

§ 2 磁介质 (研究方法 with 电介质类比)



场对介质的作用和介质的磁化互相影响、互相制约.

主要内容:

磁介质定义及分类

顺、抗磁质的磁化

磁化强度矢量

磁介质中的安培环路定理

铁磁质



磁性、磁介质、磁化

磁性：

- ◆ 物质的基本属性之一，即物质的磁学特性；
- ◆ 吸铁石——天然磁体—— 具有强磁性；
- ◆ 多数物质一般情况下没有明显的磁性。

磁介质：

- ◆ 对磁场有一定响应, 并能反过来影响磁场的物质；
- ◆ 一般物质在较强磁场的作用下都显示出一定程度的磁性，即都能对磁场的作用有所响应，所以都是磁介质。

磁化

- ◆ 在外磁场的作用下，原来没有磁性的物质，变得具有磁性，简称磁化。磁介质被磁化后，会产生附加磁场，从而改变原来空间磁场的分布。



“分子电流”模型

问题的提出

- ◆ 为什么物质对磁场有响应？
- ◆ 为什么不同类型的物质对磁场有不同的响应，即具有不同的磁性？
- ◆ 与物质内部的电磁结构有着密切的联系

分子电流

安培的大胆假设：

一切磁现象的根源是电流。

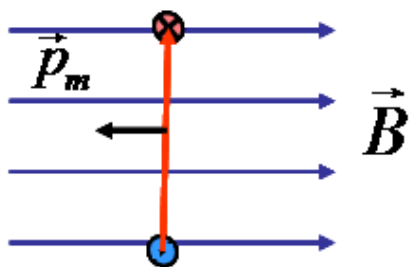
磁介质的“分子”相当于一个**环形电流**，是电荷的某种运动形成的。

分子的环形电流具有磁矩——分子磁矩，在外磁场的作用下可以自由地改变方向。

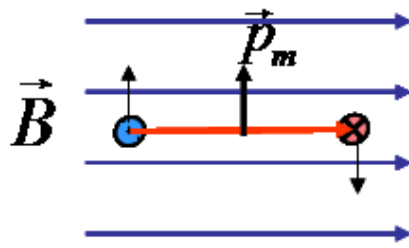
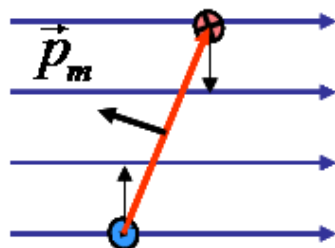
力矩

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$

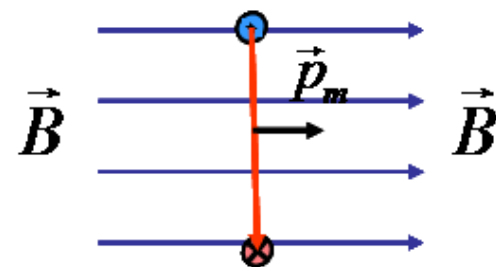
\vec{p}_m : 磁矩



非稳定平衡态



力矩最大



稳定平衡态



1. 磁导率

磁介质的磁化:

磁场中放入磁介质 \longrightarrow 磁介质发生磁化 \longrightarrow 产生附加磁场

磁介质在磁场的作用所发生的变化——磁介质的磁化

真空中的磁感应强度为 B_0 ，磁介质磁化而产生的附加磁场为 B' ，磁感应强度为 B ，则

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$



实验发现：有、无磁介质的螺线管内磁感应强度的比值，可表征它们在磁场中的性质。

* 相对磁导率：

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}$$

相对介电常数： $\varepsilon_r = 1 + \chi_e$

* 绝对磁导率：

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

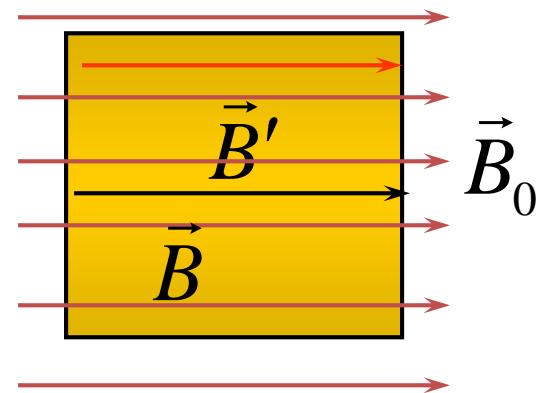
绝对介电常量： $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

2. 磁介质的分类

①. 顺磁介质

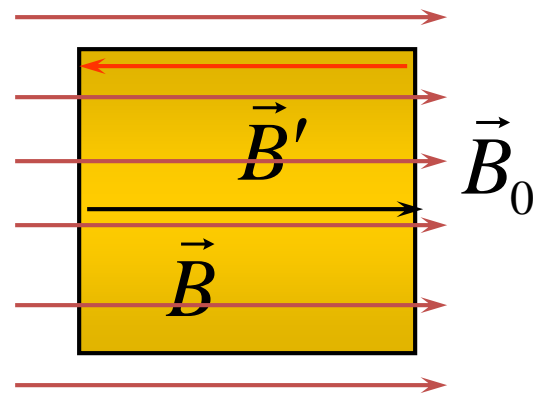
顺磁介质中产生的附加磁场 \vec{B}' 与外场 \vec{B}_0 方向相同，磁介质中的场 \vec{B} 要比外场 \vec{B}_0 大。

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' > \vec{B}_0 \quad \text{如铝、锰、铬等。}$$



