

第一章 磁路

1-1 磁路的基本定律

1-2 常用的铁磁材料及其特性

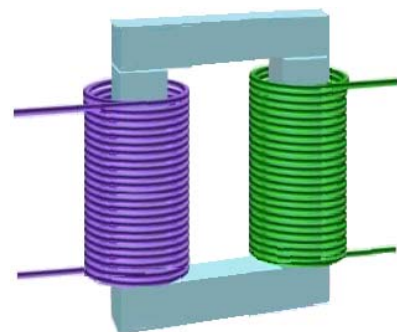
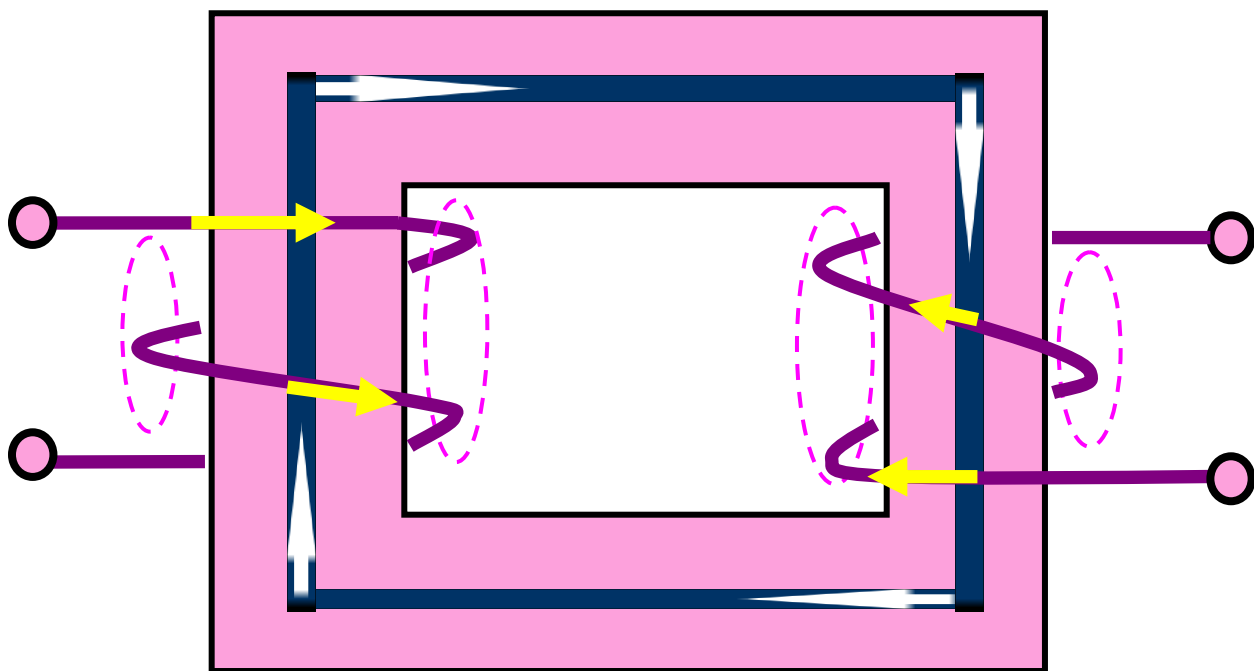
1-3 磁路的计算



1-1磁路的基本定律

磁路：磁通所通过的路径。

主磁通：由于铁心的导磁性能比空气要好得多，绝大部分磁通将在铁心内通过，这部分磁通称为主磁通。



变压器模

漏磁通：围绕载流线圈、部分铁心和铁心周围的空间，还存在少量分散的磁通，这部分磁通称为漏磁通。

主磁路：主磁通所通过的路

漏磁路：漏磁通所通过的路

励磁线圈：用以激励磁路中磁通的载流线圈

励磁电流：

励磁线圈中的电流

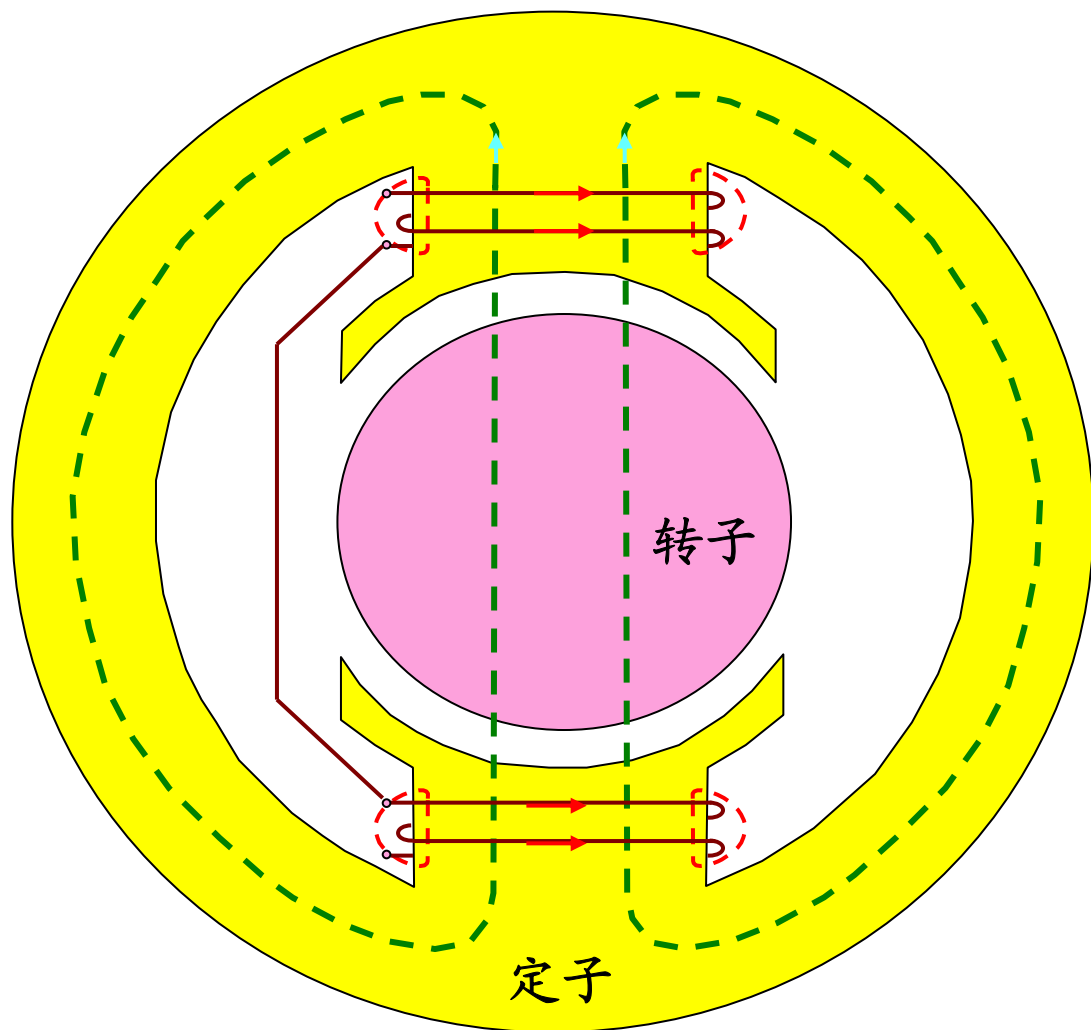
直流：直流磁路

例如：直流电机

交流：交流磁路

例如：变压器

两极直流电机磁路

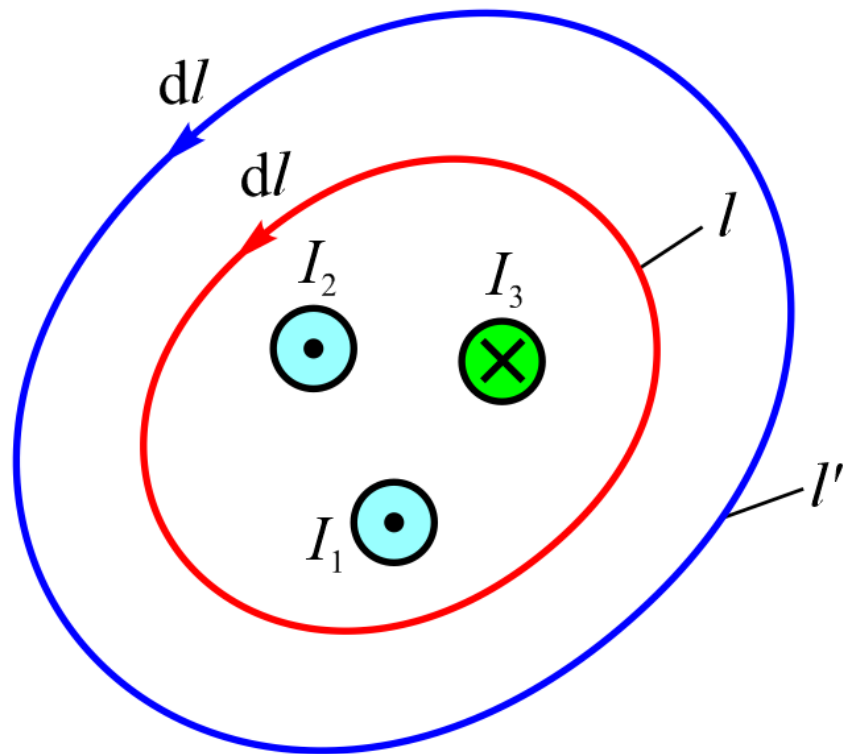


二、磁路的基本定律

1. 安培环路定律

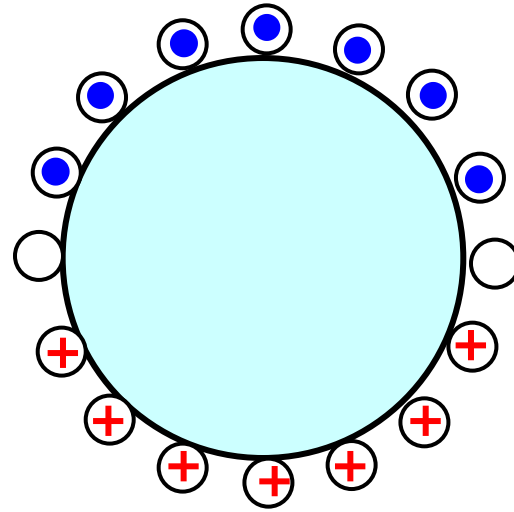
➤ **全电流定律**: 磁场强度沿任意的闭合回路的线积分等于闭合回路包围的导体电流的代数和。

