

主编 于良 高建华

# 目标物理场 测试与分析

MUBIAO WULICHANG CESHI YU FENXI



国防科技大学出版社

要對容內

# 目标物理场测试与分析

主编：于良 高建华

主审：朱金华 周腊久 黄送秋

编者（按姓名笔画排序）：

于良 吴兵 沈青

汪庆桃 郭天天 高建华

崔伟峰

号 772881 卷 1 133

国防科技大学出版社

·长沙·

元 00 22 50

E951.2  
Y1

## 内 容 提 要

地雷的非触发引信主要根据目标的磁场特性、振动场特性、声场特性、红外场特性等各种物理特性而动作,本书重点介绍目标物理场的测试与分析方法。全书内容包括坦克、舰船磁场测试分析方法,坦克振动场的测试分析方法,坦克、舰船的声场测试分析方法,传感器的检测技术,以及测试分析各种目标物理场时使用的电测仪器等。

本书可作为相关专业大学本科生的专业基础教材,也可供从事目标物理场测试与分析的工程技术研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

目标物理场测试与分析/于良,高建华主编. —长沙:国防科技大学出版社, 2007.12

ISBN 978-7-81099-465-1

I. 目… II. ①于… ②高… III. 地雷场-研究 IV. E951.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 182637 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731) 4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:徐飞 责任校对:唐卫葳

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

\*

开本:787×960 1/16 印张:17.5 字数:324千

2007年12月第1版第1次印刷 印数:1-2000册

ISBN 978-7-81099-465-1

定价:28.00元

# 前 言

地雷是一种重要的作战武器，其非触发引信具有隐蔽性好、作用距离远、灵敏度高等优点，是地雷引信的发展趋势。非触发引信主要根据目标的磁场特性、振动场特性、声场特性、红外场特性等各种物理特性而动作，目前国内缺乏这方面系统研究的书籍和教材，本书正是在这一背景下由国防科学技术大学组织编写的。

本书根据地雷爆破与破障工程专业教学改革发展的需要，在专业教学和科研工作的基础上，并参考国内外有关文献资料而编写的。本书遵循简明、实用的编写原则，力求理论联系实际，阐述了磁场、振动场、声场的基本理论；分析了坦克、舰船的典型磁场、振动场和声场特性以及各种物理场的测试分析方法；相关的传感器和电测仪器等。教材编写时充分考虑到专业的特点，在内容选择上删繁就简，章节安排上充分考虑新教材的系统性、完整性，内容既着重于基础理论的介绍，又注重知识面的拓宽及实际能力的培养。

本书共分五章，第1章由于良编写，第2章由高建华编写，第3章由郭天天编写，第4章由吴兵、汪庆桃编写，第5章由崔伟峰、沈青编写。书稿经朱金华副教授、周腊久副教授、黄运秋副教授审查并提出修改意见，全书由于良副教授和高建华副教授统稿、定稿。在本书的编写过程中，得到了国防科学技术大学指挥军官基础教育学院野战工程系弹药工程教研室领导和同志们的大力支持和协助，在此表示衷心的感谢。

由于目标物理场的分析与测试知识面广，编著者水平有限，谬误之处在所难免，诚恳希望读者不吝批评、指教。

编者

2007年11月

# 目 录

## 第 1 章 目标磁场分析

- 1.1 磁学基础知识 ..... ( 1 )
  - 1.1.1 基本概念 ..... ( 1 )
  - 1.1.2 铁磁质 ..... ( 7 )
  - 1.1.3 物体的磁化 ..... ( 12 )
  - 1.1.4 电磁感应 ..... ( 16 )
  - 1.1.5 地磁场 ..... ( 18 )
- 1.2 坦克磁场分析 ..... ( 23 )
  - 1.2.1 坦克磁场基本概念 ..... ( 23 )
  - 1.2.2 坦克磁场测试原理 ..... ( 25 )
  - 1.2.3 坦克磁场测试结果分析 ..... ( 26 )
  - 1.2.4 磁场水平分量和垂直分量 ..... ( 37 )
  - 1.2.5 坦克磁场模拟仿真研究 ..... ( 38 )
- 1.3 舰船磁场分析 ..... ( 38 )
  - 1.3.1 舰船磁化 ..... ( 38 )
  - 1.3.2 舰船磁场分布 ..... ( 40 )
  - 1.3.3 舰船消磁 ..... ( 45 )
- 思考题 ..... ( 46 )

