

高等学校教材

磁 性 物 理

宛德福 罗世华 编

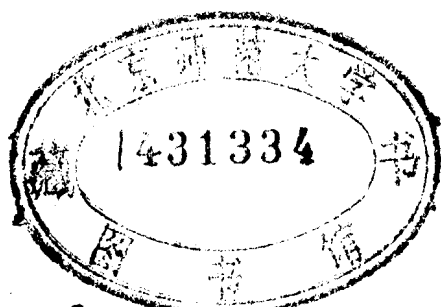


电子工业出版社

磁性物理

宛德福 编著
罗世华

2011/201/07



电子工业出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了磁性物理的基本理论。主要阐明:物质的磁性起源,铁磁性、亚铁磁性等磁性现象和本质,铁磁物质的静态磁化和动力学磁化过程,旋磁性与铁磁共振的基本理论。论述中主要强调物理概念的解释,重要的基本公式作了推导。根据理论就改善铁磁材料的性能及其应用进行了讨论。全书共分八章,每章末附有习题。

本书为高等工科院校“磁性物理与器件专业”本科生教材,亦可供教师、研究生和科技人员参考。

磁 性 物 理

宛德福 编著
罗世华

责任编辑 晓耕

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
吴江县伟业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 23 字数: 531 千字

1987年4月第一版 1987年4月第一次印刷

印数: 1—2600册 定价: 3.80元

统一书号: 15280·493

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》及中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构,并制定了一九八二年~一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系由《电子材料与器件》教材编审委员会审定,并推荐出版。

此书由华中工学院宛德福和成都电讯工程学院罗世华合编著,南京大学翟宏如担任主审。编审者均依据《电子材料与器件》教材编审委员会磁性物理与器件专业编审小组审定的编写大纲进行编写和审定的。

《磁性物理》是《磁性物理与器件》专业的一门主要专业基础课,参考教学时数为90学时,其主要内容为:绪论,磁场与物质磁性基础,抗磁性和顺磁性,自发磁化理论,铁磁体中的能量,磁畴结构,技术磁化,铁磁物质在交变磁场中的磁化过程,旋磁性与铁磁共振等。全书共分八章,每章末附有习题。论述的起点是:学生已具有高等数学,量子力学,原子物理,电磁理论,统计物理,固体物理等基础理论知识。全书主要强调基本理论和物理概念的解释,目的是给出各种磁性现象及规律的理论和物理模型,为深入研究磁性材料与器件及其工程应用打下基础。使用本书作教材时,教师可根据实际学时数进行适当选择。

本书由宛德福编著绪论,一、二、三和第八章,罗世华编著第四、五、六、七章。作者自知弩钝,笃信谬误难免,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

于一九八五年春

目 录

结 论

- 1 磁性研究简史.....1
- 2 磁性物理的基本内容.....4
- 3 磁性的应用.....5

第一章 物质磁性基础.....8

- 1.1 磁场、磁矩及其相互作用.....8
- 1.2 磁体的磁化.....13
- 1.3 物质磁性分类.....20
- 1.4 磁性现象的热力学关系.....24
- 1.5 原子的磁矩.....26
- 1.6 回旋磁效应.....33
- 习题一.....35

第二章 抗磁性和顺磁性.....36

- 2.1 抗磁性的半经典理论.....36
- 2.2 抗磁性的量子力学理论.....38
- 2.3 朗之万(Langevin)顺磁性理论.....41
- 2.4 顺磁性的量子力学理论.....45
- 2.5 稀土及铁族元素的有效玻尔(Bohr)磁子.....47
- 2.6 晶体场效应.....49
- 习题二.....55

第三章 自发磁化理论.....56

- 3.1 自发磁化.....56
- 3.2 外斯(Weiss)分子场理论.....57
- 3.3 反铁磁性的定域分子场理论.....61
- 3.4 亚铁磁性的基本理论.....68
- 3.5 直接交换作用.....84
- 3.6 超交换作用.....90
- 3.7 低温自旋波理论.....92
- 3.8 铁磁性的能带理论模型.....95
- 3.9 RKKY 作用.....96
- 习题三.....99

第四章 铁磁体中的能量.....101

- 4.1 铁磁体内的各种相互作用能.....101
- 4.2 交换能.....101
- 4.3 磁晶各向异性能.....104
- 4.4 磁致伸缩.....119
- 4.5 磁弹性能.....131

- 4.6 静磁能.....135

- 习题四.....140

第五章 磁畴结构理论.....142

- 5.1 磁畴的起源.....142
- 5.2 磁畴壁的结构.....145
- 5.3 均匀铁磁体的磁畴结构.....158
- 5.4 非均匀铁磁体的磁畴结构.....163
- 5.5 单畴结构.....166
- 5.6 薄膜的磁畴结构.....171
- 习题五.....180

