

第五章

磁场和磁路

教学重点

1. 了解直线电流、环形电流以及螺线管电流的磁场，会用右手定则判断其磁场的方向。
2. 理解磁感应强度、磁通、磁导率、磁场强度的概念。
3. 了解匀强磁场的性质及有关计算。
4. 掌握磁场对电流作用力的有关计算及方向的判断，了解磁场对通电线圈的作用。
5. 了解铁磁性物质的磁化、磁化曲线和磁滞回线。
6. 了解磁动势和磁阻的概念。

教学难点

掌握磁路中的欧姆定律。

学时分配

序号	内 容	学 时
1	第一节 电流的磁效应	1
2	第二节 磁场的主要物理量	1
3	第三节 磁场对电流的作用力	1
4	第四节 铁磁性物质的磁化	1
5	第五节 磁路的基本概念	1
6	本章小结	1
7	本章总学时	6

第五章 磁场和磁路

第一节 电流的磁效应

第二节 磁场的主要物理量

第三节 磁场对电流的作用力

第四节 铁磁性物质的磁化

第五节 磁路的基本概念

本章小结

第一节 电流的磁效应

一、磁场

二、磁感线

三、电流的磁场

一、磁场

1. 磁场：磁体周围存在的一种特殊的物质叫磁场。磁体间的相互作用力是通过磁场传送的。磁体间的相互作用力称为磁场力，同名磁极相互排斥，异名磁极相互吸引。

2. 磁场的性质：磁场具有力的性质和能量性质。

3. 磁场方向：在磁场中某点放一个可自由转动的小磁针，它N极所指的方向即为该点的磁场方向。

二、磁感线

1. 磁感线

在磁场中画一系列曲线，使曲线上每一点的切线方向都与该点的磁场方向相同，这些曲线称为**磁感线**。如图 5-1 所示。

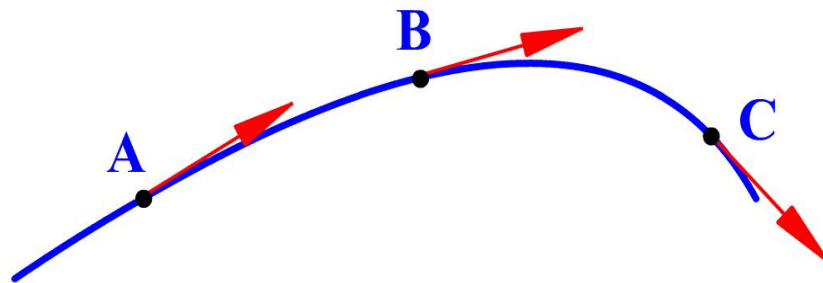


图 5-1 磁感线

2. 特点

(1) 磁感线的切线方向表示磁场方向，其疏密程度表示磁场的强弱。

(2) 磁感线是闭合曲线，在磁体外部，磁感线由 N 极出来，绕到 S 极；在磁体内部，磁感线的方向由 S 极指向 N 极。

(3) 任意两条磁感线不相交。

说明：磁感线是为研究问题方便人为引入的假想曲线，实际上并不存在。

图 5-2 所示为条形磁铁的磁感线的形状。

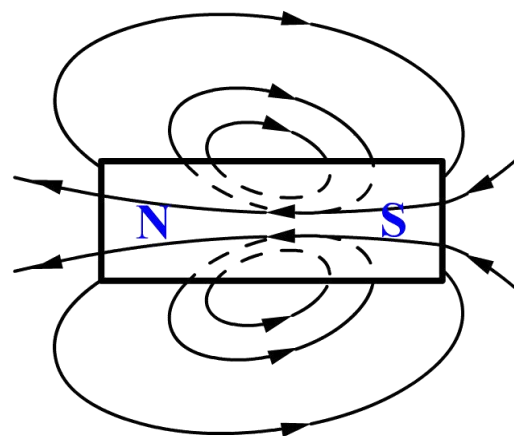


图 5-2 条形磁铁的磁感线

3. 匀强磁场

在磁场中某一区域，若磁场的大小、方向都相同，这部分磁场称为匀强磁场。匀强磁场的磁感线是一系列疏密均匀、相互平行的直线。



三、电流的磁场

1. 电流的磁场



动画 [M5-1 直线电流的磁场](#)

直线电流所产生的磁场方向可用**安培定则**来判定，方法是：用右手握住导线，让拇指指向电流方向，四指所指的方向就是磁感线的环绕方向。



动画 [M5-2 环行电流的磁场](#)

环形电流的磁场方向也可用安培定则来判定，方法是：用让右手弯曲的四指和环形电流方向一致，伸直的拇指所指的方向就是导线环中心轴线上的磁感线方向。

螺线管通电后，磁场方向仍可用安培定则来判定：用右手握住螺线管，四指指向电流的方向，拇指所指的就是螺线管内部的磁感线方向。



动画 [M5-3 螺线管电流磁场](#)

2. 电流的磁效应

电流的周围存在磁场的现象称为**电流的磁效应**。电流的磁效应揭示了磁现象的电本质。

第二节 磁场的主要物理量

一、磁感应强度

二、磁通

三、磁导率

四、磁场强度

一、磁感应强度



动画 [M5-4 磁感应强度](#)

磁场中垂直于磁场方向的通电直导线所受的磁场力 F 与电流 I 和导线长度 l 的乘积 Il 的比值叫做通电直导线所在处的磁感应强度 B 。即

$$B = \frac{F}{Il}$$

磁感应强度是描述磁场强弱和方向的物理量。

磁感应强度是一个矢量，它的方向即为该点的磁场方向。
在国际单位制中，磁感应强度的单位是：特斯拉(T)。

用磁感线可形象地描述磁感应强度 B 的大小， B 较大的地方，磁场较强，磁感线较密； B 较小的地方，磁场较弱，磁感线较稀；磁感线的切线方向即为该点磁感应强度 B 的方向。

匀强磁场中各点的磁感应强度大小和方向均相同。

二、磁通

在磁感应强度为 B 的匀强磁场中取一个与磁场方向垂直，面积为 S 的平面，则 B 与 S 的乘积，叫做穿过这个平面的磁通量 Φ ，简称磁通。即

$$\Phi = BS$$

磁通的国际单位是韦伯（Wb）。由磁通的定义式，可得

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

即磁感应强度 B 可看作是通过单位面积的磁通，因此磁感应强度 B 也常叫做磁通密度，并用 Wb/m^2 作单位。

三、磁导率

1. 磁导率 μ

磁场中各点的磁感应强度 B 的大小不仅与产生磁场的电流和导体有关，还与磁场内媒介质(又叫做磁介质)的导磁性质有关。在磁场中放入磁介质时，介质的磁感应强度 B 将发生变化，磁介质对磁场的影响程度取决于它本身的导磁性能。

