

磁记录物理

CIJILU WULI

杨 正 编著



兰州大学出版社

内 容 提 要

本书从物理的角度,对磁记录的一些基本问题进行了分析和讨论,并对一些新的磁记录理论作了介绍和论述.主要讨论的问题是:环形磁头的磁场分布,磁记录过程的分析,再生理论,磁头和磁头材料,磁记录材料及垂直磁记录的理论及应用.

本书可作高等学校物理系,电子计算机系有关专业的教学参考书,也可供从事磁记录材料及各种磁记录装置研究和生产的科技人员参考.

磁 记 录 物 理

杨 正 编著

兰州大学出版社出版

(兰州市天水路76号)

甘肃省新华书店发行 兰州新华印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张 22 3/4 字数 583千字

印数 1—4000

1986年6月第1版

1986年6月第1次印刷

统一书号: 13402·2

定价: 4.45 元

前 言

近几十年来磁记录技术发展非常速速，它在电视广播、计算技术、空间技术、军事技术、教育、医学、科学研究、工农业生产及以日常生活等方面已经得到了很广泛的应用。所有磁记录装置的研究主要都是围绕两个目标进行的：①提高记录密度；②同时保证重放过程中有足够的信噪比。因此一种磁记录系统的建立和性能的提高与材料、磁记录原理、组装、磁相互作用、电路、编码、机械及伺服机构等有关。从学科上讲涉及磁学、电子系、精密机械学及化学等。随着记录密度的提高，要求更深入地了解磁记录过程。譬如，极高密度的记录中记录介质中的磁化分布问题。因为每位信息对应的体积已接近磁畴的尺寸，需用微磁学的方法处理；新材料和新的磁记录原理的研究和应用也非常重要。本书主要讨论有关磁记录物理的以下问题：环形磁头的磁场分布；磁记录过程的分析；再生理论；磁头及磁头材料；磁记录材料及垂直磁记录的理论和应用等。

作者结合自己在教学和研究工作中的点滴体会，撰写了本书。由于作者水平有限，难免有不少缺点甚至错误，请读者批评指正。

本书在编写过程中得到兰州大学磁性材料研究所各位同志的支持。刘文仙同志为本书绘制了插图，作者谨向他们表示衷心感谢。

杨 正

一九八六年四月于兰州大学

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 磁记录的发展概况	(1)
第二节 磁记录的特点及其应用	(2)
第二章 环形磁头的磁场分布	(5)
第一节 磁头场型分布的理论计算	(5)
一、理想环形磁头的场型分布	(5)
二、磁头场分布的近似表达式	(11)
三、磁头结构(磁极形状及尺寸)对磁场分布的影响	(19)
第二节 磁头场分布的数值计算	(30)
一、磁势的数值计算法——差分法	(30)
二、磁头材料的主要磁特性	(34)
三、磁头材料的磁性对磁头场分布的影响	(37)
第三节 磁头场分布的实验测定	(47)
一、电势模拟法	(47)
二、放大模型(Large-scale model)实验	(49)
三、实际磁头的微区磁场的直接测量	(52)
第三章 磁记录过程的分析	(60)
第一节 引言	(60)
一、模拟式磁记录	(60)
二、数字式磁记录	(61)
第二节 数字式磁记录过程的分析	(63)
一、用作图法分析记录过程	(63)
二、记录介质中磁化强度的分布	(73)
三、磁性过渡区(Magnetization transition zone)	(82)
第三节 模拟式磁记录过程的分析	(96)
一、直接记录和直流偏磁记录	(96)
二、交流偏磁记录	(98)
第四章 再生理论	(119)
第一节 再生过程的互易性原理	(119)
第二节 重放过程中的各种损失	(121)
一、重放磁头的磁场分布	(124)
二、重放过程的各种损失	(124)
第三节 数字式记录的读出过程的分析	(130)
一、阶跃式磁化分布的读出过程	(130)
二、峰值位移(相移)及幅值减小	(133)
三、磁头的某些参数对最大位密度的影响	(138)

四、NRZ 1 记录中相继写入三个“1”时的读出电压波形	(143)
五、记录介质对位密度的影响	(146)
第四节 读出电压的理论计算	(150)
一、环形磁头读出的情况	(151)
二、用互易性原理计算读出电压	(160)
三、用镜像法计算读出电压	(161)
第五章 磁头及磁头材料	(172)
第一节 磁头的磁路分析和设计	(172)
一、磁头的磁路分析和主要特性	(172)
二、音频磁头的设计	(188)
三、磁盘机磁头的性能与磁头材料的关系	(194)
四、磁带机用的多路磁头及道间干扰(串音)的分析	(203)
第二节 铁氧体磁头材料	(207)
一、热压铁氧体磁头材料	(208)
二、热等静压(HIP)铁氧体磁头材料	(214)
三、晶粒取向多晶铁氧体磁头材料	(223)
四、MnZn单晶铁氧体磁头材料	(226)
第三节 金属合金磁头材料	(228)
一、玻莫合金	(228)
二、铁硅铝合金(Sendust)	(231)
三、非晶态合金磁头材料	(233)
第六章 磁记录材料	(239)
第一节 微粉的磁性	(241)
一、单畴颗粒的临界尺寸	(241)
二、磁性粒子的反磁化过程	(243)
三、磁滞损失及转动磁滞	(252)
四、超顺磁性	(253)
五、单畴粒子集合体的磁性	(256)
第二节 磁粉的制备及性能	(257)
一、 γ - Fe_2O_3 磁粉	(257)
二、包Co- γ - Fe_2O_3 磁粉	(257)
三、 Cr_2O_3 磁粉	(262)
四、金属磁粉	(265)
第三节 连续薄膜型高密度磁记录介质	(266)
一、高密度化对记录介质的要求	(266)
二、溅射Co- γ - Fe_2O_3 薄膜磁盘	(269)
三、用电镀法和化学镀法制备的Co系合金薄膜介质	(271)
四、真空蒸镀的Co-Ni合金薄膜磁带	(273)
第七章 一种新型的高密度磁记录理论——垂直磁化模式	(279)
第一节 引言	(279)
一、高密度(短波长)记录中出现的问题	(279)