第六章 技术磁化理论.....182

- 6.1 磁化过程的概述.....182
- 6.2 畴壁位移磁化过程.....186
- 6.3 磁畴转动磁化过程.....198
- 6.4 起始磁化率理论的应用.....204
- 6.5 不可逆磁化过程.....206
- 6.6 磁化曲线的计算.....212
- 6.7 磁滞——反磁化过程.....221
- 6.8 剩余磁化.....234
- 6.9 永磁性.....241
- 6.10 矩磁性.....248
- 习题六.....258

第七章 铁磁物质在交变磁场中的磁化过程.....259

- 7.1 动态磁化曲线和磁滞回线.....259
- 7.2 动态磁性参数.....262
- 7.3 磁化时间效应.....267
- 7.4 磁损耗.....268
- 7.5 涡流损耗.....271
- 7.6 磁滞损耗.....277
- 7.7 磁后效.....280
- 7.8 磁化矢量的运动方程.....290
- 7.9 畴壁位移引起的频散和损耗.....293
- 7.10 磁畴自然共振引起的频散和损耗.....300
- 7.11 磁谱.....305
- 7.12 尺寸共振和磁力共振引起的频散和损耗.....307
- 习题七.....308

第八章 旋磁性与铁磁共振.....310

8.1	张量磁导率 μ	310
8.2	正负圆偏振波磁场下的磁导率	316
8.3	旋磁材料中电磁波的传播	318
8.4	铁磁共振线宽	321
8.5	铁磁体中的自旋模式	325
8.6	一致进动共振	327
8.7	非一致进动	338

8.8	高功率现象与理论	351
习题八		359

主要参考书		360
-------	-------	-----

附录一	常用物理常数	361
-----	--------------	-----

附录二	磁学主要公式	361
-----	--------------	-----

附录三	磁学量单位及其换算	362
-----	-----------------	-----

绪 论

1 磁性研究简史

物质的磁性约在三千多年前就受到注意了^[1]。关于磁性的最早记载,中国的《管子·地数篇》中云:“……上有慈石者,下有铜金”。《管子·地数篇》是管仲(公元前?~645年)和他以后学者等的著作。稍后,《吕氏春秋·精通篇》里对磁石吸铁的性能作了栩栩如生的描述:“慈石召铁,或引之也”。我国古籍中的“慈石”,即现代的磁铁矿。欧洲对磁石的最早记载是希腊台利斯(Thales)的著作,约在公元前600年,迟于管仲的时代。

中国是最先将磁体作为实际用途的国家^[2]。从文献来看,大概在公元前四世纪,我国古人利用磁石制成了世界上最早的指南工具——“司南”,司南就是掌握方向的意思。在《鬼谷子》这部书中记载:“郑人取玉,必载司南,为其不惑也”。《论衡》一书里更明确地指出,“司南之杓,投之于地,其柢指南”。指南针的前身就是“司南”。从司南到指南针的发明,虽无确切年代,但完全可以说,中国在很早的时候就有了指南针的发明。十一世纪中期,北宋杰出自然科学家沈括的《梦溪笔谈》,不仅记载了指南针的制法,而且还总结了应用方法。书云“方家以磁石磨针锋,则能指南,……水浮多荡摇,指爪及碗唇上皆可为之,运转尤速,但坚滑易坠,不若缕悬之最善。其法取钅中独茧缕,以芥子许蜡,缀于针腰,无风处悬之,则针常指南”^①。这是磁性应用的最早记载。以后,航海事业上用的罗盘,就是在指南针的基础上改进的。

磁学史上,第一部磁学专著是英国吉耳伯特(W·Gilbert)著的《论磁石》(“De Magnete” 1600年),在这部名著里介绍了那时已知有关的磁性知识。然而,磁性作为一门科学,实际上到十八世纪后期,特别是十九世纪前半期才开始发展,相继出现关于磁性的各种实验和理论研究。例如,库仑在1785年提出“磁流体”假设,用来解释长细钢杆上的磁极之间的力的作用现象。虽然这种解释不正确,但磁的库仑定律却成为磁学的出发点。丹麦物理学家奥斯特在1820年发现电流的磁效应,拉开了磁与电之间联系的序幕。而法国物理学家安培也于1820年末,证明了通以电流的圆形线圈和普通磁铁一样有相同的吸引和排斥作用,并在1825年提出著名的“分子电流”假说。“分子电流”假说是以电流和磁体等效性为基础,以定性的形式说明磁性来源于纯电流取向;它预言了原子和物质的磁性的现代电子理论,成为磁学的理论基础,对磁学的发展起了推动作用。到了1831年,伟大的英国科学家法拉第发现了电磁感应定律,从而揭示出电与磁之间的内在联系。法拉第首先用了“磁场”这一名词,指出变化着的电场与磁场是永远相互联系的,动电生磁,动磁生电。后来,苏格兰物理学家麦克斯韦在前人工作和自己发现位移电流的基础上,将这种联系建立了严密的电磁场理论。麦克斯韦发展了法拉第的思想,并用数学形式揭露了电场和磁场的联系,建立起著名的麦克斯韦方程。洛伦兹(Lorentz)考虑到物质的电子结构,进一步发展了麦克斯韦的理论,解释

