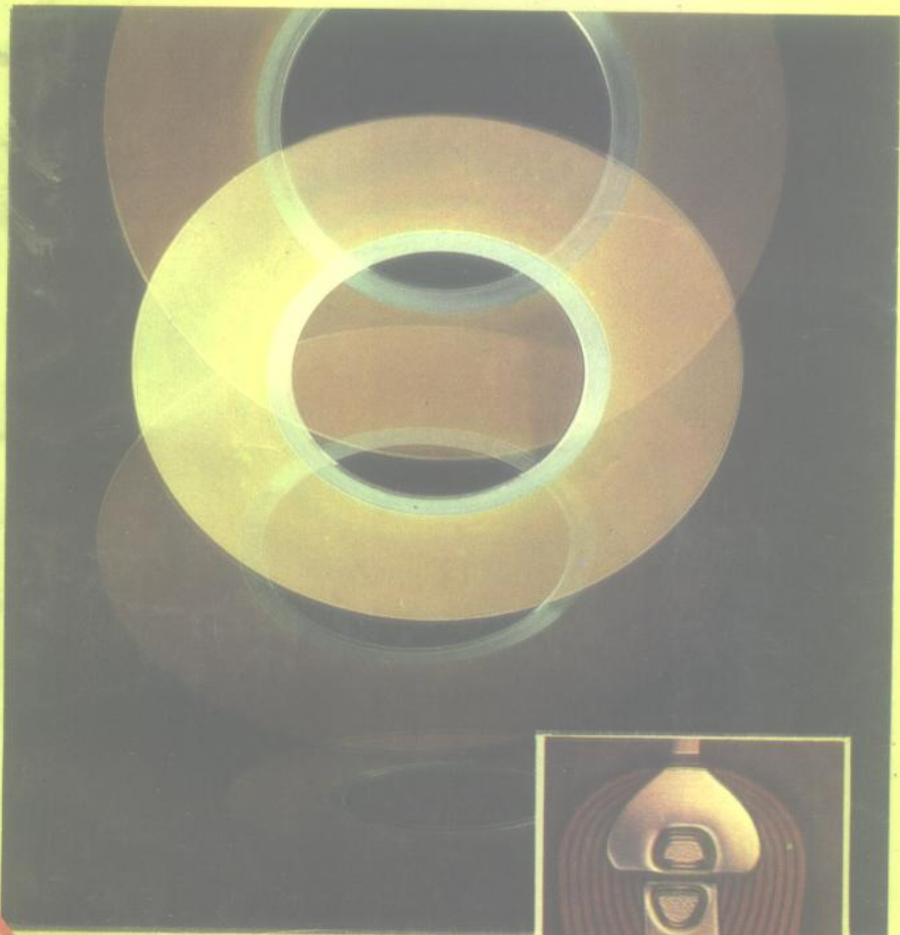


章吉良 编



磁记录 原理与技术

上海交通大学出版社

TQ 581

359750

乙16

磁记录原理与技术

章吉良 编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书的主要内容包括感应式磁头磁场分布、记录(写入)过程、重放(读出)过程、垂直磁记录、记录介质、磁头和磁头材料等。对最近发展的薄膜介质、薄膜磁头和垂直记录方式也作了较详细的介绍。

本书可作为高等院校计算机外部设备、磁记录设备专业的参考书,也可供该领域的工程技术人员参考。

7427166

磁记录原理与技术

出 版: 上海交通大学出版社
(淮海中路1984弄19号)
发 行: 新华书店上海发行所
印 刷: 常熟文化印刷厂
开 本: 787×1092 (毫米) 1/32
印 张: 10.125
字 数: 227000
版 次: 1990年11月 第一版
印 数: 1990年12月 第一次
印 数: 1—1350
科 目: 232—304