二、一种新的高密度磁记录方式——垂直磁化模式	(285)
第二节 垂直磁记录用的磁头	(289)
一、单极磁头的磁场分布	(289)
二、“C”形垂直磁头的磁场分布	(293)
第三节 垂直磁记录介质	(299)
一、垂直磁化膜的磁特性和显微结构	(300)
二、垂直磁记录用的CoCr合金膜	(306)
三、垂直磁记录用的钡铁氧体涂布介质	(310)
第四节 磁头与介质的磁相互作用——CoCr/NiFe双层膜垂直磁记录	
介质的提出	(321)
一、单极磁头记录	(323)
二、环形磁头记录	(328)
第五节 垂直磁化模式的记录过程及再生过程	(331)
一、单极磁头写入并读出的情况	(332)
二、环形磁头写入并读出的情况	(337)
三、垂直磁记录中的分离损失	(341)
第六节 垂直磁化CoCr膜的磁化分布和磁化过程	(344)
一、畴壁位移过程——条状畴结构	(344)
二、柱状粒子磁矩的非一致转动模型	(348)
第七节 垂直磁记录的应用前景	(352)

第一章 绪 论

第一节 磁记录的发展概况

声音、图象、数码、文字以及其他一切能够转换成电信号的信息，都能记录和存贮在磁介质上，可以立即再现，也可以在需要时再现，这就是各种磁记录装置的功能。

磁记录的发展已有八十多年的历史〔1〕。1889年O. Smith提出了利用永磁体的特点进行磁性录音的设想，但未能实现。1898年丹麦人V. Poulsen研制出第一台钢丝录音机，在1900年的巴黎博览会上展出。钢丝是碳钢制做的，因矫顽力低，又无放大设备，只能用耳机勉强可听。同时不能进行短波长记录。不过这项发明对磁记录的发展有较大的作用，因为它实现了局部磁化。1909年采用了直流偏磁记录方式，使灵敏度提高，失真度减小。但在1920年以前所有的磁性录音机大都是实验性质的装置。1920年电子管放大器出现，才使磁性录音机达到实用化阶段。在1920年至1930年期间还进行了磁记录介质的研究，出现了钢带式的记录介质。1935年德国人E. Schüller研究出环形磁头。这是一项重要的发明。因为这种磁头具有一个很狭窄的工作缝隙，其附近的磁场分布很窄，这就克服了过去各种磁头的磁场发散的困难。1936年发明了粉末涂布型磁带。由于磁层可以比较薄，容易实现短波长记录。由于采用了矫顽力较高的 γ - Fe_2O_3 磁粉，在记录特性的稳定性方面有很大的提高。

1935年至1938年，侧重于磁带录音机质量的提高。1938年日本永井发明了交流偏磁法。将调制的音频信号输入磁头线圈，提高了录音灵敏度和输出信号，克服了非线性失真，改善了音质，降低了噪音。这对直流偏磁法是一个很大的改进。到了四十年代，磁带录音技术已发展到比较成熟，开始普遍应用。

随着磁记录技术的发展，记录波长不断减小。1950年提出视频磁记录。1956年美国Amperex公司采用环形磁头和粉末磁带研制成功磁带录像机。1956年至1957年美国IBM公司发明了电子计算机用的磁鼓存贮器，实现了数字信息的磁记录。接着发明了磁盘存贮器，使磁表面记录器逐渐变成了电子计算机的重要外存贮装置。一个国家能否在电子计算机和信息处理方面占据领先地位，在很大程度上取决于磁记录技术的发展速度。统计资料表明，各种磁记录产品的年产值已达到300亿美元；在美国硅谷地区磁记录产品的产值已与半导体产品的产值大体相同〔2〕。可见，磁记录技术在从现在的工业社会向信息社会的过渡中起着极为重要的作用。

近年来对原有的磁记录装置如录音机、录像机、计测用的磁带机以及各种数字式磁记录器进行了大量的理论和实验研究，譬如，1967年 CrO_2 磁带实用化；1974年提出包 $\text{Co}-\gamma$ - Fe_2O_3 磁带；1976年及1978年相继发明了金属粉末磁带和蒸镀的金属薄膜磁带，使各类磁记录装置的性能有了大幅度的提高。同时，自1977年以来日本岩崎俊一提出并详细研究了一种新的高密度磁记录方式——垂直磁记录。近年来在理论研究和实际应用方面均取得较大的进展。

第二节 磁记录的特点及其应用

同其他记录方法（印刷记录、示波器记录、胶片记录及唱片记录等）相比，磁记录有以下优点：

（1）记录密度高、存贮容量大。近年来各种磁记录装置的记录密度不断提高，以磁盘机为例，在1956年～1975年的二十年间，面密度提高了1500倍。目前磁盘机的面密度已达 56Mbits/in^2 （ 86Kbits/mm^2 ）；位密度为20,000BPI；道宽 $16\mu\text{m}$ 〔3〕。用垂直磁记录原

