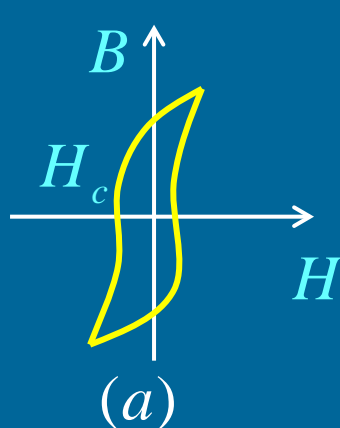
B_r 称为剩磁。

(2) 矫顽力

为消除剩磁，加一反向磁场，当 $H = -H_c$ 时， $B = 0$
反向磁场强度 H_c 称为矫顽力，曲线 $R \rightarrow C$ 退磁曲线。

磁化铁磁质要消耗能量，其大小正比于回线面积。

3. 铁磁质的种类



(a) 软磁物质

H_c 小，易磁化，易于退磁，用于变压器电机的铁芯。

(b) 硬磁物质

H_c 大 B_r 大，不易去磁，能较长时间保持磁性，作永久磁体（磁铁）如钴钢、碳钢。

✦ 总结

1. 含磁介质的磁高斯定理

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

2. 介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{\text{内}} I \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$

3. 铁磁质

- 起始磁化曲线、磁滞回线、剩磁、矫顽力
- 铁磁质的种类