## 第 2 章 目标振动场分析

- 2.1 振动学基础知识 ..... ( 47 )
  - 2.1.1 概述 ..... ( 47 )
  - 2.1.2 质点振动学基本知识 ..... ( 48 )
  - 2.1.3 随机振动基本知识 ..... ( 73 )

2.2	坦克振动场分析 .....	(83)
2.2.1	概述 .....	(83)
2.2.2	坦克振动场分析 .....	(84)
	思考题 .....	(87)
<b>第3章 目标声场分析</b>		
3.1	声学基础知识 .....	(88)
3.1.1	声波与声场 .....	(88)
3.1.2	声波的波形 .....	(89)
3.1.3	声场的基本参数 .....	(90)
3.1.4	声源与声辐射 .....	(94)
3.1.5	噪声 .....	(94)
3.2	坦克声场分析 .....	(95)
3.2.1	概述 .....	(95)
3.2.2	坦克声场测试分析 .....	(95)
3.3	舰船水声场分析 .....	(99)
3.3.1	舰船水声场的基本概念和形成原因 .....	(99)
3.3.2	舰船水声场的特性 .....	(101)
	思考题 .....	(106)
<b>第4章 传感器</b>		
4.1	传感器概述 .....	(107)
4.1.1	传感器的定义、组成和分类 .....	(107)
4.1.2	传感器的技术性能指标 .....	(109)
4.1.3	传感器的标定与校准 .....	(110)
4.2	应变式电阻传感器 .....	(110)
4.2.1	应变式电阻传感器的工作原理 .....	(111)
4.2.2	电阻应变计的结构规格与类型 .....	(112)
4.2.3	电阻应变计的主要特性 .....	(117)
4.2.4	电阻应变式传感器的测量转换电路 .....	(122)
4.2.5	应变式传感器的构成及常用的弹性敏感元件 .....	(126)
4.2.6	电阻应变计的温度误差及补偿 .....	(128)

## 目 录

4.3 压阻式传感器 .....	(130)
4.3.1 压阻式传感器的工作原理 .....	(130)
4.3.2 压阻式传感器的结构与特性 .....	(131)
4.3.3 压阻式传感器的测量电路 .....	(133)
4.3.4 压阻式传感器的温度误差及补偿 .....	(135)
4.4 压电式传感器 .....	(135)
4.4.1 压电式传感器工作原理 .....	(136)
4.4.2 压电材料 .....	(140)
4.4.3 压电传感器的测量电路 .....	(145)
4.4.4 压电传感器的应用 .....	(149)
4.5 磁电式传感器 .....	(155)
4.5.1 磁电感应式传感器 .....	(155)
4.5.2 霍尔传感器 .....	(164)
4.5.3 磁敏晶体管 .....	(176)
4.6 红外传感器 .....	(183)
4.6.1 红外辐射的基本特点 .....	(184)
4.6.2 红外辐射的基本定律 .....	(185)
4.6.3 红外探测器 .....	(186)
思考题 .....	(189)
<b>第5章 常用电测仪器</b>	
5.1 电子测时仪 .....	(190)
5.1.1 电子测时仪的工作原理 .....	(191)
5.1.2 KG8601 爆速仪 .....	(197)
5.2 信号发生器 .....	(199)
5.2.1 XFG-7 型高频信号发生器 .....	(199)
5.2.2 XFD-7A 型低频信号发生器 .....	(203)
5.3 电子示波器 .....	(206)
5.3.1 示波器的主要技术指示 .....	(207)
5.3.2 示波器显示波形原理 .....	(208)
5.3.3 TD4651 型超低频双踪示波器 .....	(212)