②. 抗磁介质

抗磁介质中产生的附加磁场 \vec{B}' 与外场 \vec{B}_0 方向相反，磁介质中的场 \vec{B} 要比外场 \vec{B}_0 小。



$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' < \vec{B}_0$$

如金属金、银、铜等。

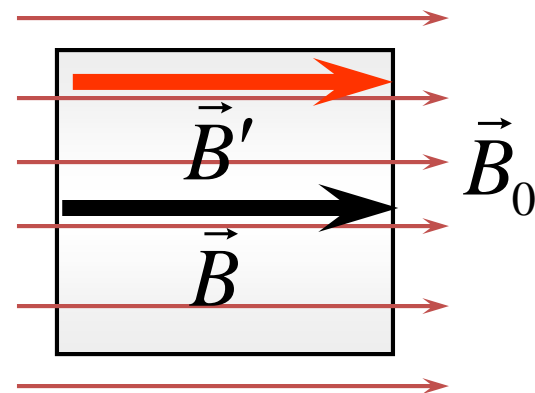
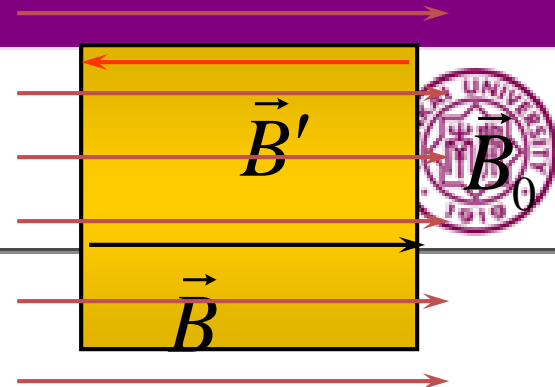
超导体是理想的抗磁质。

③铁磁介质

铁磁介质中产生的附加磁场 \vec{B}' 与外场 \vec{B}_0 方向相同，但磁介质中的场 \vec{B} 要远比外场 \vec{B}_0 大，是外场的几百倍到几万倍。

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \gg \vec{B}_0$$

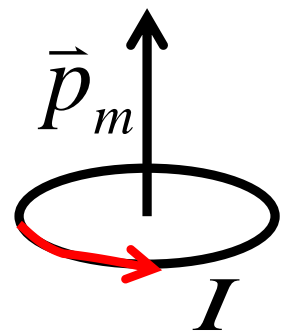
如金属钢、铁、钴、镍等。



3. 磁介质的磁化机制

类似电介质的讨论，从物质电结构来说明磁性的起源。

原子中电子参与两种运动：自旋及绕核的轨道运动，对应有所谓自旋磁矩和轨道磁矩。



整个分子磁矩等于其中各个电子的轨道磁矩和自旋磁矩以及核的自旋磁矩的矢量和（核的自旋磁矩常可忽略）。

顺磁质：由具有固有磁矩的分子组成。分子中各电子的磁矩不完全抵消，整个分子具有一定的固有磁矩。

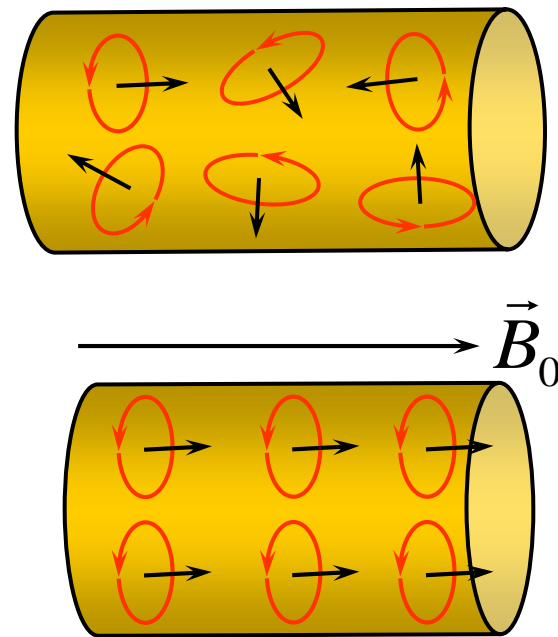
抗磁质：分子中各电子的磁矩完全抵消，整个分子不具有固有的磁矩。

(1) 顺磁质的磁化机制

磁介质是由大量分子或原子组成，无外场时，顺磁质分子的磁矩排列杂乱无章，介质内分子磁矩的矢量和 $\sum \vec{P}_m = 0$ 。

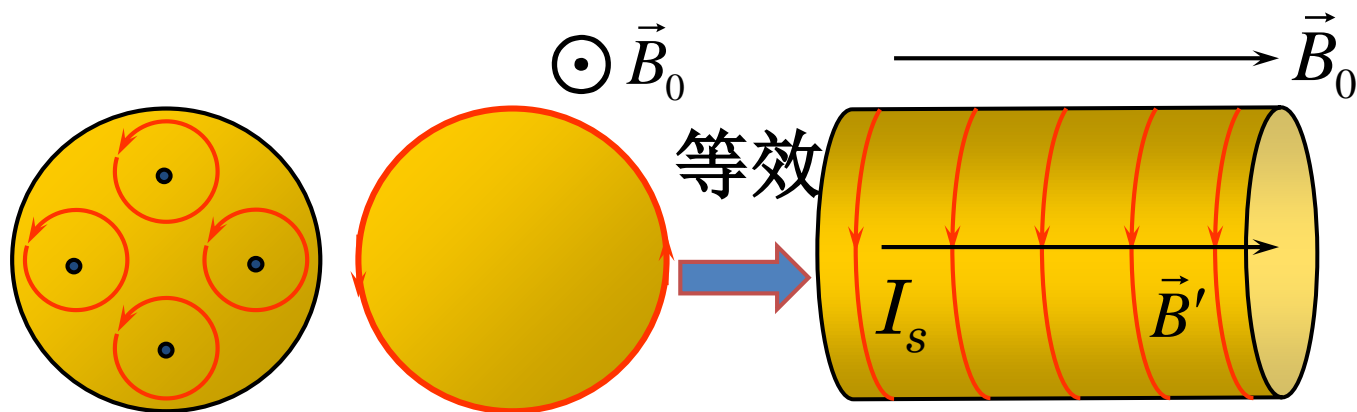
有外磁场时，这些分子固有磁矩就要受到磁场的力矩作用，其方向力图使分子磁矩的方向沿外场转向。各分子磁矩都在一定程度上沿外磁场方向排列起来。