理，日本日立公司中央研究所于1984年公布的软磁盘的 D_{50} 已达230KBPI， $5\frac{1}{4}$ 吋软磁盘存贮容量达35MB。

（2）工艺成熟、制造比较容易、经济。已录信息容易清洗、消除，以便再记录新的内容。可以这样反复使用 $10^3\sim 10^5$ 次。

（3）记录的信息可长期保存，不易丢失。属于非破坏性读出，可反复重放。譬如已录信息的磁带或磁盘，经过上千次的重放再现，记录信息仍能保持原状。

（4）记录的频率范围宽，可以直流到15兆赫以上。

（5）记录的动态范围宽，可超过40db。从满刻度到其0.3%的整个范围的讯号都能给出精确而呈线性的记录。

（6）可立即重放再现，不需要胶片记录那样的冲洗过程。

（7）可多通道记录。使用多通道技术，上千的二进制信息，可以同时记录在一条磁带上。而且还能保持这些同时记录的信号在通道间的精确的时间和相位关系。

（8）失真小。磁带记录即使过载，也不象别的电子仪器，并不表现明显的突变而是比较平缓。

（9）可以改变时标。就是说允许以一种速度记录信息，而用另一种速度重放。这是其他记录介质无法办到的。

当然事物总是一分为二的。磁记录有许多优点，但也有它的缺点。譬如磁带、磁盘的制造、保存和使用中对环境的要求均很高；并对机械振动、温度、磁场和灰尘都很敏感。磁带机和磁盘机都具有复杂而又精密的机械驱动装置，而这些部件的可靠性往往是比较差的。这些问题需在设计和使用中注意。

近十年来磁记录技术的应用十分广泛和普及。因为世界上发生的任何现象，只要选择适当的传感器就可以把它转变成一定形式的电信号，那就能够记录在某种形式的磁记录介质上，根据需要随时可以再现这种现象。目前磁记录的应用已深入到电影、电视、广播、教育、计算技术、航测、军事、空间技术、医学、科学研究及工农业生产等各个领域。单从磁带销售量的增长速度就可以说明这一趋势。1969年磁带的世界总销售额为3.05亿美元，到1971年总销售额增加到4.4亿美元。美国垄断了世界磁带产量的一半以上，是磁带产量最多的一个国家。表1给出美国1968年各种磁性材料消费金额的百分比〔18〕。不难看出，磁记录材料的产值已超过电工用钢（硅钢片等），而跃居第一位。据报导〔14〕，氧化物粉末磁记录介质的总销售量1974年约为14,000吨，1977年约为18,000吨。

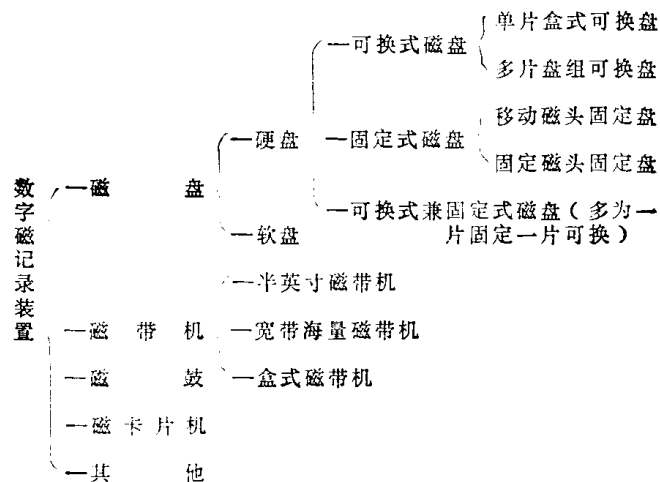
作为例子下面简单介绍一下磁记录的应用情况。

表 1-1 1968年美国磁性材料销售额

材 料 类 别	消费金额 (10 ³ 美元)	百分比 (%)
磁 带	180	27.7
磁盘、磁鼓	100	15.3
电工用钢片	180	27.7
软磁铁氧体	110	17.0
永磁材料	55	8.5
铁镍合金	25	3.8

(1) 在计算技术中的应用 近年来数字磁记录技术发展很快, 新的高速、高密度及大容量的数字磁记录装置不断涌现。表 2 列出了目前常用的数字磁记录装置的主要类型。虽然随着半导体集成电路技术的迅速发展, 大规模集成电路代替磁芯存储器。但是磁带机, 磁盘机作为外存储器来讲, 仍占有很重要的地位。它们的突出优点是容量大、成本低。以磁带为例, 一盘直径为 $10\frac{1}{2}$ 英寸 ($\cong 25\text{cm}$) 的磁带可以存贮 4×10^8 位信息, 相当于近十万个 4096 位的半导体存储器的总容量。

表 1-2 目前常用的数字磁记录装置



(2) 在军事和空间科学方面的应用 磁记录技术在军事上有重要应用。超级大国的高空侦察机、资料卫星上都配备有磁记录装置, 以获得军事情报和地球资源及地形方面的资料。宇宙飞船也是利用磁记录技术得到月球、火星等天体的表面情况的资料。人造卫星、宇宙飞船或者侦察机舱内的传感器是用来将测到的种种参数转换为电讯号, 然后送给编码器, 编成数码。一边经发射器, 直接发送给各接收台站, 同时还将这些信号存贮在探测舱内的磁记录器中。各接收台站也都有自己的磁记录器, 记录和存贮接收的信息。如果探测舱内没有磁记录器, 则信号只能发送一次, 遇到意外情况时, 传输过程可能突然中断, 信号就会丢失。装备磁记录器以后, 探测舱就可以根据各接收站的命令, 随时再次发送所需要的信号。

又如飞机的飞行试验中, 磁带记录器不仅能记录有关的大量数据, 甚至在飞机坠毁后仍可保证从保护很好的磁带中取出有关信息, 供分析判断用。

(3) 在电视广播中的应用 廿世纪五十年代磁记录进入由图象记录的时代。由于政治

上和经济上的需要,往往要求将同一节目重复广播多次.磁带录像机的发展就成了一个十分迫切的课题.1956年前后商品录像机开始生产,不久彩色磁带录像机也试制成功并投产.由于录像磁带具有直接快速显示,可以消磁.重复使用的特点,一些国家的电视广播都逐步从胶片录制节目改为磁带录制节目.于是录像磁带和录像机就成了电视广播的关键设备之一.据报导,1970年电视广播中磁带录像的节目,在美国占43%,在日本占70%.这一时期录像磁带的复制技术也有了进一步的发展.用视频磁带印相机在几分钟内就可复制一小时的节目.这是磁记录技术的又一重要成就.

