

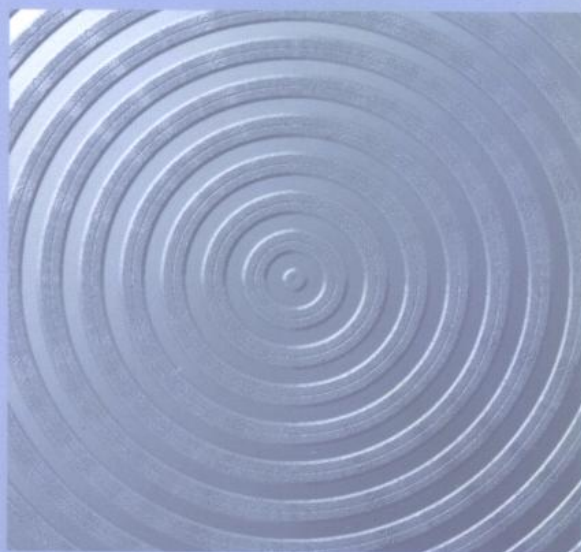


李国栋 编著

当代磁学



中国科学技术大学出版社



当代磁学

李国栋 编著

中国科学技术大学出版社

1999·合肥

图书在版编目(CIP)数据

当代磁学/李国栋编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,
1999.8

ISBN 7-312-01106-3

I. 当… II. 李… III. 磁学 IV. 0441.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 18291 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

850×1168/32 印张: 12.25 字数: 310 千

1999 年 8 月第 1 版 1999 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—4000 册

ISBN 7-312-01106-3/O·222 定价: 18.00 元

536
5

前 言

1998年是中国科学院物理研究所建所70周年(1928—1998),也是中国科学技术大学建校40周年(1958—1998)和中国科学技术大学研究生院建院20周年(1978—1998)。物理所磁学研究室(1993年成为磁学国家重点实验室)是现代中国最早建成的从事磁学和磁性材料科学研究的实验室。在进行磁学研究、培养磁学专业人才和进行国际磁学学术交流等方面都做出了重要的贡献。著者是新中国建立不久第一批(1950年)考入中国科学院应用物理研究所(后改名物理研究所)从事磁学研究的科研人员,亲眼看到当代中国磁学和世界磁学的迅速发展,亲身参加到当代中国磁学的研究工作中。几十年来,著者一直从事磁学和磁性材料研究工作,先后参加过多个磁学和磁性材料领域的科学研究;又一度在中国科学技术大学和中国科学技术大学研究生院兼任有关磁学的教学工作。在研究的地方(北京)、单位(中国科学院物理研究所)和专业(磁学)方面“三不变”。这从一种意义上说是很幸运的。为了庆祝和纪念中国科学院物理研究所建所70周年,中国科学技术大学建校40周年,中国科学技术大学研究生院建院20周年,著者撰写这部《当代磁学》,作为对所庆、校庆和院庆的一种纪念性献礼。

考虑到当代磁学发展的特点,结合著者长期从事磁学研究,一段时期内兼任磁学教学工作,以及在较长时期中兼任中国物理学会物理学名词委员会、国家科学技术名词审定委员会中物理学名词审定委员会和外国科学家译名委员会、全国量和单位标准化委员会中电学和磁学分委员会等的工作中的认识和体会,在撰写时特别注意到以下几个方面:

(1) 本书内容以当代发展的广义磁学为重点。虽然目前国内

外的磁学著作大多是以铁磁学和磁性材料为重点,但是考虑到当代科学研究和高新技术在深度和广度上的迅速发展,各个学科本身以及各学科之间的边缘学科(交叉学科)又都有显著的扩大和发展,为了反映这些特点,本书尽量包含了广义磁学的较多新领域和新内容。例如,本书仅把传统的铁磁学和磁性材料作为部分章节,而对原子核、基本粒子、地球、宇宙、生物以及等离(子)体、纳米材料、介观物态的磁现象都分别列为专章加以适当介绍。将铁磁性扩大为包括铁磁性和亚铁磁性的强磁性,将磁性材料主要限定在与强磁性相关的强磁材料。