物质导磁性能的强弱用磁导率 μ 来表示。 μ 的单位是：亨利/米(H/m)。不同的物质磁导率不同。在相同的条件下， μ 值越大，磁感应强度 B 越大，磁场越强； μ 值越小，磁感应强度 B 越小，磁场越弱。

真空中的磁导率是一个常数，用 μ_0 表示

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

2. 相对磁导率 μ_r

为便于对各种物质的导磁性能进行比较，以真空磁导率 μ_0 为基准，将其他物质的磁导率 μ 与 μ_0 比较，其比值叫**相对磁导率**，用 μ_r 表示，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

根据相对磁导率 μ_r 的大小，可将物质分为三类：

(1) **顺磁性物质**： μ_r 略大于 1，如空气、氧、锡、铝、铅等物质都是顺磁性物质。在磁场中放置顺磁性物质，磁感应强度 B 略有增加。

(2) **反磁性物质**： μ_r 略小于 1，如氢、铜、石墨、银、锌等物质都是反磁性物质，又叫做抗磁性物质。在磁场中放置反磁性物质，磁感应强度 B 略有减小。

(3) **铁磁性物质**： $\mu_r \gg 1$ ，且不是常数，如铁、钢、铸铁、镍、钴等物质都是铁磁性物质。在磁场中放入铁磁性物质，可使磁感应强度 B 增加几千甚至几万倍。

表 5-1 列出了几种常用的铁磁性物质的相对磁导率。

表 5-1 几种常用铁磁性物质的相对磁导性

材 料	相对磁导率	材 料	相对磁导率
钴	174	已经退火的铁	7 000
未经退火的铸铁	240	变压器钢片	7 500
已经退火的铸铁	620	在真空中融化的 电解铁	12 950
镍	1 120	镍铁合金	60 000
软钢	2 180	“C”型坡莫合金	115 000

四、磁场强度

在各向同性的介质中，某点的磁感应强度 B 与磁导率 μ 之比称为该点的**磁场强度**，记做 H 。即

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

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

磁场强度 H 也是矢量，其方向与磁感应强度 B 同向，国际单位是：安培/米 (A/m)。

必须注意：磁场中各点的磁场强度 H 的大小只与产生磁场的电流 I 的大小和导体的形状有关，与磁介质的性质无关。

第三节 磁场对电流的作用力

一、磁场对直线电流的作用力

二、磁场对通电线圈的作用力矩

三、电流表工作原理

一、磁场对直线电流的作用力

1. 安培力的大小

磁场对放在其中的通电直导线有力的作用，这个力称为**安培力**。

(1) 当电流 I 的方向与磁感应强度 B 垂直时，导线受安培力最大，根据磁感应强度

$$B = \frac{F}{Il}$$



可得

$$F = BIl$$

(2) 当电流 I 的方向与磁感应强度 B 平行时，导线不受安培力作用。

(3) 如图 5-3 所示，当电流 I 的方向与磁感应强度 B 之间有一定夹角时，可将 B 分解为两个互相垂直的分量：

一个与电流 I 平行的分量， $B_1 = B\cos\theta$ ；另一个与电流 I 垂直的分量， $B_2 = B\sin\theta$ 。 B_1 对电流没有力的作用，磁场对电流的作用力是由 B_2 产生的。因此，磁场对直线电流的作用力为

$$F = B_2 Il = BIl\sin\theta$$

当 $\theta = 90^\circ$ 时，安培力 F 最大；当 $\theta = 0^\circ$ 时，安培力 $F = 0$ 。

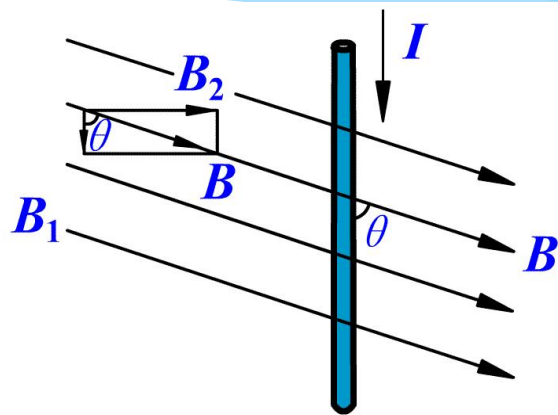


图 5-3 磁场对直线电流的作用力

2. 单位

公式中各物理量的单位均采用国际单位制：安培力 F 的单位用牛顿 (N)；电流 I 的单位用安培 (A)；长度 l 的单位用米 (m)；磁感应强度 B 的单位用特斯拉 (T)。

3. 左手定则

安培力 F 的方向可用左手定则判断：伸出左手，使拇指跟其他四指垂直，并都跟手掌在一个平面内，让磁感线穿入手心，四指指向电流方向，大拇指所指的方向即为通电直导线在磁场中所受安培力的方向。

由左手定则可知： $F \perp B$ ， $F \perp I$ ，即 F 垂直于 B 、 I 所决定的平面。

二、磁场对通电线圈的作用力矩

将一矩形线圈 $abcd$ 放在匀强磁场中，如图 5-4 所示

线圈的顶边 ad 和底边 bc 所受的磁场力 F_{ad} 、 F_{bc} 大小相等，方向相反，在一条直线上，彼此平衡；而作用在线圈两个侧边 ab 和 cd 上的磁场力 F_{ab} 、 F_{cd} 虽然大小相等，方向相反，但不在一条直线上，产生了力矩，称为**磁力矩**。