在电影制片方面,利用录像机拍摄影片和进行预编辑要比传统的制片方法提高效率10倍左右,大大缩短了拍片时间,降低了成本.

(4) 在科研和工农业生产中的应用 对于实验研究工作中碰到的连续变化过程(缓变、速变、瞬态等)的分析(如频谱分析),使用磁带记录器有很多优点.利用相应的传感器便可以测量和分析压力、应力、位移、振幅、速度、加速度、温度、流量、声、心电及其他各种物理量的变化过程.一些无法重复的一次性实验(例如爆炸地震、核爆炸等)可以先记录下来,然后再进行分析和处理.

多速模拟磁记录装置,可将记录下来的信号进行时间放大或缩小(通常称为时标的扩展和压缩),使数据处理更为灵活.这可以使一般分析仪器本来无能力分析的信号变为可以分析,例如电话线能传输音频范围300Hz左右的信息,而需传输的资料频率可能大于 10^5 Hz.用磁带记录器便可解决这类特殊问题.高频信号的资料可用磁带高速记录,然后低速还出(重放)输入电话线,在电话线的另一端也用一台磁带记录器低速记录电话线的传输信号.而当分析资料需要重放时,可高速重放,使时标与原记录的时标相同.这样便可克服低频传输的局限.相反,如果资料信号的频率比较低,而传输线路可能是微波线路那样的高频传输线路.这时,只要将低频的原始资料,先用低速记录在磁带上,然后高速重放输入微波线.于是数小时记录的建息只要几分钟就可以传输过去.既降低了传输成本,又充分利用了磁带记录器和微波传输线两者的能力.

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63位/毫米的九路磁带记录装置,记录或长期存贮数据.每次高能物理实验往往需要数千盘磁带.在1976年前CERN在数据库中存放的磁带已超过70,000盘.1975年一年就增加了10,000盘,由上述情况可以看出磁记录技术的重要性.

参 考 文 献

- [1] 岩崎俊一,磁记录物理与技术(来华技术报告),1977年8月.
- [2] Roger wood et al, IEEE Trans, Magn., Vol MAG-20, No 5, 698(1984).
- [3] 《磁性材料新应用文集》,中国电子学会应用磁学学会、电子工业部磁性材料情报网编,1984.年8月
- [4] 虞浦帆等,数字磁记录磁盘,科学出版社,1980.
- [5] 戴礼智,磁记录基础知识,科学出版社,1980.
- [6] 刘克哲,磁记录物理,山东科学技术出版社,1979.
- [7] 李荫远、李国栋,铁氧体物理学,科学出版社,1978.
- [8] 张江陵等,电子计算机磁盘存贮器,国防工业出版社,1981.
- [9] 杨正,“磁记录物理”,金属材料研究,1986年第2期,1—23页

第二章 环形磁头的磁场分布

磁头可分为清洗(抹去)磁头、记录(写)磁头和重放(读)磁头三类。清洗磁头的功能是使磁记录介质的剩余磁化强度变为零或者沿某一方向饱和磁化。记录磁头的功能是在记录介质中产生数值大约为介质矫顽力并具有一定分布形式的高梯度磁场;而重放磁头的基本功能,则是将记录介质上的磁化分布图样给出的磁通量分布,通过感应线圈或者其他磁通敏感元件(如霍尔元件及磁电阻元件)转换为电压信号。

尽管同类磁头具有类似的功能,但是在结构上却差别很大。磁盘机磁头和录像磁头相类似,通常是单体磁头,磁头芯的尺寸在毫米范围,录放共用一个磁头。消费者用的录音磁头通常是2~4路磁头;专业用的录音磁头是8~24路磁头。数字磁带机磁头是9路磁头;而计测磁头通常是1~84路磁头。

由于以下两方面的原因,磁头缝隙附近磁场分布的理论和实验研究就显得非常重要:

(1)从论录过程看,磁头场分布直接影响记录介质中的磁化分布。在数字式磁记录の場合,将磁头的场型分布称为写形状函数(*Write Shape Function*)。

(2)从再生过程看,利用互易性原理,根据磁头的场型分布可以计算出重放磁头线圈中感生的电压或者磁通量。因此,文献中称之为重放磁头的敏感函数(*Sensitivity Function*)。

由此可见磁头场的分布与磁记录系统的记录和重放特性均有极密切的关系,有必要仔细地分析、研究。鉴于下面的讨论围绕磁记录原理进行,所以只对目前普遍使用的环形磁头(*Ring head*)进行计算和讨论,其他型式的磁头将在以后相应的章节中介绍。

第一节 磁头场型分布的理论计算

一、理想环形磁头的场型分布

图2-1给出环形磁头的示意图。用 g 、 d 及 W 分别表示磁头缝隙的宽度、深度以及磁道宽度。一般情况下磁头迹面(即图2-1中的 xz 面)不是平面,而是具有某种形状的曲面。如果不做某些假设,很难用解析的方法得到磁头缝隙处的磁场分布。所以需采用近似的方法,所谓理想环形磁头就是一种近似。假设磁头迹面为平面,两个极头延伸到无穷远(图2-2;磁头的磁道宽度 $W \gg g$,可以认为磁头场的分布与坐标 z 无关;假设磁头芯的磁导率很高,近似地认为 $\mu = \infty$ 。在这种情况下磁头极面便是等磁势面。若磁头线圈的匝数 $n = 1$,电流等于 I ,则磁头的左则及右则两个磁极的磁势分别为 $+I/2$ 及 $-I/2$ 。

现在的问题是在区域 $y > 0$, $-\infty < x < +\infty$ 中,求出磁势 $V(x, y)$,再用下式求出磁头场分布:

$$\mathbf{H}(x, y) = -\text{grad}V(x, y) \quad (2-1)$$

而磁势 $V(x, y)$ 在上述区域中满足拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (2-2)$$

