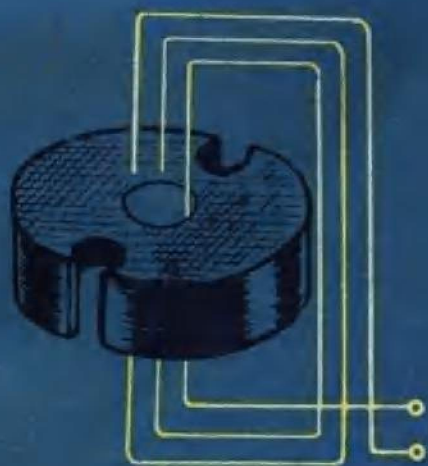


铁氧体磁芯

V. W. 卡姆普曲克 E. 勒斯 著



科学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍软磁铁氧体磁芯及线圈的设计、计算与应用。全书共分五章。第一章概括地叙述磁学基础理论；第二章论述材料的性能；第三章介绍磁芯与线圈的结构；第四章是本书的重点，列举了大量的应用及设计实例；第五章附录。本书所涉及的理论既阐述得精辟准确，又省略了繁琐的公式推导，使读者一目了然。书中的实际应用部分包括了软磁铁氧体各方面的主要内容，具有很大的实际参考价值。本书可供铁氧体制造厂的工程技术人员、有关科研单位的研究人员及高等院校有关专业的师生参考。

Von Wolfgang Kampezyk und Erich Röß

FERRITKERNE

Siemens Aktiengesellschaft, 1978

铁 氧 体 磁 芯

V. W. 卡姆普曲克 E. 勒斯 著

冯怀涵 沈执良 池玉清 译

郭贻诚 校

责任编辑 李义发 姚为克

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986 年 5 月第 一 版

开本：787×1092 1/32

1986 年 5 月第一次印刷

印张：17 1/2

印数：精 1—1,200

插页：精 2

平 1—1,000

字数：400,000

统一书号：13031·3153

本社书号：4758·13—3

定价：布脊精装 4.70 元
平 装 4.10 元

译 者 的 话

自从铁氧体问世以来,这种高频磁性材料的发展很快,尤其作为电感线圈芯子的软磁铁氧体磁芯的发展更为迅速,品种也最多,用途最广,且性能也较复杂。随着我国电子工业的快速发展,从事于研制铁氧体的科技队伍越来越大,许多科技人员和技术工人急切希望有一本关于软磁铁氧体方面的专门著作作为工作中的参考用书。为此,译者将西门子公司 Röss 博士赠送的《铁氧体磁芯》一书翻译过来,介绍给广大读者。本书对有关铁氧体磁芯方面的磁学理论及实际应用,都做了全面系统的阐述,书中还引用了大量的数据与图表。此书内容丰富,图文并茂,可谓是一本集软磁铁氧体之大成的好书。这样的书在国内还是第一本。我们希望此书的出版能对我国铁氧体的研制、应用与推广起到进一步的促进作用。

本书是由冯怀涵、沈执良、池玉清三人合作翻译而成。全书由郭贻诚教授作了认真仔细的校阅。此外在本书的翻译过程中,还得到许多同志的帮助,在此一并致谢。

限于译者水平,文中难免有错误之处,敬请广大读者批评指正。

译 者

序 言

电感元件,一般由铁氧体磁芯和绕在磁芯上的线圈组成,近年来在通信技术的许多领域里日益具有重要意义。铁氧体磁芯的用途日益扩大的原因是,除对电子元件需要量日益递增以外,还由于处在不断发展的磁芯型谱中涌现出许多更优良的材料,而且使用者越来越信赖这种材料。本书将有助于读者更深入地了解这个重要领域,更充分地发挥现有的一切潜力,同时更清楚地看到采用有铁氧体磁芯的线圈比无磁芯线圈,在现在以及将来都优越得多。