① 《梦溪笔谈》卷廿四杂志一 •437

了原子谱线在磁场中的分裂,这种分裂是塞曼(Zeeman)发现的。电子在外磁场中的进动即拉莫(Larmor)定理,对证明原子磁性具有重大的意义。

与上述一般磁性理论发展的同时,磁现象物理学中的许多专题亦在进行研究。例如,1845年法拉第确定了抗磁性和顺磁性的存在,居里(Curie)对抗磁性、顺磁性的温度关系进行了广泛的实验研究,到1905年,朗之万(Langevin)利用拉莫定理和洛仑兹电子理论对抗磁性和顺磁性现象作出了解释。

对铁磁体的磁性进行系统研究是从俄国物理学家斯托列托夫(Stoletov)测定铁的磁化工作开始的。那时,人们被铁磁金属可以存在稳定退磁状态的机构问题迷惑不解,对已磁化的材料如何在适当磁场的影响下完全退磁是不清楚的。为了解释铁磁体的磁性,俄国物理学家罗辛格(Rozing)于1892年首先提出铁磁体内可能存在“局部磁势”的假说,其后,法国物理学家外斯(Weiss)于1907年,根据朗之万的顺磁性理论,第一次成功地建立起铁磁性现象的物理模型。外斯的理论是以两个假说为基础,第一个假说认为,铁磁体在温度从绝对零度到临界温度(居里温度)范围内有自发磁化强度,并且与外磁场无关。然而,不存在外磁场时,整个铁磁体在居里点以下始终是退磁状态。这就导致外斯的第二个假设,即不存在外磁场时,居里点以下的铁磁体内,自发磁化分成小区域——磁畴,每个磁畴内自发磁化到饱和,磁化强度在大小和方向上都保持恒定,但各个磁畴之间的磁化强度的方向是不同的,铁磁体的总磁矩为零,只有当外磁场存在时,磁畴的磁化矢量调整自己往外磁场取向,构成铁磁体非零的总磁矩。由以上两个假说构成的外斯理论称为“分子场”理论,它是现代铁磁理论的基础。从此,现代铁磁理论在以下两方面发展:第一,自发磁化理论。这是解释磁有序起源为中心的微观相互作用的理论,第二,磁畴与技术磁化理论。这是解释铁磁体与外加磁场作用后表现出宏观物理性能的理论。

铁磁体自发磁化的物理本质是在量子力学发展以后才得到解释的。1928年弗仑克耳(Frenkel)首先用集体模型和海森堡(Heisenberg)首先用局域-自旋模型,系统地阐述了铁磁性的量子理论^{[3][4]},说明分子场来源于电子间的静电性交换作用。铁磁性金属和合金的集体模型,后来由布洛赫(Bloch)^[5]、斯东纳(Stoner)^[6]、莫特(Mott)^[7]、斯莱特(Slater)^[8]和沃尔法斯(Wohlfarth)^[9]等人进一步发展;局域-自旋模型由布洛赫^[10]、范弗列克(Van Vleck)^[11]和霍耳斯坦-普里马科夫(Holstein and Primakoff)^[12]等人进一步发展。总之,有关铁磁性起源的理论,随着各种磁有序材料及固体理论的进步而发展。对于3d过渡族金属的铁磁性,局域电子论和集体电子论争论了数十年,最近,有人提出了自旋涨落^[13],打开了向统一理论发展的局面,使过渡族金属的磁性理论成为十分活跃的领域,这方面的研究工作正在发展之中。对于稀土金属的磁性,发展有RKKY相互作用理论,把稀土金属的4f电子当作局域电子看待,在其中起着作用的是将传导电子作为媒介的间接交换相互作用。对于亚铁磁性的化合物,例如铁氧体,超交换作用理论给予了满意的解释。在发展亚铁磁性的理论方面,法国物理学家奈耳(Néel)^[14]作了杰出的贡献。