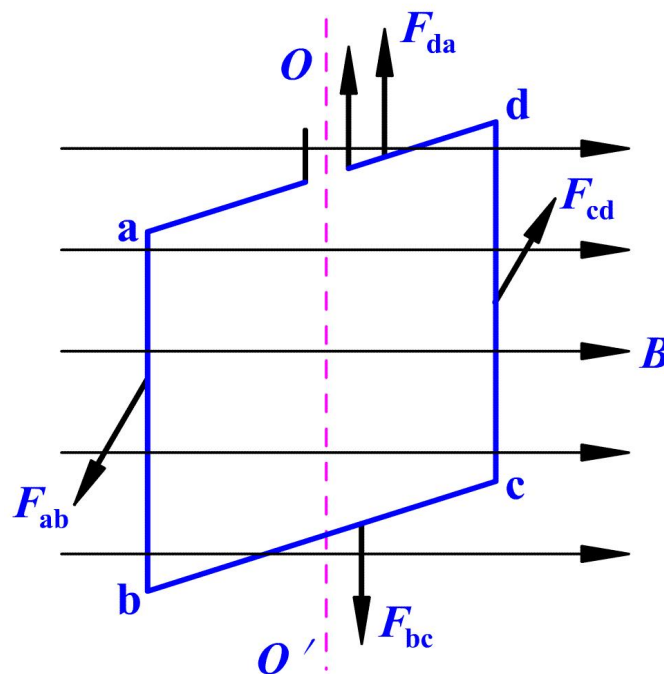


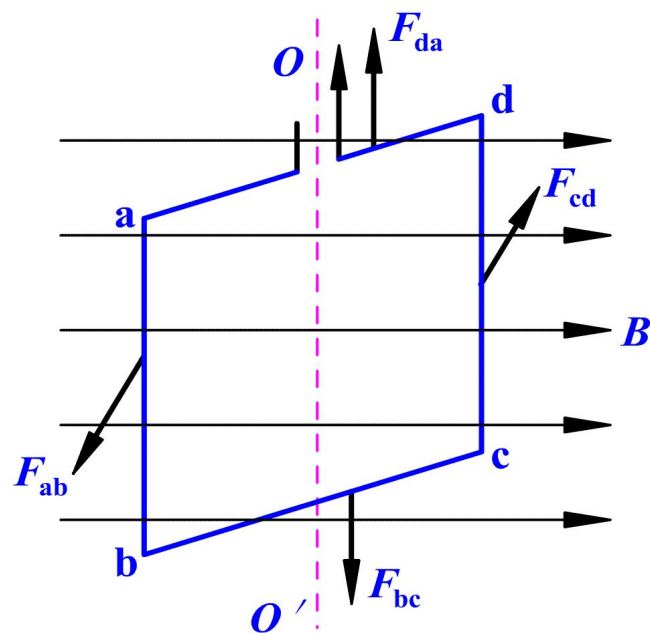
图 5-4 磁场对通电矩形线圈的作用力矩

这个力矩使线圈绕 OO' 转动，转动过程中，随着线圈平面与磁感线之间夹角的改变，力臂在改变，磁力矩也在改变。

当线圈平面与磁感线平行时，
力臂最大，线圈受磁力矩最大；

当线圈平面与磁感线垂直时，
力臂为零，线圈受磁力矩也为零。

电流表就是根据上述原理工作的。



三、电流表工作原理

1. 结构

电流表的结构如图 5-5 所示。

在一个很强的蹄形磁铁的两极间有一个固定的圆柱形铁心，铁心外套有一个可以绕轴转动的铝框，铝框上绕有线圈，铝框的转轴上装有两个螺旋弹簧和一个指针，线圈两端分别接在这两个螺旋弹簧上，被测电流就是经过这两个弹簧流入线圈的。

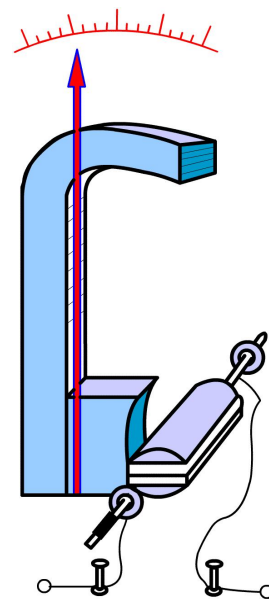


图 5-5 电流表的结构

2. 工作原理

如图 5-6 所示，蹄形磁铁和铁心间的磁场是均匀地辐向分布，这样，不论通电线圈转到什么方向，它的平面都跟磁感线平行。因此，线圈受到的偏转磁力矩 M_1 就不随偏角而改变。