5.4 应变仪 .....	(213)
5.4.1 应变仪的分类 .....	(214)
5.4.2 YD-15 型动态电阻应变仪 .....	(216)
5.5 电荷放大器 .....	(223)
5.5.1 电荷放大器的原理 .....	(223)
5.5.2 电荷放大器的特点 .....	(227)
5.5.3 YE5853 电荷放大器 .....	(228)
5.6 光线示波器 .....	(230)
5.6.1 光线示波器的基本原理和组成 .....	(230)
5.6.2 光线示波器用的振动物子 .....	(232)
5.6.3 SC16 型光线示波器的结构及作用 .....	(235)
5.6.4 SC16 型光线示波器的使用方法 .....	(243)
5.7 瞬态波形存储器 .....	(247)
5.7.1 DBC-8810B 型波形存储器的性能和组成 .....	(248)
5.7.2 DBC-8810B 瞬态波形存储器的操作使用 .....	(250)
5.8 磁带记录器 .....	(259)
5.8.1 磁带记录器的工作原理和特点 .....	(259)
5.8.2 模拟磁带记录器的几种记录方式 .....	(261)
5.8.3 磁带记录器的结构和性能指标 .....	(264)
思考题 .....	(269)
参考文献 .....	(270)

# 第 1 章 目标磁场分析

## 1.1 磁学基础知识

本节主要在物理学的基础上对磁场及电磁感应的现象、规律进行扼要的归纳总结。

### 1.1.1 基本概念

人们对于磁的认识，最初是从天然磁石的吸引与排除现象开始的。以后在 16 世纪开始将电场的概念运用到磁学上。仿照带电荷物体相互间力的作用，提出了磁荷、偶极子等概念，认为磁荷间相互作用力也符合库仑定律。这样建立起来的静磁学与静电学完全相仿，一些公式的形式也完全对应。但是，实际上从来没有发现过单独的正磁荷或负磁荷。

1819 年，奥斯特发现了电流的磁场。1822 年，安培进一步用分子电流的假设来解释一切物质的磁性来源，这样就把磁现象与电现象联系起来。现代原子物理学的发展证实了这个理论。但是，在近代物理学中已经摒弃不用的古老的磁学概念，在某些应用学科仍在使用的。在磁性引信技术中，目前大都以磁场强度  $H$  为主要参数来描述磁场。所以本教材中也沿用这种方法来分析磁场，而对近代物理学中的一些概念和分析方法就不多介绍了。

#### 1. 磁性和磁场

大家都知道磁铁（或磁石）有吸引铁钉或铁屑等铁质物体的性能，这就说明在有磁铁存在时，周围空间发生了与原来不同的变化。磁铁通过空间对铁质物体显示了力的作用，通常称磁铁的这种特性为磁性。

磁铁的两端的磁性最强，称为磁极。任何一个磁铁都同时存在两个磁极，分别称为南极（S极）和北极（N极）。这就是说，磁铁的南极或北极是不能单独存在的，它们总是同时出现。无论将其分割成多小，这种性质不变。

两个磁铁间存在着力的作用，其特点是同性相斥、异性相吸。磁铁对铁质物体的这种吸引力作用就称磁力。通常把存在磁性的空间，即磁力能作用的范围称为磁场。除了天然磁石、永久磁铁外，带电导体的周围也存在磁场，称为电磁场。

磁场具有两个显著的特征：1) 铁质物体或带电导体在磁场中会受到力的作用；2) 在磁场中运动的导体会产生感应电势。

由此可见，磁场中贮存一定的能量，磁场实质上是一种特殊形态的物质。

在未发现磁现象和电现象的联系以前，曾利用磁场和磁极的作用来描述磁场。磁场中某点处小磁针的N极所指的方向，就表示该点处的磁场方向。磁场的强弱可用该点处单位正磁荷所受的力的大小来描述。这样，按磁荷的观点，磁场强度大小等于作用于磁荷  $m$  上的力  $F$  与该磁荷  $m$  的比值，并用字母  $H$  表示磁场强度，即