分子磁矩的矢量和： $\sum \vec{P}_m \neq 0$





从导体横截面看，导体内部分子电流两两反向，相互抵消。导体边缘分子电流同向，未被抵消的分子电流沿着柱面流动。



分子电流可等效成磁介质表面的磁化电流 I_s ， I_s 产生附加磁场。

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' > \vec{B}_0$$

磁化电流 I_s 可产生附加磁场，但无热效应，因为无宏观电荷的移动，磁化电流束缚在介质表面上，不可引出，因此，磁化电流也称为束缚电流。

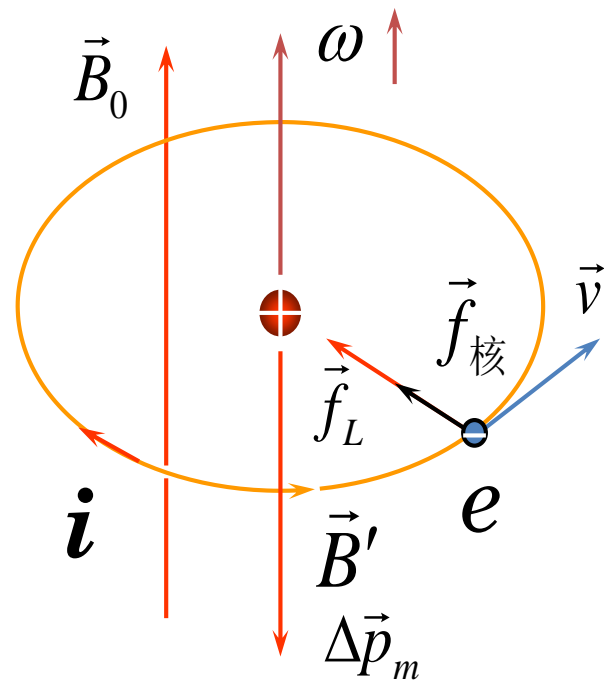
(2) 抗磁质的磁化机制

对抗磁介质来说，无外磁场时，各电子的磁矩矢量和为 **0**，分子磁矩 $\sum \vec{P}_m = 0$ ，分子不显磁性。

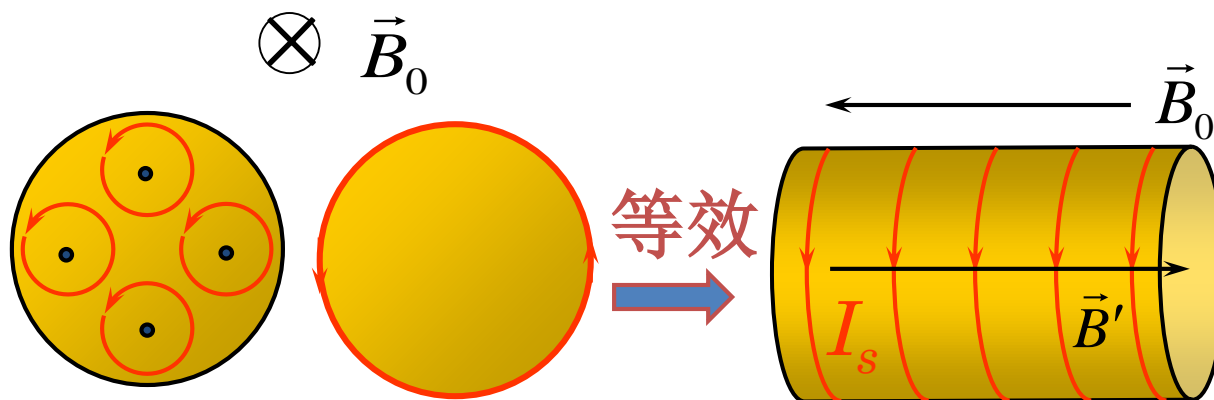
加外磁场后，电子受的向心力为核力和洛仑兹力的叠加，

$$\vec{f}_{\text{心}} = \vec{f}_{\text{核}} + \vec{f}_L > \vec{f}_{\text{核}} \longrightarrow \omega \uparrow \longrightarrow \vec{i} \uparrow$$

—— 产生反向电子附加磁矩 $\Delta \vec{p}_m \longrightarrow \vec{B}'$



同理，分子电流可等效成磁介质表面的磁化电流 I_s ， I_s 产生附加磁场。





几点说明:

- ①.抗磁性是一切磁介质固有的特性，它不仅存在于抗磁介质中，也存在于顺磁介质中；
- ②.对于顺磁介质分子磁矩 $>$ 电子附加磁矩，顺磁效应 $>$ 抗磁效应；
- ③.抗磁介质中电子附加磁矩起主要作用，显抗磁性。

结论：顺抗磁化微观机制不同，但宏观上表现相同，均在介质表面（或内部）出现磁化电流。

磁化电流



在磁化状态下,由于分子电流的有序排列,磁介质中将出现宏观电流,称为磁化电流。

磁化电流和传导电流区别:

- 1) 磁化电流的产生不伴随电荷的宏观移动,故磁化电流又称为束缚电流。相反,凡伴随电荷的宏观位移的电流称为传导电流;
- 2) 磁化电流可存在于一切磁介质(包括绝缘体和导体)中,不具有焦耳热效应;传导电流则只能存在于导体(包括半导体和电离气体)中,具有焦耳热效应;
- 3) 尽管两种电流在产生机制和热效应方面存在区别,但在激发磁场和受磁场作用方面却是完全一致的。