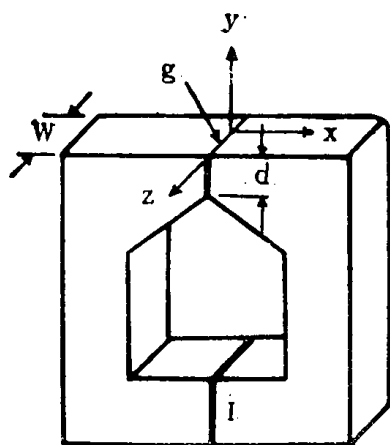


图 2-1 环形磁头示意图 (g —缝宽、 d —缝深、 w —道宽)

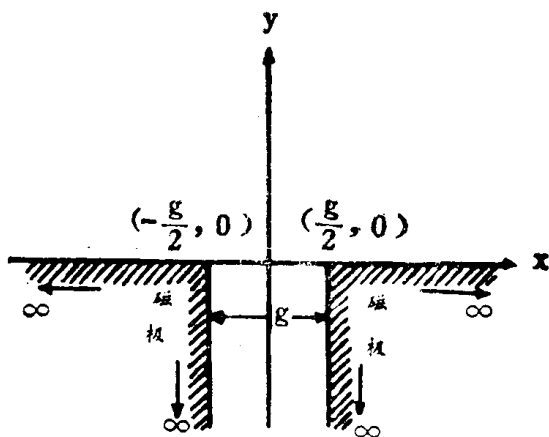


图 2-2 理想环形磁头示意图及缝隙处的坐标

边界条件:

$$\left. \begin{aligned} V &= I/2 & x \leq -g/2, y=0 \text{ 及 } x = -g/2, y \leq 0 \\ V &= -I/2 & x \geq g/2, y=0 \text{ 及 } x = g/2, y \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

求解磁头缝隙附近磁势 $V(x, y)$ 的方法, 常用的有两种: 一种是保角变换 (Conformal mapping) 的方法^[1], A. D. Booth^[2], W. K. Westmize^[3] 及 O. Karlqvist^[4] 等人采用了这种方法。另一种方法是富利叶变换法。G. J. Fan^[5] 和 O. Karlqvist 等人采用了这种方法。本节将介绍第一种方法。第二种方法将在再生理论中介绍。

公式 (2-2) 及 (2-3) 所给出的磁势问题可以用许瓦兹—克列斯多菲 (Schwarz—Christoffel) 变换求解^[1, 6]。现对此方法作一简单介绍。我们知道, 在一平面场 [譬如说磁场 $H(x, y)$] 的情况下, 其通量函数与势函数都是共轭函数。总的由一正则复变函数 $W(x, y) = U(x, y) + jV(x, y)$ 表示。函数 $U(x, y)$ 及 $V(x, y)$ 满足下列偏微分方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

及 Cauchy-Rieman 方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} &= \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial y} &= -\frac{\partial V}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

当 W 给定时, 就定义了 z 平面上的两条曲线:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \text{Const.} = U_0 \\ V(x, y) &= \text{Const.} = V_0 \end{aligned}$$

计算证明, 通量函数 $U(x, y)$ 与势函数 $V(x, y)$ 是正交函数。即磁力线垂直于等磁势面。

把第一个平面的上半平面与另一平面上的一个多角形区域联系起来, 把第一个平面的实

轴与另一平面上的一个多角形区域的边界联系起来的变换称为 Schwarz-Christoffel 变换。图 2-3 给出两个平面。图中被变换的区域位于边界线的无阴影一侧，两平面的各对应点均

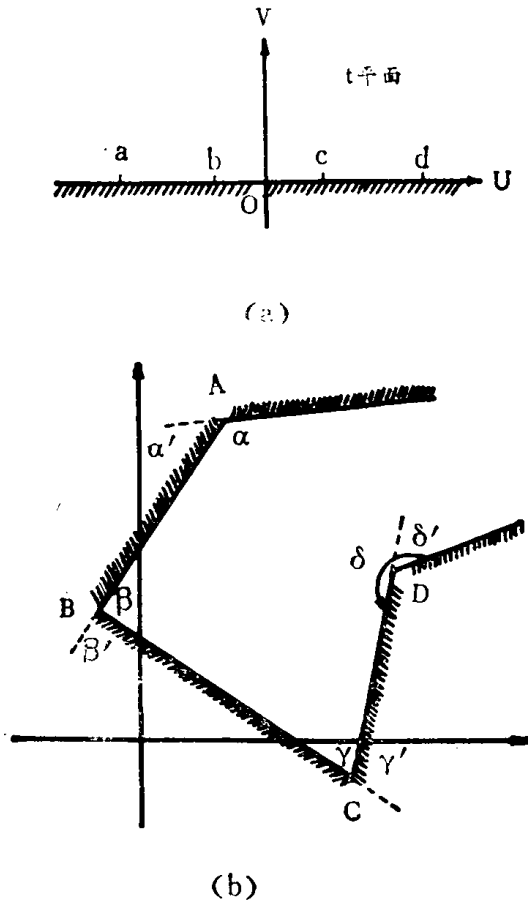


图 2-3

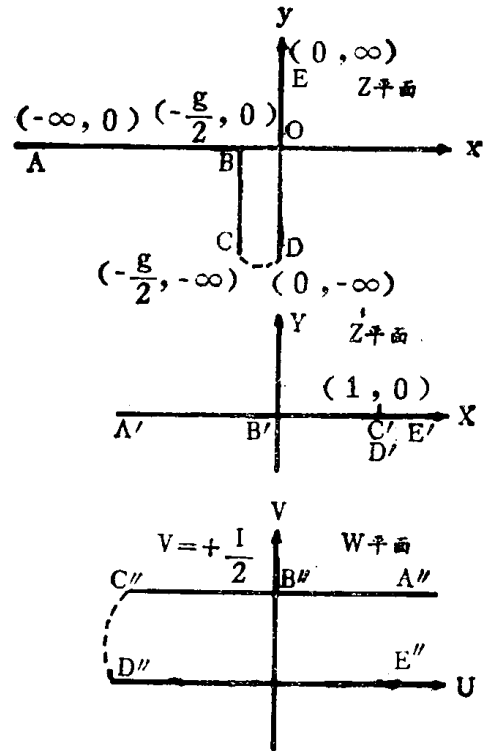


图 2-4 保角变换对应的各平面

标以相似的字母 $A, B, C \dots$ 及 $a, b, c \dots$ 。于是，从 Z 平面的实轴变换至 z 平面上多角形边界的变换式可通过对下式的积分而得到：

$$\frac{dz}{dZ} = S (Z-a)^{\frac{\alpha}{\pi}-1} (Z-b)^{\frac{\beta}{\pi}-1} (Z-c)^{\frac{\gamma}{\pi}-1} \dots \quad (2-6)$$

