



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

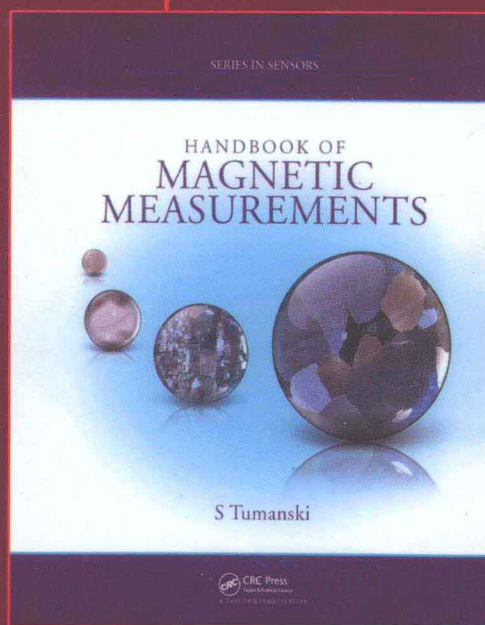
磁性测量手册

Handbook of Magnetic Measurements

(波兰) Slawomir Tumanski 编著

赵书涛 葛玉敏 译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

磁性测量手册

Handbook of Magnetic Measurements

(波兰) Slawomir Tumanski 编著

赵书涛 葛玉敏 译



机械工业出版社

目前,磁设备的应用很广泛,但国内全面系统介绍现代磁性测量技术的权威书籍却很少。本书收集紧跟科技发展的信息广泛涵盖了磁性测量领域的多个主题。

本书首先从容易理解的磁性测量基本知识开始,综合述评了现代磁性材料测量发展的现状,如软磁性材料、硬磁性材料和薄膜磁性材料。然后,全面描述了常用磁性测量传感器,包括感应、磁通门、霍尔、磁阻、磁共振、超导量子干涉仪(SQUID)、磁致伸缩和磁光等传感器,并给出了详细的实现电路和测试结果等应用实例。最后讨论了磁性测量用于材料无损检测和探测方面的应用,包括医学磁性诊断、磁考古学和磁成像。

本书是一本全面的磁性测量书籍,既适合从事磁测量的专业人员,也适合具备很少专业知识的读者,能帮助读者在令人费解的专业术语中畅游,为有效地解决电磁装置设计中的难题提供参考。本书既可以作为从事与磁性材料和磁测量有关的研发、生产相关技术人员的参考书籍,也可作为测量及检测技术相关专业研究生和本科生的教学参考书。

Handbook of Magnetic Measurements (1st Edition) /by Slawomir Tumanski/ISBN:
978-1-4398-251-6

Copyright© 2011 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of
Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved;

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并在限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized
and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书北京市版权局著作权登记号:图字 01-2012-4436

图书在版编目(CIP)数据

磁性测量手册/(波兰)斯朗瓦莫(Tumanski, S.)编著;赵书涛,葛玉敏译. —北京:机械工业出版社,2013.9

(国际电气工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-43439-9

I. ①磁… II. ①斯…②赵…③葛… III. ①磁测量—技术手册 IV. ①TM936-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 168529 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:赵玲丽 责任编辑:赵玲丽

版式设计:霍永明 责任校对:刘志文

封面设计:赵颖喆 责任印制:李 洋

北京华正印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·32 印张·734 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-43439-9

定价:128.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

磁性测量技术是现代测量、测试中的一项关键技术，在现代科技中有着重要的地位，尤其是在材料、能源、工业生产、宇宙探索以及国防科技应用中，都扮演着举足轻重的角色。无论是对于磁学的专业研究者还是与磁有关其他领域的研究人员，掌握磁性测量原理和现代磁性测量技术是重要的基本技能。但是国内专门介绍磁性测量的书籍不多，尤其紧跟最新发展的磁性材料测试及传感器方面可供查阅的资料较少。本书可供从事磁性测量研究与装置开发等相关工作的专业技术人员参考，也可作为高校检测与仪器、测量、材料专业或其他相关专业的本科生、研究生的教学参考书。

