



电磁测量与仪表丛书

直流磁性测量

刘兴民 编

机械工业出版社

本书为《电磁测量与仪表丛书》之一,主要包括:(1)物质磁性的分类、铁磁物质的直流磁化特性和磁性参量;(2)测量用的试样、磁化装置和仪器;(3)直流磁性测量中常用的方法,包括冲击法、霍尔效应法、差值冲击法、双轭对称磁导计法、开路磁性测量、顺磁和抗磁物质磁化率的测量方法等;(4)新近发展起来的自动测量技术、数字测量技术、振动样品磁强计法以及稀土永磁材料的测量技术。

本书可供从事实验物理、电力工程、自动控制、仪器仪表及电磁计量测试方面的工程技术人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

直流磁性测量

刘兴民 编

*

责任编辑:秦起佑 版式设计:乔玲

责任印制:郭炜 责任校对:熊天荣

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $8 \frac{1}{8}$ ·字数 208 千字

1989年6月北京第一版·1989年6月北京第一次印刷

印数 0,001—2,240·定价:6.70元

*

ISBN 7-111-00783-2/TM·110

编辑说明

电磁测量技术的应用非常广泛，在工农业生产及科学实验中起着极为重要的作用。用于电磁测量的仪表种类繁多，发展迅速。建国以来，我国各有关部门从事电磁测量和仪表方面工作的科技人员迅速增加。为了总结电磁测量及仪表方面的经验，普及有关电磁测量及仪表知识，中国计量测试学会电磁专业委员会和中国仪器仪表学会电磁测量信息处理仪器学会联合成立了《电磁测量与仪表丛书》编委会，组织编写了这套丛书。编委会成员是：

主编：唐统一

副主编：郭志坚 丁银云 张钟华

编委（以姓氏笔划为序）：

尤德斐 王 镒 叶妙元 陈印琪 何振瀛 李显扬
李修治 庞仲予 沈平子 杨华山 余鹤栋 张叔涵
张润康 张德实 林瑞昌 费正生 赵修民 赵新民
秦起佑 翁瑞琪 梅文余 袁 楠 彭时雄 程世鎬
雷枫桐

本丛书各分册为：《电磁量的单位制和单位的复现与传递》、《误差理论在电磁测量中的应用》、《电磁测量线路与仪器的屏蔽防护》、《感应分压器与电流比较仪》、《交流电桥》、《测量用互感器》、《大电流测量》、《微处理器在电测技术中的应用》、《运算放大器在电测技术中的应用》、《数字电压表的电气性能测试》、《电磁测量数字化及其应用》、《磁测量基础》、《磁场的产生》、《磁场的测量》、《动态磁性测量》、《硅钢磁性测量》、《微型计算机与电测仪器的接口技术》、《直流磁性测量》等。将陆续出版。

本丛书为中级科技读物，其内容主要介绍电磁测量与仪表的

IV

基本原理，但更侧重介绍实际应用方面的知识，例如实验技术、仪表的设计计算、仪表的使用及有关的数据、资料等。对国内外最新成就及发展方向也有一定的反映。

本丛书力求深入浅出，通俗易懂。希望能为读者在电磁测量与仪表方面提供有益的知识。但由于水平所限，书中一定存在不少缺点，甚至错误，欢迎读者批评指正。

《电磁测量与仪表丛书》编委会

前 言

物质磁现象的研究和磁性材料的应用在国民经济中占有十分重要的地位。为了合理使用材料,更好地设计和制造磁性器件,以及提高现有磁性材料性能和研制新型材料,磁性测量都是不可缺少的。随着生产的迅速发展,各种新型磁性材料,例如稀土永磁、非晶态磁性合金和磁泡材料的出现,不但进一步开拓了磁性材料的应用领域,促进了生产和科学技术的发展,而且对磁性测量也提出了更高的要求。

在整个磁性测量中,直流磁性测量的历史最长,方法也最成熟。它所用的测量仪器比较完善,有些产品已经系列化。物质直流磁性参量的测量原理,普遍建立在法拉第电磁感应定律基础上。任何利用感应法测量磁通量的装置都离不开积分器。冲击检流计就是一种应用最为广泛的积分器;它已有近二百年的历史。用冲击检流计作为积分器进行直流磁性测量的冲击法,具有线路结构简单,磁通灵敏度高,测量准确等优点,所以至今仍不失为一种较好的测量仪器,得到广泛应用。

随着电子技术的迅速发展,直流磁性测量也正朝着自动化、数字化方向发展。光电磁通计、电子磁通计、数字磁通计相继问世,并且给直流磁性测量带来了重要变革。另外,冲击法不能解决的磁滞后效应影响问题,在自动测量技术中也已经解决。