在研究铁磁体的磁性能方面,本世纪初不过是磁畴假说,而现在关于磁畴的形成及其运动变化的现象已经获得大量实验验证和理论阐述。最早从理论上探讨磁畴问题的是苏联的弗仑克耳和多尔弗曼(Frenkel and Dorfman)^[15],他们在1930年定量地证明了“磁畴的出现是由于在有限大小的物体中的交换力同磁力之和取最小值的结果”。毕特(Bitter)^[16]和阿库洛夫(Akulov)^[17]分别用粉纹法从实验上证实磁畴的存在。定量的铁磁理论,由朗道

和里弗西兹(Landau and Lifshits)^[18]于1935年建立起来。他们从铁磁晶体的简单模型推算出磁畴结构,从而给磁畴理论奠定了坚实基础。磁畴的存在,乃是自发磁化的分布满足平衡状态下总自由能达到极小值的必然结果;技术磁化过程由畴壁位移和磁畴转动来实现,这给技术磁化过程作出原则性的解释。

从理论角度看,作为基本概念的磁畴和畴壁是以假设的形式引入的,而且,自由能极小原理是在假定形成磁畴结构的限制下应用。所以,磁畴理论的体系是不完善的。同时,在计算磁畴结构时,磁畴理论很难给出精确的定量结果。为了克服上述困难,本世纪四十年代,一些物理学者发展了直接由铁磁体系内磁化矢量运动和平衡方程式求解的理论——微磁化理论。如布朗(Brown)、杜宁(Döring)^[20]、基特耳(Kittel)^[21]和奈耳^[22]等人对微磁化理论进行了重要研究。

自本世纪五十年代以来,出现了关于磁性基础理论研究和磁性应用相结合的局面,这加速了磁性领域的发展。这方面,玻饶士(Bozorth)起了积极作用,他为组织磁学学术活动的热情工作和他的权威著作^[23],帮助许多人投身到这一领域;范弗列克和奈耳,由于他们在磁学方面的杰出贡献,还赢得了诺贝尔奖金;在我国的磁学工作者,施汝为、潘孝硕、戴礼智^[24]、郭貽诚^[25]和李国栋^{[26][27]}等人,对促进中国的磁学发展起了积极作用。

近期,无论是金属及其合金,或是绝缘磁性材料,非晶磁性材料,从磁性固体到磁性液体,从块状磁体到磁性微粒或薄膜,都获得了惊人的发展。就永磁材料而言,若以它的磁能积 $(BH)_{\max}$ 作为时间函数关系画出曲线,可以看到,过去的四十年中,曲线几乎呈指数形式增长。如图1所示。这种磁性能对于时间的函数关系曲线,亦可以用来表征其它类型磁性材料的情况。

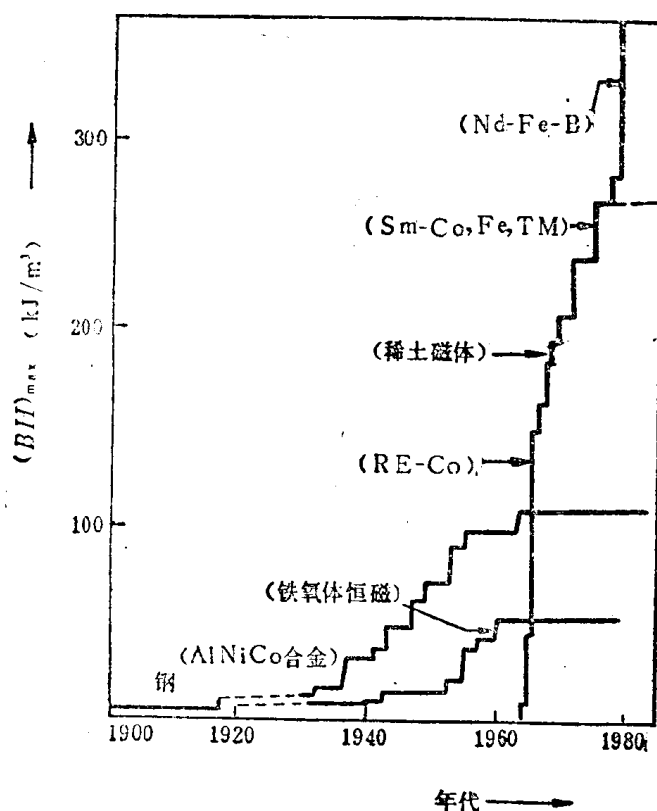


图1 永磁体的进展

前面,我们回顾了磁性研究的历史,可以看到,磁性领域内的学科不但历史悠久,而且充满青春活力。有关磁性问题的研究文献,浩如烟海,即使只考虑代表性的实验和理论,也得费尽心思从堆积如山的资料中加以选择取舍。表1列出按年代顺序磁性研究的历史梗概^{[20][28]}。