通电线圈所受的的磁力矩 M_1 的大小与电流 I 成正比，即

$$M_1 = k_1 I$$

式中 k_1 为比例系数。

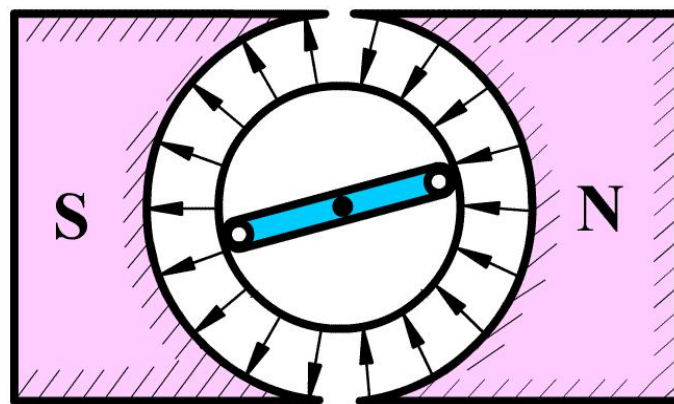


图 5-6 磁电式电表的磁场

线圈偏转使弹簧扭紧或扭松，于是弹簧产生一个阻碍线圈偏转的力矩 M_2 ，线圈偏转的角度越大，弹簧的力矩也越大， M_2 与偏转角 θ 成正比，即

$$M_2 = k_2 \theta \quad (\text{式中 } k_2 \text{ 为比例系数})$$

当 M_1 、 M_2 平衡时，线圈就停在某一偏角上，固定在转轴上的指针也转过同样的偏角，指到刻度盘的某一刻度。

比较上述两个力矩，因为 $M_1 = M_2$ ，所以 $k_1 I = k_2 \theta$ ，即

$$\theta = \frac{k_1}{k_2} I = k I$$

即测量时偏转角度 θ 与所测量的电流成正比。这就是电流表的工作原理。这种利用永久性磁铁来使通电线圈偏转达到测量目的的仪表称为**磁电式仪表**。

3. 磁电式仪表的特点

(1) 刻度均匀，灵敏度高，准确度高。

(2) 负载能力差，价格较昂贵。

(3) 给电流表串联一个阻值很大的分压电阻，就可改装成量程较大的电压表；并联一个阻值很小的分流电阻，就可改装成量程较大的电流表；欧姆表也是由电流表改装的。

第四节 铁磁性物质的磁化

一、铁磁性物质的磁化

二、磁化曲线

三、磁滞回线

一、铁磁性物质的磁化

1. 磁化

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

2. 被磁化的原因

(1) 内因：铁磁性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小磁铁。

(2) 外因：有外磁场的作用。

如图 5-7(a) 所示，当无外磁场作用时，磁畴排列杂乱无章，磁性相互抵消，对外不显磁性；

如图 5-7(b) 所示，当有外磁场作用时，磁畴将沿着磁场方向作取向排列，形成**附加磁场**，使磁场显著加强。

有些铁磁性物质在撤去磁场后，磁畴的一部分或大部分仍然保持取向一致，对外仍显磁性，即成为永久磁铁。

不同的铁磁性物质，磁化后的磁性不同。

铁磁性物质被磁化的性能，被广泛地应用于电子和电气设备中，如变压器、继电器、电机等。

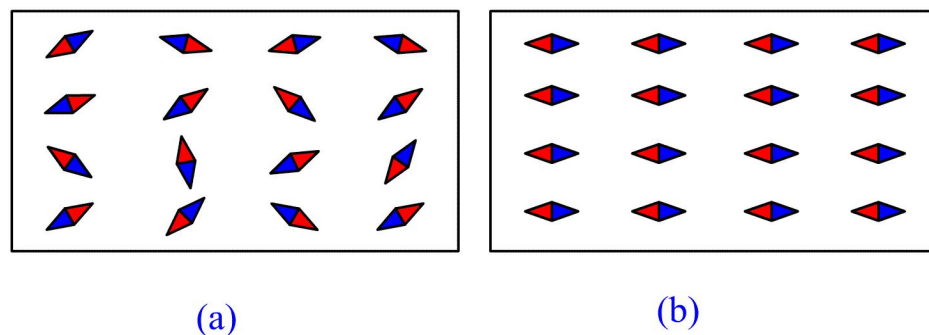


图 5-7 铁磁性物质的磁化

二、磁化曲线

1. 磁化曲线的定义

磁化曲线是用来描述铁磁性物质的磁化特性的。铁磁性物质的磁感应强度 B 随磁场强度 H 变化的曲线，称为磁化曲线，也叫 $B-H$ 曲线。



动画 [M5-5 磁化曲线](#)

2. 磁化曲线的测定

图 5-8 中，(a) 是测量磁化曲线装置的示意图，(b) 是根据测量值做出的磁化曲线。由图 5-8 (b) 可以看出， B 与 H 的关系是非线性的，即 $\mu = \frac{B}{H}$ 不是常数。

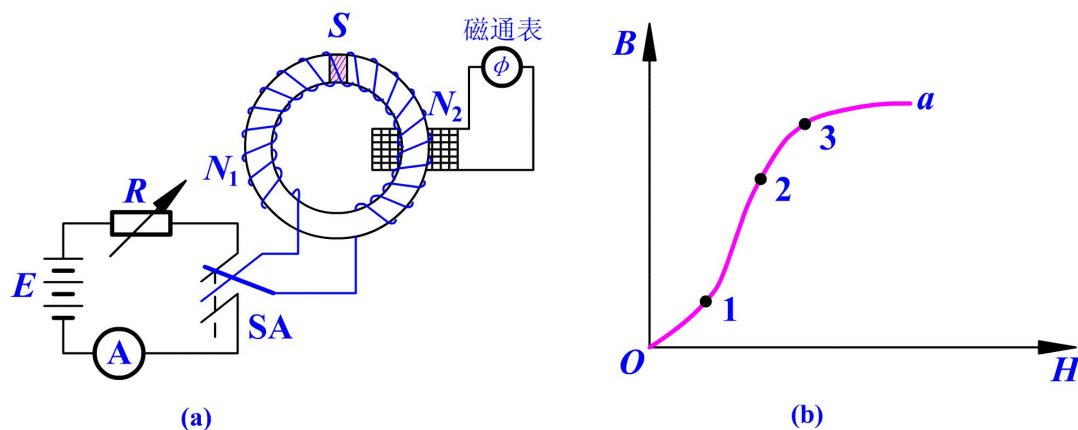


图 5-8 磁化曲线的测定

3. 分析

(1) 0 ~ 1 段：曲线上升缓慢，这是由于磁畴的惯性，当 H 从零开始增加时， B 增加缓慢，称为**起始磁化段**。

(2) 1 ~ 2 段：随着 H 的增大， B 几乎直线上升，这是由于磁畴在外磁场作用下，大部分都趋向 H 方向， B 增加很快，曲线很陡，称为**直线段**。

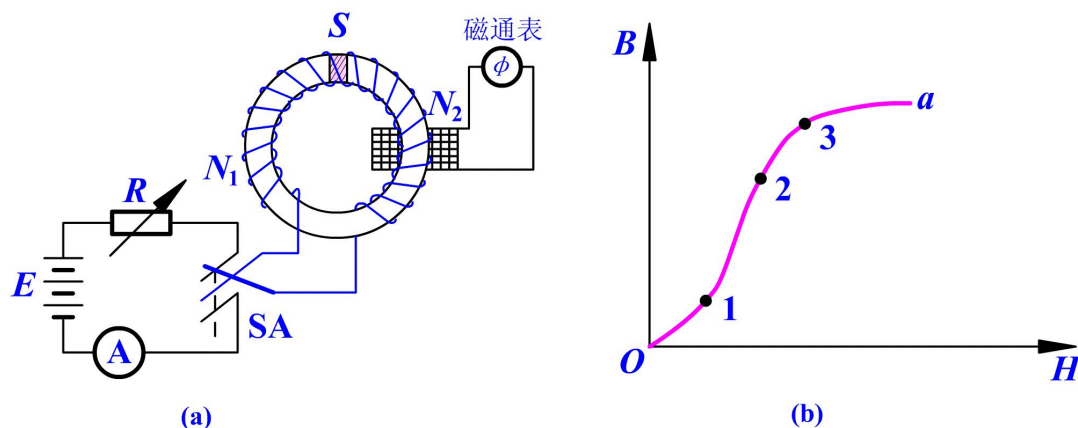


图 5-8 磁化曲线的测定

(3) 2 ~ 3 段：随着 H 的增加， B 的上升又缓慢了，这是由于大部分磁畴方向已转向 H 方向，随着 H 的增加只有少数磁畴继续转向， B 增加变慢。

(4) 3 点以后：到达 3 点以后，磁畴几乎全部转到了外磁场方向，再增大 H 值， B 也几乎不再增加，曲线变得平坦，称为饱和段，此时的磁感应强度叫饱和磁感应强度。