本书系根据波兰华沙理工大学 Slawomir Tumanski 教授出版的《Handbook of Magnetic Measurement》一书翻译而成。有关本书的内容安排已在内容提要中做了详细说明，故不再赘述。这里仅着重指出，与目前国内已出版的多种同类书籍相比，本书具有以下几个显著特点。

1) 综合了磁性测量新技术，在磁性测量基本知识基础上，讲述了磁性材料测量方法和领域内的新应用成果。

2) 详细描述了磁性材料测试方法及其多种传感器，从磁性测量的标准、电路设计以及满足实际中技术要求等方面做了深入分析。这对于更有效地实际应用磁性传感器无疑很有启发和帮助。

3) 为了使读者系统了解磁性测量系统应用的发展，书中列举出在磁无损检测、医学诊断和磁勘探等典型应用实例，因而易于为读者理解和接受。

4) 每章都附有相当数量的参考文献，以帮助读者进一步查阅和钻研思考。

本书由华北电力大学赵书涛、葛玉敏组织翻译和校核，在工作中陈朋永、赵永俊、齐芸芸、申路、张佩和张伟霞等硕士研究生参与部分翻译工作，在此译者谨向他们表示衷心感谢。

译者对原书中的一些印刷错误已做了补正。

鉴于本书涉及的知识范围十分广泛，译者水平有限，译文中不妥和错误之处在所难免，望读者不吝批评指正。

译者

2013 年 5 月

前言

本书是我前一本书《电气测量原理》的续篇。然而写这本书更具有挑战性，因电气测量被大家所熟知——有许多经典书籍介绍这方面知识。而在磁性测量方面，可供参考的最新技术书籍却非常有限，不得不搜集分散的专业文献来编辑部分现代知识。

当然，也有几本有关磁测量的优秀书籍和文献。许多年前，就有“磁”方面的权威著作，例如 Bozorth 在 1951 年发表的《铁磁性》、Cullity 在 1972 年^①出版的《磁性材料导论》和 Zijlstra 在 1967 年编写的《磁性实验方法》。如今这些著作主要被当作历史奠基而多次被重新印刷（也许是缺乏紧跟时代发展的相关书籍的原因）。

在这方面，有两本优秀的现代书籍推荐给读者：Fiorillo 编写的《磁性材料测量与描述》和 Ripka 编写的《磁性材料》。这两本书相对集中地介绍了有关磁性测量领域的内容。

在波兰华沙理工大学，磁性测量并不是一门必修课。实际上，让更多学生自学这门课程也比较困难。大多数学生在修完电力理论基础必修课程后，对磁性测量有些偏见，他们认为，磁性测量很困难，需要特别复杂的数学知识。确实，麦克斯韦定律中如梯度、差分和卷积等复杂概念，在电磁场理论中需要卓越的智力和付出更多努力才能理解。基于这个原因，许多学生很难立即克服这个困难，他们兴趣可能转移到科学技术中的其他新领域。这就导致一般实践工程师在磁学方面的知识匮乏。

最近我审阅了一篇电力电子专业的博士论文，在其课题实际工作中，磁学部分起很重要的作用。该论文中博士生得到下面结论：在基本形式上，磁路由铁心构成，通常是铁磁材料，即所谓的软磁性材料。这是整篇论文中唯一一句在磁方面的句子！这简直吓人一跳。我很惊愕，这就相当于对法国人来说，他刚刚知道了“葡萄酒可以分为红葡萄酒和白葡萄酒”。显然与葡萄酒类似，磁性材料可以分为几百种，又可以分为几百个等级——每种有其特有的属性。

磁装置已经有比较广泛的应用。本书并不是只写给专家，更是面对磁性测量知识较少的工程师和学生的，目的是在帮助他们理解一些费解的概念的基础上，让他们更有效地设计电磁装置。因此，本书从相对通俗易懂的“磁性测量的基础知识”开始。这样，读者在阅读其他部分的时候不至于太陌生。