此式即谓 Schwarz-Christoffel 微分方程。其中 S 为标尺及旋转常数； $a, b, c \dots$ 是 Z 平面实轴上的一些点，它们和 z 平面上多角形的顶点 $A, B, C \dots$ 等相对应； $\alpha, \beta, \gamma \dots$ 分别为多角形在 $A, B, C \dots$ 等处的内角。若用 $\alpha', \beta', \gamma' \dots$ 表示，则 (2-6) 式就比较简单：

$$\frac{dz}{dZ} = S (Z-a)^{-\frac{\alpha'}{\pi}} (Z-b)^{-\frac{\beta'}{\pi}} (Z-c)^{-\frac{\gamma'}{\pi}} \dots \quad (2-7)$$

现在我们用上述变换求解理想环形磁头的磁场分布。由于对称性只要讨论图 2-4 中的 ABC 及 DE 所给出的范围。 ABC 处的磁势 $V = \frac{1}{2}I$ ，沿 DE 的磁势 $V = 0$ 。利用 Schwarz-Christoffel 变换，将 z 平面上的多角形 $ABCDE$ 各点映象到 Z 平面的 X 轴上。 z 平面上的 B 点对应 Z 平面上的 B' 点 ($Z_1 = 0$)； z 平面上的 C, D 点变换为 Z 平面上的 C' 及 D' 点 ($Z_2 =$

(1, 0)]。所以, 根据 (2-7) 式得:

$$\frac{dz}{dZ} = C(Z - Z_1)^{-\frac{1}{\pi}(-\frac{\pi}{2})} \cdot (Z - Z_2)^{-\frac{1}{\pi} \cdot \pi} \quad (2-8)$$

整理后得: $\frac{dz}{dZ} = C \frac{\sqrt{Z}}{Z-1}$ (2-9)

求变换函数, 令 $\sqrt{Z} = t$, 积分 (2-9) 式:

$$\begin{aligned} z &= \int dz = \int C \frac{\sqrt{Z}}{Z-1} dZ = C \int \frac{t}{t^2-1} \cdot 2t dt \\ &= 2C \int \frac{t^2-1+1}{t^2-1} dt = 2c \int dt + 2c \int \frac{1}{t^2-1} dt \\ &= 2ct + 2c \frac{1}{2} \ln(t-1) - 2c \cdot \frac{1}{2} \ln(t+1) \\ &= 2c(t + \frac{1}{2} \ln \frac{t-1}{t+1}) + C' \\ &= 2c(\sqrt{Z} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z}-1}{\sqrt{Z}+1}) + C' \end{aligned} \quad (2-10)$$

现在的问题是确定常数 C 及 C' 。适当选择 Z 平面上的某一点 $Z = \xi$ 与 z 平面的原点对应, 则 $C' = 0$ 。

常数的确定: 使 B 点 $\rightarrow B'$ 点, 即

$$\begin{aligned} -\frac{g}{2} &= 2c \left(\sqrt{Z} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z}-1}{\sqrt{Z}+1} \right) \Big|_{z=0} \\ &= 2c \cdot \frac{1}{2} \ln(-1) = c \cdot (-\pi j) \\ \therefore C &= \frac{jg}{2\pi}; C' = 0 \end{aligned} \quad (2-11)$$

将 C 值代入 (2-10), 即可求出 $\xi = 1.42$ 。

至此, 得到所求的变换函数或映象函数 (Mapping Function):

$$z = \frac{jg}{\pi} \left(\sqrt{Z} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z}-1}{\sqrt{Z}+1} \right) \quad (2-12)$$

其次, 使用同样的 $S-C$ 变换, 可将 $W = U + jV$ 平面 (图 2-4) 映象到 Z 平面上。变换式为:

$$\frac{dW}{dZ} = C' (Z-1)^{-\frac{\alpha'}{\pi}} = C' (Z-1)^{-1} \quad (2-13)$$

求积分得:

$$W = C' \ln(Z-1), W = U + jV$$

当 $Z = 0$ 时, $W = \frac{I}{2}$; 由此可得出常数 C' 的值, 结果得到如下的变换函数:

$$W = \frac{I}{2\pi} \ln(Z-1) \quad (2-14)$$

把 W 平面变换到 Z 平面: W 平面上的 $V = 0$ ($D''E''$ 映射为 Z 平面上的 $D'E'$; W 平面上的 $V = \frac{1}{2}I$ ($A''C''$) 映射为 Z 平面上的 $A'C'$ 。一般地说, W 平面上的的一条直线, 譬如说

$V = V_0$ 的直线，映射到 Z 平面后，即为通过 $C' (1, 0)$ 点并与 X 轴成角度 $\theta = \frac{2\pi V_0}{I}$ 的直线。

从 (2-12) 式及 (2-14) 式消去 Z ，便可得到要求的变换：

$$\frac{dW}{dz} = -\frac{jI}{g} \frac{1}{\sqrt{Z}} \quad (2-15)$$

另一方面，应用 Cauchy—Rieman 定理 (2-5 式) 得：

$$\frac{dW}{dz} = \frac{\partial V}{\partial y} + j \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2-16)$$