本书综述了下列各部分,如磁学基础,材料学,线圈结构及其应用,特别是高磁导率铁氧体领域的应用。对基础理论感兴趣的读者,可以概括地了解有关高磁导率铁氧体的重要性质以及材料发展的最新情况,此外还可以了解到应用的可能性。对于使用者,除了能使他们加深磁芯材料的知识之外,还可向他们提供选择电感元件最佳参数的基本方法。

在本书编辑工作中,Kornetzki 博士提出了许多宝贵意见,对此表示感谢。我们的合作者: I. Hanke 博士、H. Capellmann 博士、H. Haudek 博士、H. Hebbeker 先生、P. Jiru 先生、H. Löbel 先生、M. Zenger 先生以及 E. Metschl 博士审阅了手稿,并提出了一些宝贵建议,借此机会,表示衷心感谢。

著 者

目 录

第一章 基础

§ 1.1 引言	1
§ 1.2 磁场	3
1.2.1 磁场强度与磁感应强度	3
1.2.2 极化	5
1.2.3 磁力线	6
1.2.4 环路定律(麦克斯韦第一方程)	9
1.2.5 磁感应定律(麦克斯韦第二方程)	10
1.2.6 磁场能量	12
1.2.7 退磁因子	13
§ 1.3 铁磁性与亚铁磁性	18
1.3.1 基元磁矩	18
1.3.2 磁有序化	20
1.3.3 能量考虑	25
1.3.3.1 交换能	26
1.3.3.2 磁晶各向异性	28
1.3.3.3 磁致伸缩	30
1.3.3.4 磁场能	32
1.3.4 磁畴结构	36
1.3.4.1 布洛赫畴壁的厚度与畴壁能	43
1.3.4.2 外斯畴的宽度	45
§ 1.4 铁氧体	48
1.4.1 分类	48
1.4.2 铁磁尖晶石的结构	52

§ 1.5 铁氧体磁芯的制造	56
1.5.1 铁氧体结构	56
1.5.2 粉料制备	58
1.5.3 成型	61
1.5.4 烧结	63
第二章 材料性能	
§ 2.1 结构不敏感性能	68
2.1.1 自发极化和饱和极化	68
2.1.2 居里温度	75
§ 2.2 起始磁导率	79
2.2.1 电感和磁导率	79
2.2.2 磁畴转动过程和畴壁位移过程	82
2.2.3 NiZn 与 MnZn 铁氧体的起始磁导率	88
2.2.4 温度稳定性与时间稳定性	95
2.2.4.1 定义	98
2.2.4.2 温度系数	101
2.2.4.3 减落系数	117
2.2.5 复数磁导率	129
§ 2.3 损耗因数	132
2.3.1 等效电路图	133
2.3.2 损耗因数的频谱	140
2.3.3 后效损耗	145
2.3.4 自旋弛豫与旋磁共振	154
2.3.5 涡流损耗	158
2.3.6 尺寸共振	162
2.3.7 截止频率	165
2.3.8 铁氧体的损耗因数	167
§ 2.4 磁滞	171
2.4.1 磁滞回线的各种特性参数	171
2.4.2 可逆与不可逆磁化过程	176

2.4.3 瑞利区	183
2.4.3.1 磁滞公式	183
2.4.3.2 普赖沙赫 (Preisach) 图解	190
2.4.3.3 磁滞系数、磁滞损耗	196
2.4.4 巨明伐效应与等导磁效应	202
2.4.5 铁氧体的磁滞系数	212
2.4.6 偏磁化	218

第三章 磁芯与线圈结构

§ 3.1 磁芯类型	229
3.1.1 单件闭路磁芯	230
3.1.2 多件闭路磁芯	235
3.1.3 开路磁芯	246
§ 3.2 几何数据	249
3.2.1 磁芯有效尺寸	249
3.2.2 绕组数据	256
§ 3.3 开气隙	257
3.3.1 开气隙磁芯的退磁因子与磁滞回线	258
3.3.2 有效磁导率	261
3.3.3 损耗、非线性失真因数、干扰电压	265
3.3.4 磨加工质量与剩余空气隙宽度	272
§ 3.4 电感的调节	274
3.4.1 罐形磁芯的调节杆	276
3.4.2 磁芯部分的轴向移动	286
3.4.3 单只磁芯的转动	289
3.4.4 磁控可变电感器	297