(2) 本书取材在围绕广义磁学这一主题时,尽可能同时采用国外和国内的科研工作,而不是只引用或主要引用国外的研究文献。虽然由于历史和资料等原因,在取材内容的广度和文献数量上,我国资料受到一定的限制。但是在可能的条件下,仍尽力做到国外的和国内的文献资料并重。也对中国磁学和世界磁学的发展,作了较简略的历史回顾,并且把中国和世界的一些广义磁学历史发展中的重要事项,尽量列入附录“磁学发展大事记”中。

(3) 本书所用的科学技术名词及量和单位都尽力做到规范化。由于著者多年来一直参与物理学名词、电学和磁学的量和单位的审定工作,因此对于科技名词及量和单位的规范化特别重视,体会也较多较深。虽然磁学量和单位在采用国际单位制和中国法定计量单位的规范化中遇到的困难和不方便处都较多,但是为了全国科技名词及量和单位的统一和规范化,为了同国际科技界接轨,为了长远的统一和规范,采用规范化的科技名词、量和单位不但是必要的,也是必然的发展趋势。

(4) 本书所涉及的广义磁学,其内容是既多又广的,故对于各章内容仅能扼要阐述其主要部分,而难于更全面和更仔细地讨论其诸多方面和细节。为了进行弥补,只能将各个专题的有关参考文献列于该章后面,供读者进一步参考。在可能条件下,尽量注意将这些参考资料中的综合性的和专题性的、中文的和外文的、国内的

和国外的有关文献同时列出,以便于不同读者在不同情况下都能查到适合自己需要的文献资料。一般说来,这些文献资料绝大多数都可以在中国科学院图书馆、北京图书馆和中国科学院物理研究所图书馆中查找到。

(5) 考虑到字数等原因,原书稿中的“当代磁学的应用”,“磁场和磁铁的设计及应用”,“世界磁学发展的回顾”和“当代磁学发展的特点和展望”等内容不再包括在本书中,今后将可能在适当的期刊或出版物中再陆续发表。

在新中国建国以来的几十年中,也是著者从事磁学研究工作的几十年中,中国和世界磁学研究和应用都有了很大的发展。记得建国初期,著者刚考进中国科学院应用物理研究所,并分配从事磁学研究时,对于磁学的研究和应用都所知甚少。当时任所领导的一位科学家语重心长地说:现在中国的磁学研究工作虽然很少,全国从事磁学研究工作的还不到10人,但是从国家的需要和科学的发展看,磁学是一定会有大的和快的发展的。几十年来,我国磁学研究、教育和应用在广度和深度上的进步,都是十分有力的印证。许多年来,著者应一些科技期刊(多数任该刊编委)的邀请,每年为这些期刊分别撰写有关磁学、磁性材料和生物磁学的当年进展综述,从而经常阅读较多的广义磁学方面的文献资料,也深深认识和体会到这位所领导科学家谈话的重要意义,和当代磁学迅速发展的态势。

总的说来,著者能从广义磁学新的角度写成这部《当代磁学》,既有几十年来从事磁学多方面研究工作和经常阅读文献资料的积累,磁学前辈们高瞻远瞩的言传身教,同辈和年轻磁学工作者们的切磋讨论,以及同广义磁学相关的朋友和亲人们的合作研究和相互帮助,又有不少图书信息文献单位和相邻学科单位和朋友们的协助,以及在中国科学院图书馆工作几十年的爱人訾宝珊在工作和家务上的多方面支持和帮助。在本书的酝酿、撰写过程中,又得到各方面旧朋新友们提供珍贵的文献资料和研究论文,直

接参观他们的实验室、观测站和高新技术实验设备,才使这本《当代磁学》能在较短时期内写成。著者谨对他们表示诚挚和深湛的感谢。在本书出版过程中,还得到了章综院士,王震西院士,聂玉昕副所长、研究员和中国科学技术大学物理系刘文汉教授、张泰永教授、熊曹水副教授等同志的帮助,一并向他们表示谢意。

由于本书涉及面较广和内容较多,著者的知识、经验和能力有限,撰写时间也较为有限,因此难免存在这样那样的问题和不足,甚至错误,希望能得读者和同仁们的批评和指正。

李国栋

1998年10月于

中国科学院物理研究所,北京.