ISBN 7-313-00733-7/O·44

定 价: 2.15 元



序

当前的信息社会，迫切需要高密度、大容量、小体积、低成本的信息存贮设备。就磁记录产品而言，1989年世界总产值已超过500亿美元。我国的磁记录事业虽然起步较晚，但发展较快，特别是改革开放以来，发展尤为迅速。可以预言，到本世纪末，我国磁记录的科研和生产水平一定会有一个大幅度的提高。

国际上磁记录技术的发展可谓日新月异，薄膜磁头、薄膜磁盘等高密度产品已商品化，垂直磁记录方式也已开始实用化。目前，国内虽已出版了一些质量很好的介绍磁记录原理与技术方面的书，对提高我国的磁记录技术起到了极大的推动作用，但真正能详细反映最新技术的书还是不多见的。

章吉良同志根据自己的教学、科研实践撰写而成的本书除了介绍磁记录的一般原理和技术之外，对最新技术，如薄膜磁头的结构和制备工艺、薄膜介质的制备、垂直磁记录方式等，也作了较大篇幅的介绍，因此本书具有一定的先进性。此外，由于作者本身具有

一定的实际经验，因而所介绍的内容也颇具实用性。
谅本书的出版会受到同行们的欢迎。

中国科学院学部委员、
上海交通大学教授 沈天慧

1990年7月

目 录

1. 概 论

1.1 磁学基础	1
1.1.1 物质的磁性	1
1.1.2 铁磁性物质的磁化特性	2
1.2 磁记录发展历史	9
1.3 磁记录的特点	14
1.3.1 磁记录的基本过程	14
1.3.2 介质结构	15
1.3.3 磁头结构	16
1.3.4 记录方式	17
1.4 磁记录基础	18
1.4.1 记录场	18
1.4.2 介质的各向异性	21
1.4.3 纵向记录	21
1.4.4 垂直记录	23
1.4.5 重放	24

2. 感应式磁头的磁场分布

2.1 磁头类型	27
2.2 磁路	29

2.2.1	有缝隙的磁路	30
2.2.2	记录磁头的漏磁通	30
2.2.3	磁头线圈的电感	32
2.3	磁头磁场的理论计算	33
2.3.1	安培环路定律	34
2.3.2	卡尔奎斯特方程	38
2.3.3	从间隙两端磁荷求磁场	46
2.3.4	计算磁头磁场的其他方法	48
2.3.5	有限极尖长度磁头的磁场分布	57
2.4	磁头磁场的实验验证	68
2.4.1	直接测量方法	68
2.4.2	电场模拟法	70

3. 记录(写入)过程

3.1	标量磁化的近似记录理论	75
3.1.1	正弦信号的无偏磁记录	75
3.1.2	数字信号的记录	84
3.2	介质中的自退磁场	90
3.2.1	自退磁场的计算	90
3.2.2	正弦磁化自退磁场的计算	92
3.2.3	数字信号自退磁场的计算	97
3.3	自相一致磁化	106

4. 重放(读出)过程

4.1	各种物理效应	118
-----	--------------	-----

4.2	重放(读出)理论基础	120
4.3	环形磁头的重放	124
4.4	输出电压	127
4.4.1	正弦波记录	127
4.4.2	脉冲记录	131
4.4.3	有限极尖长度磁头的重放过程	142
4.5	输出脉冲的对称性和脉冲叠加	144

5. 垂直磁记录

5.1	纵向磁记录在高密度时遇到的困难	155
5.1.1	纵向磁记录的圆形磁化模式	155
5.1.2	纵向磁记录在高密度时遇到的困难	163
5.2	垂直磁记录	166
5.2.1	三种记录模式及其特性	166
5.2.2	垂直磁记录磁头的磁场分布	170
5.2.3	磁头与介质的互作用	179
5.2.4	垂直磁记录的非线性记录过程	183
5.2.5	垂直磁记录的再生过程	187

6. 记录介质

6.1	颗粒状介质	197
6.1.1	磁性能要求	197
6.1.2	非磁性能要求	202
6.1.3	磁性材料	203
6.1.4	颗粒状介质的优缺点	214