➤ **意义**: 电流是产生磁场的源



$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_{l'} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum i$$

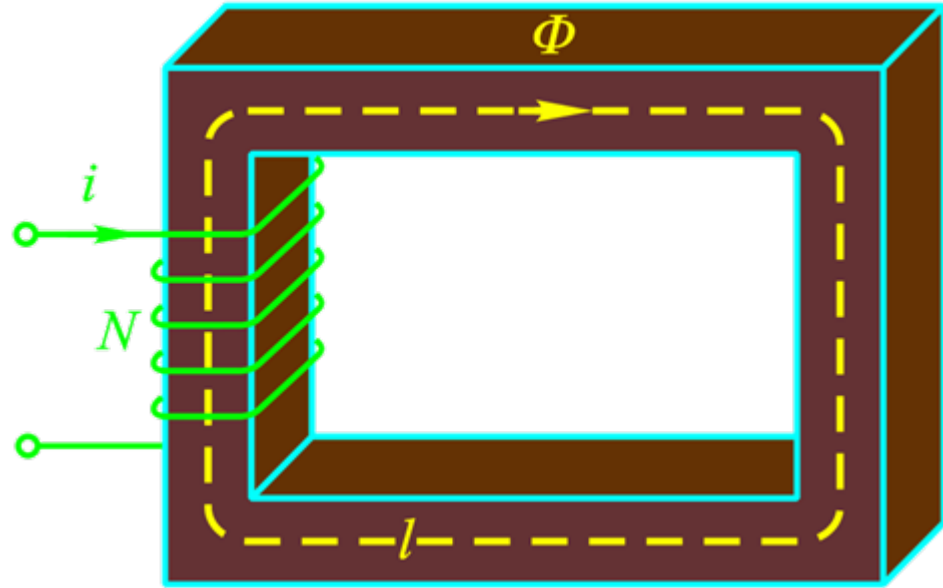
$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_1 + I_2 - I_3$$



在一个圆形铁磁材料的周围，布置一圈如上图分布的载流导体

安培环路定律的特例

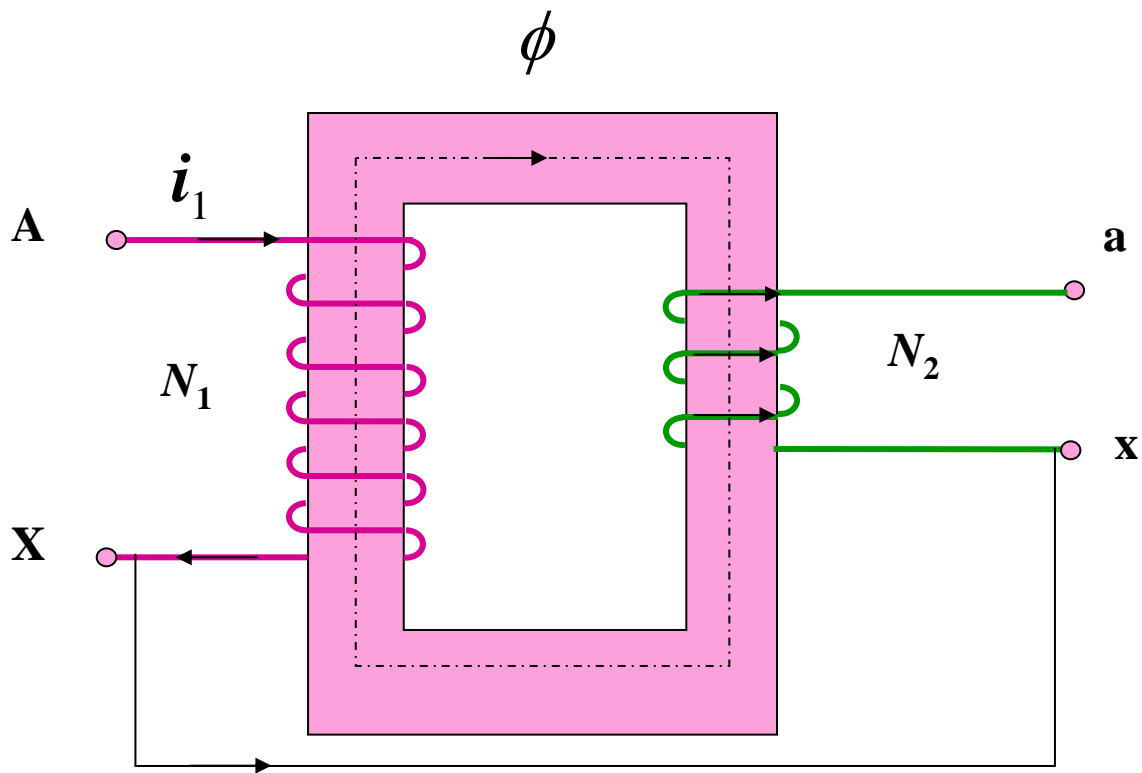
➤右图：沿回线 l ，磁场强度 H 的方向总在切线方向、其大小处处相等，且闭合回线所包围的总电流是由通入电流 i 的 N 匝线圈所提供，则有：



$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Hl = Ni$$

➤磁动势： $F = Ni$

有效匝数



2.磁路的欧姆定律

➤思路：从全电流定律出发

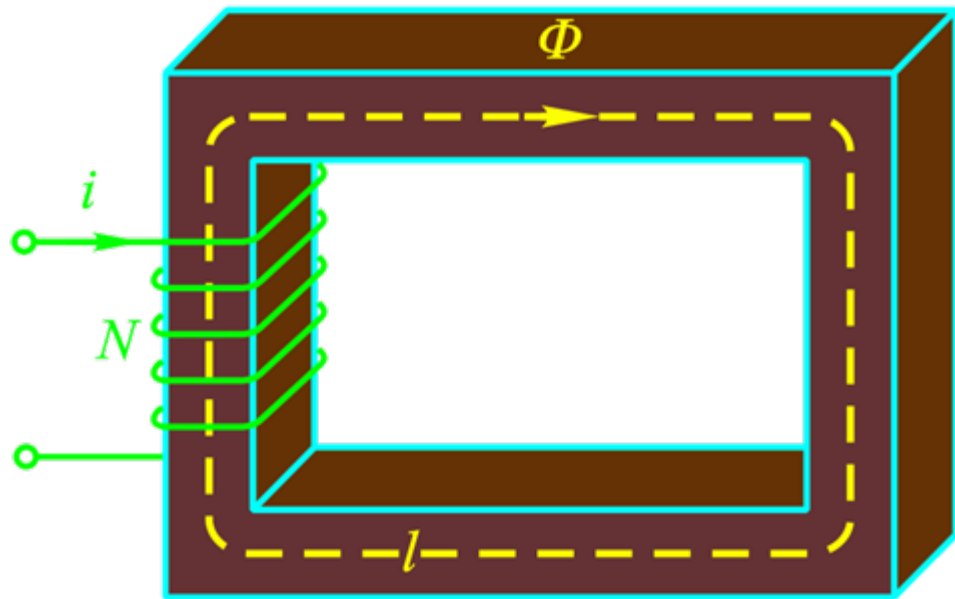
➤磁路：与电路相仿，将磁通比拟为电流，则磁路是磁通行的路径。

磁动势 $F = Ni$

磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu A}$

磁导 $\Lambda_m = 1 / R_m$

磁通 $\phi = F / R_m$



有一闭合铁心磁路，铁心的截面积 $A = 9 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ，磁路的平均长度 $L = 0.3 \text{m}$ ，铁心的磁导率，套装在铁心上的励磁绕组为 500 匝。试求在铁心中产生 1T 的磁通密度时，所需的励磁磁动势和励磁电流。

解 用安培环路定律来求解。

磁场强度

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

磁动势:

$$F = Hl = 159 \times 0.3 \text{A} = 47.7 \text{A}$$

励磁电流:

$$i = \frac{F}{N} = 9.54 \times 10^{-2} \text{A}$$

几种情况

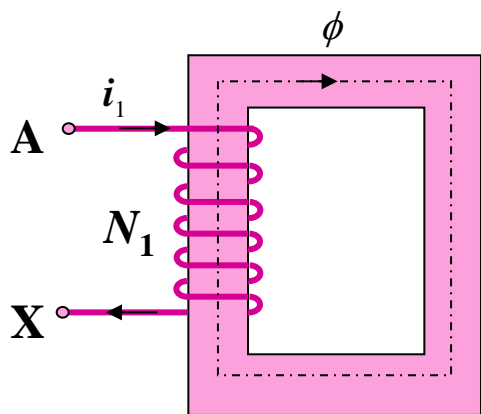


图1

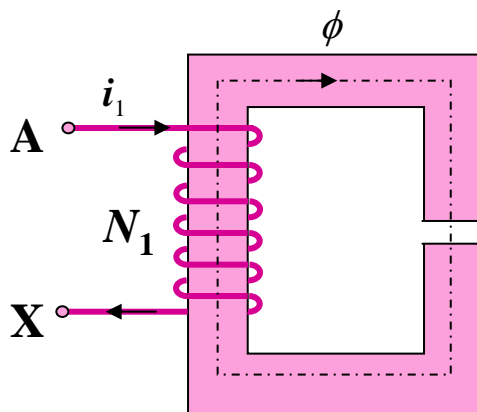


图2

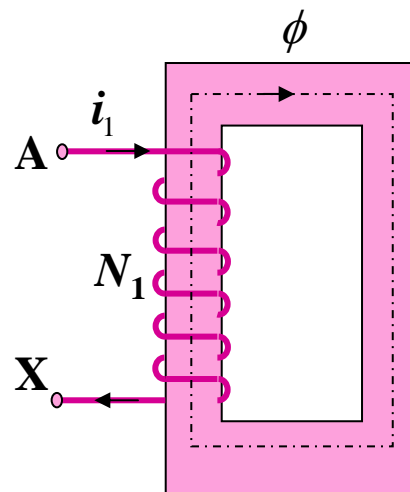
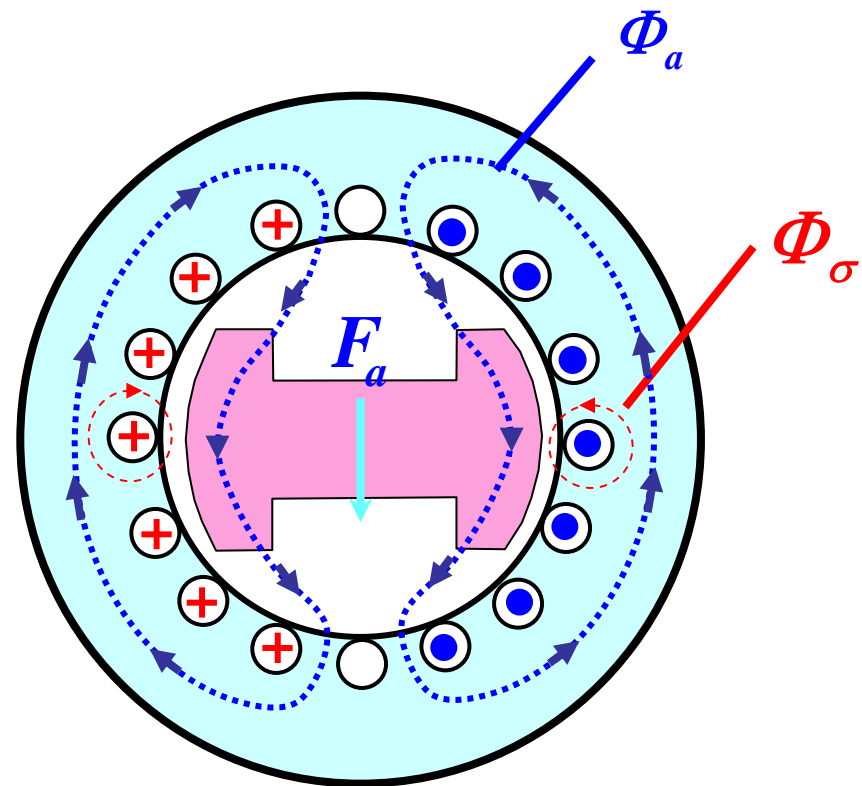
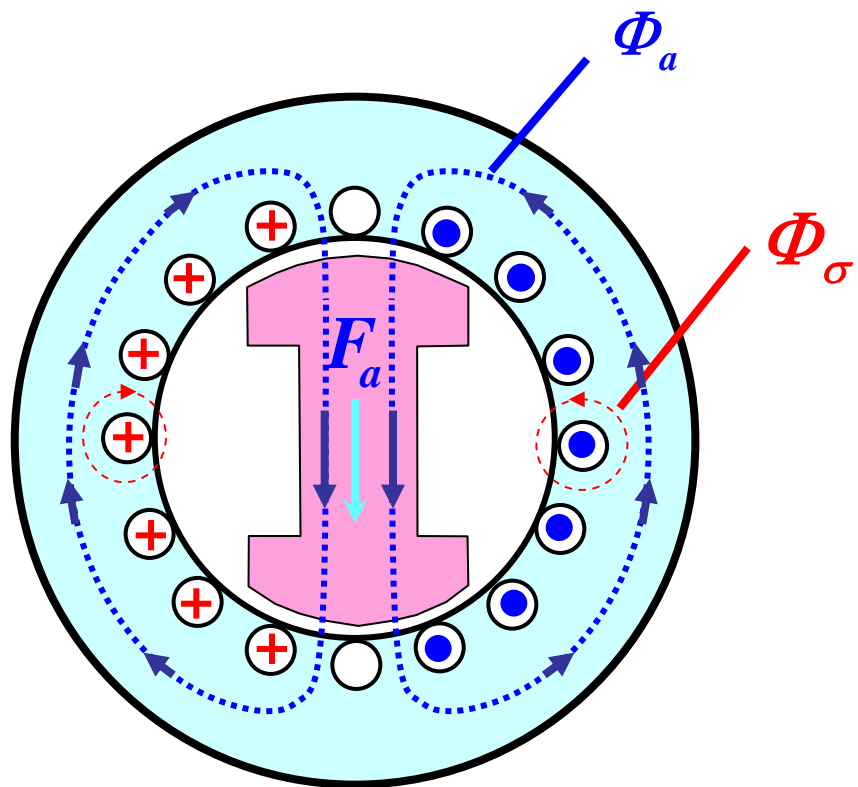


图3

问题1: 图2和图1相比, 电流和匝数不变, 仅铁心柱上开了个口, 问对主磁通和漏磁通的影响。

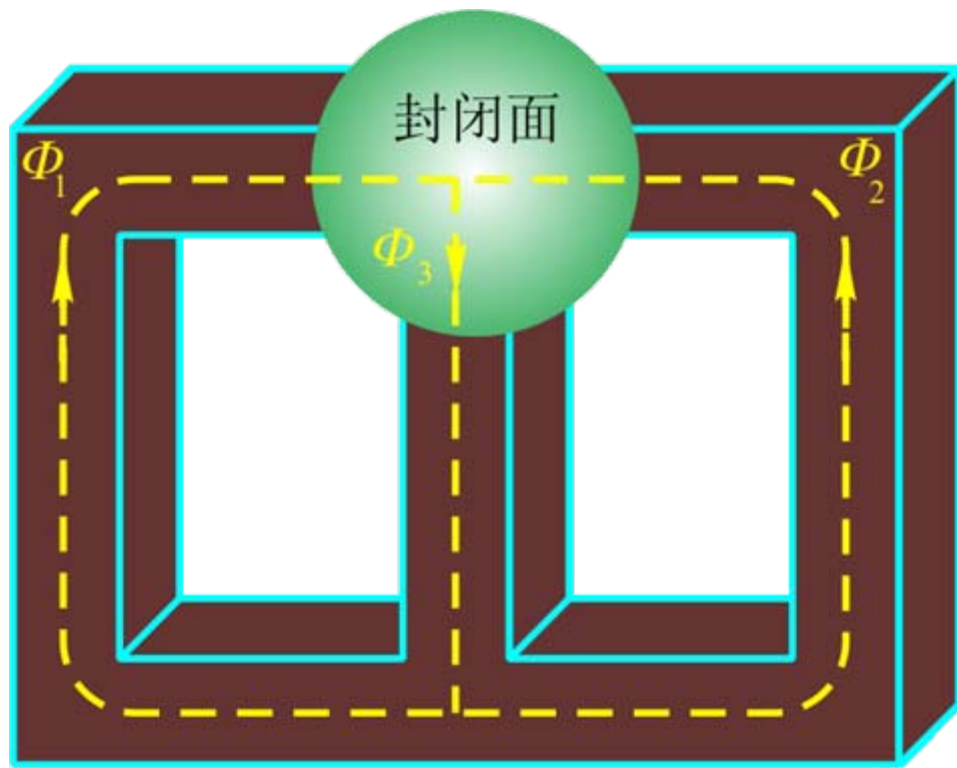
问题2: 图3和图1相比, 电流和匝数不变, 铁心柱和线圈高度均增加, 铁心回路总长度不变, 问对主磁通和漏磁通的影响。



3. 磁路的基尔霍夫第一定律

公式: $\sum \phi = 0$

$$-\phi_1 - \phi_2 + \phi_3 = 0$$



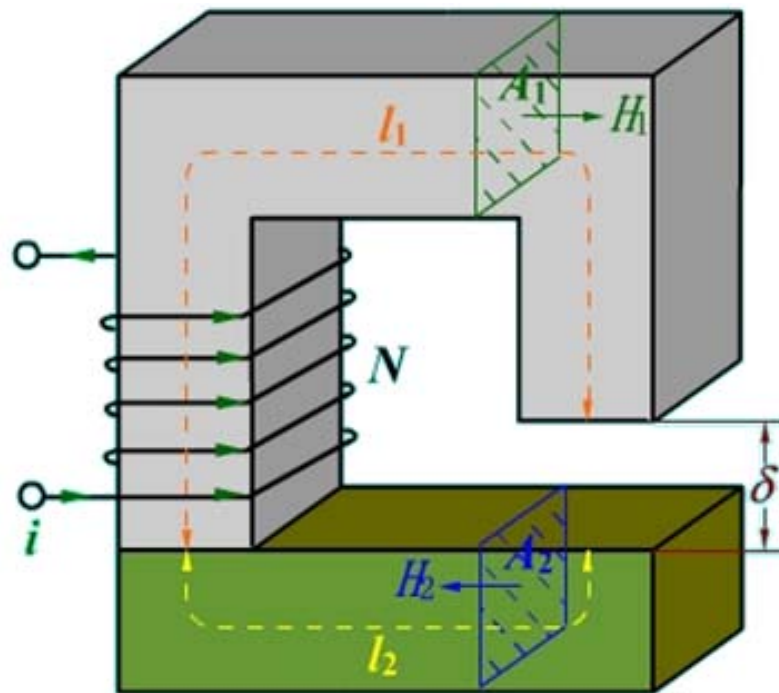
穿出(或进入)任一闭和面的总磁通量恒等于零
(或者说, 进入任一闭合面的磁通量恒等于穿出该
闭合面的磁通量), 这就是磁通连续性定律.