4. 磁化强度矢量

表征物质的宏观磁性或介质的磁化程度的物理量。

(1)定义：单位体积内分子磁矩的矢量和。

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{P}_{mi}}{\Delta V} \quad \text{它与介质特性、温度与统计规律有关。}$$

其中： \vec{P}_{mi} 是第*i*个分子的磁矩；

ΔV 宏观无限小微观无限大；

方向：与分子磁矩矢量和同向。

单位：安/米，A/m

注意：

顺磁质 \vec{M} 与 \vec{B}_0 同向，
所以 \vec{B} 与 \vec{B}_0 同方向

抗磁质 \vec{M} 与 \vec{B}_0 反向，
所以 \vec{B} 与 \vec{B}_0 反方向，

①.无外磁场 \vec{B}_0 时，介质中 $\vec{M} = 0$ 。因为 $\sum \vec{P}_m = 0$

②.真空中 $\vec{M} = 0$ 。 因为没有磁介质。



(2)磁化强度与磁化电流 I_s 的关系

在外磁场作用下，介质中的分子电流可等效成介质表面的磁化电流 I_s ，它产生附加磁场，但无热效应。

定义： 沿磁介质轴线方向上单位长度的磁化电流称为磁化电流密度 j_s 。

$$j_s = \frac{I_s}{L}$$

结论1： 磁化强度的切向分量等于磁化电流密度。

$$M_t = j_s$$

$$\vec{j}_s = \vec{M} \times \hat{n} \quad (\text{磁介质表面外法向单位矢量})$$

电介质有 $\sigma' = \vec{P} \cdot \hat{n}$ 极化电荷面密度的大小等于电极化强度的法向分量。

结论2: 磁化强度沿闭合路径的线积分, 等于环路内磁化电流的代数和。

物理意义

$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum_{(L \text{ 内})} I_s$$

磁化强度

束缚面电流

磁化强度沿任一回路的环流, 等于穿过此回路的束缚电流 I_s 的代数和。

I_s 与 L 环绕方向成右旋者为正, 反之为负。

与电介质对比的公式

$$\oiint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} = - \sum_S q'$$

电极化强度

束缚电荷



5. 磁介质中的安培环路定理

1. 问题的提出:

磁介质放在磁场中, 磁介质受到磁场的作用要产生磁化电流, 磁化电流又产生附加磁场。

任一点的总磁强为: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

由于束缚电流和磁介质磁化的程度有关, 而磁化的程度又决定于总磁场, 所以磁介质和磁场的相互影响呈现一种比较复杂的关系。

$$\begin{array}{c} \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \\ \uparrow \quad \downarrow \\ \vec{M} \quad \leftarrow \quad I_s \end{array}$$

可以象研究电介质与电场的相互影响一样, 通过引入适当的物理量加以简化。

在真空中的安培环路定理中: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$

将其应用在磁介质中时, $\sum I$ 为所有电流的代数和;

有磁介质的总磁场

传导电流

束缚电流



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum (I_0 + I_s)$$
$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I_0 + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$
$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum_L I_0$$
$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_L I_0$$
$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum_L I_s$$

- 定义：磁场强度
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

磁介质中的安培环路定理

物理意义：磁场强度沿闭合路径的线积分，等于环路所包围的传导电流的代数和。



2. 几点说明:

- ①. \vec{H} 是一辅助物理量, 描述磁场的基本物理量仍然是 \vec{B} . \vec{H} 是为消除磁化电流的影响而引入的;
- ②. \vec{H} 既与磁感应强度 \vec{B} 有关, 又与磁化强度 \vec{M} 有关, 所以 \vec{H} 又是混合物理量。
- ③. 磁场强度的单位与磁化强度相同, 安培/米, A/m
- ④. $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0$, 不一定环路内无电流。
- ⑤. $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0$, 环路上各点的 \vec{H} 不一定为 0, 因为 \vec{H} 是环路内、外电流共同产生的。



在各向同性的均匀磁介质（非铁磁介质）中，磁化强度与磁场强度具有线性关系：

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad \chi_m \text{ 为磁化率。} \quad (\text{实验规律})$$

$$\text{由 } \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad \text{有: } \vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \chi_m \vec{H}) = \mu_0(1 + \chi_m) \vec{H}$$

$$= \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad \mu_r = 1 + \chi_m \text{ 相对磁导率。}$$

$$= \mu \vec{H} \quad \mu = \mu_0 \mu_r \text{ 为绝对磁导率。}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$



在各向同性介质中 $\vec{B} \cdot \vec{H}$ 关系: $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$

真空中 $\mu_r = 1$, $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$

即 $\frac{\vec{B}}{\vec{B}_0} = \mu_r$ 介质中的磁感应强度是真空中 μ_r 倍。

顺磁介质: $\vec{B} > \vec{B}_0, \mu_r > 1$

抗磁介质: $\vec{B} < \vec{B}_0, 0 < \mu_r < 1$

铁磁介质: $\vec{B} \gg \vec{B}_0, \mu_r \gg 1$



- 磁介质中的高斯定理

磁感应强度 \vec{B} 是外加磁场 \vec{B}_0 与介质内束缚电流产生的 \vec{B}' 的合矢量.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

磁力线无头无尾。穿过任何一个闭合曲面的磁通量为零。

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

磁介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I_0 + \mu_0 \sum_L I_s$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I_0 + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum_L I_0$$

$$\vec{H} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_L I_0$$

电介质中的高斯定理



$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_S (q_0 + q')$$

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_S q_0 - \frac{1}{\epsilon_0} \oiint_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$$

$$\oiint_S (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{S} = \sum_S q_0$$

$$\vec{D} \stackrel{\text{def}}{=} \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_S q_0$$