很多专家在许多国际会议中遇到后就讨论磁测量中的问题，这些会议有国际应用磁学、软磁性材料会议、磁传感器、磁测量和 2 维磁测量工作等会议，且每年发表大量的磁学论文。正是由于这个原因，文章的高级读者经常处于某种自主状态，并且容

① 2009 年 Graham 对第 2 版进行了部分改编。

易失去联系信息。我希望这本书对组织者有所帮助，能作为这些读者的指南和参考。

由于样品的形状和磁化条件等因素对测量结果产生影响，磁性测量，特别是磁性材料测量方法十分复杂，所以需要标准精确地描述大多数测量方法。可惜，除了国际组织外，不同的国家仍在使用不同的标准。本书采用的是国际电工委员会标准，与美国、欧洲和日本标准相差不大，但这些标准差别也不能被忽略。

有时术语和单位在每个国家有所不同。尽管有义务采用国际标准单位（SI），但是在某些环境中也不完全是 SI 单位。例如，物理学家仍采用以前的单位制——高斯作为磁感应强度单位，奥斯特作为磁场强度单位或者埃作为尺寸小时的单位。本书仍坚持采用 SI 单位制。利用下面的简单易记的关系式，旧的单位制能非常容易地转换为新单位制。

$$1\text{Oe} \rightarrow 0.796\text{A/cm} \rightarrow 79.6\text{A/m}$$

在磁学书籍中，有些术语经常引起误解。例如，两个最基本的术语有不同的名字，磁通（量）密度（ B ）也意味着磁感应强度 B （事实上，第一个术语写起来较长些）。类似的，磁场强度 H 也称为磁场密度 H 。此外在日常的交流中，磁场也被理解为磁场强度（例如，表达式 100A/m 的磁场）。为避免争议，我采用磁场来描述物理现象（没有单位），采用带单位的量描述磁场强度或磁感应强度。

更广范围的磁性测量有时学科跨度很大，诸如物理、医学、材料科学、地球物理、电气工程和信息等，不可能在这么多个学科都是专家，因此本书撰写难免有不足之处。另一方面，一个作者写一本书，与多个合作者共同书写相比，能更好地贯穿自己的思想。幸运的是，市场上有许多优秀书籍是讲述专门课题的，如磁性材料、磁共振、磁图像、磁物理和超导量子干涉仪（SQUID）等。本书给出了大多数直接相关的参考文献，但文献有数百篇，不能详细地一一列入。

在此感谢加迪夫大学的 Tony Moses 教授的帮助。特别感谢 Megger 有限公司 Stan Zurek 博士，他是本书的第一个读者，且为提高本书质量提供了重要的帮助。

Slawomir Tumanski

作者简介

Slawomir Tumanski 多年担任华沙理工大学教授，主要研究领域为磁传感器和磁性材料。出版了《薄膜磁阻传感器》和《电气测量原理》两本著作。担任《Prze-glad Electrotechniczny (Electrical Review)》科技杂志主编。