4. 磁路的基尔霍夫第二定律

- **定律背景:**磁路计算时，总是把整个磁路分成若干段，每段为**同一材料、相同截面积**，且**段内磁通密度处处相等**，从而**磁场强度亦处处相等**。

$$Ni = \sum_{k=1}^3 H_k l_k =$$

$$\phi_1 R_{m1} + \phi_2 R_{m2} + \phi_\delta R_\delta$$



- **定律内容:**沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁位降的代数和。

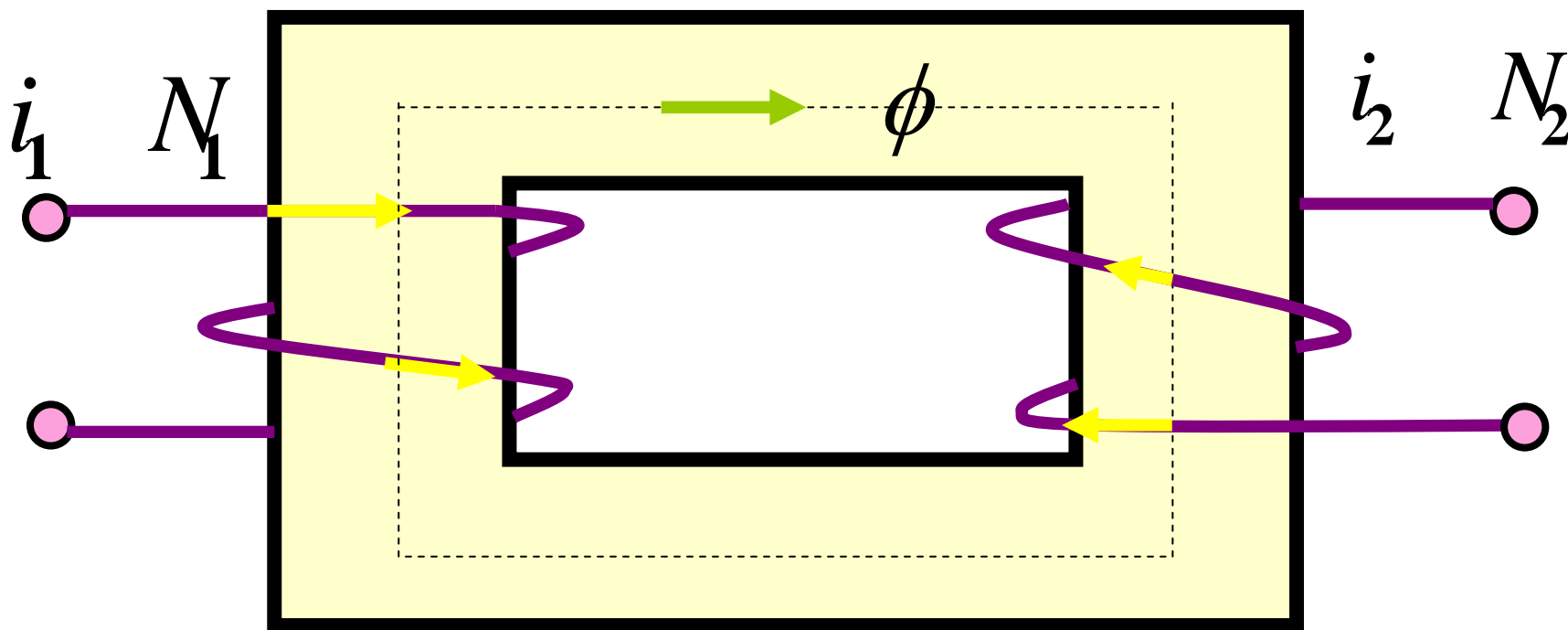
与电路相比较，磁路具有以下特点：

- 电流表示带电质点的运动，它通过电阻时的功率损耗为 I^2R ；磁通不代表质点运动， ϕ^2R_m 也不代表功率损耗。
- 自然界存在着良好的对电流绝缘的材料，但尚未发现对磁通绝缘的材料。磁路中没有“断路”的情况，即不存在有磁动势而无磁通的现象。磁力线即无始端也无终端。
- 空气也是导磁的，磁路中存在着漏磁的现象。
- 含有铁磁材料的磁路几乎都是非线性的。一般来说，磁路问题是非线性问题，磁阻的概念和磁路欧姆定律只有在磁路中各段的材料都是线性的或可以作为线性处理时才能适用。在精确的磁路计算中不用磁阻和磁路欧姆定律，而是直接用全电流定律和各段材料的 $B-H$ 曲线。

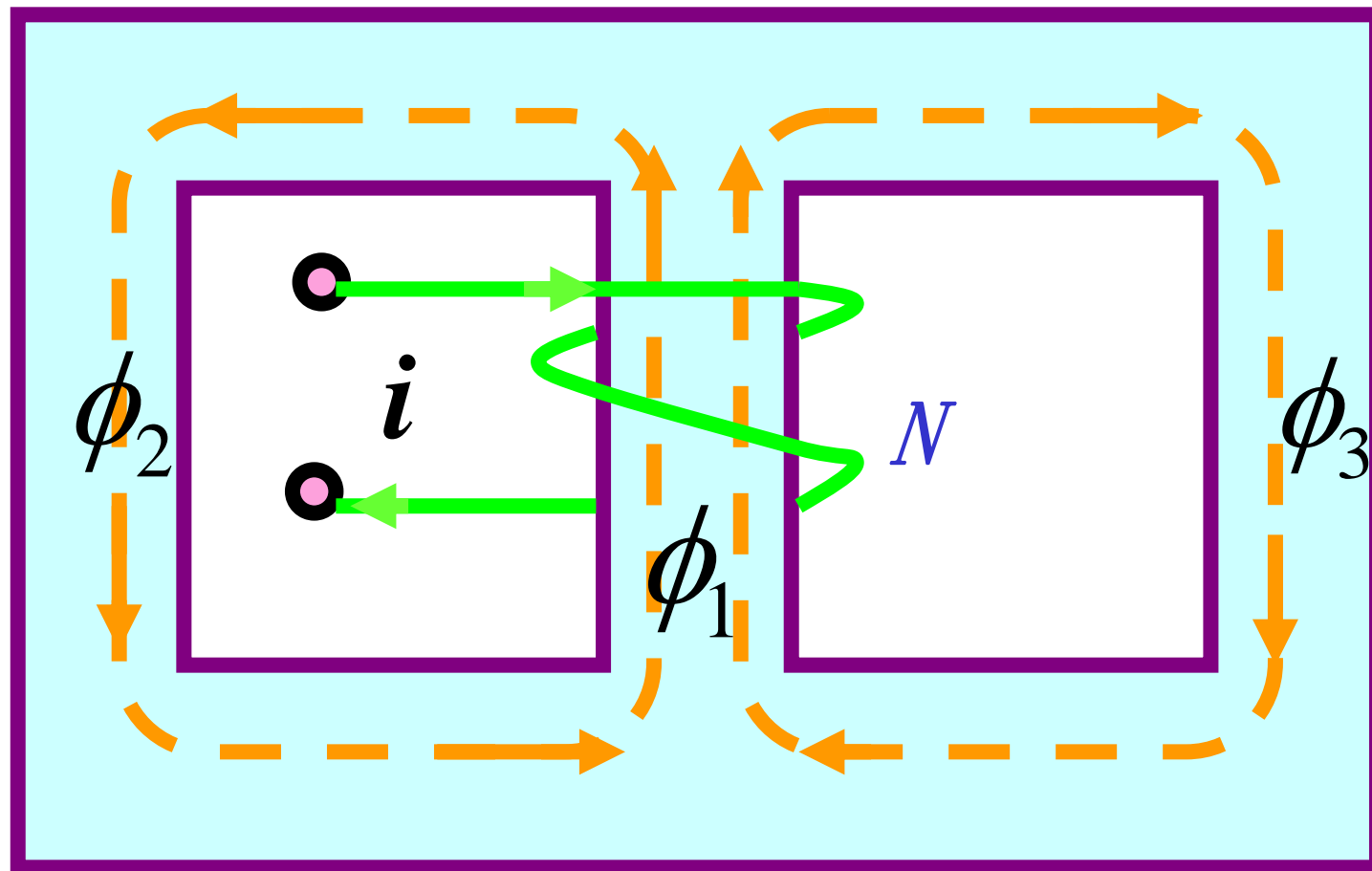
磁路和电路的比拟仅是一种数学形式上的类似，而不是物理本质的相似。

讨论

$i_1=10\text{A}$, $i_2=0$, $N_1=10$ 匝, N_2 为5匝时磁路中的磁通为 10WB 。当 $i_2=-5\text{A}$ 的时候, 要保持磁通不变, i_1 应为多少安培?



讨论-磁路的基尔霍夫第二定律



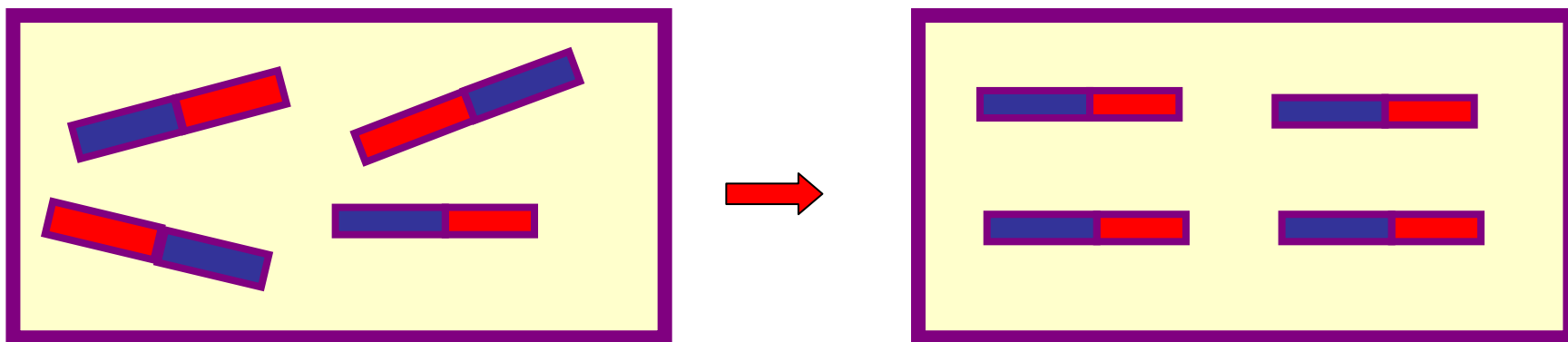
$$F = Ni = \phi_1 R_{m1} + \phi_2 R_{m2} + \phi_3 R_{m3}$$