表 1 磁性研究历史梗概

年 代	实 验 和 理 论 进 展
公元前 3000~2500 年	铁的发现
公元前 4 世纪	磁石吸铁的记载(中国)
~3 世纪	中国发明司南
~12 世纪	中国将指南针用于航海
1600 年	吉耳伯特:《论磁石》
1785 年	磁的库仑定律
1820 年	奥斯特发现电流的磁效应
1825 年	安培提出“分子电流”假说
1831 年	法拉第发现电磁感应定律
1895 年	居里总结出顺磁化率的居里定律
1905 年	朗之万提出抗磁性和顺磁性理论
1907 年	外斯提出铁磁性分子场理论
1915 年	德哈斯的回转磁效应实验
1928 年	弗仑克耳-海森堡提出铁磁性量子力学解释
1930 年	布洛赫的自旋波理论
1932 年	磁畴壁概念。粉纹磁畴实验证明
1935 年	磁畴的理论解释
1946 年	铁磁共振观察
1948 年	奈耳提出亚铁磁性理论
1949 年	旋磁性和张量磁导率理论
1955 年	Neel 型畴壁概念。磁性石榴石出现
1957 年	沃克提出静磁模理论
1958 年	穆斯堡尔效应
1967 年	磁泡的发明
1973 年	稀土-过渡金属合金非晶磁性薄膜及磁光记录技术
1974 年	垂直磁记录
1979 年	自旋涨落理论

2 磁性物理的基本内容

有关铁磁性的问题,大致分为三类:(1)自发磁化;(2)技术磁化;(3)应用磁学。磁性物理研究的内容,限于讨论自发磁化和技术磁化及其相关的基本概念和理论。主要有以下几方面的内容:

1. 洪德法则和原子磁性;
2. 拉莫进动和物质的抗磁性;
3. 朗之万顺磁性理论;
4. 分子场理论(包括外斯铁磁性和奈耳亚铁磁性的分子场理论)和自发磁化;
5. 交换相互作用(包括直接交换和超交换作用)原理和自发磁化;
6. 自由能极小原理和自发磁化的平衡分布;

7. 磁化和反转磁化及其机理;
8. 磁化动力学;
9. 弛豫过程和能量损耗;
10. 旋磁性和铁磁共振理论.

磁性物理通过上述基本概念和理论, 指望阐明以下一些基本问题. 这些基本问题是:

1. 构成原子磁性的因素和磁矩的计算;
2. 抗、顺磁性的磁化规律;
3. 自发饱和磁化强度、居里温度和自发磁化强度对温度的关系;
4. 铁磁体(包括亚铁磁体)的磁特性, 例如, 磁各向异性, 磁致伸缩, 退磁因子等基本磁参量;
5. 磁畴结构计算;
6. 磁化曲线、磁滞回线及其相应的磁特性参量, 例如, 初始磁导率, 剩磁, 矫顽力和最大磁能积;
7. 交变场下的磁特性, 例如复数磁导率, 磁导率的频散和吸收;
8. 微波场下的磁特性, 例如张量磁导率, 铁磁体系内的自旋模式.

3 磁性的应用

磁性材料在现代技术和工业上起着重要的作用, 我们用下面的方框图来简略地描述磁



性的应用情况。方框之间的箭头表示相互关系。

从方框图可以看出，磁性的应用领域十分广泛和诱人。磁效应不但在许多基本领域占有关键地位，而且还有巨大的经济效益，这从下面表 2 列出的数据中可以一目了然。

表 2 磁性材料的市场规模⁽²⁹⁾

材 料 类 型	材 料 种 类	1982 年世界产值($\times 10^6$ 美元)
永磁	铝-镍-钴	250
	铁氧体恒磁	350
	稀土永磁	80
低频软磁	非取向矽钢	188
	取向矽钢	340
	Ni-Fe	50
铁氧体软磁	Mn-Zn	125
	Ni-Zn { 电话通信 记录磁头 电 源 家用电器	50
		125
		250
微波铁氧体	石榴石 隔离或环行器	120
	尖晶石 开关, 相移器	50
	YIG 单晶 调谐器	60
磁记录微粒	γ -Fe ₂ O ₃ 磁带	31
	针状 γ -Fe ₂ O ₃ 声频	53
	加 Co γ -Fe ₂ O ₃ 视频	108
	CrO ₂ 视频	43
铁氧体磁芯		130
磁泡存储器		100 ^①
磁光介质		400 ^②
磁粉		34

① 1984 年估计, 1987 年可增到 500 百万美元

② 预计在 1990 年增到这个数值

最后, 我们指出磁性应用上的某些主要倾向, 以此展望磁性应用的未来。

第一个主要倾向, 以某种磁性物理效应为基础, 把材料作为器件的整体的功能器件的应用。近年来, 在磁性薄膜上形成各种功能的器件越来越多。磁泡畴器件是这一倾向的典型例子。