第四章 应用和参数选择举例

§ 4.1 谐振回路线圈	305
4.1.1 温度补偿	307
4.1.2 在工作条件变化下的稳定性	318
4.1.3 线圈的品质因数	325

4.1.3.1	铁氧体损耗与铜损耗	326
4.1.3.2	空气隙的影响	333
4.1.3.3	绕组内的位移电流	336
4.1.4	非线性失真	342
§ 4.2	加感线圈	349
4.2.1	加感线圈的工作原理	349
4.2.2	线圈的参数选择	354
4.2.3	线圈组	358
§ 4.3	磁芯尺寸和线圈性能的关系, 最佳磁芯形状	360
4.3.1	高品质因数线圈	361
4.3.2	低非线性失真的线圈	370
§ 4.4	扼流圈	376
4.4.1	哈纳 (Hanna) 曲线	376
4.4.2	气隙度、绕组匝数与磁芯尺寸	379
4.4.3	电感的变化	385
4.4.4	磁芯材料	387
§ 4.5	变压器	392
4.5.1	功能	392
4.5.2	理想的变换器	394
4.5.3	磁化电流与漏磁通	398
§ 4.6	宽频带变压器	401
4.6.1	电感耦合的频带宽度	401
4.6.2	弱耦合的损失	406
4.6.3	磁滞与非线性失真因数	420
4.6.4	磁芯形状的影响	430
4.6.5	偏磁化	434
4.6.6	电容	439
§ 4.7	功率变压器	457
4.7.1	最大传输功率	457
4.7.2	磁感应幅度	465

4.7.3 频率范围	475
§ 4.8 脉冲变压器	478
4.8.1 脉冲顶部跌落与脉冲上升时间	479
4.8.2 脉冲序列	484
4.8.3 磁性材料的性能	495
4.8.4 尺寸的确定	501
4.8.5 测试方法	511
第五章 附录	
§ 5.1 磁芯几何数据 l_c 与 A_c 的计算	518
5.1.1 环形磁芯	518
5.1.2 罐形、E 形及其类似磁芯	519
§ 5.2 带空气隙的罐形磁芯在绕组中横向磁场损失的估算	524
§ 5.3 磁芯材料的性能与选择扼流圈最佳参数之间的关系	527
§ 5.4 变压器的磁回路	529
参考文献	535
常用符号	545
常用脚注符号	549
常数	549
单位	550

第一章 基 础

§ 1.1 引 言

磁芯线圈的外形结构虽然常常比较简单，但却是一个相当复杂的系统，它的性能依赖于许多参数。因此，一方面由于要在应用中了解与协调它们之间的关系，从而带来一定的困难，但另一方面也大大增加了能够与转换能力较低的元件性能相适应的可能性，这是其它无源元件所不具备的。

电感元件的变化范围决定于三个因素：磁芯物理化学结构，磁芯形状与尺寸以及线圈结构。由此可见，电感元件的电磁性能受流过线圈的电流与磁芯磁阻变化的影响。一般说来，它们还依赖于温度、频率和受机械影响。在一定环境条件下，电磁性能还随时间而变化。所以必须深入研究所有这些影响，并从它们复杂的相互关系中找出规律来，例如为了某些特定的应用，找出最佳的结果。由于电感元件不象电容器和电阻那样有现成的元件可供使用，而是先有磁芯，然后再用磁芯制成完整的线圈，因此这些工作显得特别重要。

这里所考虑的磁芯材料只限于在通信技术中占重要地位的高磁导率铁氧体材料；在应用实例方面，也只考虑那些能实际反映这些铁氧体特性的电感元件。这些元件所用的磁芯形状主要是闭合的，最多只开一个或几个窄空气隙。由于上述限制，这里涉及的材料性能大多数是有关锰锌铁氧体的，它是一种具有最高磁导率的铁氧体。另外，对于象磁头那种要求磁性能以外，主要考虑机械性能的应用范例，本书不作详细论述。