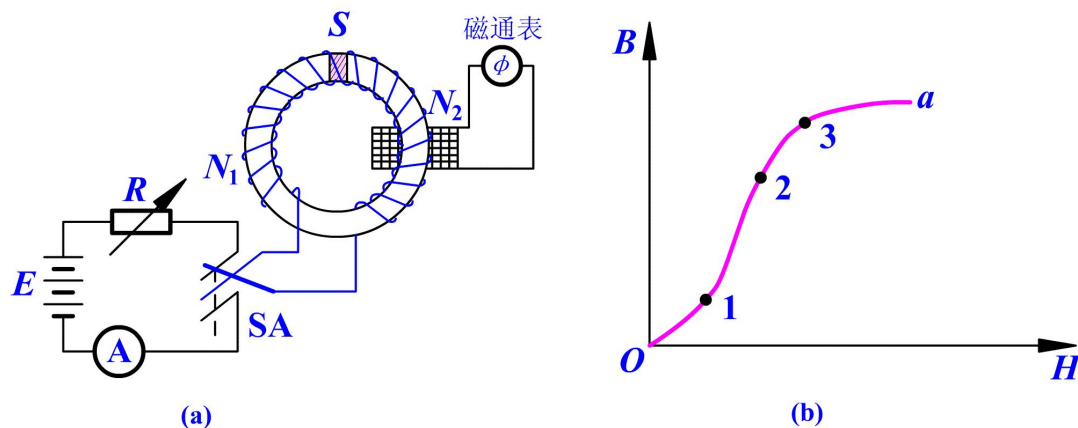


图 5-8 磁化曲线的测定

不同的铁磁性物质， B 的饱和值不同，对同一种材料， B 的饱和值是一定的。

电机和变压器，通常工作在曲线的 2 ~ 3 段，即接近饱和的地方。

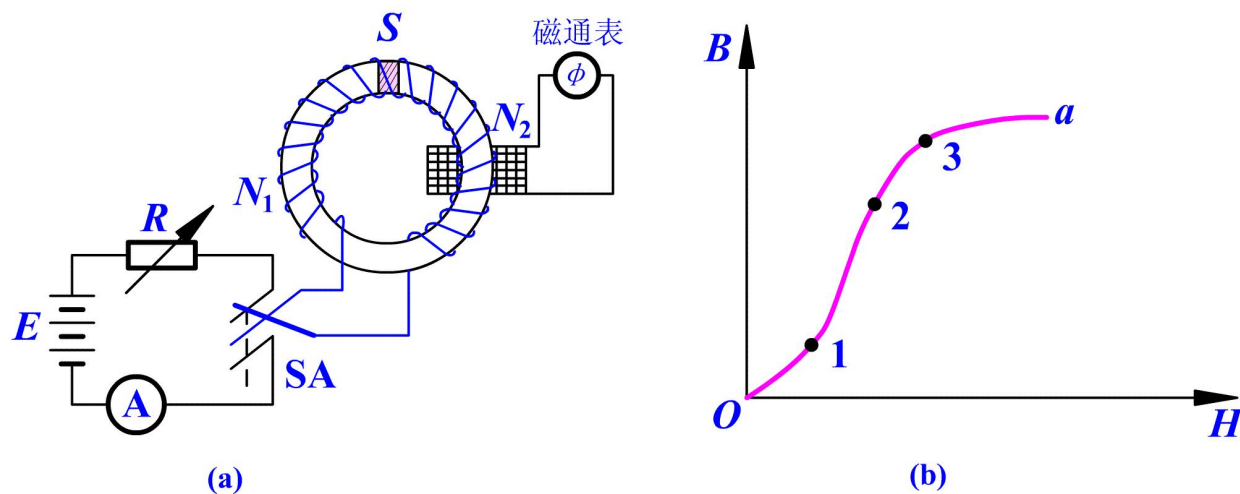


图 5-8 磁化曲线的测定

4. 磁化曲线的意义

在磁化曲线中，已知 H 值就可查出对应的 B 值。因此，在计算介质中的磁场问题时，磁化曲线是一个很重要的依据。

图 5-9 给出了几种不同铁磁性物质的磁化曲线，从曲线上可看出，在相同的磁场强度 H 下，硅钢片的 B 值最大，铸铁的 B 值最小，说明硅钢片的导磁性能比铸铁要好得多。

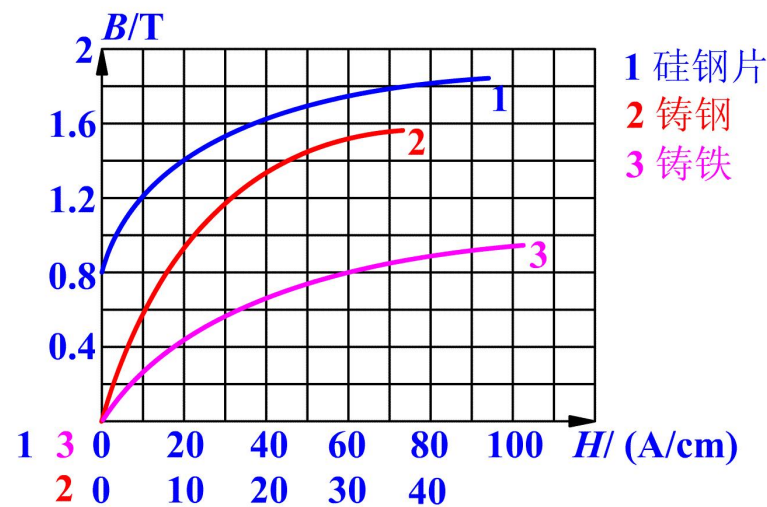


图 5-9 几种铁磁性物质的磁化曲线

三、磁滞回线

磁化曲线只反映了铁磁性物质在外磁场由零逐渐增强的磁化过程，而很多实际应用中，铁磁性物质是工作在交变磁场中的。所以，必须研究铁磁性物质反复交变磁化的问题。

1. 磁滞回线的测定



动 画

动画 [M5-6 磁滞回线](#)