本书内容的选取力图结合生产实际,叙述侧重于具体技术,以便初学者阅读后能够较快掌握基本测量方法。另外,根据本专业当前发展的趋势,也适当介绍国内外直流磁测量的新方法和新仪器,以便读者对这一学科有较全面的了解。

由于测量时经常用到技术标准中的方法,所以在本书正文中,我们还根据需要介绍了有关标准的内容,并在附录5中列出了我

国部分直流磁性试验方法标准和检定规程。

在编写过程中，张一德、叶妙元、何振瀛、余桂莲、梅文余、张钟华、李安西等同志曾提出了不少宝贵意见，并给予热情帮助。何振瀛、叶妙元同志审阅了全部书稿。作者在此表示深切的谢意。

由于本人水平有限，书中一定存在不少缺点，甚至错误之处，希望广大读者批评指正。

编者

符 号 表

B	磁感应强度	R_m	磁阻
B_i	内禀磁感应强度	T_0	居里温度
B_s	饱和磁感应强度	V_H	霍尔电动势
B_r	剩余磁感应强度	β	阻尼度
BH	磁能积	ϵ	误差
$(BH)_{max}$	最大磁能积	λ	线度比, 磁滞伸缩系数
H	磁场强度	μ	磁导率
H_i	物体内部磁场强度	μ_d	微分磁导率
H_e	外磁场强度	μ_i	起始磁导率
H_c	矫顽力	μ_m	最大磁导率
H_c	磁感应矫顽力	μ_0	真空磁导率 (磁性常数)
H_c	内禀矫顽力	μ_{rec}	恢复磁导率
J	转动惯量	μ_{rev}	可逆磁导率
M	磁化强度, 互感, 力矩	ρ	密度
M_s	饱和磁化强度	σ	比磁化强度
m	质量	τ	持续时间
N	退磁系数	ϕ	磁通量, 角度
N_1	磁化线圈	χ	磁化率
N_2	测量线圈	χ_i	起始磁化率
P	压强	χ_g	单位质量的磁化率
Q, q	电量		

目 录

编辑说明

前言

符号表

第一章 物质的直流磁化特性	1
一、物质的磁性和分类	1
1. 物质磁性的起源	1
2. 物质按照磁性的分类	2
二、铁磁物质的直流磁化特性和磁性参量	6
三、物体的磁化	13
第二章 试样	18
一、闭合磁路试样	18
1. 试样的基本形式	18
2. 环形试样的均匀磁化和尺寸	18
3. 环形试样的磁化线圈和测量线圈	23
4. 条形和正方形试样	23
5. 试样的热处理	25
二、开磁路试样	25
三、试样横截面积的计算	27
四、试样的退磁	27
1. 概述	27
2. 均匀降低磁感应法退磁	28
3. 退磁效果的判断	30
第三章 磁化装置	33
一、螺线管	33
1. 单层螺线管	33
2. 多层螺线管	35

3. 脉冲螺线管	37
二、中场磁导计	41
1. NPL 型磁导计	41
2. 伊劳维斯磁导计	43
3. MH 磁导计	44
4. 桑福德-贝内特高场磁导计	45
5. 霍普金松磁导计	46
6. 费依磁导计	47
三、强场磁导计	48
四、电磁铁	50
第四章 测量仪器	56
一、冲击检流计	56
1. 结构	56
2. 运动方程	57
3. 回零装置	63
4. 校准	64
5. 技术性能	65
6. 使用中应注意的问题	66
二、磁通计	66
三、霍尔效应特斯拉计	70
1. 原理	70
2. 基本电路	74
3. 特性	76
4. 校准	76
5. 测量误差	77
第五章 在闭合磁路中测量	80
一、用冲击法测量材料的磁性	80
1. 测量原理	80
2. 测量软磁材料环形试样	88
3. 在磁导计中测量软磁材料	91
4. 测量永磁材料	95
5. 影响冲击法测量的因素	104