6.2 薄膜介质	217
6.2.1 薄膜介质的应用.....	217
6.2.2 薄膜的磁性能.....	219
6.2.3 薄膜材料和工艺.....	228
6.2.4 寿命.....	242

7. 磁头及磁头材料

7.1 磁头分类	250
7.2 体型磁头	251
7.2.1 叠层合金磁芯磁头.....	251
7.2.2 铁氧体磁头.....	256
7.3 薄膜磁头	263
7.3.1 薄膜磁头的优缺点.....	263
7.3.2 用于硬盘的薄膜磁头.....	266
7.3.3 用于磁带的薄膜磁头.....	277
7.4 MIG 磁头	279
7.5 磁阻磁头和双元件磁头	282
7.6 垂直磁记录磁头发展现状	289
7.6.1 体型磁头.....	290
7.6.2 薄膜磁头.....	292
7.6.3 组合头.....	296
7.7 磁头材料	297
7.7.1 磁性、电气和机械方面的性能要求.....	297
7.7.2 体型磁头材料.....	299
7.7.3 薄膜磁头材料.....	304
7.8 磁头测试	307

1.1 磁学基础

1.1.1 物质的磁性

物体在外加磁场中磁化，其磁化强度 M 和磁场强度 H 的关系为 $M = \chi H$ 。从实用的观点出发，可以按照磁化率 χ 的大小和符号将物质分类如下：

1. 抗磁性 磁化率 $\chi_d < 0$ 的物质称为抗磁性物质。 χ_d 不仅为负值，而且绝对值也很小，一般为 10^{-5} 数量级。抗磁性物质主要有惰性气体、众多的有机化合物、若干金属（如Bi、Zn、Ag、Mg等）和非金属（如Si、P、S等）。其磁化曲线为直线。

2. 顺磁性 磁化率 $\chi_p > 0$ ，但数值很小，仅显示微弱磁性的物质称为顺磁性物质。室温下 χ_p 为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 数量级。具有顺磁性的物质很多，如典型的稀土金属和铁族元素的盐类等。有些顺磁性物质的 χ_p 与温度 T 的关系服从居里定律：

$$\chi_p = \frac{C}{T}, \quad (1.1)$$

式中， C 为居里常数， T 为绝对温度。然而更多的顺磁性物质服从居里-外斯定律：

$$\chi_p = \frac{C}{T - T_p}, \quad (1.2)$$

式中 T_c 为临界温度,称为顺磁居里温度。

3. 反铁磁性 有一类物质,当温度高于临界值 T_N 时,服从居里-外斯定律,而当温度低于 T_N 时,磁化率不是继续增大,而是降低,并逐步趋于定值,因此在 T_N 处磁化率有极大值。 T_N 称为奈尔温度。这类物质称为反铁磁性物质,主要有过渡族元素的盐类及化合物,如 MnO 、 Cr_2O_3 、 CoO 等。

4. 铁磁性 与上述三种磁性截然不同,铁磁性物质在很小的磁场下就被磁化到饱和,不仅磁化率 χ 大于零,而且数值大到 $10^4 \sim 10^6$ 数量级。其磁化强度 M 与磁场强度 H 的关系为非线性的函数关系。铁磁性元素不多,到目前为止,纯元素只有九个,它们是三个 $3d$ 金属——铁、钴、镍和六个 $4f$ 金属——钆、铽、镱、铕、钐、镱。但具有铁磁性的化合物却有很多种。当铁磁性物质的温度比临界温度 T_c 高时,铁磁性将变为顺磁性,并服从居里-外斯定律,只是 T_c 为铁磁性物质的顺磁居里温度。几种典型铁磁性物质的 T_c 见表 1.1。

表 1.1

物质	Fe	Co	Ni	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
$T_c(K)$	1043	1393	631	293	219	89	20	20	32

5. 亚铁磁性 具有亚铁磁性的物质,其宏观磁性与铁磁性相同,仅是磁化率的数量级稍低一些,大约为 $10^0 \sim 10^3$ 。众所周知的铁氧体,是典型的亚铁磁性物质。

