

内 容 简 介

本书由浅入深地介绍了磁记录技术的基本概念、原理及其在录音、录象、仪表记录和计算机外部存储器方面的应用。同时对新型的高密度的磁记录技术：垂直磁记录、光磁记录、磁泡技术等也进行了分析和说明。

本书共分十一章，内容包括：概述；磁学的基本原理；环形磁头的磁化场；记录介质的磁化；模拟式磁记录方式；数字式磁记录方式和磁盘存储器；重放过程；磁头；磁记录介质；高密度磁记录与新型磁记录技术；磁泡及其记录存储技术。

本书可供从事录音、录象、计测技术、电子计算数字记录、磁学和磁性材料等专业的有关工作人员阅读；大专院校师生参考。

磁 记 录 技 术

鲍元恺 金秀中 编

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 颜绍蓉 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本 787×1092毫米 1/32 印张：13.125 字数：301 千

1988年7月第1版 第1次印刷

印数：0001—3000册 定价：3.15 元

目 录

第一章 概 述	1
第一节 磁记录的机构	1
第二节 磁记录技术的特点和应用	6
第二章 磁学的基本原理	10
第一节 物质的磁性	10
第二节 铁磁性物质的磁化特性	21
第三节 退磁效应和形状各向异性	27
第四节 磁畴的形成	35
第五节 技术磁化过程	48
第六节 交变磁场下的磁特性	62
第三章 环形磁头产生的磁场	67
第一节 磁路的计算	67
第二节 磁头缝隙附近磁化场的分布	73
第三节 实际磁头缝隙附近的磁场分布	82
第四章 记录介质的磁化	87
第一节 局域性磁化和自退磁作用	87
第二节 自退磁场的计算	91
第三节 磁介质的磁化曲线和磁滞回线的简化	109
第四节 自相一致磁化理论	113
第五章 模拟式磁记录方式	123
第一节 偏磁记录	124
第二节 无磁滞磁化和剩磁	130
第三节 内部相互作用与普利萨赫图形	135
第四节 调制记录方式	150
第五节 磁性录象的基本原理	169
第六章 数字式磁记录方式和磁盘存贮器	181
第一节 数字磁记录方式	181

IV

第二节	电子计算机外存贮器	191
第三节	存贮容量与磁道格式	203
第七章	重放过程	213
第一节	重放过程的镜象法	214
第二节	重放过程的互易原理法	226
第三节	录放过程中的损失	232
第四节	数字式磁记录的读出	242
第五节	噪声和复印效应	253
第六节	模拟式磁记录的幅频补偿	259
第八章	磁 头	267
第一节	磁头的分类和结构	267
第二节	对环形磁头的性能要求和测试技术	278
第三节	磁头材料和制造	282
第四节	磁头的设计	298
第九章	磁记录介质	304
第一节	磁带的分类和要求	304
第二节	磁粉及其制备	307
第三节	磁粉的特性和磁浆的特性	319
第四节	磁带的制造	328
第五节	磁带的性能及测量	343
第六节	磁盘及其制备	351
第十章	高密度磁记录与新型磁记录技术	359
第一节	提高纵向磁记录密度的途径和困难	359
第二节	垂直磁记录及其特点	366
第三节	光磁记录与克尔效应	386
第十一章	磁泡及其记录存贮技术	392
第一节	磁泡及其基本的特性	392
第二节	磁泡材料和器件的制造技术	401
第三节	磁泡技术的应用	407
主要参考文献		413

第一章 概 述

第一节 磁记录的机构

由于科学技术的不断进步，人们记录信息的技术也得到了不断的改进和发展。目前应用十分广泛的磁记录技术就是一种很重要的记录存贮信息技术。磁记录技术是一门综合性技术，它将现代的磁学、电磁学基本原理与电子技术、材料制造技术、化工技术以及精密机械技术等有机地结合在一起，构成了一套磁记录的机构，以实现磁记录的物理过程。