• \vec{B} , \vec{H} , \vec{M} 之间的关系

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

$$\vec{H} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$$

$$\mu_r = (1 + \chi_m)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

μ_r 称为相对磁导率

$\mu = \mu_0 \mu_r$ 磁导率

• \vec{P} , \vec{D} , \vec{E} 之间的关系

$$\vec{P} = \chi_e \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{D} \stackrel{\text{def}}{=} \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E}$$

$$\varepsilon_r = (1 + \chi_e)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon \vec{E}$$

ε_r 称为相对电容率
或相对介电常量。

6. 应用介质中安培环路定理的解题方法



$$\oint \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

1. 选取环路;

2. 求环路内传导电流的代数和 $\sum I_0$;

3. 由 $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_0 \longrightarrow$ 求 H ;

由 $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \longrightarrow$ 求 B ;

由 $\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} = \vec{H} \longrightarrow$ 求 M ;

由 $M = j_s \longrightarrow$ 求 j_s ;

由 $I_s = j_s L \longrightarrow$ 求 I_s ;

应用举例



例1、一螺线管环，管半径为 r ，环半径为 $R(R \gg r)$ 。载流后，内部磁感矢量为 \vec{B}_0 。管内充满磁介质后，磁化矢量为 \vec{M} ，求内部磁感矢量 \vec{B} 。

解：选管中心线为安培环络，则有：

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

设螺线管内电流为 I_0 ，共有 N 匝，有

$$2\pi R \cdot H = NI_0$$

$$H = \frac{NI_0}{2\pi R} = n I_0$$

因为 $B_0 = \mu_0 n I_0$

所以 $H = \frac{B_0}{\mu_0}$

有 $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$



- 例2、同一螺线管环的管内填满磁介质，前后的自感系数分别为 L_0 ， L 。磁介质相对磁导率为 μ_r ，求比值 L/L_0

解：设 I_0 ，无介质时： $B_0 = \mu_0 n I_0$

有介质时： $H = n I_0$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r n I_0$$

$$\frac{B}{B_0} = \mu_r$$

$$\frac{\psi}{\psi_0} = \frac{BSN}{B_0 S N} = \frac{B}{B_0} = \mu_r$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{L I_0}{L_0 I_0} = \frac{\psi}{\psi_0} = \mu_r$$

即自感系数增加到原来的 μ_r 倍。

例3：如图，载流无限长磁介质圆柱，其磁导率为 μ_{r1} ，外面有半径为 R_2 的无限长同轴圆柱面，该面也通有电流 I ，圆柱面外为真空，在 $R_1 < r < R_2$ 区域内，充满相对介质常数为 μ_{r2} 的磁介质，且 $\mu_{r2} > \mu_{r1}$ 。求 B 和 H 的分布？

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_L I$$

解：根据轴对称性，以轴上一点为圆心在垂直于轴的平面内取圆为安培回路：

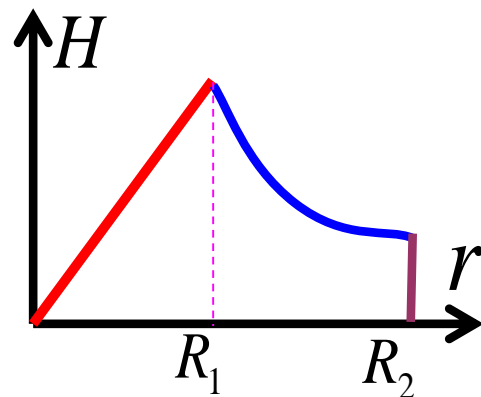
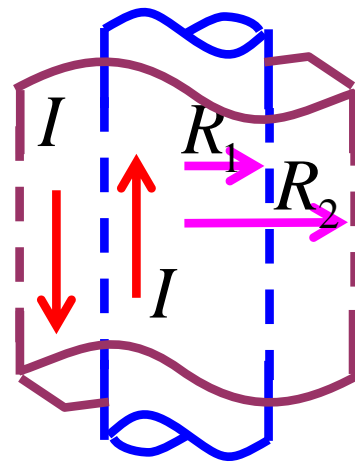
$$r \leq R_1 \quad \therefore 2\pi r H_1 = \frac{I}{\pi R_1^2} \pi r^2$$

$$\therefore H_1 = \frac{I}{2\pi R_1^2} \pi r \quad \therefore B_1 = \frac{\mu_{r1} \mu_0 I}{2\pi R_1^2} \pi r$$

同理 $R_1 < r < R_2$

$$\therefore H_2 = \frac{I}{2\pi r} \quad \therefore B_2 = \frac{\mu_{r2} \mu_0 I}{2\pi r}$$