书中用到的单位、符号和常数

a	尺寸 (m)	J	磁极化 (T)
A	面积 (横截面积) (m^2)	J_s	饱和极化 (T)
$\mathbf{A}$	矢量磁位 (T m)	k_B	波尔兹曼常数, $k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
B	磁通密度 (磁感应强度) (T)	K_0, K_1, K_2	各向异性常数 (J/m^3)
$b(t)$	瞬时磁感应强度 (T)	K_u	单轴各向异性常数 (J/m^3)
$B_j(x)$	布里渊函数	K_K	冯克里兹常数, $K_K = 25812 \times 10^{-7} \Omega$
B_r	剩磁感应强度	l	长度 (m)
B_s	饱和磁感应强度	l	轨道量子数
BH	能积 (J/m^3)	L	角动量
c	光速, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$	L	磁感应系数 (H)
e	电荷, $e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$	L	各向异性轴
C	电容 (F)	M	磁化
C_j	约瑟夫逊常数, $C_j = 483.597891 \text{ GHz/V}$	M_s	饱和磁化
d	直径 (m)	M	磁偶极矩 (A m^2)
e	电动势 (V)	M	互感系数 (H)
E	电场强度 (V/m)	m	磁偶极矩 (A m^2)
E	能量密度 (J/m^3)	m	质量 (kg)
f	频率 (Hz)	m_e	电子质量, $m_e = 9.109 \times 10^{-28} \text{ g}$
f_0	共振频率	m_l	磁量子数
F	力 (N)	m_s	自旋量子数
g'	朗德 g 因子	n	匝数
H	磁场强度 (磁场密度) (A/m)	n	主量子数
$h(t)$	瞬时磁场强度 (A/m)	N_A	阿伏伽德罗常数, $N_A = 6.022 \times 10^{26} \text{ 原子 kg/mol}$
H_c	矫顽磁场强度 (A/m)	N_d	退磁因子
H_{cr}	临界磁场 (在超导体中) (A/m)	P	功率 (W)
H_d	退磁场强度 (A/m)	P_A	轴向损耗
H_k	各向异性场强 (A/m)	P_r	自旋功率损耗
H_l	磁场切向分量 (A/m)	P_w	单位功率损耗 (W/kg)
$B H_c$	$B(H)$ 曲线矫顽磁性	P_H	磁滞损耗
$J H_c$	$J(H)$ 曲线矫顽磁性	P_{EC}	涡流损耗
I	电流 (A)	P_{Ex}	额外功率损耗
I_{cr}	临界电流 (超导体)	q	电荷 (C)
J	电子角动量		
j	电流密度 (A/m^2)		

R	电阻 (Ω)	10^{-12} C/V m
R	磁阻	ε 磁条方向角
R_H	霍尔系数	Φ 磁通 (Wb)
r	半径 (m)	Φ_0 磁通量子, $\Phi_0 = 2.067833667 \times 10^{-15} \text{ Wb}$
s	自旋角动量	λ_s 饱和磁弹性
S	视在功率损耗	$\hbar$ 普朗克常数, $\hbar = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$
S	自旋总转矩	μ_m 磁矩
S	屏蔽因数	μ_l 轨道磁矩
S	自旋数	μ_s 自旋磁矩
t	时间 (s)	μ_B 波尔磁子, $\mu_B = 1.165 \times 10^{-29} \text{ J m/A}$ $= 9.274 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$
t	厚度 (m)	μ_N 核磁子, $\mu_N = 5.05083 \times 10^{-27} \text{ Am}^2$
T	温度 (K)	μ 磁导率
T	时间常数	μ_0 真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am}$ $= 4\pi \times 10^{-6} \text{ H/m}$
T_c	居里温度	μ_r 相对磁导率
V	电压 (V)	μ_{rev} 可逆性磁导率
V	体积 (m^3)	μ_{in} 初始磁导率
v	速度 (m/s)	μ_{rec} 反冲磁导率
w	宽度 (m)	μ_{Δ} 可逆性磁导率
x	距离 (m)	ρ 电阻率
Z	原子序数	ϑ 电流磁化及方向夹角
Z	阻抗 (Ω)	φ 磁化及各向异性轴夹角
Z_0	自由空间阻抗, $Z_0 = 377 \Omega$	ψ 标量磁位
α	方向角	ω 角频率 (rad/s)
β	磁光效应的光线旋转	ω_0 进动频率
β	McCumber 因子	χ 磁化率
γ	密度 (kg/m^3)	ν 费尔德常数
γ	旋磁比	ν 磁阻
γ_p	质子 (氢核) 旋磁比, $\gamma_p = 42.5760812 \text{ MHz/T}$	θ 标称角
γ_e	电子旋磁比, $\gamma_e = 28.02468 \text{ GHz/T}$	τ 转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)
δ	集肤效应深度 (m)	
σ	机械应力	
ε	介电常数 (C/V m)	
ε_0	真空中介电常数, $\varepsilon_0 = 8.854 \times$	