所谓磁记录的物理过程就是：通过各种变换器或传感器等，首先将信息（如声音、图象、技术数据等）变换成电信号，将电信号进行适当的处理后送入一种电磁能量转换器，利用电磁学原理转换成相应的磁信号。然后利用局域性磁化的原理，把这种磁信号记录、存贮在一种具有记忆功能的磁性介质上，保存起来。当需要将信号再现时，又把磁性介质上已存贮的磁信号通过电磁能量转换器，转换成对应的电信号，经过对该电信号作适当的处理后，利用各种变换器、显示器等恢复成原来的信息（如声音、图象、技术数据等），供人们使用。由此可见，磁记录的物理过程基本上可包括两个部分：信息的记录过程和重放过程。

此外，磁记录不属于永久性记录，记录的磁信号在磁介质上是可以抹去的。抹去信号后的磁介质可被用来重新记录、存贮新的信息。已记录了磁信号抹去的物理过程叫做抹去过程。它也是按照磁学的基本原理，通过一种电磁能量转换器使记录的信号消除的。

8910026

以磁带录音机为例，其机构的基本组成可简单地用图1.1来说明。设备可分为五大类：信息变换器、电源和电子控制线路、磁头、磁带、磁带传输部件。

磁带录音机的信息变换器是拾音器（话筒）、扬声器（或耳机）。话筒把接受到的声波变换成相应频率的电信号，扬声器将重放出来的电信号还原成原来的声音。电源和电子控制线路为磁带录音机的各个成员提供能量，并对电信号进行放大、补偿等处理。

图1.1中有三种磁头：抹音磁头、录音磁头和重放磁头。普通录音机中，常将录音磁头和重放磁头共用同一个磁头来实现这两种功能。磁头就是磁记录中的一种电磁能量转换器，通过它来实现电信号与磁信号之间的相互转换。磁头是由带有一个很小缝隙的环形铁心和绕在铁心上的线圈所组成，如图1.2（a）所示。构成铁心的材料是具有高磁导率的软磁性材料。按照电磁感应原理，当线圈中通过一种交变的电流时，就会在铁心中感应出交变的磁通。由于铁心带有窄小的缝隙，磁通在缝隙处泄漏而产生出交变的磁场，使位于它附近的磁性物质磁化。在录音机中的磁头总是位置固定，本身不运动。

磁带是由柔软的、机械强度较好的塑性带基材料和均匀的、牢固地附着在带基上的磁性层所组成，如图1.2（b）所示。目前市场出售的录音磁带，带基一般均为聚酯薄膜，厚度为 $12\sim 18\mu\text{m}$ ，宽度为 3.81mm 的盒式带；磁性层中的磁介质为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粉末，它和粘合剂以一定的比例混合后，均匀地涂布在带基上，经过加热固化粘结在带基上。在电子显微镜下观察到的单个 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粉粒呈细长的针状外形，它具有一定的记忆磁特性。

磁带传输部件由供带盘、收带盘、走带机构、驱动电机

及控制电路等共同组成。要求磁带在记录和重放过程中以一恒定的线速度、恒定的张力，紧靠着磁头缝隙处移动。为使磁带在录音机上装卸方便，保证磁带的清洁和使用的通用性，都采用标准化的盒式磁带装置，把供带盘、收带盘和一部分走带机构组装在一个塑料盒内。使用时只需把带盒插入机内即可。