X

6. 误差分析	109
二、用差值冲击法测量软磁材料的磁性	115
三、用霍尔效应法测量永磁材料的磁性	117
四、用双轭对称磁导计法测量永磁材料的磁性	119
1. 磁场强度的测量	120
2. 磁化强度 $4\pi M$ 和磁感应强度 B 的测量	122
第六章 在开磁路中测量	124
一、矫顽力的测量	124
1. 抛移测量线圈和抛移试样	129
2. 试样的饱和磁化场	130
3. 退磁速度的影响	131
4. 外磁场的影响	131
二、弱磁材料磁导率的测量	134
第七章 直流磁性的自动测量	137
一、模拟式直流磁性自动测量系统	138
1. 采用光电磁通计的自动测量系统	138
2. 采用电子磁通计的自动测量系统	140
二、数字式直流磁性自动测量系统	149
三、稀土永磁材料磁性的自动测量	152
1. 在普通电磁铁上用自动记录式磁通计测量	154
2. 用振动样品磁强计测量	156
3. 用超导磁体和数字磁通计测量	162
四、微型计算机在直流磁性测量中的应用	164
第八章 顺磁和抗磁物质磁化率的测量	171
一、古依法	171
二、法拉第-萨克斯密斯法	174
三、居里-塞尼沃扭秤	179
四、自动平衡磁天平	180
五、克文凯法	183
六、测量弱磁材料磁化率的射频法	185
七、在低温下测量磁化率的磁秤	186
八、铁磁性杂质的修正	186

附录	189
附录 1 常用磁学量单位的换算关系	189
附录 2 部分磁性材料的密度数值	189
附录 3 商品化霍尔效应特斯拉计的性能	191
附录 4 我国有关技术标准中材料磁性能的保证数据	192
附录 5 直流磁性测量方法国家标准和标准样品检定规程	207
参考文献	247

第一章 物质的直流磁化特性

一、物质的磁性和分类

物质磁性的研究是近代物理学的重要领域之一。从微观粒子到宏观物体，以至宇宙天体，都具有某种程度的磁性。磁性材料在近代技术的各部门，特别是电工技术及无线电技术中，获得了日益广泛的应用。

1. 物质磁性的起源

物质是由原子构成的。原子又是由原子核和围绕核运动的电子组成的。物质的磁性来源于原子磁性。原子具有一定的磁矩，它来源于原子中的电子磁矩和核磁矩。原子核的磁矩很小，一般可以忽略。电子的磁矩分为轨道磁矩和自旋磁矩两部分，原子的总磁矩就是这两部分磁矩的总和。

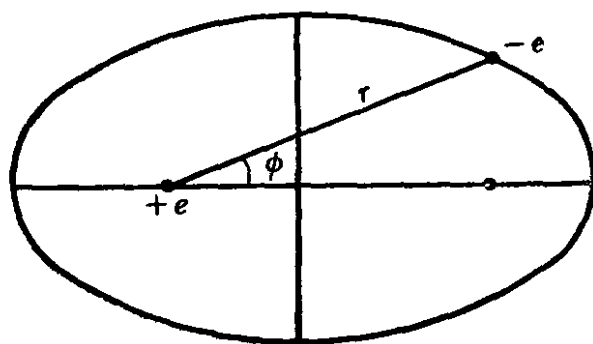


图1-1 电子的椭圆轨道

电子的轨道磁矩是由电子环绕原子核运动产生的。假定电子围绕原子核运动是沿椭圆形轨道进行，如图1-1所示。它相当于一个闭合电路中的电流

$$i = -\frac{e}{T}$$

式中 $-e$ 为电子的电荷； T 为电子运动的周期。该电流必然产生一磁矩，称为轨道磁矩。电子除了绕原子核作轨道运动外，还绕自己的轴以一定角速度作自旋运动，所以也具有自旋磁矩。

为了描述宏观物体的磁性强弱，一般常用单位体积（或单位质量或每克原子）内的总磁矩来表示。单位体积的总磁矩称为磁

化强度 $\vec{M}$ ，即

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{V} \quad (1-1)$$

式中 V ——磁体的体积；

$\vec{m}$ ——磁偶极子的磁矩。

把物体放入磁场中，它就被磁化了。其磁化强度 $\vec{M}$ 与磁场强度 $\vec{H}$ 的关系为：

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (1-2)$$

χ 称为物质的磁化率，它是物质磁性参量之一。

2. 物质按照磁性的分类

各种物质的磁性不同，按照磁化率 χ 的大小，可以分为三类：

(1) 抗磁物质

如果 $\chi < 0$ ， $\vec{M}$ 与 $\vec{H}$ 的方向相反，这类物质称为抗磁性物质。惰性气体、许多有机化合物，以及若干金属如 Bi、Zn、Ag、Mg 和非金属 Si、P、S 等都是典型的抗磁物质，它们的磁化率 $\chi \approx -(4\pi)^2 \times 10^{-13}$ [国际单位]，基本上不随温度变化。