2. 分析

图 5-10 为通过实验测定的某种铁磁性物质的磁滞回线。

(1) 当 B 随 H 沿起始磁化曲线达到饱和值以后，逐渐减小 H 的数值，由图可看出， B 并不沿起始磁化曲线减小，而是沿另一条在它上面的曲线 ab 下降。

(2) 当 H 减小到零时， $B \neq 0$ ，而是保留一定的值称为剩磁，用 B_r 表示。永久性磁铁就是利用剩磁很大的铁磁性物质制成的。

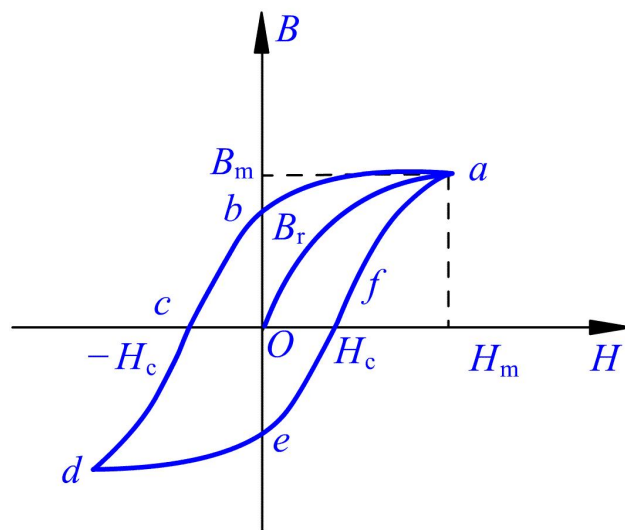


图 5-10 磁滞回线

(3) 为消除剩磁，必须加反向磁场，随着反向磁场的增强，铁磁性物质逐渐退磁，当反向磁场增大到一定值时， B 值变为 0，剩磁完全消失，如图 bc 段。

bc 段曲线叫退磁曲线，这时 H 值是为克服剩磁所加的磁场强度，称为矫顽磁力，用 H_C 表示。矫顽磁力的大小反映了铁磁性物质保存剩磁的能力。

(4) 当反向磁场继续增大时， B 值从 0 起改变方向，沿曲线 cd 变化，并能达到反向饱和点 d 。

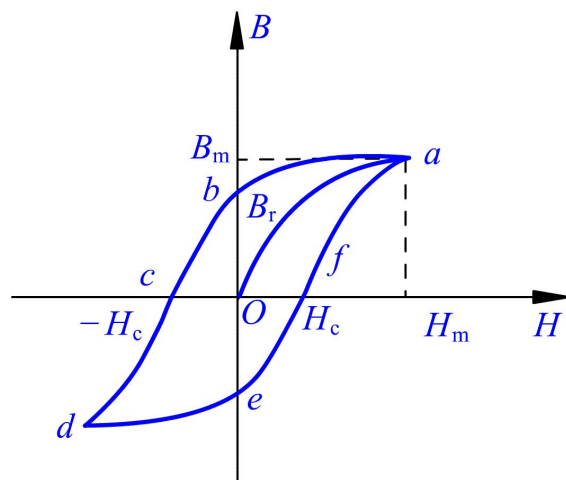


图 5-10 磁滞回线

(5) 使反向磁场减弱到 0， $B-H$ 曲线沿 de 变化，在 e 点 $H = 0$ ，再逐渐增大正向磁场， $B-H$ 曲线沿 efa 变化，完成一个循环。

(6) 从整个过程看， B 的变化总是落后于 H 的变化，这种现象称为磁滞现象。经过多次循环，可得到一个封闭的对称于原点的闭合曲线 ($abcdefa$)，称为磁滞回线。

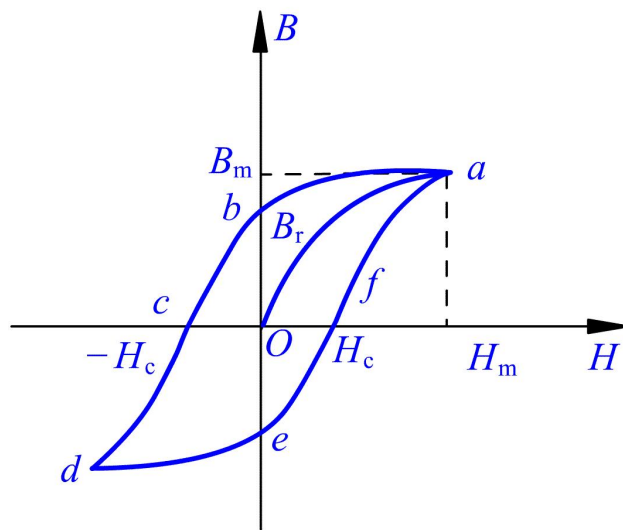


图 5-10 磁滞回线

(7) 改变交变磁场强度 H 的幅值，可相应得到一系列大小不一的磁滞回线，如图 5-11 所示。连接各条对称的磁滞回线的顶点，得到一条磁化曲线，叫基本磁化曲线。

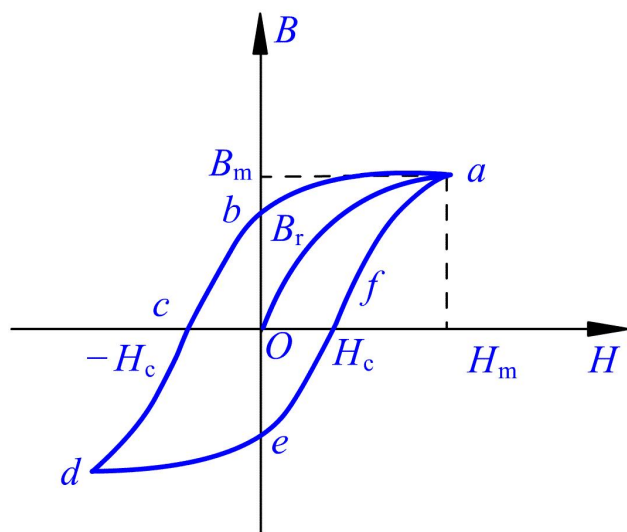


图 5-10 磁滞回线

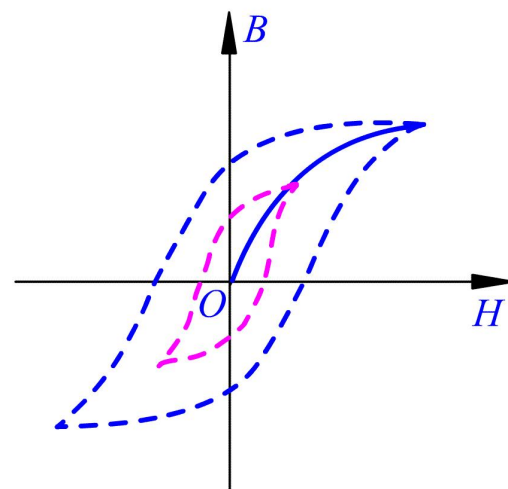


图 5-11 基本磁化曲线

3. 磁滞损耗

铁磁性物质在交变磁化时，磁畴要来回翻转，在这个过程中，产生了能量损耗，称为**磁滞损耗**。磁滞回线包围的面积越大，磁滞损耗就越大，所以剩磁和矫顽磁力越大的铁磁性物质，磁滞损耗就越大。因此，磁滞回线的形状常被用来判断铁磁性物质的性质和作为选择材料的依据。