$$H = \frac{F}{m} \quad (1-1)$$

按磁荷观点，被称作为匀磁场强度的  $H$  矢量是描述磁场的基本物理量。

自从认识了运动电荷是磁现象的根源后，一般常用磁场对运动电荷或载流导体的作用来描述磁场，即主要用磁感应强度来描述磁场。

## 2. 磁感应强度 $B$

磁感应强度  $B$ ，又叫磁通密度  $B$ ，简称  $B$  矢量，是描述磁场的基本物理量，其地位与电场中的电场强度  $E$  相当。

在磁场中，某一点的磁感应强度大小为

$$B = \frac{F}{qv} \quad (1-2)$$

式中： $F$  是电荷在该点所受的最大磁力；

$q$  是运动电荷的电量；

$v$  是电荷在该点运动速率。

该点磁场方向就是磁感应强度的方向，即可用小磁针法或右手螺旋法测来确定。

在国际单位制中，磁感应强度  $B$  的单位定为特斯拉，代号为 T。在物理学

常用的高斯单位制中， $B$  的单位为高斯。在工程实用单位制中， $B$  的单位韦伯/米<sup>2</sup> ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ )。它们的关系为：1 特斯拉 = 1 韦伯/米<sup>2</sup> =  $10^4$  高斯。

### 3. 磁通量 $\phi$

通常，还可以用磁感应线描绘磁场，磁感应线上任一点的切线方向和该点处的磁场方向一致。

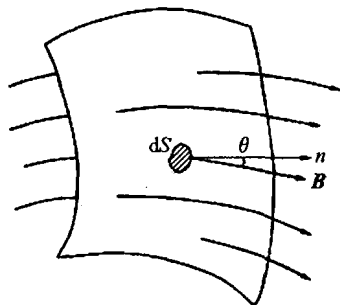


图 1-1 磁通量

一般规定：通过磁场中某点处垂直于  $B$  矢量的单位面积上的磁感应线数等于该点  $B$  的矢量值，见图 1-1。因此，磁场较强的地方，磁感应线较密；反之，磁感应线就较疏。

通过给定曲面的总磁感应线数，称为通过该曲面的磁通量，用  $\phi$  表示。

$$\phi = \int_s B \cos \theta dS \quad (1-3)$$

若磁感应强度  $B$  垂直于某一面积  $S$ ，则通过此面积的磁通量为

$$\phi = BS \quad (1-4)$$

磁通量的单位为韦伯，国际单位制中代号为  $\text{Wb}$ 。

### 4. 磁矩

磁矩概念是通过磁场对载流线圈的作用引入的。设在磁感应强度为  $B$  的匀强磁场中，有一个长方形平面载流线圈，面积为  $S$ ，电流为  $I$ ，见图 1-2。

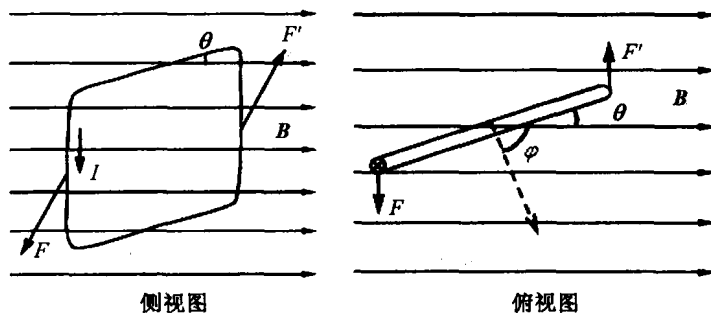


图 1-2 平面载流线圈在匀强磁场中所受的力矩

磁场作用在线圈上的力矩

$$M_l = BIS \sin \varphi \quad (1-5)$$

其中  $\varphi$  是线圈平面的正法线  $n$  方向和磁场方向的夹角。

如果线圈有  $N$  匝，则线圈所受的力矩为

$$M_l = NBIS \sin \varphi = P_m B \sin \varphi \quad (1-6)$$

上式中  $P_m = NIS$  就是线圈的磁矩。如用矢量式表示，则有

$$M_l = P_m \times B \quad (1-7)$$

磁矩的方向就是载流线圈平面法线  $n$  的正方向。

实际上，式 (1-6) 和式 (1-7) 不仅对长方形线圈成立，而且有普遍意义。凡是平面线圈、带电粒子沿闭合回路的运动以及带电粒子的自旋所具有的磁矩等，在磁场中所受的磁力矩作用，都可用上述公式描述。