1.1.2 铁磁性物质的磁化特性

铁磁性物质在磁记录中得到了广泛的应用。本节简要讨论铁磁性物质磁感应强度 B (或磁化强度 M) 和外加磁场 H 之间的关系。

1. B 和 H 及其关系

B 和 H 都是矢量。在许多场合,确定磁场效应的是 B 而不是 H , 只有在自由空间, B 和 H 始终平行,并可写为

$$B = \mu_0 H. \quad (1.3)$$

在磁介质中, B 和 H 之间的关系较复杂,两者不一定平行。在 SI 单位制中,有

$$B = \mu_0 (H + M), \quad (1.4)$$

B 的单位是 T 或 W_b/m^2 。上式也可写成

$$B = \mu_0 H + B_i. \quad (1.5)$$

2. 磁化

磁体受磁场作用后将会感应出磁矩,处于磁化状态。磁化磁场一般指能使磁体感应出磁矩的外加磁场,它可以是直流磁场,也可以是交变或脉冲磁场。

在磁介质内部取一个宏观体积元 ΔV , 这个体积元内包含大量的磁偶极矩 p_m , 用 $\sum p_m$ 代表该体积元内所有磁偶极矩之和。定义磁化强度为

$$M = \frac{\sum p_m}{\Delta V}, \quad (1.6)$$

由上式可见,磁化强度为单位体积内具有的磁矩矢量和。 M 是一个矢量,单位为 A/m, 它描述磁体被磁化的方向和强度。

3. 退磁场和退磁因子

磁介质被磁化后产生的磁化强度,对介质内的总磁场将发生影响。(1.4) 式中的 H , 只有当磁介质是均匀且无限大时,才和无介质时的外加磁场相同,而在一般情况下,由于磁介质的磁化,不仅对磁感应强度 B 有贡献,而且将影响磁场强度 H 。图 1.1(a) 为闭合环形磁芯,其中的 H 就等于外加

磁场。而对于图 1.1(b) 所示的有缺口的磁性圆环,磁化后在缺口处将出现表面磁极,这个表面磁极将在磁芯中产生一个与磁化强度相反的磁场,它起着削弱磁化的作用,通常称为退磁场,以 H_d 表示。当均匀磁化时, H_d 才是均匀的,它的数学表式可写为

$$H_d = -NM, \quad (1.7)$$

式中, N 称为退磁因子,是个无量纲的比例常数,只与磁体的几何形状有关。

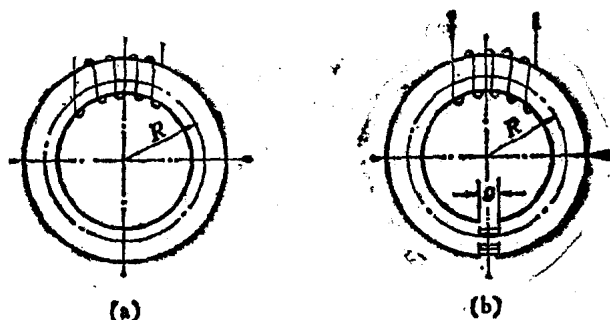


图 1.1

(a) 环形磁心, (b) 有缺口的环形磁心。

这时在磁芯内部真正起作用的磁场应该是磁化磁场 H 和退磁场 H_d 的矢量和。缺口环形磁芯的磁感应强度可写为

$$B_{\text{缺口}} = \mu_0(H - NM + M_{\text{缺口}}). \quad (1.8)$$

严格地说,只有当磁场均匀,被磁化物体形状为旋转椭球时, H_d 才是均匀的, N 变成常数, (1.8) 式才能成立。现将实用价值较高的几种情况介绍如下:

(a) 沿细长椭圆柱体长轴方向磁化

设三个长半轴为 a, b, c , $a > b = c$, $k \equiv a/c$,

$$N = \frac{1}{k^2 - 1} \left\{ \frac{k}{\sqrt{k^2 - 1}} \ln(k + \sqrt{k^2 - 1}) - 1 \right\}, \quad (1.9)$$