第二个主要倾向, 是通过控制磁畴的应用。光(热)磁记录可以作为这一倾向的例子。例如, 世界上正在推向实用化的光磁盘, 即是用稀土-过渡金属合金非晶磁性薄膜作记录介质, 通过激光束对介质照射, 控制磁畴反转, 实现对信息的记录, 再现和擦除。

第三个主要倾向, 非晶磁性材料愈来愈频繁地使用。这类材料问世已有多数, 七十年代初, 制造非晶磁性工艺出现突破, 推动了应用。例如, 变压器、延迟线、磁头、磁带和磁传感器等, 都出现了用非晶磁性材料做成的器件。特别是非晶稀土-过渡金属合金膜的出现, 为光磁存贮技术开辟了广阔的道路。当前, 非晶磁性材料成为磁学领域内非常活跃的研究课题。

第四个主要倾向, 磁性以惊人的变革速度进入医学和人们的日常生活。近年来, 生物磁学方面已有专著^[27], 并正在逐步形成一门独立的磁学分支学科。目前, 利用核磁共振成像

技术,观察到 X 射线层析照相不能显示的图形^[30],显示出磁性在医学上的特殊效力。至于日常生活中的磁性应用,随着现代文明的进步愈来愈广泛是不言而喻了。

参 考 文 献

- [1] L. Néel, IEEE Trans, Magn., Vol. MAG-17, No.6, 2516(1981).
- [2] С. В. Вонсовский, Магнетизм, Москва, 1971.
- [3] Я. И. Френкель, Z. Physik, 49, 31(1928).
- [4] W. Heisenberg, Z. Physik, 49 619(1928).
- [5] F. Bloch, Z. Physik, 57, 545(1929).
- [6] E. Stoner, Phil. Mag. (7), 15, 1018(1933).
- [7] N. F. Mott, Proc. Phys. Soc., 47, 571(1935).
- [8] J. C. Slater, Phys. Rev., 49, 537(1936).
- [9] E. P. Wohlfarth, Proc. Leeds Phil. Soc., 5, 89(1948).
- [10] F. Bloch, Z. Physik, 61, 206(1930).
- [11] J. H. VanVleck, Theory of Electric and Magnetic Susceptibilities, OXFORD, (1932).
- [12] T. Holstein and H. Primakoff, Phys. Rev., 58, 1098(1940).
- [13] T. Moriya, J. Magn. Magn. Mat., 14, 1(1979); 31-34, 1(1983).
- [14] L. Néel, Ann. de Phys., 3, 137(1948).
- [15] Я. И. Френкель и Я. Г. Дорфман, Nature, 126, 274(1930).
- [16] F. Bitter, Phys. Rev., 38, 1903(1931).
- [17] Н. С. Акулов и М. В. Дехмяр, Ann. d. Phys., 15, 750(1932).
- [18] Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Sow. Phys., 8, 153(1935).
- [19] W. F. Brown Jr., Phys. Rev., 58, 736(1940); 105, 1479(1957).
- [20] W. Döring, Probleme der Technischen Magnetisierungskurve, PP. 26-41 Berlin(1933).
- [21] C. Kittel, Phys. Rev., 69, 640(1946); 73, 810(1948).
- [22] L. Néel, Cahiers Phys., 25, 1, 22, 241(1944).
- [23] R. M. Borzorth, Ferromagnetism, New York, 1951.
- [24] 戴礼智 金属磁性材料 上海 1973.
- [25] 郭贻诚 铁磁学 高教出版社 1964.
- [26] 李荫远, 李国栋 铁氧化物物理学 科学出版社 1962.
- [27] 李国栋 生物磁学及其应用 科学出版社 1983.
- [28] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, PP. 611 Addison-Wesley 1972.
- [29] R. M. White, J. Appl. Phys., 57(1), 2997(1985).
- [30] L. Kaufman and L. Crooks, J. Appl. Phys., 57(1), 2989(1985).