$$r \geq R_2 \quad \therefore H_3 = 0 \quad \therefore B_3 = 0$$



7. 铁磁质



1. 磁特性

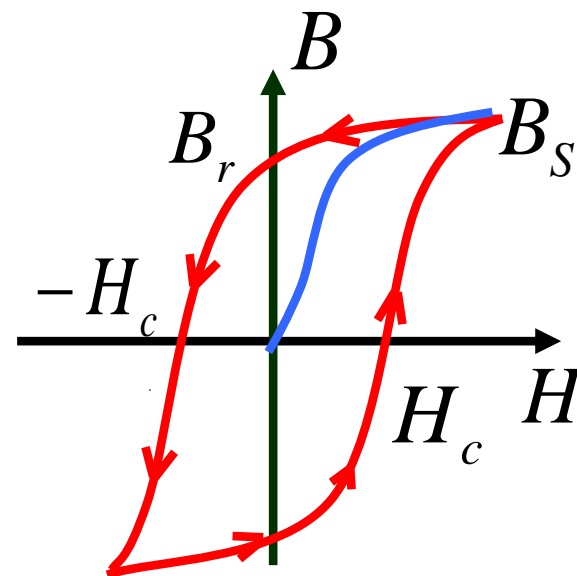
Fe, Co, Ni 及稀土族元素的化合物，能被强烈地磁化。

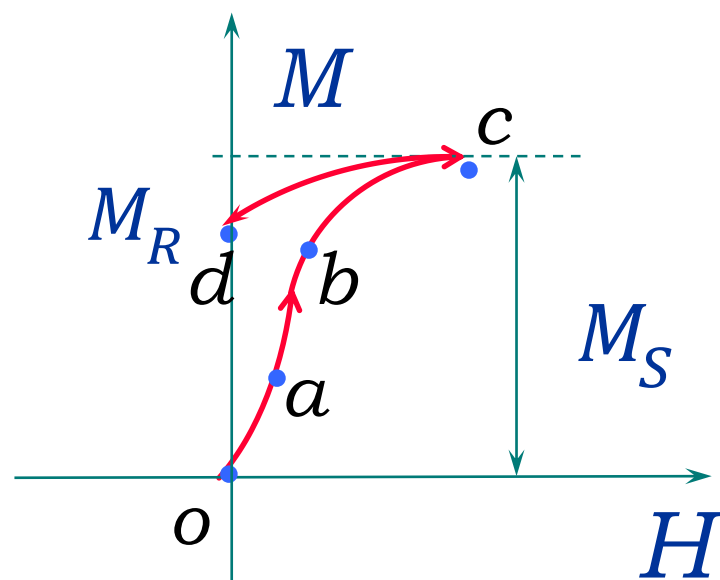
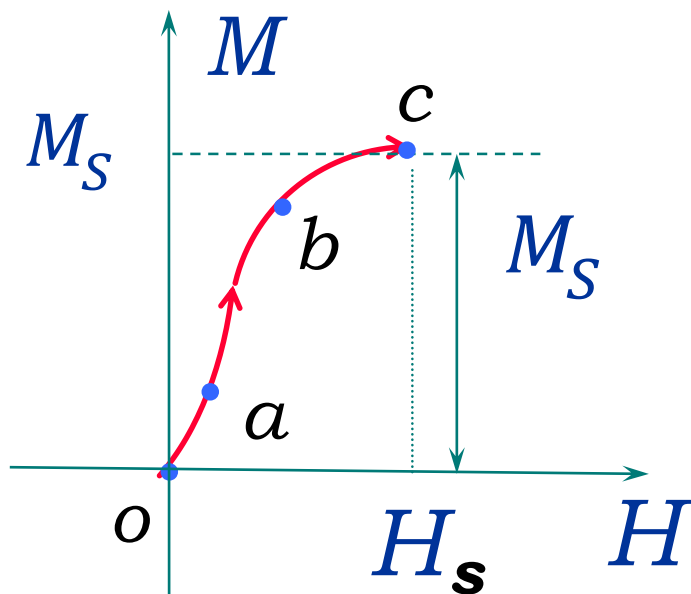
$$\mu_r = \mu_r(H)$$

铁磁质的 μ_r 不是一个常数，它是 H 的函数。

2. 铁磁质的磁化曲线

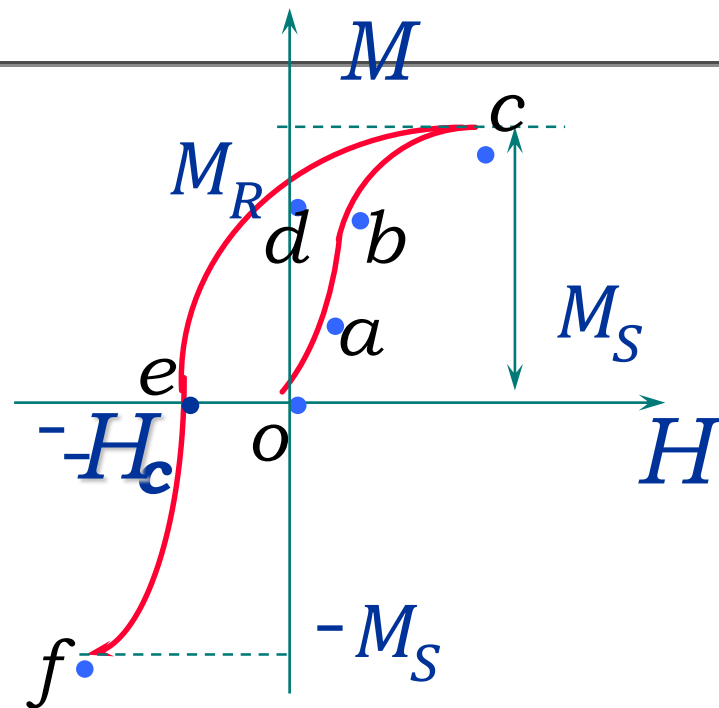
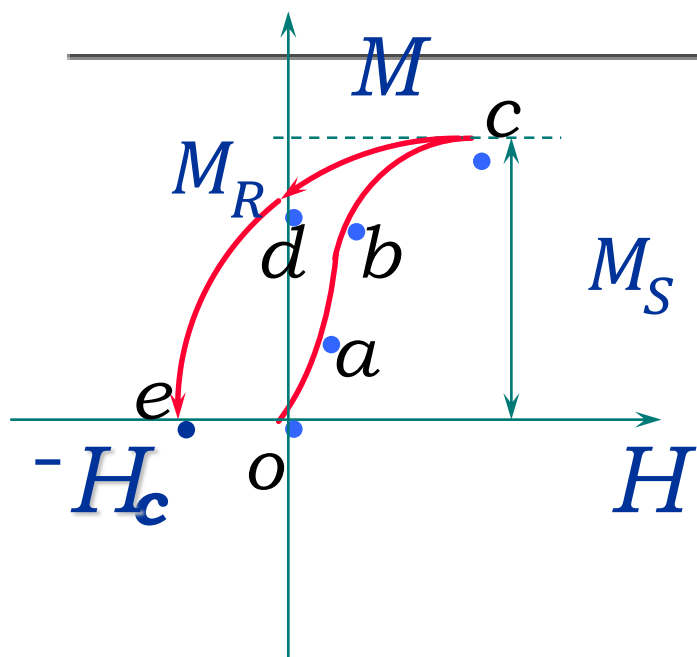
当外磁场变化一个周期时，铁磁质内部的磁场变化曲线如图所示：