若 $k \gg 1$

$$N \approx k^{-2}(\ln 2k - 1). \quad (1.10)$$

(b) 沿扁平旋转椭球体的平面进行磁化

设 $a = b > c$, $k \equiv a/c$,

$$N = \frac{1}{2} \left\{ \frac{k^2}{(k^2 - 1)^{3/2}} \arcsin \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{k} - \frac{1}{k^2 - 1} \right\}. \quad (1.11)$$

对一般椭球体, 如果分别在三个主轴方向进行磁化, 其退磁因子 N_a, N_b, N_c 应满足

$$N_a + N_b + N_c = 1. \quad (1.12)$$

根据上式, 可得下述情况下的退磁因子:

球体

$$N_a = N_b = N_c = \frac{1}{3}; \quad (1.13)$$

圆柱(无限长) 在垂直于轴的方向磁化,

$$N_b = N_c = \frac{1}{2}, \quad N_a = 0; \quad (1.14)$$

平板 在垂直于平面方向上进行磁化,

$$N_a = N_b = 0, \quad N_c = 1. \quad (1.15)$$

对于磁记录而言, 自退磁场不能按(1.7)式进行计算。因为磁化区域(大小、形状)和磁化状态 M 的分布在没有确定之前, 退磁因子不能确定, 其退磁场也无法计算。在“记录(写入)过程”一章中, 我们将详细介绍磁记录中退磁场的计算方法。

4. 磁化曲线和磁化率

磁化强度 M 或磁感应强度 B 和磁场强度 H 之间的关

系，可以由磁化曲线（也称磁滞回线、 $B-H$ 曲线、 $M-H$ 曲线等）来描述。铁磁性物质的磁化曲线只能由实验方法测定。 $B-H$ 曲线和 $M-H$ 曲线形状相似，只是在趋于饱和阶段略有区别。 $M-H$ 曲线的饱和段几乎与 H 坐标轴平行，但 $B-H$ 曲线的饱和段，总以一定的斜率变化，这是由于在(1.4)或(1.5)式中 B 这个量还包含有 H 量的缘故。此外，剩余磁化强度 M_r 和剩余磁感应强度 B_r 都是在 $H=0$ 的情况下测得的，因此 $B_r = \mu_0 M_r$ ，而对矫顽力 H_c 而言， $B-H$ 曲线的矫顽力和 $M-H$ 曲线的矫顽力不同，可分别以 H_{cB} 和 H_{cM} 表示。

在铁磁性物质中， M 和 H 不一定呈平行关系，因此用磁化曲线表示 M 时，只要不预先说明，所指的 M 都是在 H 方向上的分量。此外，当 $H=0$ 时，大多数铁磁性物质的 M 不为零，因此要研究 $M-H$ 曲线，首先要使 M 等于零。使铁磁性物质 M 为零的方法有好几种。一种是将物质加热到居里温度以上，然后在没有磁场的情况下冷却，这称为热退磁法。另一种方法是把材料放在交变磁场中，逐步减小磁场振幅，直到零为止，这称为交流退磁法。此外还有形变退磁法等。

需要注意的问题是，铁磁性材料磁化时，正如上述，将在样品表面或内部产生磁荷而引起退磁场 H_d ，因此样品内的有效磁场强度 H_{eff} 总是小于外磁场 H_{ex} 。磁化曲线上所表示的 H 值，在任何情况下都是有效磁场 H_{eff} ，而不是外磁场 H_{ex} 。