1-2 常用的铁磁材料及其特性

一、铁磁物质的磁化

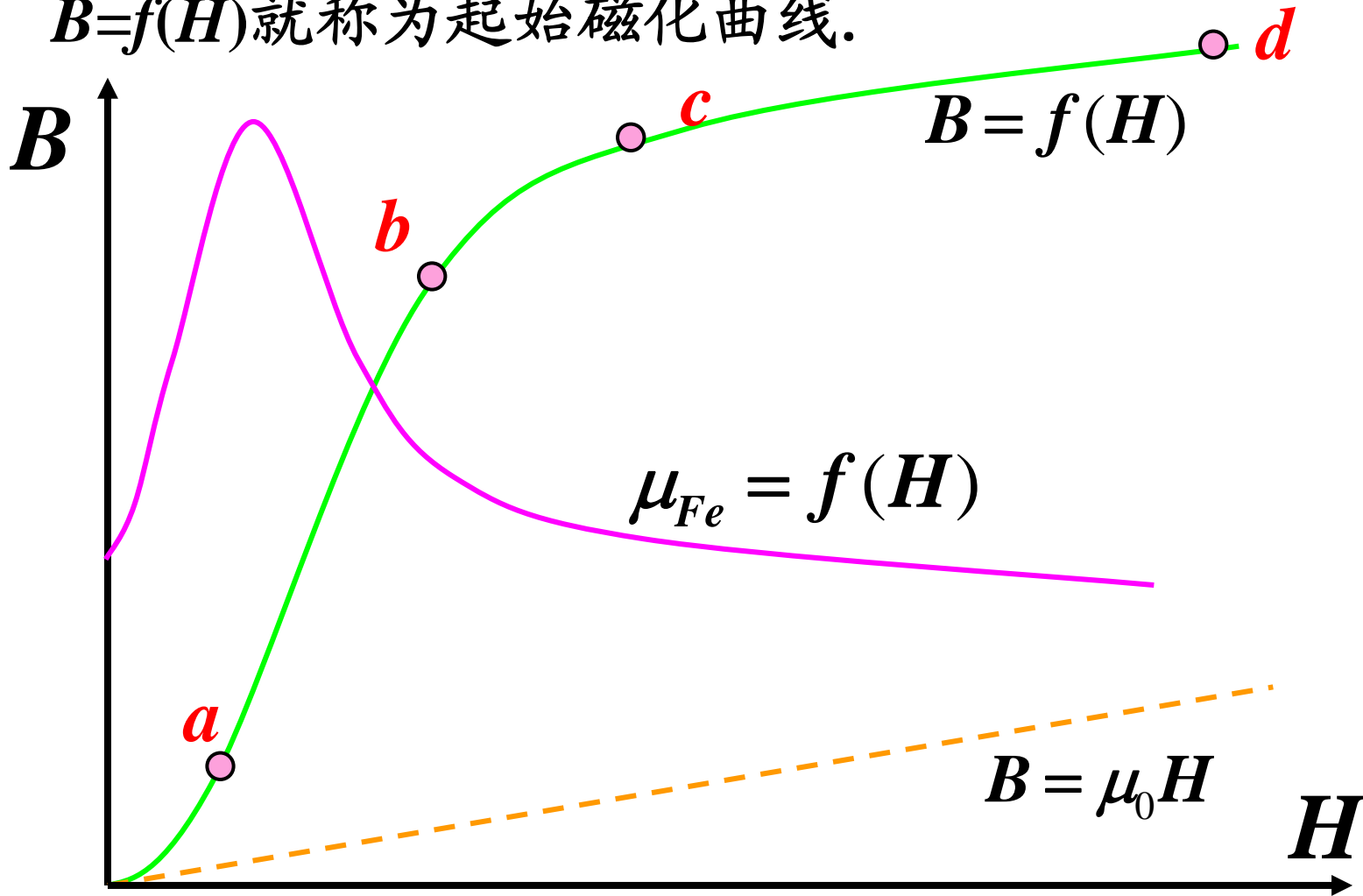
铁磁物质的磁化

铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性，此现象称为铁磁物质的磁化。

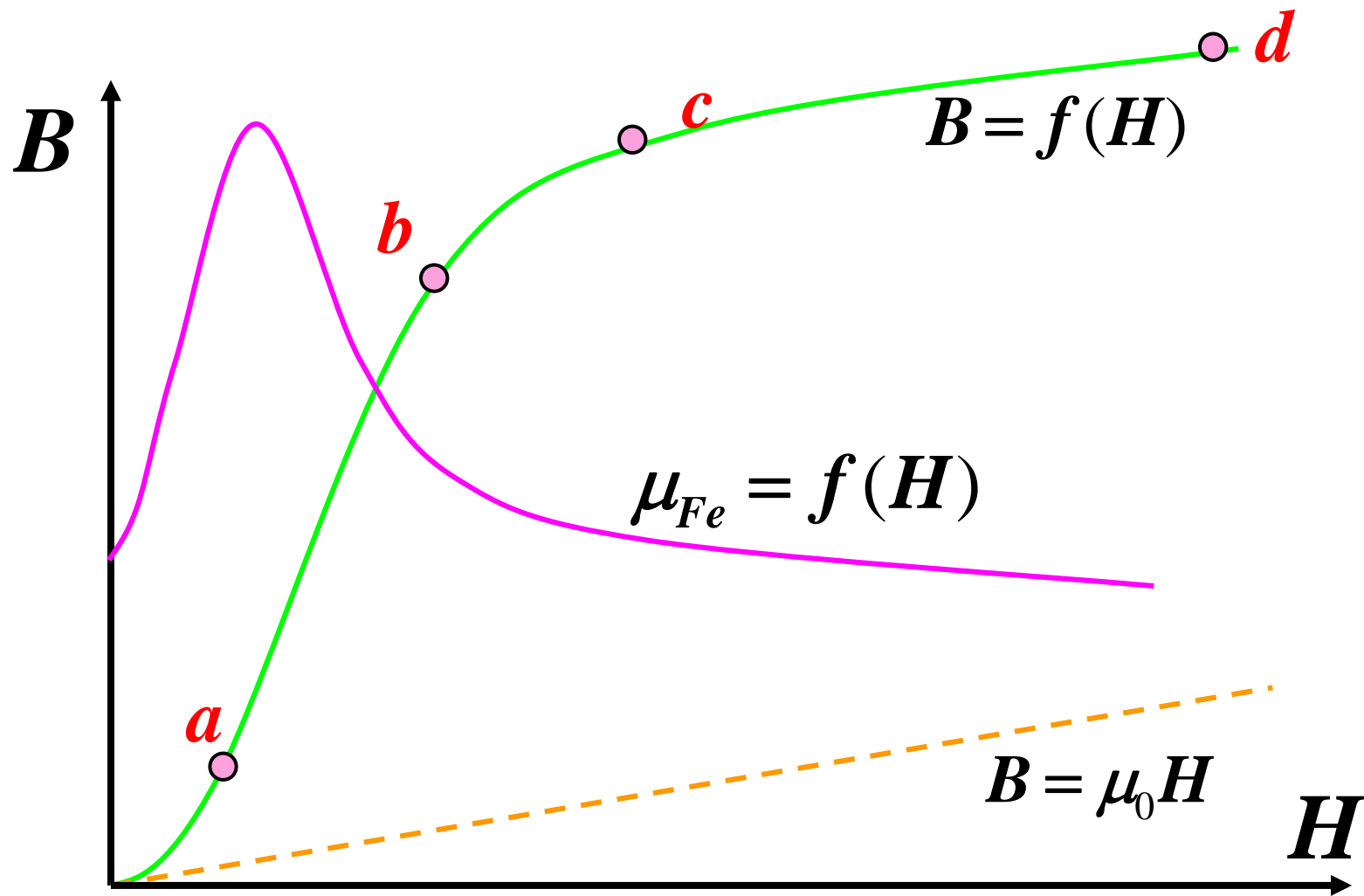


二、磁化曲线和磁滞回线

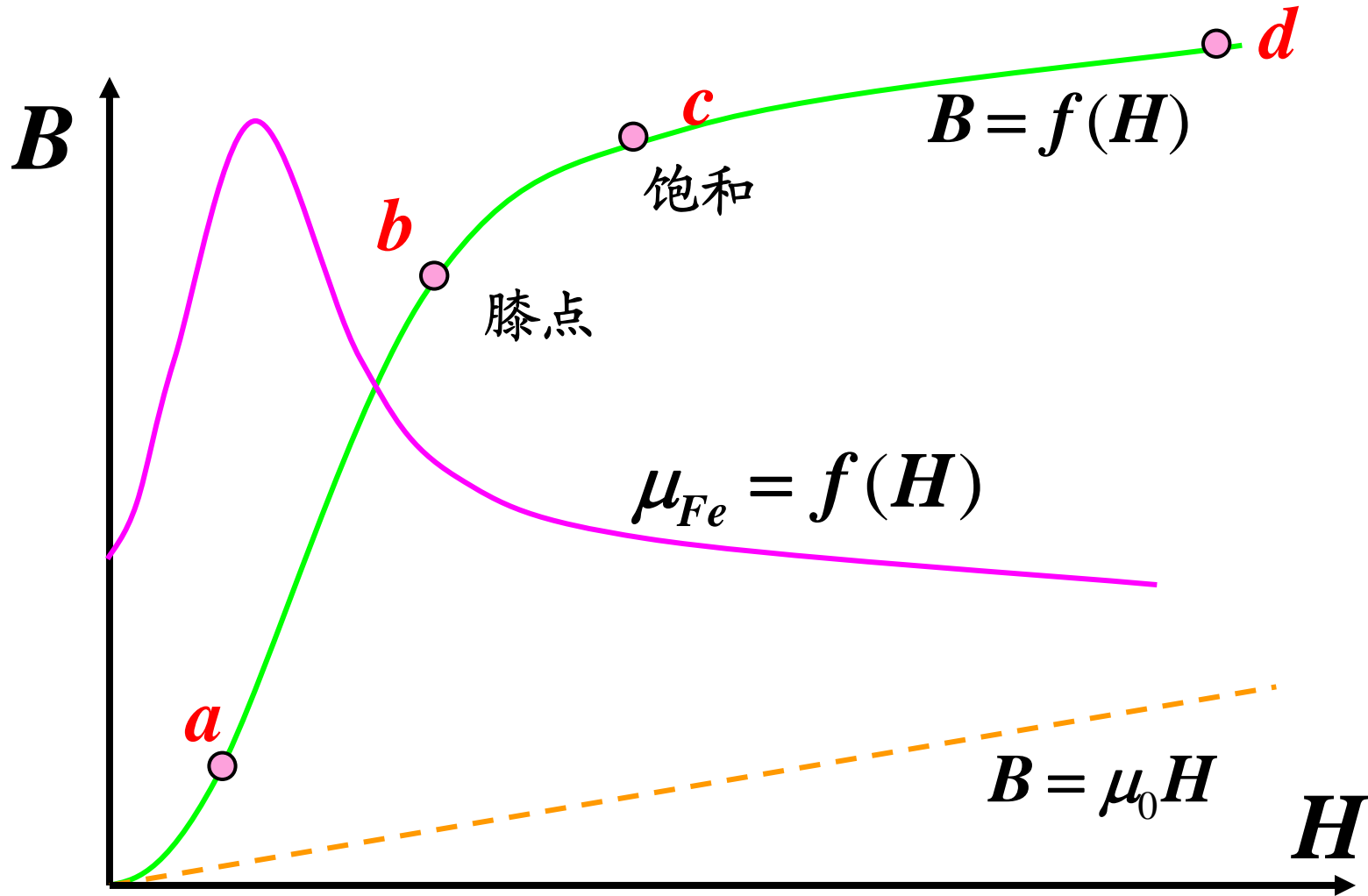
将一块尚未磁化的铁磁材料进行磁化，当磁场强度 H 由零逐渐增大时，磁通密度 B 将随之增大，曲线 $B=f(H)$ 就称为起始磁化曲线。