首先,本书第一章和第二章介绍了铁氧体的磁结构、磁性能与物理化学结构之间的关系,以及制造过程对性能的影响,从而向使用者指明会出现哪些基本困难,为什么要有如此庞大的铁氧体材料品种系列,为什么性能的分散是不可避免的。

第二章和第三章介绍铁氧体材料、磁芯和线圈的性能,为第四章探讨应用实例打下基础。本书前几章的许多论述是一般性的,不限于高磁导率铁氧体,但是所举的许多例子是以高磁导率铁氧体材料为主。例中没有给出磁芯与线圈性能的全面介绍,这些性能可以从制造厂家的产品目录中更详细地查出。

还需要指出的是,本书为了避免引起误解,在编写中尽可能按照标准化建议,并注意采用了 SI 单位制(国际标准单位制)^[HA1,WO2]。当有多种标准可供选用时,则采用国际上最常用的一种,例如采用 μ_i 作为起始磁导率的符号,而不用 μ_a 。那些对理解非绝对必要的符号都省略了。这里没有引入绝对磁导率;书中的 μ 都是指相对磁导率,它是一个比例值。

读者常常会由于见不到象高斯与奥斯特那样熟悉的单位而感到失望,但只要我们始终一致地采用近代单位制,便能逐步消除这个困难,否则如果采用不同的单位制倒会增加对磁学领域文献阅读和运算的困难。书中所有的公式都是有理化的数量关系方程^{1.1)}或简化的数量关系方程,当代入相应的 SI 单位制中的数值单位时便很容易算出。许多公式是从其它书上引用过来的,没有进行推导,因为详细的推导对于简单明了的论述极为不便。

本书汇集了基础工作与较新成果的报道,但并不着眼于

1.1) 在麦克斯韦方程中没有出现 4π 。当使用任意单位制时,只有始终将数值与单位的乘积当作量值才能得到准确的数据。

完备的叙述，其中西门子公司的同事所做的磁学与铁氧体领域的工作所占比重也许稍大些。这主要是因为西门子公司在高磁导率铁氧体方面做了大量工作。

关于铁磁学已有了一系列广泛的论著^[BE1, BO1, RA1, KN1, CH1]。在磁性材料和磁芯元件的性能方面也已经有不少著作^[FE1, HE1, SC1, TE1, RA2, ZI1]。自从 J. L. Snoek^[SN1] 专著最先出版以来，又有 J. Smit 与 H. P. J. Wijn^[SM1], E. C. Snelling^[SN2] 以及 S. Krupicka^[KR1] 专谈铁氧体的较为详细的著作。

§ 1.2 磁 场

带有磁芯的电感元件的性能主要来源于力的作用，即与流过线圈的电流交连的磁场施加于磁芯内部原子磁矩上力的作用，通过磁芯内部磁状态的改变而产生感应电压。

1.2.1 磁场强度与磁感应强度

数学上用矢量(既有方向又有大小的量)来描述磁场,通常用磁场强度 **H** 和磁感应强度 **B** 来表示.两者的关系可用方程

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H} \quad (1.2.1)$$

表示,在真空中可简化为

$$B_0 = \mu_0\mathbf{H}_0 \quad (1.2.2)$$

乘积 $\mu\mu_0$ 称为绝对磁导率，常数 μ_0 称为真空绝对磁导率(或叫磁感应常数)。在 SI 单位制中,磁场强度 **H** 的单位用安培/米 (A/m)，磁感应强度 **B** 的单位用特斯拉 ($1\text{T} \cong 1\text{Vs}/\text{m}^2$)，则式(1.2.2)中 μ_0 的单位便是伏特·秒/安培·米 (Vs/Am)。由于伏特·秒/安培是电感的单位亨，则 μ_0 的单位也可以是亨/米 (H/m)，

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H}/\text{m} \approx 1.257\mu\text{H}/\text{m}. \quad (1.2.3)$$

式(1.2.1)中的 μ 是一个纯数,它表示某种材料的磁导率比真空磁导率大多少($\mu < 1$).因此,人们称 μ 为相对磁导率或磁导率数.本书中的 μ 都是相对磁导率^{1,2)}.