目 录

第 1 章 磁现象	(1)
1.1 物质磁性和磁场	(1)
1.2 磁现象的普遍性	(3)
1.3 磁现象与电现象	(6)
1.4 磁学量及其单位	(11)
参考文献.....	(13)
第 2 章 物质磁性的分类和来源	(15)
2.1 物质磁性的分类	(15)
2.2 宏观物质磁性的来源	(19)
2.3 分子磁性和原子磁性的来源	(23)
2.4 关于磁性来源的学说	(28)
参考文献.....	(30)
第 3 章 弱磁现象性和弱磁性	(32)
3.1 物质的抗磁性	(32)
3.2 物质的顺磁性	(36)
3.3 超导体的抗磁性	(41)
3.4 物质的反铁磁性	(45)
参考文献.....	(49)
第 4 章 强磁现象和强磁性(一)	(51)
4.1 物质强磁性的宏观特点	(51)
4.2 物质强磁性的微观机理	(55)
4.3 物质强磁性的分类	(58)
4.4 物质微观磁结构的实验测定	(61)
参考文献.....	(66)

第 5 章 强磁现象和强磁性(二)	(69)
5.1 强磁物质磁畴和磁畴壁的形成和结构	(69)
5.2 磁畴和磁畴壁的实验观测	(72)
5.3 强磁体技术磁化过程	(75)
5.4 强磁体交变技术磁化过程	(78)
参考文献.....	(83)
第 6 章 磁效应	(86)
6.1 磁-力效应和磁-声效应	(86)
6.2 磁-热效应和磁-超导效应	(90)
6.3 磁-电效应和磁-光效应	(94)
6.4 其他磁效应	(101)
参考文献.....	(104)
第 7 章 磁共振	(109)
7.1 顺磁共振	(109)
7.2 铁磁共振、亚铁磁共振和反铁磁共振.....	(113)
7.3 核磁共振和穆斯堡尔效应	(120)
7.4 回旋共振	(130)
参考文献.....	(133)
第 8 章 介观磁现象和纳米磁性	(137)
8.1 介观和介观磁效应	(137)
8.2 介观磁现象和纳米磁性	(140)
8.3 纳米磁性材料	(144)
8.4 纳米多层磁膜	(149)
参考文献.....	(154)
第 9 章 等离子体磁现象	(157)
9.1 等离子体和磁等离子体	(157)
9.2 超高温磁等离子体与磁约束受控热核聚变	(160)
9.3 普通磁等离子体	(163)
9.4 宇宙磁等离子体	(166)

参考文献	(171)
第 10 章 磁性材料	(173)
10.1 永磁材料	(174)
10.2 软磁材料	(182)
10.3 信磁材料	(189)
10.4 特磁材料	(200)
参考文献	(208)
第 11 章 原子核磁性	(214)
11.1 原子核磁性的观测	(214)
11.2 原子核磁性的应用	(224)
11.3 原子核绝热退磁致冷与超低温和极低温技术	(233)
11.4 原子核磁有序	(236)
参考文献	(241)
第 12 章 基本粒子磁性	(245)
12.1 基本粒子磁性的特点和测量	(245)
12.2 电子、正电子和其他轻子的磁性	(248)
12.3 强子和夸克的磁性	(253)
12.4 磁单极子的磁性	(256)
参考文献	(264)
第 13 章 地球磁现象	(268)
13.1 地球磁场和地磁现象	(268)
13.2 岩石磁性和古地磁现象	(273)
13.3 地球磁现象的应用	(280)
13.4 地球磁场的来源	(286)
参考文献	(291)
第 14 章 宇宙磁现象	(296)
14.1 太阳磁现象和太阳系磁现象	(296)
14.2 恒星磁现象和星系磁现象	(302)
14.3 星际空间磁现象	(306)

14.4	宇宙磁现象研究的意义和宇宙磁场起源·····	(311)
	参考文献·····	(317)
第15章	生物磁现象 ·····	(321)
15.1	生物磁场和生物磁性·····	(321)
15.2	磁场生物效应·····	(326)
15.3	生物磁技术·····	(330)
15.4	生物磁现象的应用和物理基础·····	(333)
	参考文献·····	(339)
第16章	中国磁学发展的回顾 ·····	(344)
16.1	中国古代磁学的回顾·····	(344)
16.2	中国现代磁学的回顾·····	(352)
16.3	中国当代磁学的回顾·····	(357)
	参考文献·····	(363)
附录1	常用法定计量单位 ·····	(370)
附录2	磁学法定计量单位 ·····	(374)
附录3	磁学发展大事记 ·····	(376)