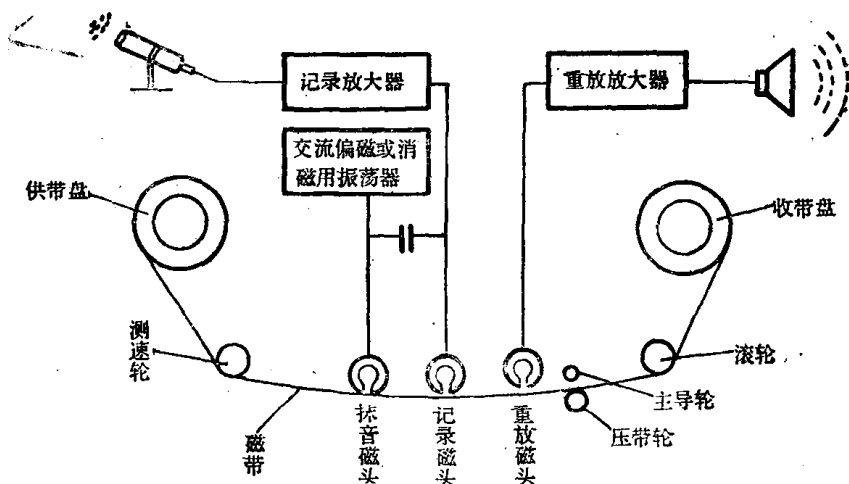


图1.1 磁带录音机构简图

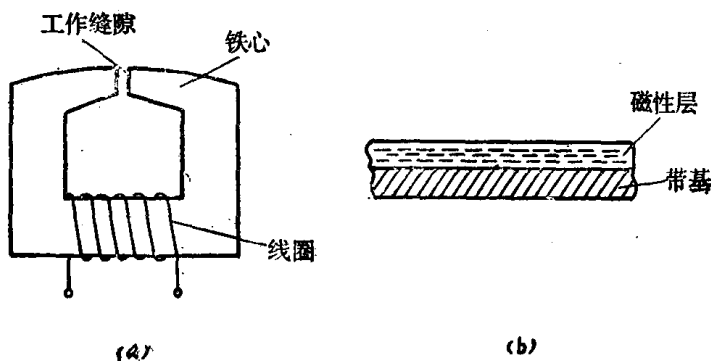


图1.2 磁记录的基本磁性元件

按照电声原理，拾音器把要记录的声音转换成相应的信号电流，经过电子控制线路放大、加偏磁处理而送入记录磁头的线圈中；根据电磁感应原理，由记录磁头产生相应的缝隙磁化场，使紧靠在缝隙处运动的磁带局域性地被磁化，把信号记录、存贮在磁带中，这一过程就是记录过程。当记录了信号的磁带经过重放磁头缝隙附近时，重放磁头就拾取这种记录的磁信号，在磁头线圈中感应出相对应的电信号，经过电子控制线路放大、补偿等处理后送入扬声器，还原成原来的声音，这就是重放过程。

尽管磁带录音机的具体结构、型号可以多种多样，但它们的工作原理都基本上相同。不管什么样的录音机，都必须具有最基本的磁性元件：磁带和磁头。它们也就是录音机最关键的部件。

要记录的信息可以是随时间连续变化的，也可以是分立式的数码，因此，磁记录按记录信号来分类，可分为模拟式磁记录和数字式磁记录。模拟式磁记录的信号通常可认为是正弦波，因为任何连续式变化的波形都可分解为各种正弦波的线性组合。数字式磁记录的信号在记录前都转化为二进制的数码脉冲。当然，即使原始连续式信号也可以通过模-数转换器（ $A-D$ 变换）变换成二进制的数码脉冲来进行记录、存贮。因此，磁记录技术在电子计算机中是一种十分重要的存贮技术。

在电子计算机的外部设备中和某些录象设备中，磁存贮介质除以磁带的形式出现外，还常以磁盘的形式来使用。磁盘是一种圆形盘片，很像普通的留声机唱片。它由盘基和磁性层组成，磁性层牢固地附着在盘基上。盘基有两种：一种是硬的金属（如铝合金或铜）板材来制作的，被称为硬磁盘；另一种是用柔软的聚酯薄膜等塑性材料来制作，被称为

软磁盘。磁性层可以只在盘基的一面，也可以两面都附着，从而两面都可以存贮信息。磁盘以一恒定的速率绕中心轴旋转运动，磁头在磁盘的盘面上可以沿径向作往返移动和定位不动。硬磁盘的盘面和磁头是不相接触的，使用的是浮动磁头，但两者间隔很小。软磁盘的盘面和磁头是紧密接触的。每个盘面至少有一个磁头。磁盘可以单片使用，也可以多片组合在一起形成磁盘组，以扩大记录的存贮面积。甚至还有磁盘组与磁头构成一体的，称为数据组件。