应用磁力矩公式时，若  $B$  的单位用特斯拉， $P_m$  的单位用安培·米<sup>2</sup> (A/m<sup>2</sup>)，则力矩的单位用牛顿·米 (N/m)。

## 5. 磁介质和磁导率

处在磁场中的磁介质也要和磁场发生相互作用，彼此影响。这样，使介质处于一种特殊的磁化状态中，这个过程称为介质的磁化。处于磁化状态的磁介质也产生一个附加磁场，使磁介质中的磁场不同于真空中的磁场。

设某一电流分布在真空中产生的磁感应强度为  $B_0$ ，若在同一电流分布下，磁场中放进了某种磁介质后，由于磁场和磁介质相互影响的结果，使磁介质在场作用下产生附加磁感应强度  $B'$ 。这时磁场中任一点的磁感应强度  $B$  就等于  $B_0$  和  $B'$  的矢量和，即

$$B = B_0 + B' \quad (1-8)$$

通常磁介质的特性以其磁导率的大小来区分。

$B$  和  $B_0$  的大小的比值

$$\frac{B}{B_0} = \mu_r \quad (1-9)$$

$\mu_r$  定义为磁介质的相对磁导率。它是决定于磁介质磁性的恒量，是一个没有单位的纯数，它反映了磁介质被磁化后对电流磁场的影响程度。

通常令

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-10)$$

式中  $\mu$  称为磁介质的磁导率，它也是一个决定于磁介质磁性的恒量。在国际单位制中，磁介质的磁导率  $\mu$  的单位和真空的磁导率  $\mu_0$  的单位相同，为

韦伯/ (安培·米)。在高斯制中,  $\mu$  为纯数, 而真空中的磁导率  $\mu_0$  规定为 1。

按照磁性, 磁介质可分三类:

### 1) 顺磁质

这类物质的相对磁导率  $\mu_r > 1$ , 即顺磁性物质,  $\mu > \mu_0$ 。

顺磁性物质有锰、铬、铂、氮等。

### 2) 抗磁质

这类物质的相对磁导率  $\mu_r < 1$ , 即抗磁性物质,  $\mu < \mu_0$ 。抗磁性物质有铜、银、金、锌、铅、水银、硫、氢等。

### 3) 铁磁质

这类物质的相对磁导率的数值很大,  $\mu_r \gg 1$ ,  $\mu \gg \mu_0$ , 并且还具有一些特殊的性质。

铁磁质有铁、镍、钴及这些金属的合金, 还有铁氧体物质。

## 6. 磁化强度

磁介质的磁化情况, 可以用磁化强度  $M$  来描述。单位体积  $\Delta V$  内的分子磁矩就称为磁化强度, 用  $M$  表示。

$$M = \frac{\sum P_m}{\Delta V} \quad (1-11)$$

磁化强度是表征磁介质磁化程度亦即所处磁化状态的物理量。在国际单位制中,  $M$  的单位是安培·米。

$M$  的方向因顺磁质和抗磁质的不同而异。对于顺磁质,  $M$  的方向与外磁场  $B_0$  的方向一致, 顺磁质经磁化后所产生的附加磁场  $B$  的方向也与  $B_0$  的方向相同, 这是顺磁化的重要表现。对于抗磁质,  $M$  的方向与外磁场  $B_0$  的方向相反, 经磁化后的抗磁质所产生的在抗磁质内附加磁场  $B'$  的方向也与  $B_0$  的方向相反, 这是抗磁性的重要表现。