第 1 章 磁 现 象

1.1 物质磁性和磁场

研究和应用磁现象的磁学是一门古老而又年轻的科学。说它古老,是因为磁的现象发现很早,磁的应用也很早。特别是我们祖国,许多磁现象的发现和运用都是世界上最早的,公认的中国对古代世界文明的四大贡献中的指南针便是磁的一种重要应用。因此,中国常被称作磁的故乡^[1]。

但是,长期以来,一般人却把磁看成是一种很少见的现象,似乎只有永久磁铁和指南针才有磁性,才是磁的应用,而把其他的绝大多数物质和现象称为是无磁的或非磁的。即使今天,随着现代科学技术的进步,磁录音和磁录象等多种磁的应用早已进入到家庭生活中,也仍有许多人认为磁是少见的,仍把大多数物质和现象看做是无磁的或非磁的。

磁真的少见吗?大多数的物质和现象真是无磁性和非磁性吗?现代科学技术的发展,特别是近几十年的大量研究和应用实践雄辩地表明,磁不但不是少见的,而且从根本上说,磁是最普遍的。磁的普遍性首先表现在:一切物质都具有磁性,只不过有的物质磁性强,有的物质磁性弱;任何空间都存在磁场,只不过有的地方磁场高,有的地方磁场低。由于磁性是一切物质的普遍属性,磁场是任何空间都存在的一种物理场,这就决定了磁的丰富内涵及其多方面的联系和广泛的应用。所有这些都是本书所要介绍和讨论的内容。

在开展全面讨论之前,我们首先介绍一下什么是磁性?什么是

磁场？

一种看法认为，磁性是物质在磁场中会受到磁力作用的性质，磁场是磁性物质在其中会受到磁力作用的物理场。这里既用在磁场中受力来定义磁性，又用在磁场中受力来定义磁场。显然，这是不科学的。

国际电工委员会(IEC)关于磁场的定义为：“电磁场的组成部分，采用磁场强度 H 和磁通密度 B 表示其特征^[2]。”我国国家标准的定义是：“磁场是一种场，其特性可用在场内运动着的带电粒子所受的力来确定，这种力来源于粒子的运动及其所带电荷^[3]。”又在磁通密度 B 的定义中指出：“空间任意一点上磁场的大小和方向由该点的磁通密度决定”，在磁场强度 H 的定义中指出：“磁场强度是与磁场中任意点的磁通密度相联系的一个轴矢量^[4]。”由此看出，磁场是用运动电荷或电流在磁场中的受力来表征和定义的。描述磁场的基本物理量是磁通密度 B ，而磁场强度 H 是描述磁场的辅助量，这是同过去的观念不相同的。因此，现在按照上述磁场的定义，采用下列公式：

$$F = QV \times B \quad (1.1)$$

来决定磁场的大小和方向，其中 F 为运动电荷所受的力， Q 为电荷量， V 为电荷运动的速度， B 为磁场的磁通密度。必须强调，这里是用磁通密度 B 来描述磁场，而不是如过去那样，用磁场强度 H 来描述磁场。而用运动电荷的受力来定义磁场，这一点是很重要的，这表明磁场不是使静止电荷受到力作用的静电场，也不是因物质质量而受到的引力场，更不是微观粒子所受到的强作用力场和弱作用力场。

有了上述关于磁场的定义之后，再来定义物质的磁性。一般说来，物质磁性也是利用该物质在磁场中受到力的作用来定义的。但因为已有了磁场的定义，就不会引起前面提到的矛盾了。严格说，具有磁性的物质在不均匀的具有梯度的磁场中会受到力的作用，可采用下列公式来决定物质的磁性^[5]：

$$F_z = \frac{1}{\mu_0} \chi m B_x \frac{\partial B_x}{\partial z} \quad (1.2)$$

其中 B_x 为磁通密度在 x 方向的数值, 而磁通密度梯度 ($\partial B_x / \partial z$ 表示 B_x 在 z 方向的梯度), m 为该物质的质量, μ_0 为真空磁导率, 亦称磁常数, 其数值 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$, χ 为该物质的磁化率。 χ 的正负和大小表示磁性的类别和强弱, χ 为负值时为抗磁性物质, χ 为正值时且 $\ll 1$ 时为弱磁性物质, $\chi > 1$ 时为强磁性物质。前面讲任何物质都具有磁性, 这就是说任何物质都具有磁化率, 即任何物质在有梯度的不均匀磁场中都会受到力的作用, 称为磁力。对于强磁物质, 因磁化率随磁场强度的变化而改变, 故一般采用自发磁化强度或饱和磁化强度来表征其磁性。这将在第 4、5 两章中作较详细介绍和讨论。