目 录

译者序

前言

作者简介

书中用到的单位、符号和常数

第 1 章 磁性测量导论	1
第 2 章 磁性测量基础	6
2.1 历史背景	6
2.2 主要概念	8
2.2.1 磁场强度 H , 磁通量 Φ 和磁感应强度 B	8
2.2.2 磁化强度 M	10
2.2.3 磁极化强度 J	11
2.2.4 磁导率 μ	11
2.2.5 磁化系数 χ	12
2.2.6 磁阻 R	13
2.3 铁磁材料的磁化过程	13
2.3.1 磁畴结构	13
2.3.2 磁化曲线	15
2.3.3 磁滞回线	16
2.4 各向异性和纹理	19
2.4.1 磁晶各向异性	19
2.4.2 纹理	21
2.4.3 形状各向异性	23
2.5 电磁损耗	25
2.5.1 磁化轴功率损耗	25
2.5.2 旋转磁化下的功率损耗	28
2.6 磁场对材料物理性质的影响	31
2.6.1 磁致伸缩和其他的磁弹效应	31
2.6.2 磁致电阻	35
2.6.3 磁光现象	38
2.6.4 磁致热效应	41
2.7 磁共振	42
2.7.1 旋磁比和拉莫尔旋进	42

2.7.2	核磁共振	44
2.7.3	电子自旋共振	46
2.7.4	铁磁共振	48
2.7.5	欧佛豪瑟(欧氏)共振	48
2.7.6	穆斯堡尔效应共振	50
2.8	超导效应在磁性测量中的应用	51
2.8.1	超导电特性和磁性——迈斯纳效应	51
2.8.2	约瑟夫逊效应	53
2.8.3	超导量子干涉仪	54
2.8.4	量子霍尔效应	56
2.9	磁学的主要定律	57
2.9.1	毕奥萨伐尔定律	57
2.9.2	安培环路定律	59
2.9.3	法拉第感应定律	60
2.9.4	洛伦兹力	61
2.9.5	坡印廷矢量	62
2.9.6	麦克斯韦方程	63
2.9.7	单一磁场的计算	65
2.10	磁性的物理原理	69
2.10.1	磁场和磁矩	69
2.10.2	磁场和能带结构的态密度	74
2.10.3	弱磁性——反磁性和顺磁性	76
2.10.4	强磁性——铁磁性	80
2.10.5	混合磁性——反铁磁性和亚铁磁性	83
2.10.6	非晶和纳米晶材料	88
2.10.7	磁畴和畴壁	90
2.11	磁滞	95
2.11.1	磁化过程	95
2.11.2	磁滞的雷利模型	101
2.11.3	磁滞的 Stoner-Wohlfart 模型	103
2.11.4	磁滞的 Preisach 模型	106
2.11.5	磁滞的 Jiles—Atherton 模型	109
2.11.6	励磁曲线和磁滞回线的近似	111
2.12	磁场的源	112
2.12.1	亥姆霍兹线圈	112
2.12.2	长螺线管	114

2.12.3 强磁场的源	116
2.12.4 任意波形的磁场源	119
2.13 测试材料的样品和电路	124
2.13.1 B 和 H 值的测量	124
2.13.2 环形铁心	126
2.13.3 爱波斯坦方圈	129
2.13.4 单一薄片和单一细长条的测试器	131
2.13.5 二维空间的测量样品	135
2.13.6 开路样品	136
2.14 磁屏蔽	138
2.14.1 磁场的污染	138
2.14.2 磁场屏蔽	139
2.14.3 主动磁屏蔽——磁场的消除	141
2.14.4 磁屏蔽室	142
参考文献	144
第3章 磁性材料	152
3.1 软磁材料的一般知识	152
3.1.1 性质和分类	152
3.1.2 纯铁	156
3.2 硅铁电工钢	158
3.2.1 常规晶粒取向 SiFe 钢	158
3.2.2 HiB 晶粒取向电工钢	164
3.2.3 SiFe 非取向电工钢	167
3.2.4 非常规铁基合金	172
3.3 镍基和钴基合金	176
3.3.1 镍铁合金(坡莫合金)	176
3.3.2 钴铁和钴铁镍合金	178
3.4 非晶和纳米晶合金	180
3.4.1 非晶态软磁材料(玻璃合金)	180
3.4.2 纳米晶软磁性材料	184
3.5 软铁	188
3.5.1 锌化锰和锌化镍铁氧体	188
3.5.2 铁氧体在微波中的应用	192
3.6 硬铁磁材料	193
3.6.1 总论	193
3.6.2 铝镍钴合金	197