## 7. 磁介质中的磁场和磁场强度 $H$ 、磁化率 $X_m$

在讨论有磁介质时的磁场和电流关系时, 常引进一个称为磁场强度的物理量, 即

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad (1-12)$$

引入磁场强度  $H$  这个物理量后, 就能够比较方便地处理有磁介质的磁场

问题。在国际单位制中， $H$  的单位是安培/米；在高斯制中， $H$  的单位是奥斯特。在磁引信技术中，经常是用奥斯特或毫奥斯特。它们的换算关系是：

$$1 \text{ 奥斯特} = 10^3 \text{ 毫奥斯特} = \frac{1}{4\pi} \times 10^3 \text{ 安培/米}$$

式 (1-12) 是磁场强度  $H$  的定义式，而且不论磁介质是否均匀，甚至对铁磁性物质，也都是用此式定义磁介质中的  $H$  矢量。也就是说，用此定义式来表示磁介质中任一点处磁感应强度  $B$ 、磁场强度  $H$  和磁化强度  $M$  的普遍关系，写成

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (1-13)$$

通常把磁介质中任一点处  $M$  矢量和  $H$  矢量之间的关系用另一个式子表示，这就是

$$M = X_m H \quad (1-14)$$

实验证明，对于各向同性的磁介质，在磁介质中任一点，磁化强度  $M$  和磁场强度  $H$  成正比，也就是说上式中比例系数  $X_m$  是恒量，称为磁介质的磁化率，它的量值只与磁介质的性质有关。因为  $M$  和  $H$  所用的单位相同，所以磁化率  $X_m$  是一个没有单位的纯数。这样可得到

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 (1 + X_m) H \quad (1-15)$$

这是把磁介质中任一点处  $B$  矢量和  $H$  矢量直接联系起来的关系式，若令

$$\mu_r = 1 + X_m$$

$\mu_r$  就是该磁介质的相对磁导率，于是有

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (1-16)$$

对于各向同性的磁介质， $X_m$  是恒量， $\mu$  也是恒量，且都是纯数。磁介质的磁化率  $X_m$ 、相对磁导率  $\mu_r$ 、磁导率  $\mu$  都是描述磁介质磁化特性的物理量；这样知道这三个量中的任一个量，就可弄清楚该介质的磁性。

这里需指出，对于铁磁质来说，铁磁质中任一点处的  $B$ 、 $M$ 、 $H$  三矢量之间的普遍关系，仍采用定义式  $B = \mu_0 H + \mu_0 M$ 。事实上，铁磁质中  $B$  与  $H$  以及  $M$  与  $H$  之间，并没有线性的正比关系。也就是说，虽然在形式上仍用

$$B = \mu_0 (1 + X_m) H$$

$$M = X_m H$$

但式中铁磁质的磁导率  $\mu$  相对磁导率  $\mu_r$  和磁化率  $X_m$  并不是恒量。由于铁磁性物质有磁滞现象，所以  $B$ 、 $H$  之间不是简单的线性关系。

以上对磁场和描述磁场的几个物理量做了简要介绍。在掌握这些基本概念

后，就可以比较深入地理解铁磁质特性、物体的磁化和电磁感应的规律了。

### 1.1.2 铁磁质

#### 1. 铁磁质的性质

我们知道，如果在电流的磁场中放入铁磁性物质，磁场将显著地增强。概括起来，铁磁质具有以下一些特殊的性质：

1) 铁磁质的  $B$  和  $H$  不是简单的正比关系，而是比较复杂的函数关系。铁磁质的磁导率  $\mu$  和磁化率  $X_m$  不是恒量，而是随磁场强度  $H$  的变化而变化。

2) 在外磁场停止作用后，铁磁质仍能保留部分磁性。

3) 在一定温度（称为居里温度）以上时，铁磁质的磁性会发生突变。它们的磁导率或磁化率和磁场强度  $H$  无关。这时，铁磁质转化为顺磁质。铁的居里点是 1040K，镍的居里点是 631K。

#### 2. 磁化曲线和磁滞回线

通过实测，可以得到  $B-H$  曲线和  $\mu-H$  曲线。

$B-H$  曲线表示磁感应强度与磁场强度的关系。对于铁磁性物质来说，由于  $B \gg H$ ，所以  $B$  近似等于  $\mu_0 M$ 。 $B-H$  曲线反映了  $M$  与  $H$  的关系，我们称之为磁化曲线，如图 1-3 (a) 所示。