在对磁场和磁性作了明确和严格的定义以后, 就可以介绍和讨论其他的磁学内容和问题了。

1.2 磁现象的普遍性

现代科学技术的发展, 已经揭示出磁的普遍性, 即一切物质都具有磁性, 任何空间都存在磁场。磁的这种普遍性是以大量的科学观测、实验和理论为根据的。这里先概略地介绍一下磁的普遍存在的若干例证, 然后在以后各章中再作较详细的介绍和讨论。

在当代电气化和信息化社会中, 不论生产和技术、科研和国防、学校和家庭生活中, 磁的应用都是非常多的^{[6],[7]}。在电气化中, 如发电用的发电机和动力用的电动机, 在将机械能转换为电能及将电能转换为机械能的过程中, 都离不开磁场的作用和产生磁场用的(强)磁性材料; 在输电配电过程中使用的改变电压的变压器, 其磁芯也需要使用磁性材料。在信息化中, 各种电子计算机需要使用多种的磁记录器和磁存储器; 传统的电报电话和高新技术的微波通信、卫星通信和光通信都分别需要应用种类繁多、功能各

异的磁性材料和磁性器件,有的还是其他材料和器件所不能代替的。在各种高能加速器和粒子检测器中以及为实现热核聚变研究的高温等离[子]体装置中,都需要使用强磁场。在国防中使用的磁性水雷和磁性地雷,正在研究的电磁炮、定向型波束武器中应用的高功率微波发生器和自由电子激光器都需要使用强磁场或结构复杂的磁场。而顺磁量子放大器和核磁共振成像装置以及超低温的顺磁致冷器和极低温的核磁致冷装置则分别利用了弱磁性或弱磁材料。强磁场分离器和高梯度磁分离器则分别是利用物质的不同磁性和磁场的力作用实现了强磁性和弱磁性物质的分离,及不同弱磁性物质的分离。

在生物学和医学的研究及应用中^{[8],[9]},由于生物体和人体都为弱磁体,各组织器官的弱磁性也有所不同,而且在生命活动中还产生极微弱的磁场,如脑磁场、心磁场和眼磁场等。这些弱的生物磁性和极微弱的生物磁场,在不同的生理状态和病理状态下也会发生变化,因此可利用这些磁性和磁场的变化进行生理和病理方面的研究以及一些疾病的诊断。由于绝大多数化学元素都具有带核磁矩的同位素,因此在生物学和医学中可以利用属于弱磁性的原子核的磁共振进行生物化学分析和医学分析。至于核磁共振成像技术目前虽然只有氢原子核成像,但因为它可作含氢组织状态和功能的成像,其应用在许多方面都胜过了 X 射线层析象和超声层析象(层析象也常称作 CT 象)。此外还有众多的磁性材料、磁学方法和磁技术应用于生物学和医学等生命科学中。这些将在生物磁学一章中再详细介绍和讨论。

在原子核和基本粒子的微观物理学研究中,磁性和磁场的应用也是很多的^{[10],[11]}。例如,前面已经讲到,磁场是多种研究原子核和基本粒子的加速器和检测器所必需的重要设备,原子核磁性又是核磁共振分析和核磁共振成像的基础。原子核磁性还是利用绝热退磁方法达到 $10^{-3} - 10^{-9}K$ 极低温度的必要条件。原子核磁矩在极低温度的排列有序,形成核铁磁性和核反铁磁性等核磁有

序结构,更是当代广义磁学中的一项突破性进展。各种基本粒子磁性的发现、研究和应用,不但有助于粒子结构和变化的研究,而且利用一些粒子的磁性发展了诸如中子衍射和中子磁散射, μ 子弛豫和旋进,正、负电子磁矩精密测量等重要的新技术。这些将在第11章和第12章中详细讨论。