第一章 物质磁性基础

本章将首先阐述磁场、磁矩及其相互作用的基本概念。然后从实用观点扼要地介绍物质磁性的五个种类。研究物质磁性的理论，既涉及到磁性现象的热力学，又涉及到磁性现象的量子力学。应用量子力学统计理论，可以较严密地建立物质的不同类型的磁性理论，这将在第二、三章中详细论述；本章只简要地列出磁性现象的热力学关系式，指出处理磁性现象的最基本的理论方法。物质磁性来自组成物质的基本质点——原子的磁矩，故本章还将着重介绍原子磁矩的知识和证明原子磁矩来源的回旋磁效应。

1.1 磁场、磁矩及其相互作用

一、磁偶极子

在历史上，对磁性现象的研究是从天然磁铁矿(Fe_3O_4)开始的。人们在认识点电荷之间的相互作用规律之前，已经发现了天然磁铁矿。下面说明磁铁的性质。将条形磁铁投入铁屑中，在取出时会发现，靠近两端的地方吸引的铁屑特别多，即磁性特别强，这磁性特别强的区域称为磁极。如果条形磁铁能够在水平面内自由转动，则两磁极总是分别指向地球的南北方向。指北的一端我们称它为正磁极，以 N 表示。指南的一端我们称它为负磁极，以 S

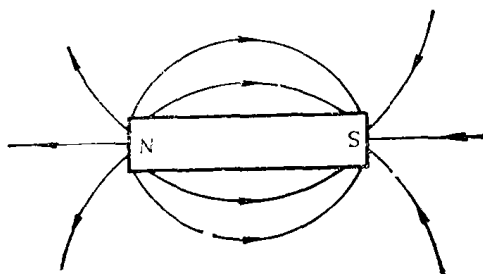
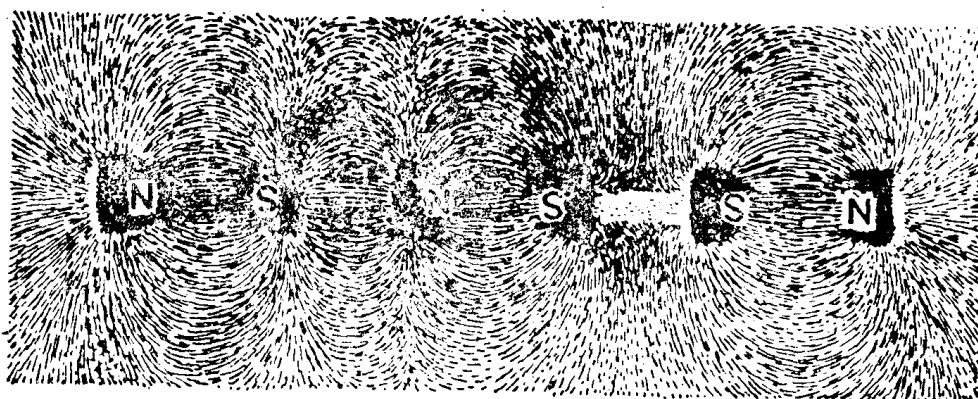


图 1-1 正、负磁极同时出现的说明

表示。同号磁极相斥,异号磁极相吸,这一点同正、负电荷有很大的相似性。在磁学和电学还处于彼此独立研究的那种时期,人们仿照静电学,认为磁极上有一种叫做“磁荷”的东西,N极上的叫正磁荷,以 $+m$ 表示,S极上的叫负磁荷,以 $-m$ 表示。当磁极本身的几何尺寸比它们之间的距离小得多时,就把磁荷看成点磁荷。但是,正、负磁荷总是同时出现,这与点电荷不同。迄今为止,实验上无论怎样分割一个小永磁体,从未发现单个磁极出现,即使分割成最小的粒子,总还是同时出现两个磁极或者偶数个磁极。如图1-1所示。因此,历史上曾提出一种假说,磁体是“元磁双极”,任何一磁体的两端,总具有极性相反而强度相等的磁极,它表现为磁体外部磁力线的出发点和汇集点,当磁体无限小时,体系定义为磁偶极子。如图1-2所示。

现在,我们考虑两个磁极,设它们的磁极强度分别是 $+m$ 和 $-m$,两者之间的距离为 l ,则这一对磁偶极子产生的磁偶极矩为

$$j_m = ml \quad (1-1)$$

j_m 是一个从 $-m$ 指向 $+m$ 的矢量,它的单位是 $[\text{Wb} \cdot \text{m}]$ 。

图 1-2 磁偶极子

磁荷之间相互作用的规律是磁的库仑定律,即两个点磁荷之间的相互作用力 F 沿着它们之间的连线方向,与它们之间的距离 r 的平方成反比,与每个磁荷的数量(或磁极强度) m_1 和 m_2 成正比。用公式来表示,则有

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-2)$$

式中,比例系数 k 与点磁荷周围的介质、式中各量单位的选择有关。设点磁荷处于真空中,在国际(SI)单位制中,互作用力 F 的单位为 $[\text{N}]$, k 的选择如下:

$$k = \frac{1}{4\pi\mu_0}$$

μ_0 为真空磁导率,其数值和单位由下式确定:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}] \quad (1-3)$$