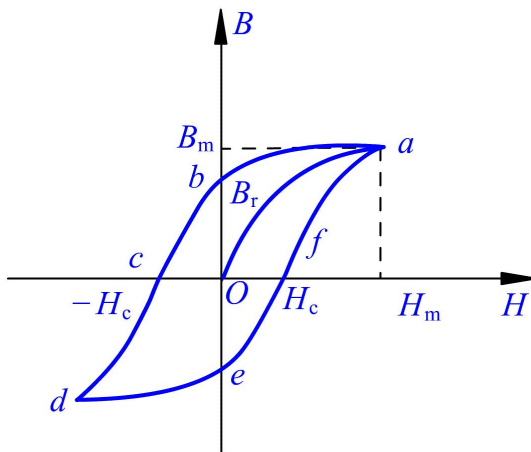


图 5-10 磁滞回线

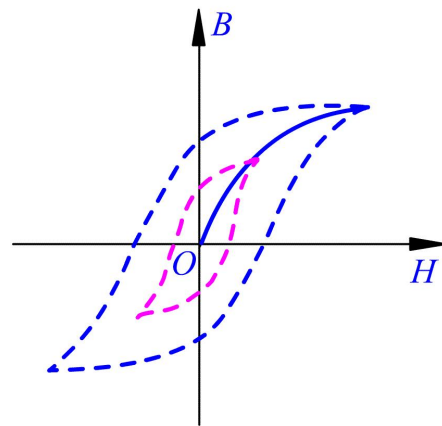


图 5-11 基本磁化曲线

第五节 磁路的基本概念

一、磁路

二、磁路的欧姆定律

一、磁路

1. 主磁通和漏磁通

如图 5-12 所示，当线圈中通以电流后，大部分磁感线沿铁心、衔铁和工作气隙构成回路，这部分磁通称为**主磁通**；还有一部分磁通，没有经过气隙和衔铁，而是经空气自成回路，这部分磁通称为**漏磁通**。

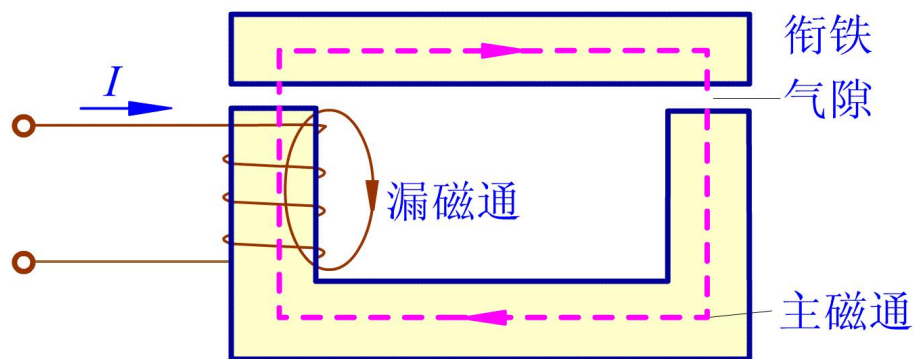


图 5-12 主磁通和漏磁通

2. 磁路

磁通经过的闭合路径叫**磁路**。磁路和电路一样，分为**有分支磁路**和**无分支磁路**两种类型。

图 5-12 给出了无分支磁路，图 5-13 给出了有分支磁路。在无分支磁路中，通过每一个横截面的磁通都相等。

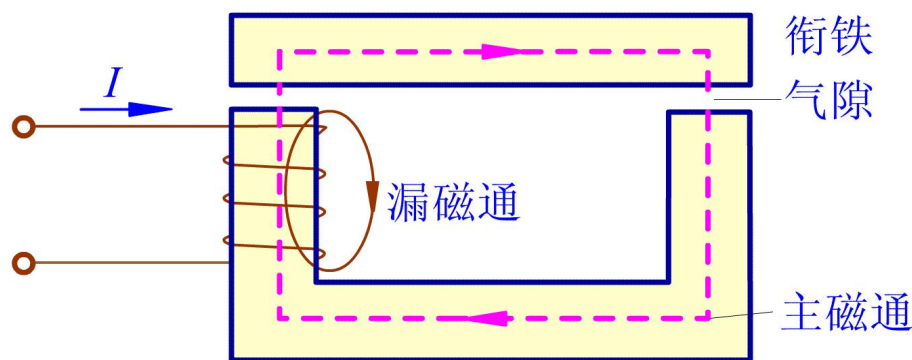


图 5-12 主磁通和漏磁通

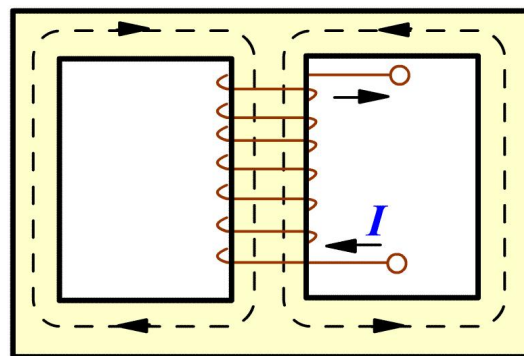


图 5-13 有分支磁路

二、磁路的欧姆定律

1. 磁动势

通电线圈产生的磁通 Φ 与线圈的匝数 N 和线圈中所通过的电流 I 的乘积成正比。

把通过线圈的电流 I 与线圈匝数 N 的乘积，称为**磁动势**，也叫**磁通势**，即

$$E_m = NI$$

磁动势 E_m 的单位是安培 (A)。

2. 磁阻

磁阻就是磁通通过磁路时所受到的阻碍作用，用 R_m 表示。磁路中磁阻的大小与磁路的长度 l 成正比，与磁路的横截面积 S 成反比，并与组成磁路的材料性质有关。因此有