人们按照磁导率的大小来区分磁性材料.抗磁材料的 μ 略小于1,例如水的 μ 为0.999918.在相同磁场强度下,抗磁材料中的磁感应强度比真空中的略小.顺磁材料的 μ 稍大于1,例如空气的 μ 为1.00000038.

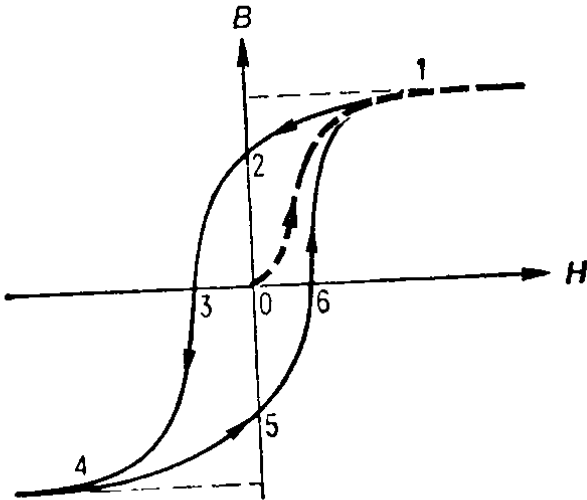


图 1.1 磁滞回线. B 为磁感应强度, H 为磁场强度,由 0 至 1 的曲线为初始磁化曲线.

抗磁物质和顺磁物质的磁导率与真空磁导率数值差别甚小,即使在工程技术中重要的场合,两者的差别也可忽略不计.

只有铁磁材料与亚铁磁材料的磁导率远远超过 1,最大可达 10^6 .它们不是常数,而是与磁场强度(外磁场)和材料本身的制造工艺有关.在这种情况下,必须精确地确定磁导率,

1.2) 两个相关矢量 B 与 H 不一定总是同方向的,因此常数 μ 不能用一个简单数值确定,即 μ 不是标量而是张量.当 B 与 H 同向,或只考虑它们的平行分量时,式(1.2.1)可简化为

$$B = \mu \mu_0 H, \tag{1.2.4}$$

其中 μ 为标量, B 与 H 表示 B 与 H 的绝对值.

并规定一种特定的测试方法，由此可以得出的一系列磁导率。

铁磁材料的磁感应强度与磁场强度的关系表现为磁滞回线(图 1.1): 从已退磁状态或初始状态(即 $B = H = 0$ 的点)出发, 当磁场强度 H 增加时, 磁感应强度 B 沿初始磁化曲线增大到上饱和值(点 1)。当磁场强度再增加时, 实际上磁感应强度不再增大。当磁场强度减小时, 磁感应强度总是大于初始磁化曲线上的相应值, 沿着磁滞回线的上支线减小。到 $H = 0$ (点 2) 时, B 仍有一正值(剩磁)。磁场强度再向反方向增加, 磁感应强度在达到矫顽力 H_c 点时下降为零值(点 3), 然后增大到下饱和值(点 4)。如果将磁场强度再增加, 则将沿着磁滞回线的下半部回行。