通常，将磁头缝隙在存贮介质上磁化、记录信息所留下來的轨迹叫做磁迹。那末，录音磁带上的磁迹图象就是沿带长方向的一条条直线，录象磁带上的磁迹图象比较复杂，记录声音的磁迹和录音带的相同，位于磁带的上或下边部，记录图象的磁迹是一条条斜线或者近似垂直于带长方向的横直线。磁盘上的磁迹图象则是一个个的同心圆周。磁迹有一定的宽度，称为迹宽或道宽。磁迹之间有一定的间隔，不能记录信息，以防止记录的磁信号之间相互干扰。普通的盒式录音带上有两条磁迹，立体声录音带上有四条磁迹。迹宽由磁头缝隙高度来决定，单声道的为 $1.5 \sim 1.6 \text{ mm}$ ，立体声的为 $0.5 \sim 0.6 \text{ mm}$ 。磁迹间的间隔也各不相同，约 $0.3 \sim 0.8 \text{ mm}$ 。

对于电子计算机用存贮器和仪表记录用磁带来说，人们最关心的是存贮信息的容量，希望在单位面积的磁存贮介质表面上记录更多的可靠信息。因此，提高记录密度，扩大存贮容量一直是人们研究磁记录技术的中心任务。随着磁记录技术的不断发展，存贮器的记录密度和存贮容量一直在迅速地提高。近年来，还在大力研究新型的存贮器，如磁泡存贮器、光存贮器、垂直磁记录技术、光磁存贮器等。不过就目前的情况来估计，像磁带、磁盘这样的表面磁存贮器仍占有着十分重要的地位。

第二节 磁记录技术的特点和应用

一、特 点

从信息的记录技术上看，磁记录技术与其它记录技术（如笔记录、印刷记录、胶片记录、唱片记录等）相比较，具有如下一些突出的特点：

（1）作为计算机的存贮器，磁介质存贮器具有记录密度高、存贮容量大、成本低的特点。因此，它在外存贮装置方面一直处于首要地位。

（2）目前，磁记录技术的工艺成熟，制造比较容易，也比较经济。已录制的信号很容易抹去，重新记录。因而磁介质的利用率很高，可以反复使用 $10^3 \sim 10^5$ 次。

（3）完成磁记录后的信息可被立即重放再现，不需要经过像胶片记录那样的冲洗过程，这样可以及时监测记录信息的质量。磁带又可以像电影胶片那样，很方便地进行剪辑、组合，消去那些不需要的部分，更换新内容。

（4）磁记录的重放属于非破坏性的，记录的信息可以反复再现上千次，仍能保持原状。同时，磁介质可以像电影胶片拷贝一样，大量复制记录信息。另一方面，已记录的信息只要保存得好，可以长期存放，不易丢失。

（5）磁记录的频率范围较宽，可从直流扩展到15 MHz以上。

（6）磁记录的动态范围很宽，可超过40 dB。从满刻度到其0.3%的整个范围的信号都能给出精确、呈线性的记录。

（7）可实现多通道记录。使用多通道技术，可以把上千条的二进制信息同时记录在同一个磁存贮器上，而且还能够保持着这些同时记录的信号间精确的时间和相位关系，以

便进行比较和分析。

(8) 磁记录技术可以改变时标。即允许用某一种速度来记录信息，而换用另一种速度重放，从而实现了录象技术中的快镜头或慢镜头，也可用于科学实验等方面的长期监测。

(9) 一般来说，磁记录设备的过载能力较强。即使出现了过载，也不会像其他电子仪器那样发生明显的突变，而是比较平缓的。

(10) 磁存贮介质的制备、使用和保存过程中，对环境都有较高的要求，对机械振动、温度、湿度、电磁场、灰尘等都十分敏感，需要采用各种措施来加以保护。

(11) 磁记录装置要求具有复杂而精密的机械驱动设备，要求有高超的、可靠的电子控制技术相配合，它是现代科学技术的综合尖端产品。这些都使磁记录装置在设计、制造、改进和维修方面存在一定的困难。