实验证明,磁极在它的周围产生磁场,这个磁场又对附近的磁极给予作用力。正如在静电学中,电场的性质是通过电场强度矢量 E 来描述的一样。我们规定磁场强度矢量 H 是这样一个矢量,其大小等于单位点磁荷在该处所受的磁场力的大小,其方向与正磁荷在该处所受磁场力的方向一致。设试探磁极的点磁荷为 m ,它在磁场中某处受的力为 F ,则该处的磁场强度矢量为

$$H = \frac{F}{m} \quad (1-4)$$

H 的单位是 $[\text{A/m}]$ 。

这里,我们还要提出“磁单极”这一概念。狄拉克(Dirac)于1931年提出了磁单极存在的假设,预言其理论值为 $2h/e$,即 $8.27117 \times 10^{-16} [\text{Wb}]$, h 是普朗克常数

$$h = 6.6256 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}],$$

e 是电子的电量

$$e = 1.6021 \times 10^{-19} [\text{C}]$$

但人们至今仍未观察到磁单极的存在。因此,对式(1-1)我们在这里应该作些说明,式中磁

极强度 m 乘以两磁极之间的距离 l , 目前还只能认为是一种虚构的操作而已。因为实验上还没有发现具有基本磁荷的磁单极, “磁荷”概念是借用来作等效运算的。如一旦发现有磁单极的存在, 式(1-1)的操作也就成为科学的论证了^①。

二、电流回路的磁矩

由电磁学知, 电流可以对磁铁施加作用力。反过来, 磁铁可以对载流导线施加作用力。此外, 电流和电流之间也有相互作用力。这种作用力都是通过磁场来传递的。无论导线电流(传导电流)还是磁铁, 它们都能在自己周围空间里产生磁场。这就使我们可以认为, 任意形状的电流回路在远区产生的磁场与磁偶极子的磁场相同。因此, 对远区场而言, 电流回路与磁偶极子相当。该电流回路的磁矩与磁偶极矩相当。电流回路具有的磁矩由下式确定

$$\mu_m = iA \quad (1-5)$$

式中, i 为电流强度; A 为电流回路的面积。磁矩 μ_m 的方向按右手螺旋法则确定, 单位是 $[A \cdot m^2]$ 。

根据玻尔原子模型, 电子沿着轨道围绕原子核旋转, 正象行星围绕太阳旋转一样。电子在原子壳中的轨道运动是稳定的, 因而, 这种运动与通常的电流闭合回路比较, 在磁性上是等效的。图 1-3 示出这一等效性。

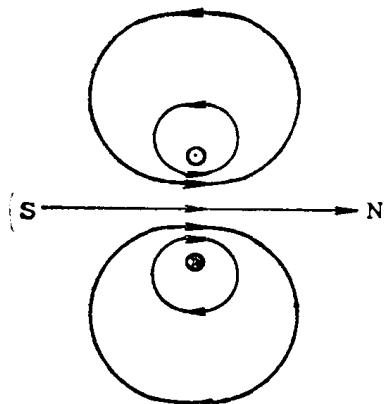


图 1-3 电流的磁效应

显然, 若把这种无限小尺寸的电流闭合回路视为磁偶极子时, 其磁矩仍由式(1-5)来确定。而磁矩的意义是表征磁偶极子磁性强弱和方向的一个物理量, 它和式(1-1)定义的磁偶极矩具有相同的物理意义, 但 μ_m 和 j_m 各有自己的单位和数值, 二者之间的关系由下式确定

$$j_m = \mu_0 \mu_m \quad (1-6)$$

需要指出, 电子的轨道运动相当于一个恒定电流回路。依磁矩定义, 容易理解, 原子中电子绕原子核旋转必定有一个磁矩; 然而, 电子的自旋, 依目前的了解, 还不能用电流回路来解释, 许多基本粒子, 包括中子都有自旋磁矩, 故把自旋磁矩看作是这些基本粒子的固有磁矩为宜。自旋概念的深刻含义是微观物理学中最重要的概念之一, 现代物理学对自旋还没有最终的描述。

归纳上述, 磁场的来源有二: (1) 电子运动包括电流及电子空间运动产生的磁场(电子空间运动又包括轨道运动和自由电子运动)。(2) 电子自旋磁矩产生的磁场。

三、磁偶极子的磁位和磁场强度

现在, 我们讨论磁偶极子在远区产生的磁位和磁场强度。设有如图 1-4 所示的磁偶极子, 它是由一对等量而异号的点磁极 $\pm m$ 组成的体系, $\pm m$ 之间的距离 l 远比到要考虑的场点 P 的距离 r 为小。

^① 美国斯坦福大学凯布雷斯声称, 他利用超导线圈发现一个磁单极。(引自《科学画报》1982.9)