随着磁场强度 H 的增大，饱和程度增加， μ_{Fe} 减小， R_m 增大，导磁性能降低。



设计电机和变压器时，为使主磁路内得到较大的磁通量而又不过分增大励磁磁动势。通常把铁心内的工作磁通密度选择在膝点附近

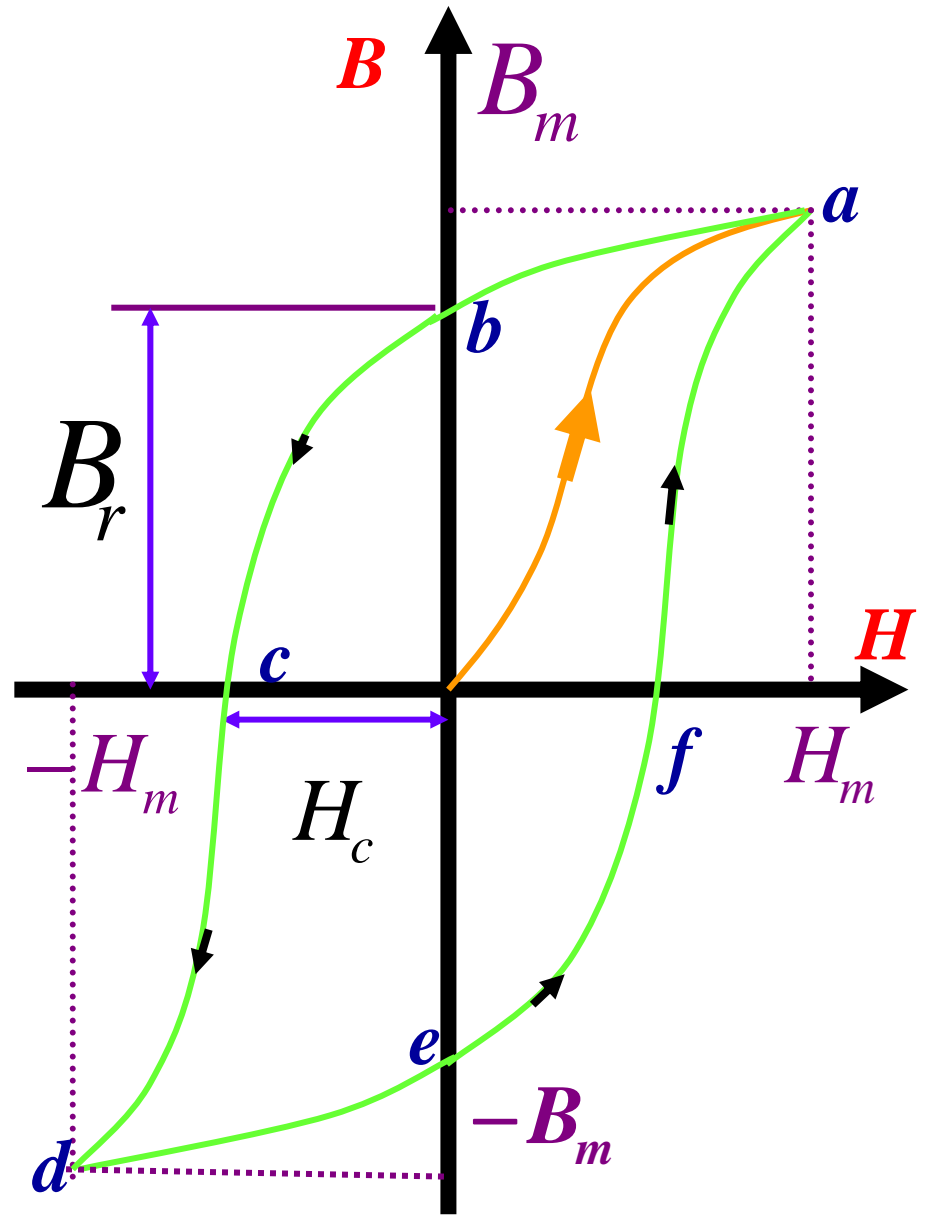


2. 磁滞回线

剩磁:去掉外磁场之后, 铁磁材料内仍然保留的磁通密度 B_r .

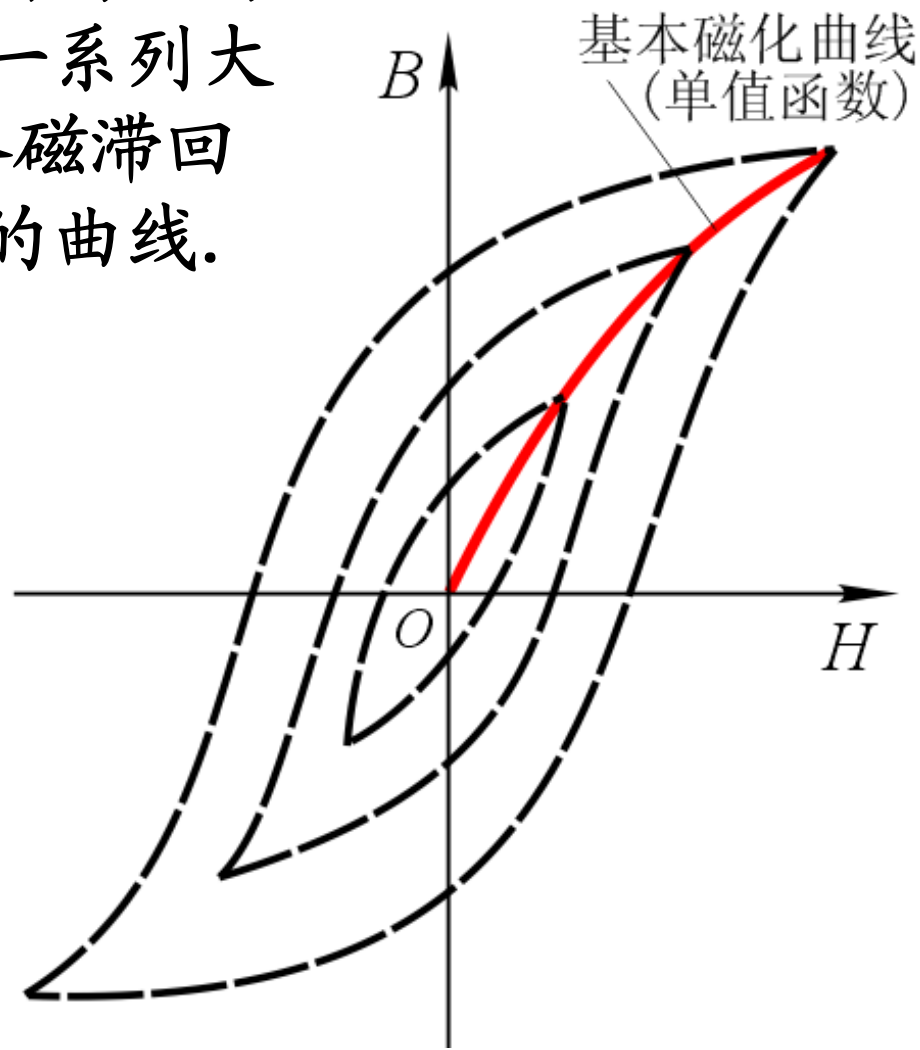
矫顽力:要使 B 值从减小到零, 必须加上相应的反向外磁场, 此反向磁场强度称为矫顽力.

不同铁磁材料有不同的磁滞回线, 且同一铁磁材料, B_m 越大, 磁滞回线所包围的面积也越大.