二、应 用

以上介绍了磁记录技术的优缺点。正是由于它具有很多突出的优点，使之在工农业生产、交通运输事业、科学研究、文化教育、计算机技术、军事和国防尖端技术、医疗卫生事业、电影、电视广播、地震和环境监测、日常生活等各个领域中都得到了广泛深入的应用。下面，简单地列举一些实例，以反映磁记录技术的应用情况：

(1) 在电影制片方面，利用磁带录象来代替胶片进行拍摄和编辑，可以提高工作效率10倍以上，同时大大地缩短了拍片时间，降低了制片的成本。

(2) 在电视广播方面，录音磁带和录象磁带已成为广播电视节目必不可缺的材料，录音机和录像机、摄像机等都是每个广播电视台的关键设备。它们为今日的新闻传播、广

播电视事业的普及作出了卓越的贡献。利用它可以随录随放，重复多次，可以长期保存。

(3) 在交通运输方面，利用磁记录技术可以配合交通管理人员观察交通运输的情况，记录和分析交通事故的发生。监测机场飞机的起降、港口船舶的进出、车站车辆的开停、城市各条街道的运输拥挤情况，从而进行合理的调配。同时，也可用安装在运输机械设备上，记录和监督运输工具的操作运行情况，保证安全可靠地工作。

(4) 在军事国防建设和空间科学方面，各种高空侦察机、科研资料卫星上都配备有磁记录装置，以获得其军事情报、地球资源和地形地物等方面的资料。在宇宙飞船、航天飞机上，也利用磁记录技术来得到天体表面情况和飞行器、飞行员工作情况的资料。它可以保证在发生意外的情况下，不使信息丢失。也可以根据地面的指令，随时、反复多次发送记录到的信息。甚至当飞机坠毁后，人们仍可以通过保存在黑匣子里的磁带中得到分析该事故的有关信息。

(5) 在医疗方面，磁记录技术可用于记录某种病情发展的全过程，供医生诊断治疗。也可提供同一病情、不同病人的不同表现和治疗效果，作为医生诊治的依据。此外，磁记录技术也常被用来统计、积累某些地区、单位的疾病发展或人民健康情况，加强防治，保证人民健康。

(6) 在地震和环境监测方面，磁记录技术可以同时记录、监视各种物理量的变化全过程（如缓变、速变、瞬变等），然后利用时标的压缩和扩展，把一般仪器无法分析的信号变为可分析，数据处理十分灵活，通过分析可使人们尽快地掌握地震和环境污染方面演变的规律性，作好预防。

(7) 在科学研究和工农业生产方面，经常要同时遇到许多种信息的现场测量、记录和分析，特别是长时间的观

察、监测和记录无法重复的一次性试验，都需要用磁记录技术先记下来，然后再进行不断的分析、推演和处理。据报导，欧洲原子核研究委员会（CERN）在研究中经常使用密度为31.5或63bit/mm的九路磁带记录装置，来记录或长期保存有关数据。每次高能物理实验往往需要数千盘磁带。在工厂的生产管理和自动化流水生产线的控制、产品检验等方面，都可以利用磁记录技术进行记录、图象监测和数据统计。

（8）在文化教育方面，直观教学、图文并茂的解释说明、授课方式的研究以及体育、舞蹈、戏剧、乐器演奏手法、手术操作、实验操作等的传授方法都充分显示了磁记录技术的优越性。电视教育节目的传送为培养人才，发展教育事业提供了良好的手段。

由于磁记录技术的应用已渗透到各个领域，对磁记录设备和存贮介质的需要量越来越大。目前，磁记录介质的产品产值已跃居所有的磁性材料之首。

第二章 磁学的基本原理

磁记录技术的基本原理是和磁学的基本原理密切相关的。为此，首先扼要地说明一下磁记录技术中所用的磁学基本原理和概念。

第一节 物质的磁性

一、对磁现象的认识

在人们对磁的认识上，和电发生了联系。我国古代科学家最早发现了天然磁石，并且了解和应用了磁石的同性相斥、异性相吸的现象发明了指南针。有人认为，既然正、负电荷具有同性相斥、异性相吸现象，磁石和它相似，那么，在天然磁石的两极端也应存在着一种“磁荷”， N 极上的叫“正磁荷”， S 极上的叫“负磁荷”。把一根细而长的磁针两端的磁荷看作为点磁荷，与点电荷相对应。于是就在电荷与“磁荷”相对应的概念下发展了磁学的基本理论。