现在根据图 1.2 来分析磁化过程。

从退磁状态开始，边增加磁场边测量磁化曲线所得的磁化曲线称为初始磁化曲线。

磁场 H 较小时， M 和 H 几乎成正比关系，并呈可逆变化，如图中 OA 段所示，称初始磁导率区域。在收音机、电

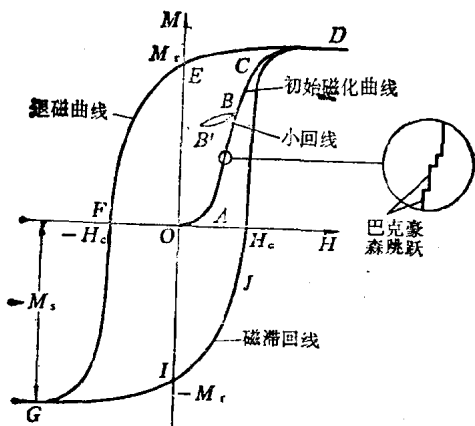


图 1.2 铁磁性物质的磁化曲线

视机中所采用的磁性材料部件（除变压器外）上所施加的磁场一般都很弱，它们的工作往往处于这个区域。磁记录中读出（或重放）磁头所接受到的来自记录介质上的磁场也很弱，因此也处于这个可逆区域，从而可将读出磁头作为线性元件处理，这将在“重放（读出）过程”一章中讨论。这部分磁化曲线的斜率 χ_i 称为初始磁化率。在 SI 制中，由于

$$\begin{aligned} B &= \mu_0(H + M) = \mu_0(H + \chi H) \\ &= \mu_0(1 + \chi)H = \mu_0\mu H, \end{aligned}$$

因而有 $\mu = 1 + \chi$ 。在这个阶段中， μ_i 称为初始磁导率，在磁记录中，它在很大程度上决定了磁头的读出幅度。

超过这个区域，随 H 的增加，由于大部分磁畴转向 H 方向， M 表现为不连续的急剧变化，如图中 AC 段所示。如果再减小 H ， M 的变化是不可逆的，其变化按图中 $B \rightarrow B'$ 路径进行，从 B' 点开始，如增加 H ，将沿 $B' \rightarrow B$ 所示路径返回 B 点。由 $B \rightarrow B' \rightarrow B$ 这个微小磁场变化所引起的磁化强度改变

称为小回线。其中小回线 BB' 的斜率, 即 $\Delta M/\Delta H$ 称为增量磁化率或微分磁化率, $\Delta H \rightarrow 0$ 的极限斜率

$$\chi_r = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} (\Delta M/\Delta H),$$

称为可逆磁化率。这段曲线中磁化过程实际上是跳跃式的, 称为巴克豪森效应。

CD 段, 由于大部分磁畴已转向 H 方向, 因而继续增加 H , 只有少数磁畴继续转向, M 增加变慢, 称为旋转磁化区域。

D 之后, 由于所有磁畴几乎都已转向 H , 因而当 H 再增加时, M 几乎不增加, 称为饱和段。这时的 M 值, 称为饱和磁化强度 M_s 。在 $B-H$ 曲线中, 对应的 B_s 称为饱和磁感应强度。

从饱和点开始减小磁场, 磁化强度的变化并不沿着初始磁化曲线进行。 $H=0$ 的时候, M 不为零, 出现剩余磁化强度 M_r 。从这个状态开始在相反的方向上增加磁场, 巴克豪森效应就会伴随发生, 磁化强度急剧下降。当磁场强度为 $-H_c$ 时, $M=0$, H_c 称为矫顽力。通常将第二象限中的磁化曲线部分, 特称为退磁曲线。超过矫顽力值, 继续在负方向增加磁场, M 的大小将在负方向急剧增加, 然后再次达到饱和状态。从这种负的饱和状态开始, 沿着正的方向增加磁场, 这时磁化曲线将沿新的路径变化, 如图 1.2 $GIJD$ 所示。该 $GIJD$ 曲线以原点 O 为对称点, 同 $DEFG$ 曲线对称。这种当独立变量增加或减小时, 函数值沿不同路径变化所形成的曲线称为磁滞曲线。当曲线闭合时称为磁滞回线。磁滞回线的面积 $\oint H \cdot dM$ 称为磁滞损耗, 该损耗最终以热能形式损失。

按磁滞回线的形状不同, 可将铁磁材料分为软磁性材料