在地球科学研究和应用中,也有许多方面涉及磁场和磁性^{[11],[12],[13]}。地球科学中的地磁学就是研究地球磁场的科学。全世界的地磁台站不间断地测量和记录各地的地(球)磁场及其随时间的变化,一些地磁学和地球物理学工作者正在从各方面研究地磁场的起源和演化。各种岩石磁性的研究在当代也取得了若干重要的成果。例如,由不同地质时代和不同地区的岩石磁性的观测研究,不但发现岩石磁性的磁化方向与地质年代和地区有关,而且还由此可推断岩石生长时的地磁场方向和强度。在这基础上形成了依据岩石磁性判断地质年代的古地磁断代学。我国学者利用这一方法断定古北京人、巫山人和元谋人等的年代同利用其他方法断定的年代相符合。利用陆地岩石和海洋底岩石磁性所推断古地磁场的方向和强度随时间的变化,还为现代新地球观的大陆漂移学说和海底扩张学说提供了有力的证据。关于地球磁场的成因和古地磁场多次倒转方向的机制也成为当代广义磁学中的重要研究课题。第13章将专门介绍和讨论这些问题。

在天文学的研究和航天新技术中,有不少同磁场和磁性相关的地方^[14]。例如,目前已知的最强磁场(脉冲星即中子星的磁场高达 10^8-10^9T)^[15]和最低磁场(星系际磁场低到 10^{-13}T)均存在于天文学的研究中;由月球表面和月球空中磁场的测量和月球岩石磁性的研究可以推断月球内部均为固体而不像地球有液体存在的地核^[16];由木星磁场的测量可以推测木星内部深处可能有金属氢的存在,而金属氢可能是高温超导体,又是高能燃料,是当前国内外正在积极进行研究的重要科学问题。空间磁场强度和分布的观测研究也是目前航天新技术中涉及问题甚多的一项研究。太阳的

剧烈磁活动,空间磁场对太阳风的作用是影响空间天气学的重要因素,是航天活动必须注意的。

从以上列举的一些例子可以看出,包括物质磁性和磁场的磁现象不但是普遍存在的,而且这些磁现象的作用和应用在许多情形下也是很重要的。正是由于磁现象的普遍性和磁应用的广泛,从而形成了磁学的许多边缘学科——边缘磁学,也称交叉磁学。图 1.1 中示出其中的若干边缘(交叉)磁学。

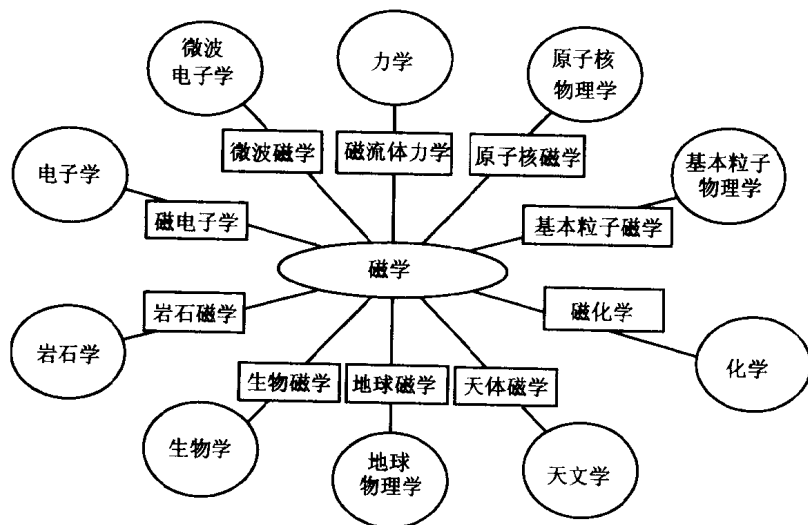


图 1.1 若干边缘(交叉)磁学

1.3 磁现象与电现象

在物理学中,磁与电的关系是最为密切的。关于磁与电的本质和相互关系的了解,也有很长的历史发展和认识过程^{[1],[18]}。

人类对于自然界的磁现象和电现象的发现、观察和应用的记载都是很早的。从几千年前起,就不断有关于磁石、磁石吸铁、磁石指南现象和原始指南器等磁现象的记载,也不断有关于雷电现象、