例如，电荷之间的库仑定律

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2-1)$$

与磁荷之间对应着磁的库仑定律

$$F_m = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_{m1} q_{m2}}{r^2} \quad (2-2)$$

在MKSA单位制中，常数 ϵ_0 和 μ_0 的数值为： $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ ； $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。磁荷的单位为 $\text{N} \cdot \text{m/A}$ 。

电场用电场强度矢量 $\vec{E}$ 来描述, 定义为单位点电荷在该处所受的力, 即

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2-3)$$

同样, 磁场也用磁场强度矢量 $\vec{H}$ 来描述, 定义为单位点磁荷在该处所受的力, 即

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}_m}{q_{m_0}} \quad (2-4)$$

国际单位是 A/m (安每米), C.G.S 单位为 Oe (奥斯特), 其换算关系为

$$1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m 或 } 1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-8} \text{ Oe}$$

它们都服从矢量迭加原理。

电介质在电场中受到极化, 表面上出现束缚电荷, 认为电介质的分子是由正、负电荷组成的电偶极子。无外场时, 各个电偶极子无规则分布, 宏观上分子的电偶极矩 $\vec{p}$ 的矢量和 $\Sigma \vec{p} = 0$ 。在外场作用下, 电偶极矩 $\vec{p}$ 以一定的方式转向外场方向, 形成有序排列, 使 $\Sigma \vec{p} \neq 0$, 表现出极化。极化的状态与外电场大小有关, 用极化强度矢量 $\vec{P}$ 来描述

$$\vec{P} = \Sigma \vec{p} / \Delta V \quad (2-5)$$

式中 $\vec{p} = q \cdot \vec{l}$, 称为电偶极矩, ΔV 为 $\Sigma \vec{p}$ 所占的体积。

仿照上述方法, 可认为磁介质的分子是正、负磁荷组成的磁偶极子, 其磁偶极矩为

$$\vec{p}_m = q_m \cdot \vec{l} \quad (2-6)$$

无外磁场时, $\Sigma \vec{p}_m = 0$, 无磁性。有外磁场作用时, $\Sigma \vec{p}_m \neq 0$, 表面出现束缚磁荷, 从而认为磁介质被磁化了。磁化

的状态与外磁场大小有关，用磁极化强度 $\vec{P}_m$ 来描述，即

$$\vec{P}_m = \sum \vec{p}_m / \Delta V \quad (2-7)$$

为了描述有电介质情况下的电场分布，通常引入一个辅助性的物理量：电位移矢量 $\vec{D}$ ，其定义为

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2-8)$$

从而得到高斯定理的积分表达式

$$\oint_{(S)} \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{(S \text{ 内})} q_i \quad (2-9)$$

$$\oint_{(S)} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{(S \text{ 内})} (q_i + q'_i) \quad (2-10)$$

$$\oint_{(S)} \vec{P} \cdot d\vec{S} = - \sum_{(S \text{ 内})} q'_i \quad (2-11)$$

式中 q_i —— S 面内的自由电荷；

q'_i —— S 面内的束缚电荷。

同理，有磁介质情况下的磁场分布也引入了一个辅助性物理量：磁感应强度 $\vec{B}$ ，其定义为

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{P}_m \quad (2-12)$$

得到的高斯定理积分形式为

$$\oint_{(S)} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2-13)$$

$$\oint_{(S)} \vec{H} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \sum_{(S \text{ 内})} q_{mi} \quad (2-14)$$

$$\oint_{(S)} \vec{P}_m \cdot d\vec{S} = - \sum_{(S \text{ 内})} q_{mi} \quad (2-15)$$