1.2.2 极化

$\mu > 1$ (对真空而言) 的材料的磁感应强度增大的原因是: 材料中原有的元磁体部分地或全部取向。所谓元磁体可以理解为无限小的磁偶极子, 它们具有相同强度的正负极性。用 m 表示磁极强度, 用 l 表示从负极到正极之间的距离, 则矢量

$$\mathbf{M} = m\mathbf{l} \quad (1.2.5)$$

定义为元磁体的磁矩。

磁极强度 m 的单位为韦伯 (Wb; $1 \text{ Wb} \cong 1 \text{ Vs}$), 磁矩的单位为韦伯·米 (Wbm)。

基元磁矩由原子中电子沿着闭合轨道运动和电子本身的自旋所产生。按照威·韦伯理论, 在一个磁偶极子中由这种电流形成的磁偶极矩为

$$\mathbf{M} = \mu_0 i A \mathbf{n}, \quad (1.2.6)$$

i 为环状电流, $A = r^2 \pi$, $\mathbf{n}$ 为平面法线方向的单位矢量。

在磁场强度为 $\mathbf{H}$ 的均匀磁场 (即在一定空间内方向和大

小都不变的磁场)中,磁矩为 $\mathbf{M}$ 的偶极子受到一个转矩 $\mathbf{N} = \mathbf{M} \times \mathbf{H}$, 其标量式为

$$N = MH \sin \varphi, \quad (1.2.7)$$

其中 φ 是矢量 $\mathbf{M}$ 与 $\mathbf{H}$ 之间的夹角.

转矩的单位为牛顿·米 (Nm ; $1 \text{ Nm} \cong 1 \text{ J/m} \cong 1 \text{ VAs/m}$). 由式 (1.2.7) 可知, 某一磁场作用于磁偶极子, 当垂直磁场方向 ($\varphi = 90^\circ$) 的磁矩为 1 韦伯·米, 产生转矩为 1 牛顿·米时, 该磁场的强度为 1 A/m .

当偶极子轴与磁场方向一致时 ($\varphi = 0$), 转矩消失, 故磁场有一个使偶极子转到磁场方向的倾向. 自由转动的偶极子轴指向磁场方向.

在磁场作用下, 磁性材料内各基元磁偶极子的取向磁学上导致出现宏观极化强度 $\mathbf{J}$. 它表示磁性材料样品在单位体积内各磁偶极矩的矢量和. 磁极化强度是材料中磁感应强度的组成部分; 即

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{J}. \quad (1.2.8)$$

磁极化强度的单位^{1.3)} (与磁感应强度的单位一样) 是特斯拉. 由式 (1.2.1) 与 (1.2.8) 可得

$$\mathbf{J} = \mu_0(\mu - 1)\mathbf{H}. \quad (1.2.9)$$

($\mu - 1$) 因子称为磁化率 κ , 它表示抗磁与顺磁材料的磁性特征. 高磁导率材料的 $\mu \gg 1$, 因此磁感应强度与磁极化强度的区别甚小, 可以忽略不计.

1.2.3 磁力线

人们常用磁力线或磁感应线描述磁场. 磁力线的画法如

1.3) 人们也经常用“磁化强度”代替“磁极化强度”, 将式 (1.2.8) 变换成 $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J}/\mu_0)$, 然后代入 $\mathbf{J}/\mu_0 = \mathbf{M}$, $\mathbf{M}$ 的单位是 A/m . 为了避免混淆, 本书只采用“磁极化强度”.

下：线的密度与磁场或磁感应强度的大小成正比；空间磁力线上任一点的切线方向表示该点的磁场强度的方向。

在磁性材料外面，磁力线与磁感应线的图形是相同的，因为两者的值只相差一个比例因子 μ_0 。但是，在一个不均匀或者不闭合的磁芯内部，磁力线与磁感应线的走向则是不同的。

磁感应线总是闭合的，在矢量场中没有起点或终点，这一事实十分重要。这样的场称为无源场，用矢量分析来表示，就是

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (1.2.10)$$

由上式与式 (1.2.8) 可知磁场强度为有源场，即

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = -\frac{1}{\mu_0} \operatorname{div} \mathbf{J}. \quad (1.2.11)$$

上式的意义由图 1.2(a) 可以看出：磁极化强度的进口处是磁场强度的发源处，换句话说，磁力线的出口是磁极化线的入口。人们把磁场强度发出端叫做正极或北极，把磁场强度的进入端叫做负极或南极。在真空中或在一均匀材料内，若各处截面上的磁力线均相等[如图 1.2 (b) 所示]，则磁力线是无源的。