物质抗磁性的起源，是由于外磁场在原子内的电子壳层引起的电磁感应效应。一个作轨道运动的电子，在外磁场中受到洛伦兹力作用，使得电子的运动状态发生变化，即电子的运动附加了围绕外磁场方向旋转的运动，这种旋转运动称为拉莫尔进动。电子相应地获得了附加磁矩，其方向与磁场方向相反，称为抗磁效应。因此，抗磁现象是普遍的，所有物质都具有。当物质的原子系统总磁矩等于零时（电子壳层内电子数达到满额），抗磁性就容易表现出来。

(2) 顺磁物质

如果 $\chi > 0$ ，但很小， $\vec{M}$ 与 $\vec{H}$ 的方向相同，这类物质称为顺磁性物质。具有顺磁性的物质很多，氧分子 O_2 、一氧化氮 NO、许多稀土金属和铁族元素的盐类、碱金属等都是顺磁性物质。在较高的温度下，Fe、Ni、Co 等也具有顺磁性。顺磁性物质的磁

化率 $\chi \approx (4\pi)^2 (10^{-10} \sim 10^{-13})$ [国际单位]。

物质的顺磁性来源于原子内没有填满的电子壳层，它们具有未被抵消的总动量矩，因而存在一定的原子或离子磁矩。在外磁场作用下，原子磁矩将转向磁场方向而产生顺磁效应。在顺磁物质中，抗磁性被较强的顺磁性掩盖了。

(3) 铁磁物质

如果 $\chi \gg 0$ ，这类物质称为铁磁性物质。Fe、Co、Ni 及它们的合金和化合物等，Cr 及 Mn 的一些合金都是铁磁性物质。这类物质的磁化强度 M 与磁场强度 H 的关系不呈线性。而抗磁性物质和顺磁性物质的 M 和 H 间存在着线性关系。

物质的铁磁性来源于铁磁物质内存在的强大分子场所产生的若干自发磁化区域——磁畴。每一磁畴内部自发磁化到饱和。无外磁场时，各磁畴的磁化强度方向分布紊乱，互相抵消，总的来说不表现宏观磁化。当加上磁场时，磁畴迅速沿外场取向，从而显现出很强的磁性。现代量子力学已完全证实了自发磁化的产生，它是由于相邻原子的电子间存在着特殊静电交换力。这种电子间的静电作用力，强迫电子自旋作平行或反平行排列。在铁磁物质内，其作用的效果相当于前面提到的分子场作用到原子磁矩上一样，使得各个原子磁矩按同一方向平行排列。

晶体中磁矩的有序排列现象分为铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性三类。如上所述，在铁磁性物质里，原子磁矩互相平行排列。在反铁磁性物质里，磁矩分为对等的两组，各形成一个次点阵。在同一组内磁矩互相平行，但两组之间则彼此反向平行。对每一次点阵而言，具有类似铁磁性的自发磁化，但两组自发磁化的总和则为零。在亚铁磁性物质里，磁矩分占不对等的两个次点阵，反向平行的磁矩不能完全抵消，因而宏观地表现出自发磁化，与铁磁性物质相似。图 1-2 为铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性的磁矩排列示意图。

铁磁性物质和亚铁磁性物质属于强磁性物质，反铁磁性物质、顺磁性物质和抗磁性物质属于弱磁物质。亚铁磁性物质也称



图1-2 铁磁性、亚铁磁性和反铁磁性的磁矩排列

为铁氧体。

可根据磁性材料的铁磁性和亚铁磁性作成各种器件。根据用途的不同以及材料所表现的磁性差别，可将磁性材料分为软磁材料、永磁材料、矩磁材料、旋磁材料、压磁材料五大类。

(1) 软磁材料。例如工业纯铁、硅钢片、铁镍合金、铁钴合金、铁铝合金、锰锌铁氧体、镍锌铁氧体等均属于这类材料。软磁材料多用作电机、变压器、继电器、磁放大器、电感线圈、磁轭、录象和录音磁头。它的特点是磁导率高，矫顽力低。当外加磁场较弱时，磁化强度即可达到较大值。去掉外磁场时，材料保持的剩余磁化强度很小，容易退磁。

(2) 永磁材料。例如碳钢、锰钢、钨钢、铝镍钴合金、可加工永磁、稀土永磁、钡铁氧体、锶铁氧体等均属于这类材料。它广泛用于仪表、磁铁控制器件、电声和电讯器件。永磁材料制成的器件，使用前需要在强磁场下磁化（称为充磁），然后在无外磁场时应用自身产生的磁场。永磁材料的特点是剩余磁化强度高，矫顽力大，不容易退磁。