3.6.3 硬磁铁氧体	198
3.6.4 稀土硬磁铁氧体	199
3.7 特殊磁性材料	203
3.7.1 磁性薄膜	203
3.7.2 铁磁流体和磁流变液体	208
参考文献	208
第4章 磁传感器	212
4.1 总论	212
4.1.1 磁场传感器分类	212
4.1.2 磁传感器性能	213
4.2 感应传感器	219
4.2.1 导论	219
4.2.2 空心线圈与铁心线圈	220
4.2.3 空心线圈传感器设计	220
4.2.4 铁心线圈传感器设计	223
4.2.5 线圈传感器的频率响应	224
4.2.6 线圈传感器连接的电子电路	226
4.2.7 移动线圈传感器	229
4.2.8 梯度传感器	229
4.2.9 洛可夫斯基 (Rogowski) 线圈	231
4.2.10 其他传感器	233
4.2.11 线圈传感器作为磁性天线	235
4.3 磁通门传感器	239
4.3.1 工作原理	239
4.3.2 磁通门传感器的性能	242
4.3.3 磁通门传感器的设计	244
4.3.4 多传感器系统 (罗盘和梯度磁力计)	246
4.3.5 磁通门传感器的电路	248
4.4 磁阻和磁阻抗传感器	252
4.4.1 磁致电阻总体介绍	252
4.4.2 AMR 磁场传感器	254
4.4.3 多层 GMR 磁场传感器	264
4.4.4 自旋阀式的巨磁阻磁场传感器	268
4.4.5 旋转—从属隧道巨磁阻磁场传感器	274
4.4.6 巨磁阻抗效应传感器	279
4.5 霍尔效应传感器	285

4.5.1 霍尔效应的物理原理	285
4.5.2 霍尔传感器的设计	287
4.5.3 霍尔传感器的性能	290
4.5.4 集成霍尔传感器	293
4.5.5 基于霍尔效应的半导体磁阻器	295
4.6 SQUID (超导量子干涉仪) 传感器	297
4.6.1 SQUID 传感器的工作原理	297
4.6.2 SQUID 传感器的设计和特性	300
4.6.3 SQUID 磁力计	303
4.7 共振传感器及磁力计	306
4.7.1 概述	306
4.7.2 测量强磁场的 NMR 磁力计	308
4.7.3 测量弱磁场的 NMR 磁力计	310
4.7.4 光泵传感器及磁力仪	314
4.7.5 双重 (欧佛豪瑟) 共振磁力计	319
4.8 其他的磁场传感器	320
4.8.1 磁致伸缩和维甘德效应	320
4.8.2 其他理论和新理论	323
参考文献	326
第 5 章 磁性材料的测试	339
5.1 软磁材料的交流测试	339
5.1.1 我们通常测试什么?	339
5.1.2 软磁材料的标准测试	345
5.1.3 单片和单条测试仪	347
5.1.4 在线测试设备	350
5.1.5 磁性材料的中频和高频测试	353
5.1.6 磁性材料参数的局部测量	357
5.1.7 旋转功率损耗	367
5.1.8 二维磁性能	374
5.1.9 各向异性和纹理	379
5.2 软磁性材料的直流测试	388
5.2.1 模拟和数字磁通计	388
5.2.2 软磁性材料的点对点直流测试	392
5.2.3 软磁性材料的连续准静态测试	394
5.2.4 用于软磁性材料测试的磁导计	395
5.3 硬磁性材料的测试	397