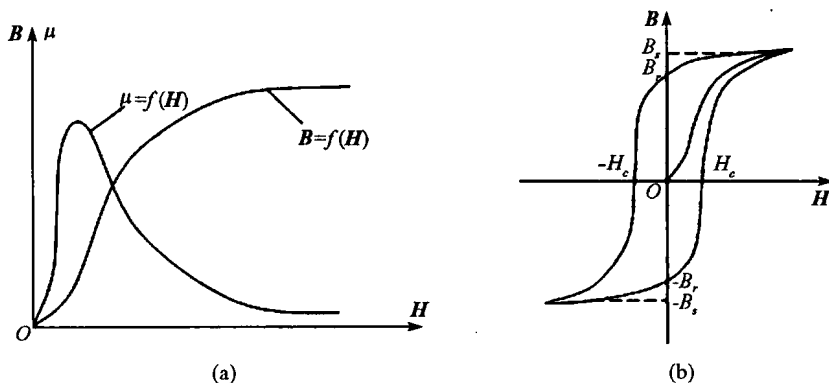


图 1-3 磁化曲线和磁滞回线

从图 1-3 (a) 中可以看出，铁磁性物质的磁化曲线在开始时磁感强度  $B$



的值随磁场强度  $H$  的增加而急速增加, 当  $H$  达到一定强度时,  $B$  的值不再随  $H$  的增强而增加, 此时磁化已达到饱和, 曲线上部接近水平。铁磁性物质的另一特点是磁化曲线既随材料及外界条件而异, 还依赖于所经历的磁状态的历史。 $B$  和  $M$  不是  $H$  的单值函数。

如果在达到饱和状态之后, 使  $H$  减小, 这时  $B$  的值也要减小, 但不沿原来的曲线下降, 而是沿着另一条曲线下降, 其对应的  $B$  值比原先的值大。这说明铁磁质的磁化过程是不可逆的过程 (见图 1-3 (b))。

当  $H$  继续减小到 0 时, 磁感应强度并不等于零, 而是还保留有一定的大小, 这就是铁磁质的剩磁现象。要使  $B$  继续减小, 必须加上反方向的磁场。当  $H$  等于某一定值  $H_c$  时,  $B$  才等于零, 这个  $H_c$  值, 称为矫顽力。矫顽力  $H_c$  的大小反映了铁磁材料保存剩磁状态的能力。如此时再增强反方向的磁场, 又可达到反方向的饱和状态。以后再逐渐减小反方向的磁场直至  $H=0$ , 又引入正向磁场, 则形成一闭合回线。

从图 1-3 (b) 中可以看出, 磁感应强度  $B$  值的变化总是落后于磁场强度  $H$  的变化, 这种现象称为磁滞, 是铁磁质的重要特性之一。上述闭合曲线就称为磁滞回线。不同的铁磁质有着不同的磁滞回线。

### 3. 铁磁性材料的分类

根据磁滞回线的不同, 可以将铁磁性材料区分为软磁材料和硬磁材料。每一类又可分为金属磁性材料和铁氧体两种。

#### 1) 软磁材料

软磁材料的特点是: 磁导率大, 矫顽力小, 磁滞损耗低。它的磁滞回线呈细长条形状, 如图 1-4 所示。这种材料容易磁化, 也容易退磁, 适用于交变磁场, 常用来制造变压器、继电器等器件或设备的铁芯。在磁引信技术中, 也常用来做磁感应装置的铁芯。

表 1-1 列出几种常用的金属软磁材料性能参量。

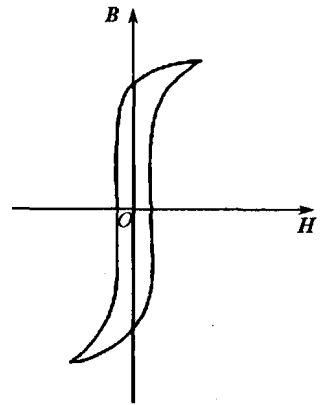


图 1-4 软磁材料