所以

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -\frac{\partial V}{\partial x} = -\operatorname{Im} \left(\frac{dW}{dz} \right) \\ H_y &= -\frac{\partial V}{\partial y} = -\operatorname{Re} \left(\frac{dW}{dz} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-17)$$

由 (2-12) 式及 (2-14) 式用作图或者数值解的方法，可以得到理想环形磁头在缝隙附近的等磁势线（实线）、磁力线（实线）及等磁场线（虚线）。图 2-5 给出计算的结果。[3, 7]

同理，用 (2-12) 式、(2-5) 式及 (2-17) 式可以计算出磁头缝隙附近的磁场分布，即 $H_x(x, y)$ 及 $H_y(x, y)$ （如图 2-6 所示）。由图看出，在磁头缝隙的尖锐边缘处 ($y=0, x=\frac{1}{2}g$)，磁场趋于无穷大，实际上，对于实际磁头没有什么意义，因为只有在 $y \leq g/10$ 时才出现这种情况。而实际磁头的缝隙不可能呈直角形。

图 2-7 给出理想环形磁头缝隙附近的等磁场强度线。

现在让我们讨论一下两个极端条件下的磁场分布：

$$(1) U/I \ll -1 \text{ 的场合: } |Z-1| = |e^{2\pi W/I}| \ll 1$$

计算给出：

$$z \approx \frac{jg}{\pi} (1 - \ln 2 + \pi W/I),$$

即

$$x + jy \approx \frac{jg}{\pi} (1 - \ln 2 + \pi W/I)$$

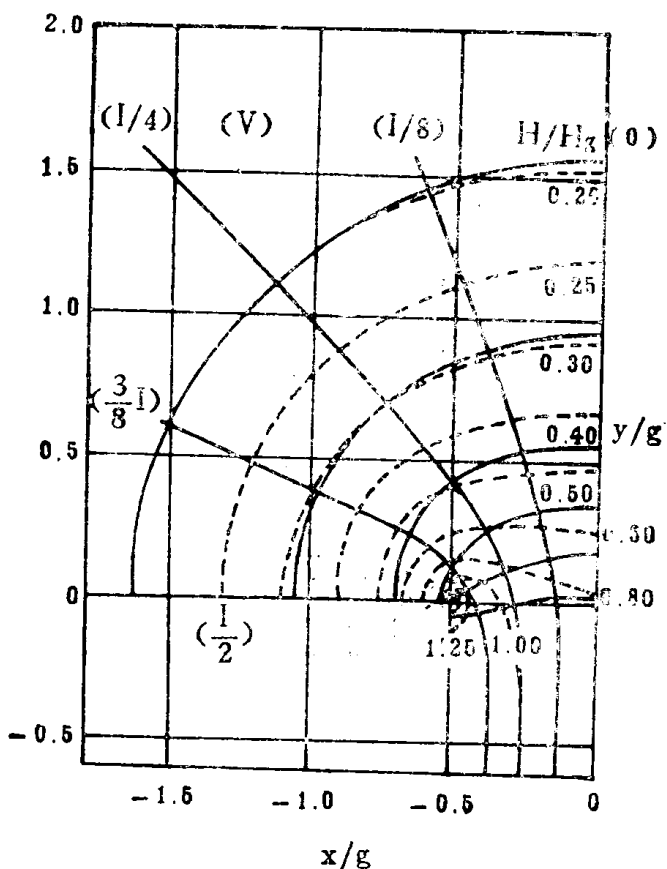


图 2-5 理想环形磁头缝隙附近的等磁势线、磁力线及等磁强度线（虚线）

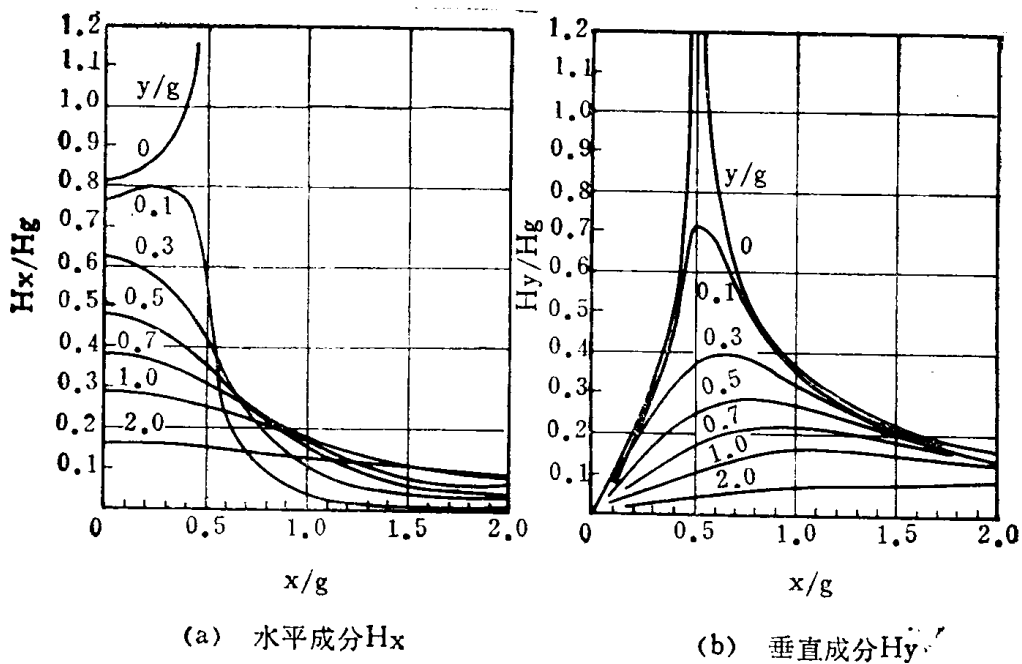


图 2-6 理想环形磁头缝隙附近的磁场分布 (第一象限的部分, 取 $H_g = 1/g$)