5.3.1 闭合磁路中硬磁性材料的测试	397
5.3.2 开磁路硬磁性材料的测试	399
5.3.3 脉冲磁场方法	402
5.4 磁性材料测试的特殊方法	404
5.4.1 测磁方法	404
5.4.2 可视测磁方法	408
5.4.3 其他扫描系统	417
5.4.4 磁致伸缩效应和其他磁力学效应的研究	420
参考文献	426
第6章 磁场测量及其应用	436
6.1 环境磁场	436
6.1.1 地球磁场	436
6.1.2 航天研究	441
6.1.3 磁性勘察和测量	444
6.1.4 罗盘与航行	450
6.1.5 电磁污染	454
6.2 磁场测量的应用	459
6.2.1 磁体探测：磁特征	459
6.2.2 机械传感器	463
6.2.3 电传感器	468
6.3 磁性诊断	472
6.3.1 磁性成像	472
6.3.2 磁性无损检测	482
6.3.3 医学中的磁学	487
参考文献	493

第 1 章 磁性测量导论

本书中，磁性测量的范围不仅仅局限于磁性材料测试或磁场测量。直接或间接测量磁性参数，例如磁场强度 H 、磁感应强度 B 、磁导率 μ 、磁化系数 χ 、磁致伸缩系数 λ ，常用于科学和技术的其他领域中，像古地磁学、磁考古学、矿山探测、位移或距离检测、电流测量、材料无损检测和医学诊断等，磁场测量实际应用是无限的。例如，可以使用磁致伸缩传感器测试其他物质数量，例如酸度 pH 值、血凝固度、蓖麻油（蓖麻毒素）浓度甚至沙门氏菌的存在。

尽管磁和电的测量需要类似的“工具”（两者都是通过电压或电流确定），但磁场测量通常更加复杂甚至更加不明确。多年来，仍假设磁性材料磁化由磁场强度 H 和磁感应强度 B 两个参数表示。然而，几年前的公认结论（国际标准紧随其后）是与磁感应强度相比，为少数人熟知的名词——极化强度 J ($J = B - \mu_0 H$) 能更准确地描述材料的磁化状态。此外，现在有些专家认为更好的是采用磁化强度 M 来描述磁性材料。在磁性材料磁场强度测量上有两个学派：一个是通过应用安培定律（通过测量励磁电流）间接测量，另一个通过测量线圈（应用法拉第电磁感应定律）直接测量。在真正选择测量磁场的传感器时，目前仍在讨论是测量磁场强度 H 还是磁感应强度 B 。因此，与建立了明确术语的电参量测量相比，磁性测量有许多基本问题仍在讨论中。

在电气测量方面，电流和电压之间存在简单关系，可表达为欧姆定律。如图 1.1 所示测试样品，电势差由供电电压 V 表示，电流用 I 表示。电流值取决于材料的电阻率 ρ ，电阻为 $R = \rho l / A$ (l 是样品的长度， A 是横截面积)。根据欧姆定律，电流为