3. 基本磁化曲线

对同一铁磁材料，选择不同的磁场强度进行反复磁化，可得一系列大小不同的磁滞回线，再将各磁滞回线的**顶点**联接起来，所得的曲线。



三、铁磁材料

1. 软磁材料

磁滞回线窄、剩磁和矫顽力 H_c 都小的材料。

常用软磁材料:铸铁、铸钢和硅钢片等。

2. 硬磁(永磁)材料

磁滞回线宽、和 H_c 都大的铁磁材料称为硬磁材料。

磁性能指标

{ 剩磁
{ 矫顽力
{ 最大磁能积

四、铁心损耗

1. 磁滞损耗

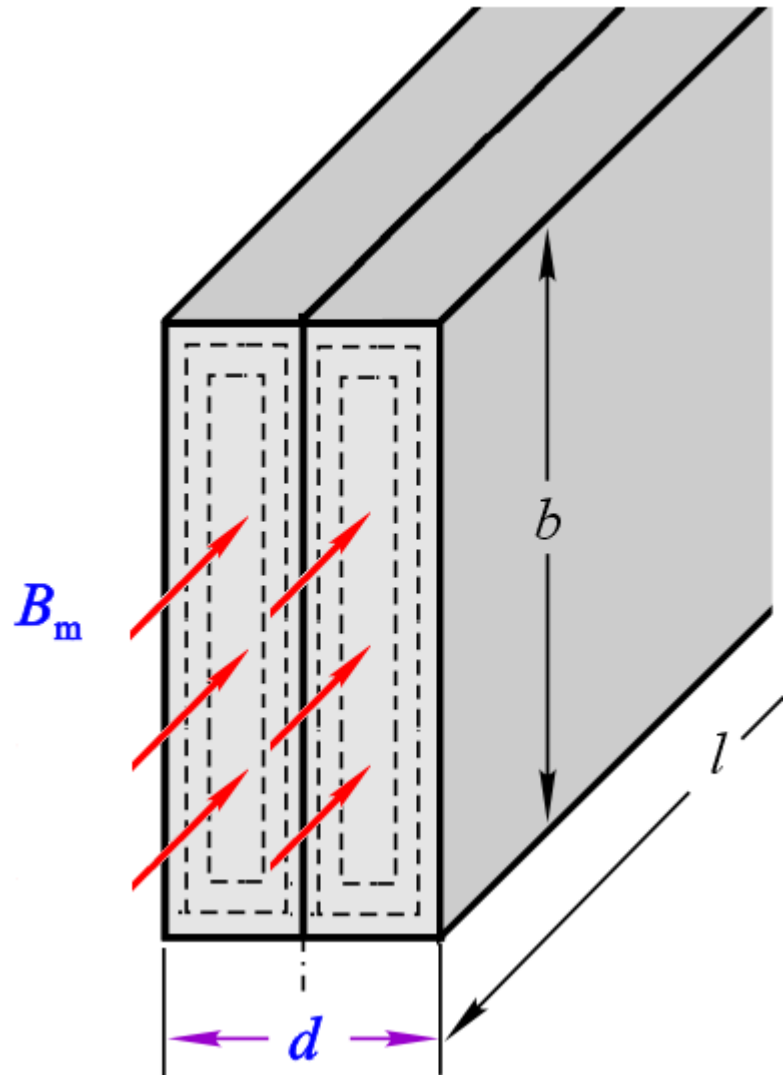
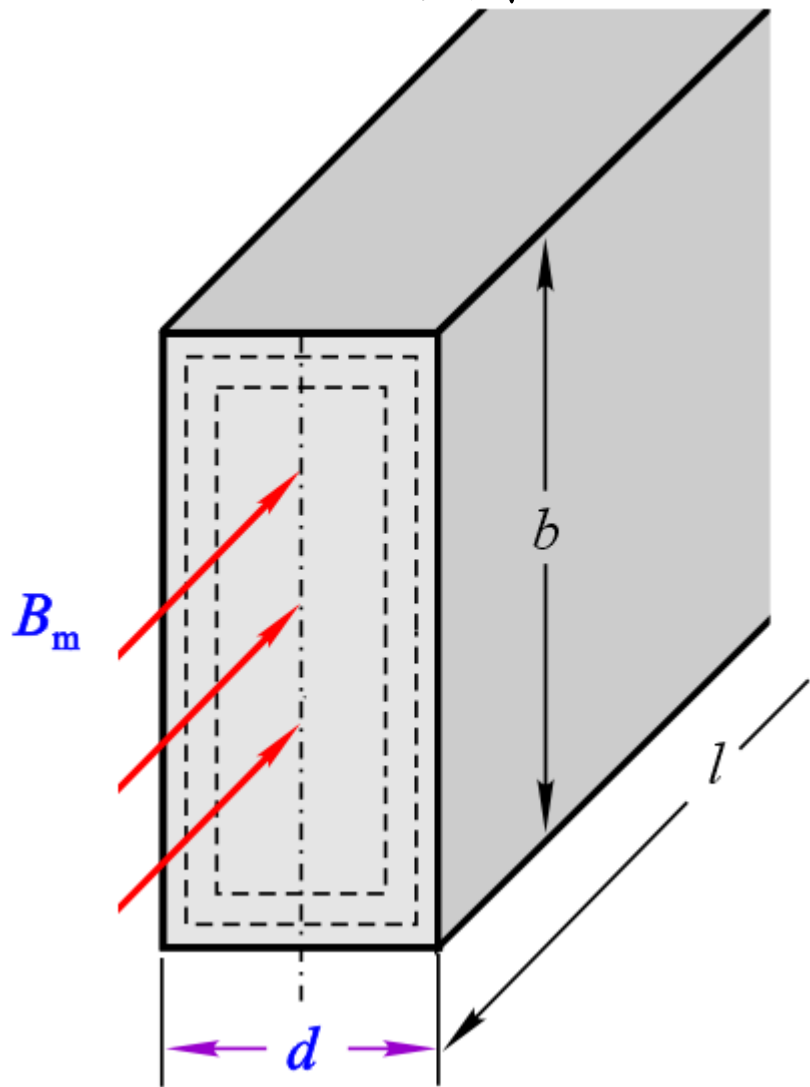
定义：铁磁材料置于**交变磁场**中时，磁畴相互间不停地**摩擦**、消耗能量、造成损耗，这种损耗称为**磁滞损耗**。

公式：

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

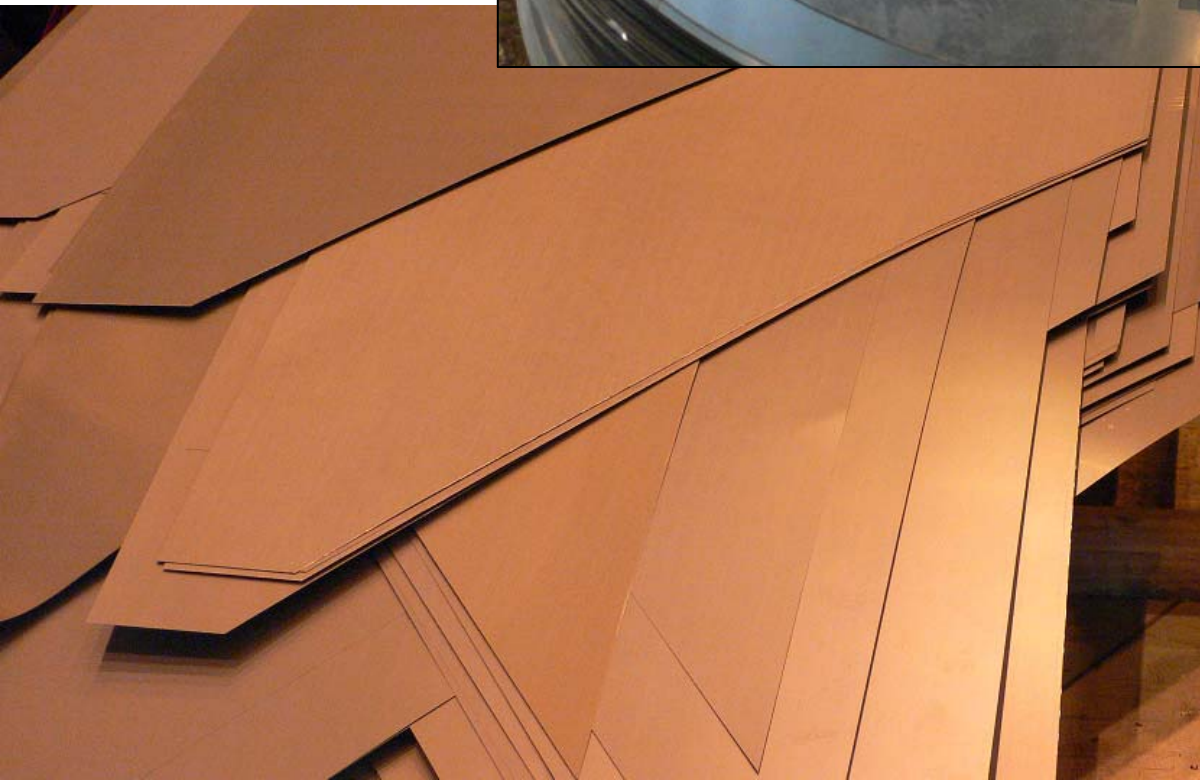
应用：由于硅钢片磁滞回线的面积较小，故电和变压器的铁心常用硅钢片制作。

2. 涡流损耗



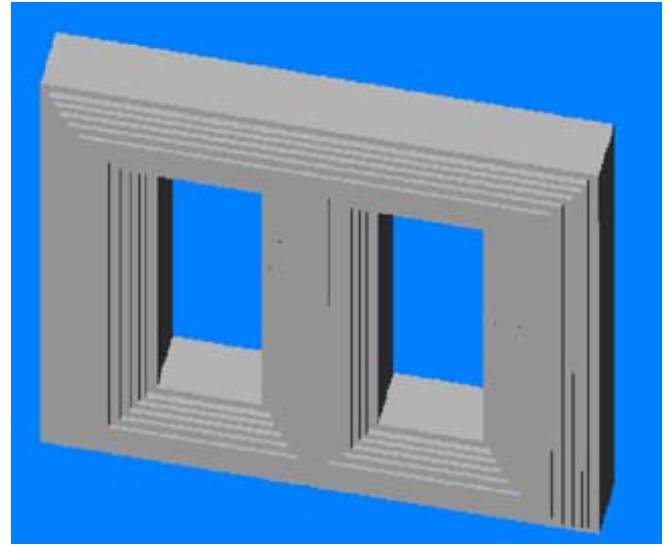
$$p_e = C_e d^2 f^2 B_m^2 V$$

硅钢片





定子铁心，采用硅钢片叠成，硅钢片表面绝缘。



变压器铁心



3. 铁心损耗

定义:

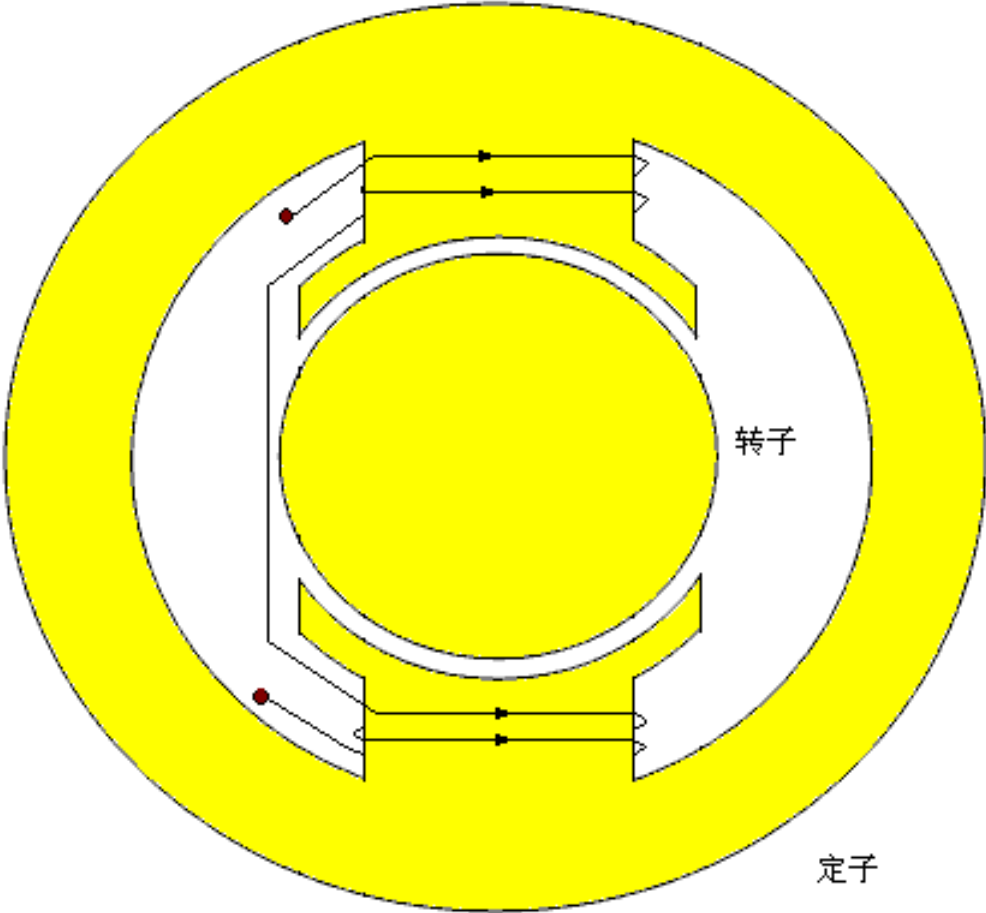
铁心中磁滞损耗和涡流损耗之和

表达式:

$$P_{Fe} = P_h + P_e$$

$$P_{Fe} \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G$$

直流电机的铁耗



1-3 磁路的计算

1. 例题1-2的结论:

气隙虽然很短, 仅仅 $5.0e-4m$ (占磁路总长度的 0.167%), 但是其磁位降缺占了磁路的 89% 。

2. 交流磁路的特点

A. 交流磁路中, 激磁电流是交流, 因此磁路中的磁动势及其所激励的磁通均随时间而交变, 但**每一瞬时仍和直流磁路一样, 遵循磁路的基本定律。**

B. 就瞬时值而言, 通常情况下, 可以使用相同的基本磁化曲线。

C. 磁通量和磁通密度均用交流的幅值表示, 磁动势和磁场强度则用有效值表示。

交变磁通的两个效应：

(1) 磁通量随时间交变，必然会在激磁线圈内产生感应电动势；

(2) 磁饱和现象会导致电流、磁通和电动势波形的畸变。

补充知识

1. 电磁感应定律

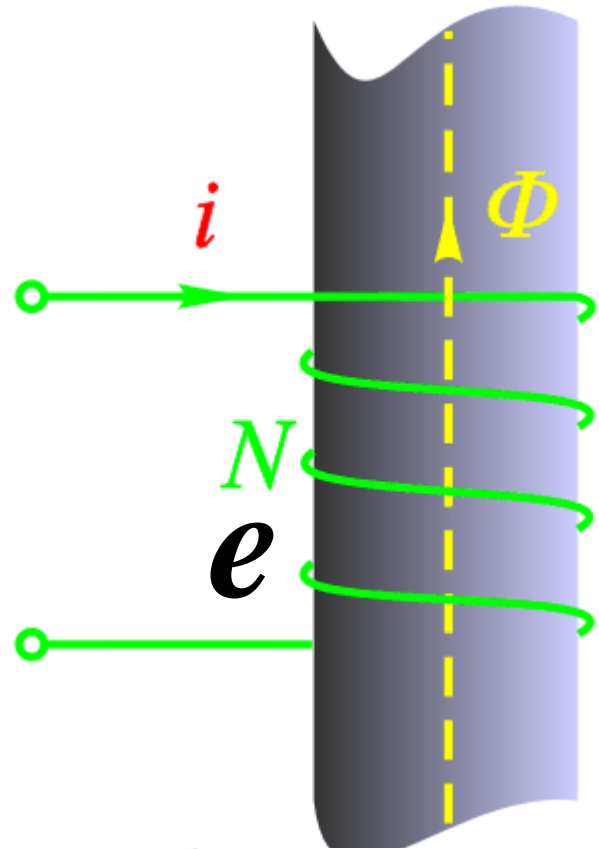
将一个匝数为 N 的线圈置于磁场当中，与线圈交链的磁链为 Ψ ，则不论什么原因（如线圈与磁场发生相对运动或磁场本身发生变化等），只要 Ψ 发生了变化，线圈中就会应出电动势。该电动势倾向于下线圈内产电流，以阻止 Ψ 的变化。

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

若 N 匝线圈中通过的磁通均为 Φ

$$\Psi = N\Phi \quad e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$d\Phi$



补充知识

导致磁通变化的原因可归纳为两大类，一类是磁通由时变电流产生，即磁通是时间 t 的函数；另一类是线圈与磁场间有相对运动，即磁通是位移变量 x 的函数。

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

从而有：

$$e = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} - Nv \frac{\partial \Phi}{\partial x} = e_T + e_v$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad \text{为线圈与磁场间相对运动的速度}$$

补充知识

$$e = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} - Nv \frac{\partial \Phi}{\partial x} = e_T + e_v$$

e_T 为变压器电势，它是线圈与磁场相对静止时，单由磁通随时间变化而在线圈中产生的感应电动势，与变压器工作时的情况一样，由此而得名。

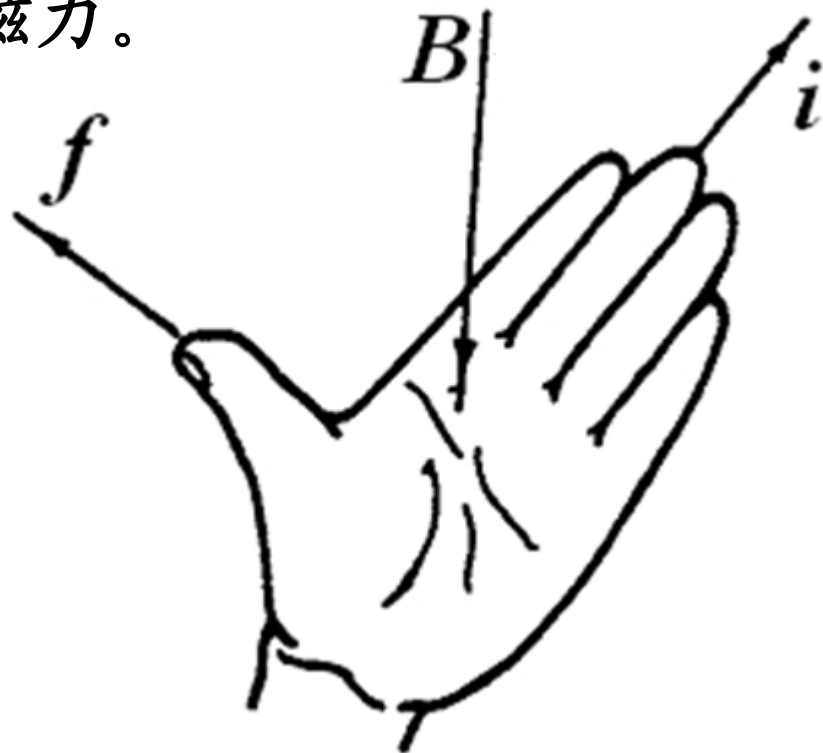
e_v 为运动电势，在电机学当中也叫速度电动势或旋转电动势，也叫切割电动势，它是磁场恒定时，单由线圈（或导体）与场之间的相对运动所产生的。

补充知识

2. 电磁力定律

磁场对电流的作用是磁场的基本特征之一。实验证明，将长度 l 的导体置于磁场 B 中，通入电流 i 后，导体会受到力的作用，称为电磁力。

$$F = Bli$$



作业

- 1-2
- 1-3
- 1-4