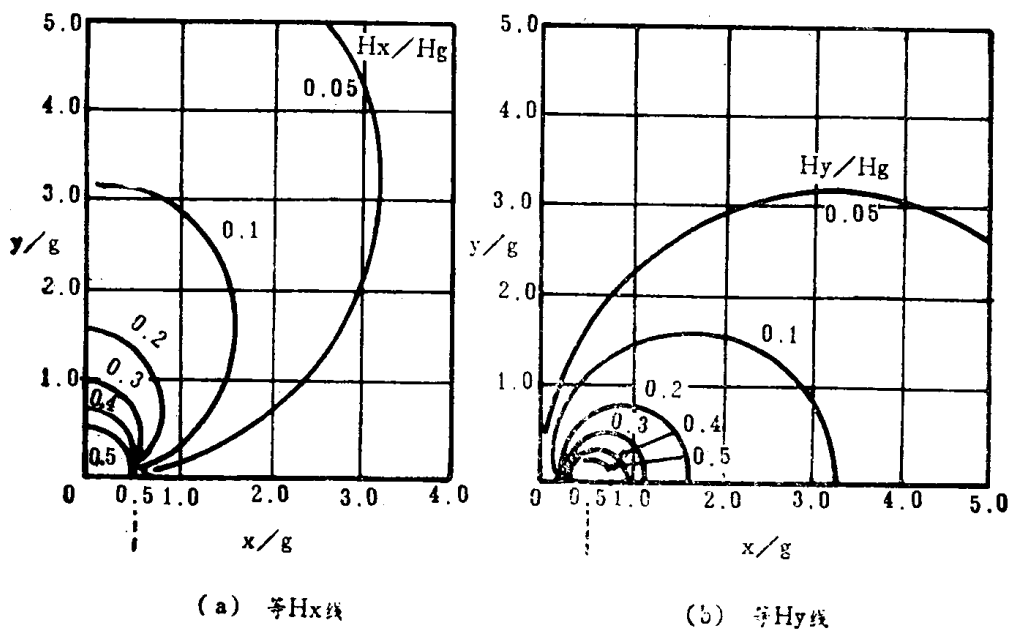


图 2-7 理想环形磁头缝隙附近的 H_x 及 H_y 的等值线

所以

$$\left. \begin{aligned} V &\approx -\frac{I}{g}x \\ y &\approx \frac{g}{I}U \end{aligned} \right\} \quad (2-18)$$

因为, $y \approx \frac{g}{I}U$, 而 $U/I \ll -1$, 这正好给出磁头缝隙深处的解。该处的等磁势线为平行于缝隙边缘的直线, 而磁场强度 $H_g = I/g$ 。

(2) $U/I \gg 1$ 的场合:

$$Z-1 = e^{2\pi W/I} = e^{2\pi U/I} \cdot e^{j2\pi V/I}$$

若 $U/I \gg 1$, 则 $Z-1 \approx Z = e^{2\pi W/I}$

所以 $z \approx \frac{jg}{\pi} \sqrt{Z} = \frac{jg}{\pi} e^{\pi U/I} \cdot e^{j\pi V/I}$

即 $x + jy \approx \frac{jg}{\pi} e^{\pi U/I} \left[\cos \frac{\pi V}{I} + j \sin \left(\frac{\pi V}{I} \right) \right]$

$$\left. \begin{aligned} x &= -\frac{g}{\pi} e^{\pi U/I} \sin \frac{\pi V}{I} \\ z &= \frac{g}{\pi} e^{\pi U/I} \cos \frac{\pi V}{I} \end{aligned} \right\} \quad (2-19)$$

$$\left. \begin{aligned} x^2 + y^2 &= \left(\frac{g}{\pi} e^{\pi U/I} \right)^2 \\ V &\approx -\frac{I}{\pi} \arctan \frac{x}{y} \end{aligned} \right\} \quad (2-20)$$

所以说在远离缝隙的区域, 磁头的等势线为放射状的直线; 而磁力线为半径 $r_0 = \frac{g}{\pi} e^{\pi U/I}$ 的半圆形。

二、磁头场分布的近似表达式

实际磁头的磁场分布与很多因素有关。譬如磁头结构(磁头芯的几何形状及尺寸), 磁头材料的磁性等, 对于特定的磁头, 可以用电子计算机数值求解其磁场分布。这样得到的结果虽然很精确, 但不能用简单的解析式表达。在磁记录原理的研究中, 为了解析记录过程中磁记录介质中的磁化分布; 重放电压的波形及幅值等, 若用比较简单的磁头场分布的解析表达式。则结果直观、易懂。因此, 往往采用磁头场分布的近似表达式, 最常用的有下述两种:

1. Karlqvist公式^[4] 除假设磁头为理想磁头(图2-2)外, 对于边界条件(2-3)式作进一步地简化, 认为磁头缝隙附近, $y=0$ 时, 在 $-g/2 \leq x \leq g/2$ 的区域内磁势 $V(x, 0)$ 与 x 成正比。即求解下述方程组:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (2-2)$$

在 $y=0$ 的界面上: $V = I/2 \quad (x < -g/2)$

$$V = -I \frac{x}{g/2} \quad (-g/2 < x < g/2)$$

$$V = -I/2 \quad (x > g/2)$$

(2-21)

用格林函数的方法^[8,9]求解上式中的磁势 $V(x, y)$ 。

从向量分析知,

$$\int_{\tau} \nabla \cdot \mathbf{A} d\tau = \int_s A_n ds$$

若令 $\mathbf{A} = \psi \mathbf{B}$ (ψ 为标量; $\mathbf{B}$ 为向量, 一、二级微商连续)。

$$\text{代入上式得: } \int_{\tau} (\psi \nabla \cdot \mathbf{B} + \mathbf{B} \cdot \nabla \psi) d\tau = \int_s \psi B_n ds$$