$$I = \frac{V}{R} \quad (1.1)$$

在电场 E 作用情况下，更精确地反映材料电阻率 ρ 的是电流密度 J 。

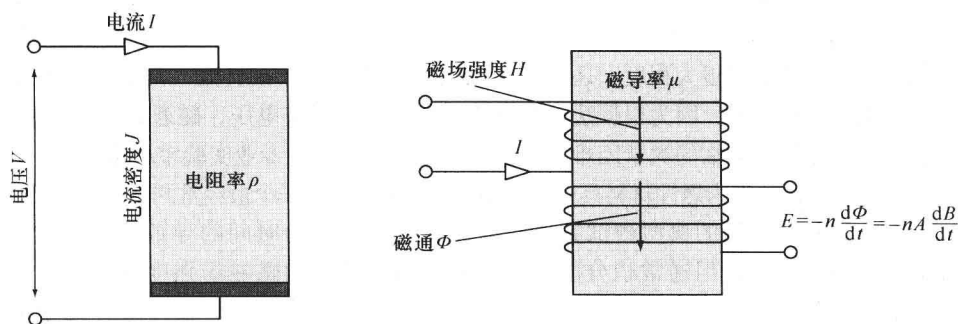


图 1.1 电气测量和磁场测量之间的类比

由图 1.1 还可得出，磁性材料的响应由磁场强度 H 作用下的磁导率 μ 表示，流过

线圈的电流 I 产生 H ，也就是线圈中产生了磁通 Φ 。换句话说，磁场强度 H 作用下材料的磁导率 μ 可由磁通量密度（即磁感应强度） $B = \Phi/A$ 表示。磁感应强度通常由二次侧 n 匝线圈感应电压来测量——电压值取决于磁感应强度的导数。在励磁磁场强度 H 和响应磁感应强度 B 之间，有相对简单的关系

$$B = \mu H \quad (1.2)$$

但是通常磁性材料测量比较复杂，远远超过同种情况下的电气测量，因为

1) 通常典型导电材料（如长方体或圆柱形）电流分布是均匀的，只有少数情况例外（举例来说，高频电流导致集肤效应）。对于磁性材料而言，这种状况几乎完全相反——磁材料测试样品磁化通常都是不均匀的，只有极少数例外（如椭圆形状样品）。

2) 典型的导电材料中，电流和电压之间的关系是高度线性，只有一些个别的例外。因此，材料可以用单一标量值电阻 R 描述。相反，大多数典型磁性材料，磁场强度和磁感应强度关系是高度非线性的。因此，通常表达两者关系使用 $B = f(H)$ 描述，这就是磁化曲线。

3) 大多数的导电材料具有相同质性，因此电流也分布均匀。由于磁性材料样品的晶粒和畴结构，在大多数情况下磁化都不均匀。

4) 除了少数例外，大多数导电材料呈现各向同性，实际中需要的是电阻率张量。而大多数磁性材料具有各向异性的特性。

因此，假设测试一个典型磁性材料样品，磁感应强度的分布很大程度上取决于样本的形状，因此不能简单地只讨论材料的磁特性。只能预先确定某些样品的属性（如环形铁心，爱波斯坦方圈，薄板或细长条形），一般建议采用闭合磁路，因开路样品需要外部磁轭磁化。

即使采用标准的试验样品，因为铁磁材料是非线性的，还有另外一个问题需要解决。那就是磁场强度和磁感应强度两个都有可能是非正弦的（如果是使用交流试验方法），磁感应强度和磁场强度两者哪一个采用正弦的，测量结果有非常大的差异。公认的标准是磁感应强度必须是正弦的。这需要使用特殊的先进数控磁化设备，产生高值的磁感应强度。

然而，即使测试样品采用确定的形状和严格的磁化波形，还有许多其他困难需要克服。因为材料通常各向异性，应该精确地确定磁化方向，这个问题在二维或三维测试中更加重要。测试结果很大程度上还要受到磁化频率的影响。在直流（静态）磁化情况下，也会出现额外问题，因为根据法拉第定律，若要产生感应电压，磁通必须是交变的。由于磁性材料测试中面临的大量困难，因此大多数测试只能在专业实验室中进行。

磁滞回线通常被视为磁性材料具有的一种现象，因此也是一个最经常测试的磁特性。

图 1.2 为磁滞回线的典型测试方法。因为磁感应强度为时间的导数，尽管先进的示波器可以执行操作，但通常积分放大器是必不可少的。励磁磁场强度通常取决于磁化电流值（电压降 V_H ），根据安培定律 $H = I_1 n_1 / l$ （ l 是磁路长度，在环形样品中取平均周长， n_1 是磁化绕组匝数）。磁感应强度通常可由法拉第定律 $dB/dt = -V_2 n_2 / A$ 得出。

马蹄型永久磁铁（见图 1.3）通常被用作一个磁性的标志。现代稀土磁铁可以产生的 BH 高于 400 kJ/m^3 ，非常接近理论极限假定的 485 kJ/m^3 。诸如 1200 kA/m 以上