M_S —饱和磁化强度， M_R —剩余磁化强度，
 $oabc$ —叫起始磁化曲线。

因为 M 的变化落后 H ，所以叫磁滞现象。



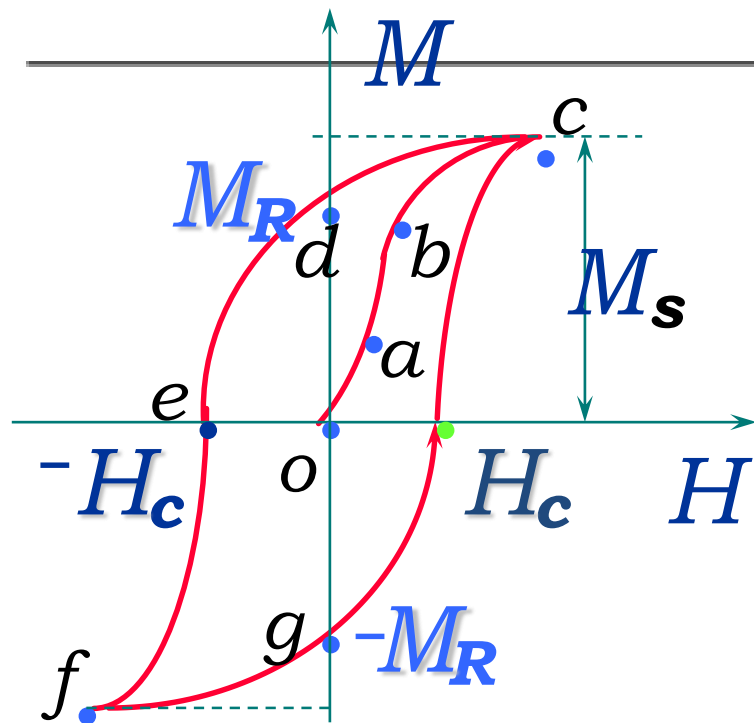
H_c — 矫顽力。

ce --- 退磁曲线。

M_s — 反向饱和磁化强度。

反向磁场 H_c ，使介质内部的磁场为 0

B的变化落后于H，从而具有剩磁，即磁滞效应。



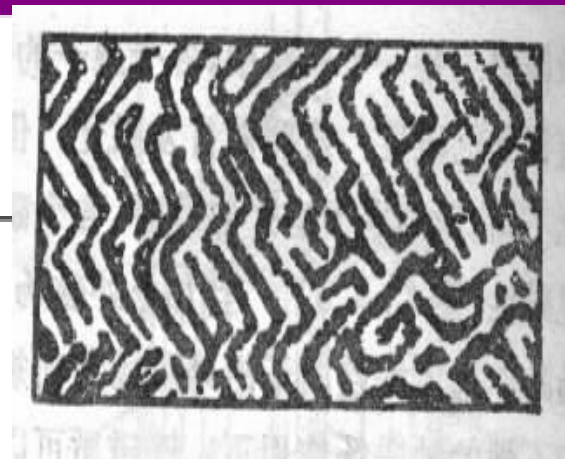
cefgc—饱和磁滞回线。

- 如果M未达到饱和，就使H减小，就会形成另一条磁滞回线，这样的磁滞回线有很多，将顶点连接而成的曲线叫标准磁化曲线。

- 由此可见，M与H的关系不是线性的，而且也不是单值的。即磁化率与H有关，与磁化历史有关。

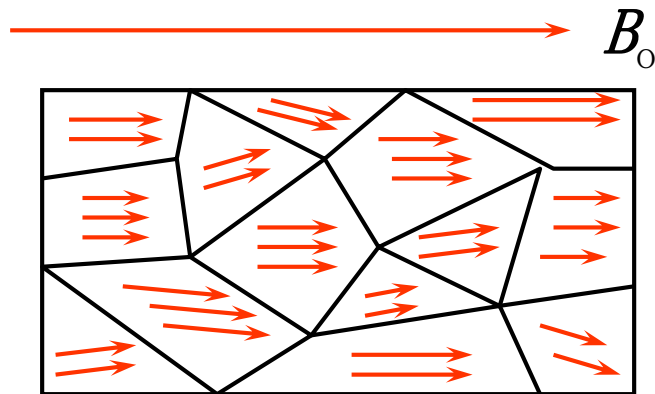
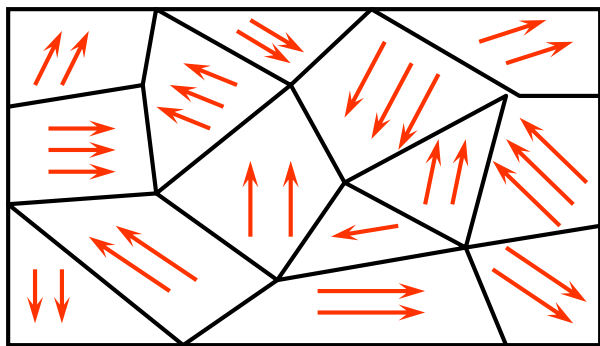
3. 铁磁质的磁化机制