当由磁导率为 μ_1 的介质过渡到磁导率为 μ_2 的介质时，磁力线的方向会发生突变或叫折射（见图 1.3），并适用磁折射定律^{1.4)}

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (1.2.12)$$

式中 α_1 与 α_2 是磁力线或磁感应线与介质 M_1 和 M_2 的交界面

1.4) 在每个界面上必须满足 $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ 与 $\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0$ 的条件（因为 $\mathbf{B}$ 是无源的， $\mathbf{H}$ 是无旋性的），即 H 的切线分量 H_1 与 B 的法线分量 B_n 必须不变。因为 $B = \mu H$ 则 $H_1 \sin \alpha_1 = H_2 \sin \alpha_2$, $\mu_1 H_1 \cos \alpha_1 = \mu_2 H_2 \cos \alpha_2$. 由此可得到方程 (1.2.12)。

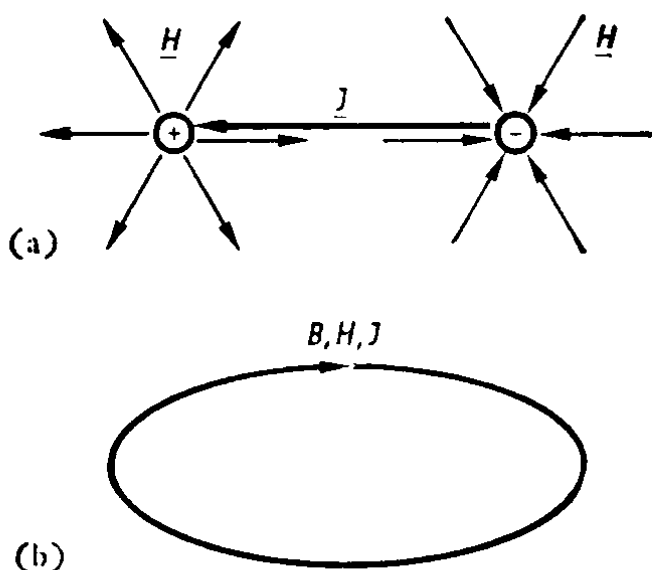


图 1.2 磁力线.

- (a) $\text{div} \underline{J} \neq 0$ 时, 磁力强度 $\underline{H}$ 与磁极化强度 $\underline{J}$ 的出口与入口;
 (b) $\text{div} \underline{J} = 0$ 时, 均匀材料内的闭合线.

法线间的夹角.

根据式 (1.2. 12), 高磁导率材料的磁力线或磁感应线总是几乎垂直地进入到非磁性材料里去. 例如在磁导率 $\mu = 1000$ 的材料中, 如果磁力线与界面仅偏差 1° , 则出射角已是 87° .

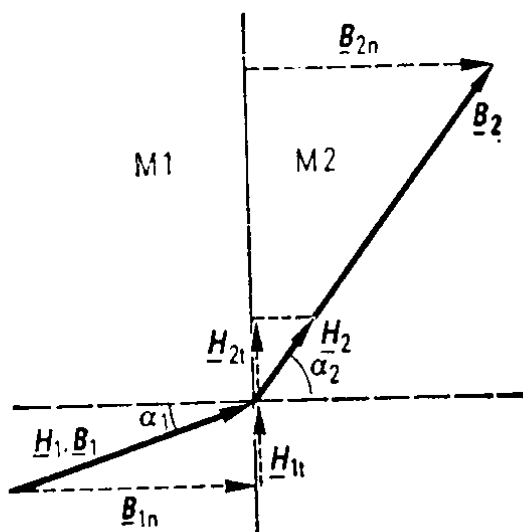


图 1.3 M_1 与 M_2 两介质的交界面上磁场线与磁感应线折射.
 $M_1: \mu_1; M_2: \mu_2 (\mu_2 = 4\mu_1)$.