(3) 矩磁材料。例如锰镁铁氧体、锰镁锌铁氧体、锂系铁氧体、含镍65%的二元铁镍合金、含镍50%的合金、铁镍合金薄膜等均属于这类材料。矩磁材料的特点是磁滞回线接近于矩形，而且矫顽力低。因此材料在反向磁场作用下，能够保留原来的正向剩余磁化，直至磁场达到矫顽力值时，才突然跃变到反向的剩余磁化。

矩磁材料可以做成计算机中的记忆元件或自动控制系统中的开关元件，这时利用材料的正向和反向剩余磁化状态作为元件中的两个基本存储状态（“1”状态和“0”状态）。

（4）旋磁材料。例如镁锰铁氧体、石榴石铁氧体均属于这类材料。旋磁材料的特点是在微波电磁场作用下，产生一系列特殊效应，如铁磁共振、法拉第旋转效应和磁导率的张量化等。利用这些效应可以做成各种微波器件。

（5）压磁材料。例如纯镍、钕坡明杜、钴铁氧体等均属于这类材料。利用材料磁化时发生的形变所引起的超声波振动现象，可以做成各种超声波发生器，以及测量力、速度、加速度的各种传感器。

除以上五类磁性材料外，还有许多特殊性能的材料。例如磁导率在一定磁场范围内无显著变化的恒导磁材料；既具有磁性，又具有半导体性能的磁性半导体材料；在一定偏磁场作用下，出现许多圆柱形磁畴，可作为记忆元件的磁泡材料；利用磁光效应作成磁光器件或磁光存储器的磁光材料等。

金属永磁材料按照永磁性能形成的机理可分为如下几种：

（1）淬火硬化型磁钢。如碳钢、铬钢、钴钢、铝钢和钨钢。这类磁钢的矫顽力和磁能积都比较低，主要通过高温淬火时奥氏体转变为马氏体所产生的应力来获得永磁特性。

（2）沉淀硬化型磁钢。这类磁钢是以铁镍铝和铁镍铝钴为基的高磁能积高矫顽力合金。其特点是在高温下合金呈单相状态，当冷却到两相区时，在一定的冷却速度下，利用 α -相析出磁性相而使矫顽力增加。浇铸磁钢和烧结磁钢均属于这种材料。

（3）时效硬化型磁钢。这类磁钢经过淬火后具有可塑性，适合于机械加工。合金的永磁性是通过淬火、塑性形变和时效硬化以后得到的。属于这类材料的有： α -铁基合金，包括钴铝、铁钨钴和铁钼钴；铁锰钛和铁钴钒合金；铜基合金，包括铜镍铁和铜镍钴合金。

（4）有序硬化型磁钢。这类磁钢包括银锰铝、铂钴、铁铂

和锰铝合金。在高温时合金处于无序状态，经过淬火和回火以后，由无序相中析出弥散状态的有序相，从而提高了矫顽力。铂钴合金的矫顽力达到 360kA/m 。

(5) 单畴微粉永磁。属于这类材料的有锰铋合金、球形微铁粉和铁钴粉、针状微铁粉和铁钴粉。这种材料都是由金属或合金的粉末在一定条件下压制而成的，微粉的颗粒只有单畴大小，一般为 $1\sim 0.01\mu\text{m}$ 。

(6) 稀土永磁合金。

此外，近年来出现的非晶态磁性材料，其原子空间排列无序，而自旋磁矩排列有序。这类材料的制造工艺简单，在性能和应用方面，与前面介绍的各类材料相比，有其独特的优点。它是一类很有发展前途的新型磁性材料，已引起国内外的重视。其发展也很快，目前已开始在工程上得到应用。

二、铁磁物质的直流磁化特性和磁性参量

铁磁物质在使用时总是处于磁化状态，它的性能也在磁化过程中表现出来。

前面已经提到，物质的宏观磁性是用磁化强度 M 来描述的。处于退磁状态的铁磁物质，对外不显示磁性。将它放入外场 H 时，物质内的原子磁矩取向并产生附加磁场。通常把附加磁场与外场叠加，将叠加后的合磁场称为磁感应强度，用符号 B 表示。磁感应强度也称为磁通密度，它是 H 的函数，它们间有下面的关系：

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

式中 $\mu = 1 + 4\pi\chi$ ，称为物质的磁导率。

铁磁物质在外场磁化下，其磁畴磁矩从不同方向转到磁场方向，对外显示磁性的过程称为技术磁化。

在技术磁化过程中，当外磁场 H 从零起逐渐增加时，铁磁物质的磁感应强度 B 或磁化强度 M 也从退磁状态（ B 或 M 等于零）逐渐上升。其值开始变化较慢，随着磁场进一步增大，则增加很快；在磁场足够强时，变化又缓慢了，如图 1-3 所示。这样的曲