磁畴：铁磁质中由于原子的强烈作用，在铁磁质中形成磁场很强的小区域——磁畴。磁畴的体积约为 10^{-12} m^3 。

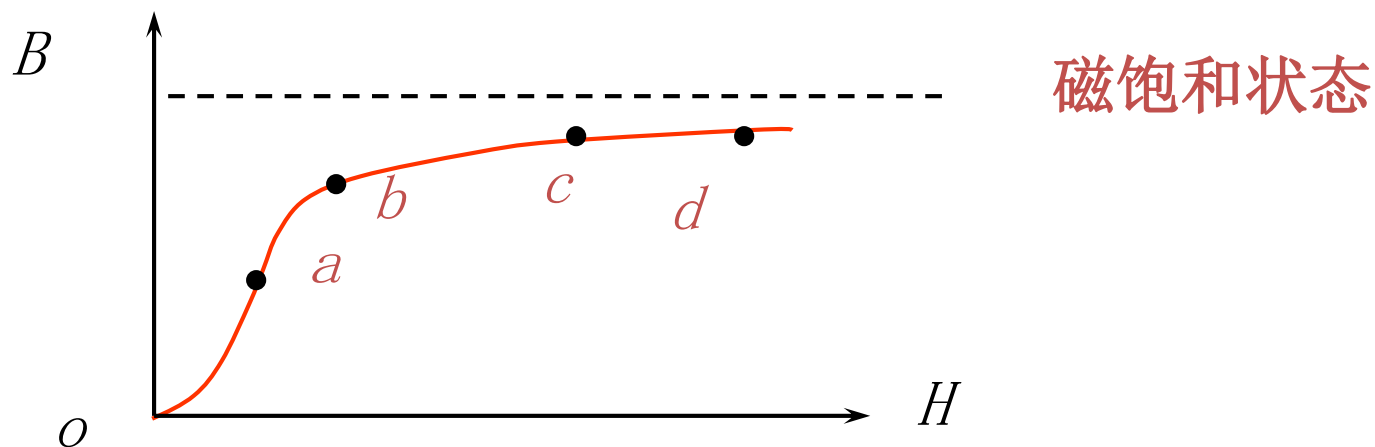


在无外磁场时，各磁畴排列杂乱无章，铁磁质不显磁性；

在外磁场中，各磁畴沿外场转向，介质内部的磁场迅速增加，在铁磁质充磁过程中伴随着发声、发热。



随着外磁场增加，能够提供转向的磁畴越来越少，铁磁质中的磁场增加的速度变慢，最后外磁场再增加，介质内的磁场也不会增加，铁磁质达到磁饱和状态。



起始磁化曲线

饱和磁化强度 M_s 等于每个磁畴中原来的磁化强度，该值很大，这就是铁磁质磁性 μ_r 大的原因。

磁滞现象是由于掺杂和内应力等的作用，当撤掉外磁场时磁畴的畴壁很难恢复到原来的形状，故保留一定磁性，即有剩余磁化强度存在。



4. 磁滞损耗

由于磁滞现象引起的能量损耗称为**磁滞损耗**。

铁磁质反复磁化，分子运动加剧，温度升高，因此放出热量，损失能量，叫**磁滞损耗**——与磁滞回线围成的面积成正比。

B-H图中磁滞回线所包围的“面积”代表在一个反复磁化的循环过程中单位体积的磁芯内损耗的能量。



铁磁质的特性

- 铁磁质：是磁性很强的磁介质。除了铁以外，还有钴、镍、稀土合金等物质。但应用最多的是铁与其他金属或非金属组成的合金，还有一些含铁的氧化物（铁氧体）。
- 特性：
 - 磁化率 χ_m 、相对磁导率 μ_r 很大，但不是常数，与 \vec{H} （磁场强度）有关。
 - \vec{B}' 与 \vec{B}_0 同向，即具有顺磁性。
 - 具有磁滞现象，撤掉外场后，保留一定磁性。
 - 存在居里温度，铁为 770°C 。在其上变为顺磁质。
- 对于顺磁质、抗磁质来说 $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ ， χ_m 为常数。但对铁磁质来说， \vec{M} 与 \vec{H} 的关系比较复杂。



几种磁介质的一般特性

	顺磁质	抗磁质	铁磁质
磁化率 χ_m	$>\approx 0$	$<\approx 0$	$10^2 \sim 10^6$
相对磁导率 μ_r	$>\approx 1$	$<\approx 1$	$\gg 1$
\vec{M} 与 \vec{H} 方向关系	相同	相反	相同
χ_m 与 \vec{H} 关系	无关	无关	有关
χ_m 与温度的关系	$T \uparrow \chi_m \downarrow$	无关	$T \uparrow \chi_m \downarrow$

某些物质在低温下具有失去电阻的性质，这些物质称为超导体。

超导体的基本性质：

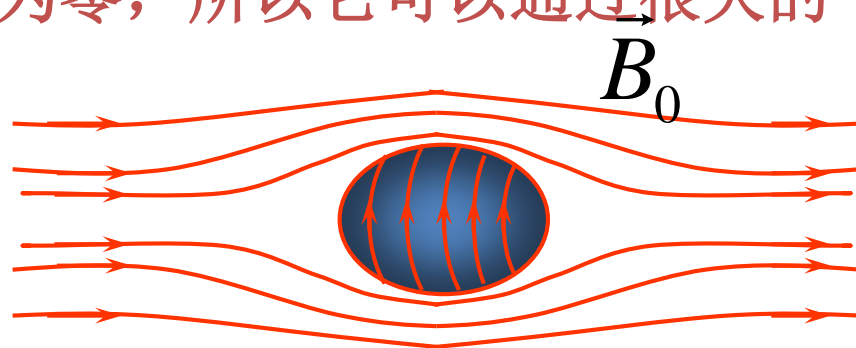
1. 零电阻率

超导体在临界温度以下时，电阻为零，所以它可以通过很大的电流，而几乎无热损耗。

2. 完全抗磁性

将超导体放入磁场中，

表面产生**超导电流**，超导电流产生的磁场与外磁场抵消，使超导体内的磁感应强度为 0。



- 作业: P436 T9.36 T9.37

The end !