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

式中， μ 为磁导率，单位 H/m；长度 l 和截面积 S 的单位分别为 m 和 m²。因此，磁阻 R_m 的单位为 1/亨 (H⁻¹)。由于磁导率 μ 不是常数，所以 R_m 也不是常数。

3. 磁路欧姆定律

(1) 磁路欧姆定律

通过磁路的磁通与磁动势成正比，与磁阻成反比，即

$$\Phi = \frac{E_m}{R_m}$$

上式与电路的欧姆定律相似，磁通 Φ 对应于电流 I ，磁动势 E_m 对应于电动势 E ，磁阻 R_m 对应于电阻 R 。因此，这一关系称为磁路欧姆定律。

(2) 磁路与电路的对应关系

磁路中的某些物理量与电路中的某些物理量有对应关系，同时磁路中某些物理量之间与电路中某些物理量之间也有相似的关系。

图 5-14 是相对应的两种电路和磁路。

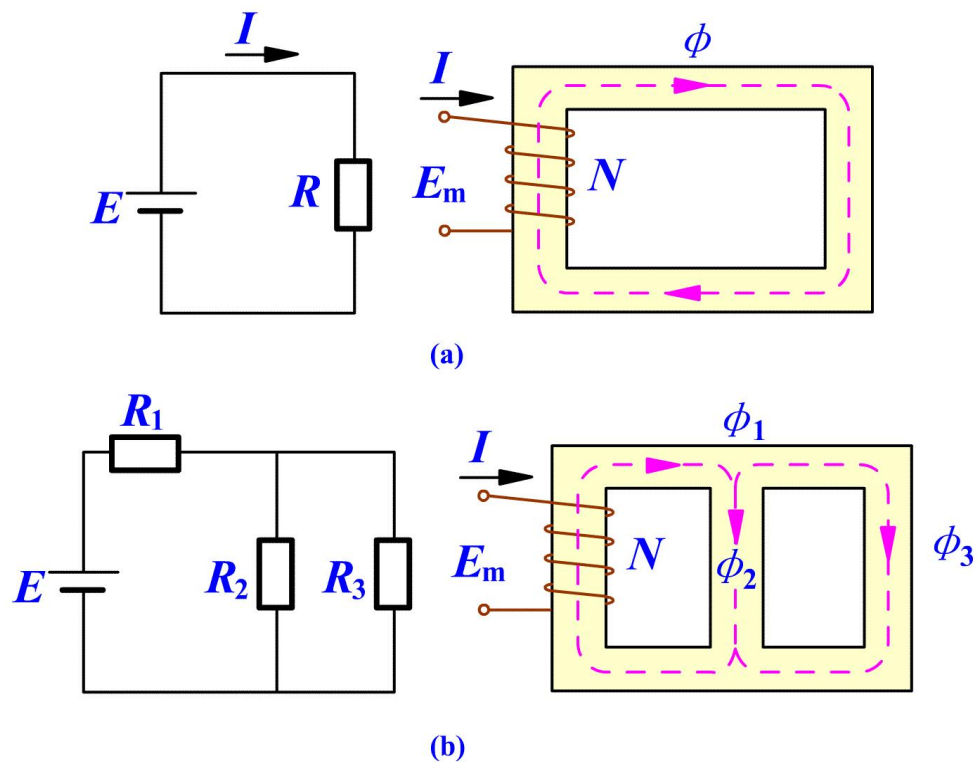


图 5-14 对应的电路和磁路

表 5-2 列出了电路与磁路对应的物理量及其关系式。

表 5-2 磁路和电路中对应的物理量及其关系式

电 路		磁 路	
电 流	I	磁 通	Φ
电 阻	$R = \rho \frac{l}{s}$	磁 阻	$R_m = \frac{l}{\mu s}$
电阻率	ρ	磁导率	μ
电动势	E	磁动势	$E_m = I N$
电路欧姆定律	$I = E/R$	磁路欧姆定律	$\Phi = E_m / R_m$

本章小结

- 一、磁场
- 二、电流的磁效应
- 三、描述磁场的物理量
- 四、磁场对电流的作用力
- 五、铁磁性物质的磁化
- 六、磁路

一、磁场

1. 磁场是磁体周围存在的一种特殊物质，磁体通过磁场发生相互作用。

2. 磁场的大小和方向可用磁感线来形象的描述：磁感线的疏密表示磁场的强弱，磁感线的切线方向表示磁场的方向。

二、电流的磁效应

1. 通电导线周围存在着磁场，说明电可以产生磁，由电产生磁的现象称为电流的磁效应。电流具有磁效应说明磁现象具有电本质。

2. 电流产生的磁场方向与电流的方向有关，可用安培定则，即右手螺旋定则来判断。

三、描述磁场的物理量

1. 磁感应强度 B

B 是描述磁场强弱和磁场方向的物理量，它描述了磁场的力效应。当通电直导线与磁场垂直时，通过观察导线受力可知导线所在处的磁感应强度

$$B = \frac{F}{Il}$$

2. 磁通

匀强磁场中，穿过与磁感线垂直的某一截面的磁感线的条数，叫穿过这个面的磁通， $\Phi = BS$ 。

3. 磁导率

磁导率是描述媒介质导磁性能的物理量。某一媒介质的磁导率与真空磁导率之比，叫这种介质的相对磁导率

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

4. 磁场强度

磁感应强度 B 与磁导率 μ 之比称为该点的磁场强度

$$H = \frac{B}{\mu}, \quad \text{或} \quad H = \frac{IN}{l}$$

四、磁场对电流的作用力

1. 磁场对放置于其中的直线电流有力的作用，其大小为 $F = BIl \sin \theta$ ，方向可用左手定则判断。
2. 通电线圈放在磁场中将受到磁力矩的作用。

五、铁磁性物质的磁化

1. 铁磁性物质都能够磁化。铁磁性物质在反复磁化过程中，有饱和、剩磁、磁滞现象，并且有磁滞损耗。
2. 铁磁性物质的 B 随 H 而变化的曲线称为磁化曲线，它表示了铁磁性物质的磁性能。磁滞回线常用来判断铁磁性物质的性质和作为选择材料的依据。

六、磁路

1. 磁通经过的闭合路径称为磁路。磁路中的磁通、磁动势和磁阻的关系，可用磁路欧姆定律来表示，即

$$\Phi = \frac{E_m}{R_m}$$

其中， $R_m = \frac{l}{\mu S}$ ， $E_m = NI$

2. 由于铁磁性物质的磁导率 μ 不是常数，因此磁路欧姆定律一般不能直接用来进行磁路计算，只用于定性分析。