式中 q_{mi} —— S 面内的束缚磁荷。

由此可见，两种情况十分相似，相互对应。但式 (2-13)

与式(2-9)不同, 由于迄今为止尚未发现有单独的正、负磁荷自由存在。这是磁学和电学概念中一条十分重要的区别。

应当指出, 由于自由磁荷的问题使磁性来源无法解释, 但实践证明, 由“磁荷”概念引出的所有定律、公式都仍然正确。可以把“磁荷”理解为磁介质内部的“束缚磁荷”。

磁学发展史上, 一个非常重要的实验: 奥斯特实验, 使人们对磁有了新的认识。奥斯特发现, 通电导线的周围存在着磁场, 通电的螺线管和磁石之间的相互作用与两个磁石之间的相互作用完全相似。于是安培提出了磁来源于电流的假说: 任何物质的分子中都存在着环路电流, 称为分子电流。它相当于一个小的磁石, 通常这些分子电流无规则取向, 因而不显示磁性; 在外磁场的作用下, 若分子电流发生有序的排列, 就能对外显现出磁极来。原子是由带正电的原子核和绕核旋转的电子组成, 电子不仅绕核旋转, 而且有自旋。微观粒子的运动就形成了分子环流, 这便是物质磁性的基本来源。

按照电流元之间的相互作用规律, 可得出安培定律

$$d\vec{F}_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2 d\vec{l}_2 \times (\vec{dl}_1 \times \vec{r}_{12})}{r_{12}^3} \quad (2-16)$$

式中 $I_1 d\vec{l}_1$ 、 $I_2 d\vec{l}_2$ ——分别为回路 L_1 和 L_2 的电流元;
 r_{12} ——上述两个电流元之间的距离。

式(2-16)与电的库仑定律相对应。若把 $I_2 d\vec{l}_2$ 看作试验电流元, 与试验电荷相对应。那么, 可得描述单位试验电流元所受的作用力为磁场大小的物理量: 磁感应强度矢量 $\vec{B}$, 即

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{(L_1)} \frac{I_1 d\vec{l}_1 \times \vec{r}_{12}}{r_{12}^3} \quad (2-17)$$

与电场强度 $\vec{E}$ 相对应，因前面所述 $\vec{H}$ 已被称磁场强度，所以用磁感应强度这一名称。

由此可得

$$\vec{F}_{12} = \oint_{(L_1)} d\vec{F}_{12} = I_2 d\vec{l}_2 \times \vec{B}$$

或 $|F_{12}| = I_2 dl_2 B \sin \theta$

式中 θ 为 $\vec{B}$ 与试验电流元 $I_2 d\vec{l}_2$ 间的夹角。 B 的单位为 T (特斯拉)； $1 T = 1 N/(A \cdot m)$ 。 B 的另一个常用单位是 Gs (高斯)，它与 T 的换算关系为： $1 T = 10^4 Gs$ ，或 $1 Gs = 10^{-4} T$ 。磁感应强度 $\vec{B}$ 服从矢量迭加原理。

与电学中的电力线和电通量相对应，在磁学中用磁力线和磁通量来描述磁场的分布。定义磁通量 ϕ_B 为

$$\phi_B = \int_{(S)} \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_{(S)} B \cos \theta dS \quad (2-18)$$

其单位为 Wb (韦伯)，即 $1 Wb = 1 T \cdot m^2$ ，或 $1 T = \frac{1 Wb}{m^2}$ 。

另一个常用的单位是 Mx (麦克斯韦)，它与 Wb 的关系为 $1 Mx = 10^{-8} Wb$ 。

由于没有单个的自由磁极，所以磁力线与电力线的形状有所不同：磁力线总是一条闭合曲线，与电流环相互套链如图 2.1(b) 所示。因而，磁学中的高斯定理和安培环路定理的表达式与静电学的也将有所不同。在电学中

$$\phi_E = \oint_{(S)} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{(S \text{ 内})} q_i \quad (2-19)$$

$$\oint_{(L)} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2-20)$$

在磁学中