

上海科技大学重点教材建设专项资助

高等院校电气工程系列教材

磁测量原理与技术

Principle and Technology of Magnetic Measurement

叶朝锋 徐云 迟忠君 郝丽 编著

Ye Chaofeng Xu Yun Chi Zhongjun Hao Li

清华大学出版社

高等院校电气工程系列教材

磁测量原理与技术

Principle and Technology of Magnetic Measurement

叶朝锋 徐云 迟忠君 郝丽 编著

Ye Chaofeng Xu Yun Chi Zhongjun Hao Li



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面介绍了磁测量的原理与技术。全书分理论和实验两大部分,其中理论部分共6章。第1章是磁测量概论,介绍了磁测量的基本概念、基本磁学量、电磁场的基本定律、磁介质的性能方程、铁磁物质的磁性、磁测量的基准和基本方法等内容;第2章主要介绍了磁场的测量,包括常见的磁场激励源和磁场测量的原理、方法与技术;第3章讲述磁性材料本征磁特性的测量,介绍了磁性材料饱和磁化强度的测量、磁各向异性常数的测量、磁致伸缩系数的测量、居里温度的测量、旋转样品测量以及应用铁磁共振技术测量磁参数;第4章讲述磁性材料静态磁特性的测量,主要介绍了冲击法测量静态磁特性;第5章介绍了动态磁特性的测量;第6章对磁测量最新进展与前沿技术作了简要介绍。实验部分介绍了10个与磁测量相关的实验,每个实验都详细介绍了实验目的、实验内容与要求、实验仪器、实验原理和实验步骤等,方便在教学实践中使用。

本书可作为磁测量方向的专业教材,供高等院校电气工程、电子技术、材料物理等专业的学生选用,也可供从事磁场与磁测量相关工作的技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

磁测量原理与技术/叶朝锋等编著. —北京:清华大学出版社,2018
(高等院校电气工程系列教材)
ISBN 978-7-302-51386-5

I. ①磁… II. ①叶… III. ①磁测量—高等学校—教材 IV. ①O441.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 233857 号

责任编辑:冯 昕

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市国英印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:12.25

字 数:293 千字

版 次:2018 年 12 月第 1 版

印 次:2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价:35.00 元

产品编号:079932-01

编著者简介

叶朝锋, 现任上海科技大学信息科学与技术学院助理教授/研究员/博导。2008年7月至2013年6月在清华大学电机系工作, 期间参与和主持了多项电磁检测相关的科研项目。后赴美国深造, 在密歇根州立大学取得博士学位并完成了博士后的研究。在美国期间, 与波音公司的研发团队合作研制了基于巨磁阻(GMR)传感器阵列磁场成像的飞机金属结构检测系统; 并在美国电力科学研究院(EPRI)的资助下完成了核电站关键结构检测传感器的仿真研究及新型传感器研发。基于研究成果, 在 *IEEE Sens. J.*, *IEEE Trans. Magn.*, *Sensors* 等期刊和国际会议发表论文 20 余篇, 申请美国专利 2 项、中国专利 5 项, 曾获北京市科学技术奖。

现于上海科技大学领衔建设一个设施一流、研发实力雄厚的传感器与无损检测研究实验室。该实验室的研究方向包括: 无损检测方法与技术, 电磁精密测量, 生物医学电磁检测成像, 新型传感器及其应用技术, 信号处理与缺陷重构算法等。目前正在开展的研究项目有: 飞机关键结构无损检测成像, 核电站蒸汽发生器和核燃料棒缺陷检测与重构, 复合材料结构健康监测, 生物弱磁场信号精密测量, 生物医学电磁成像技术等。

徐云, 清华大学研究员(已退休), 工学博士。曾任清华大学电工电子实验教学中心副主任、清华大学热工电工计量室主任、清华大学电工仪器与电工计量开放实验室主任。作为负责人完成国家自然科学基金、航天基金、清华大学基础研究基金、清华大学实验仪器研究基金及横向项目多项。出版《电工技术测量与实验》《电力系统中的高次谐波》《电学中的混沌》《非线性电路及混沌》《电路测量与实验》和《节能照明系统工程设计》6 部著作。

迟忠君, 高级工程师, 硕士研究生, 毕业于清华大学电气工程专业, 现工作于国网北京市电力公司。长期从事智能电网相关技术工作, 负责或重点参与国家级、北京市科技项目 10 余项, 获省部级科技奖 10 余项, 被授予 2018 年度中国电力优秀青年科技人才奖。

郝丽, 清华大学电机系高级工程师, 具有 10 余年从事电磁场实验教学的经验。

前言



磁场是一种看不见、摸不着的物质,它不是由原子或分子组成的,但磁场是客观存在的,就像山川河流一样客观而真实。运动电荷、磁体或变化电场周围空间都存在磁场。磁体间的相互作用就是以磁场作为媒介的,所以两磁体不用接触就能发生作用。人类在几千年前就认识到了磁场与磁性物质,但对磁的研究却是一个历久弥新的问题,例如新型磁性材料、自旋电子学、微弱磁信号测量、超导磁物理等。

磁场与电场一样,是现代电磁学、电子技术的重要基础。学生在学习过程中往往对电场的基本定律、基本分析方法、常用仪器设备、导电介质材料等了解得比较透彻,而对磁场的相关知识却比较生疏。近年来随着磁性物理与信息科学的快速发展,关于磁场的基本理论与技术的教学在高校中变得越来越重要。本书的作者曾在清华大学电机系开设了磁测量专业选修课程,取得了良好的教学效果,积累了较丰富的理论教案和实验方案,同时也注意到该方向缺乏系统性的专业教材,特编辑本书。本书作为磁测量方向的专业教材,可被全国各高校的电气工程、电子技术、材料物理等方向的学生选用,同时也可作为电气相关工业领域的参考书。

本书分理论和实验两部分。理论部分综合地介绍了磁测量的基本概念、原理和方法,以及磁测量的最新进展与前沿技术。第1章是磁测量概论,介绍了磁测量的基本概念、基本磁学量、电磁场的基本定律、磁介质的性能方程、铁磁物质的磁特性、磁测量的基准和基本方法等。第2章主要介绍了磁场的产生与测量,重点介绍了霍尔元件磁场测量、电磁感应法、磁电阻效应法、磁共振法、弱连接超导效应法和磁光法的原理与特性。第3章讲述了磁性材料本征磁特性的测量,介绍了磁性材料饱和磁化强度的测量、磁各向异性常数的测量、磁致伸缩系数的测量、居里温度的测量、旋转样品测量以及应用铁磁共振技术测量磁参数。第4章讲述磁性材料静态磁特性的测量,主要介绍了冲击法测量静态磁特性。第5章介绍了动态磁特性的测量。第6章对磁测量最新进展与前沿技术作了简要介绍。实验部分介绍了10个与磁测量相关的实验,每个实验都详细介绍了实验目的、实验内容与要求、实验仪器、实验原理和实验步骤等,方便在教学实践中使用。

附录部分是常用电磁学单位对照表。参考文献包括了编著本书过程中使用到的参考资

料和提供给读者的指导性阅读资料。由于书中涉及的知识面广泛,本书在编著过程中引用了许多文献和互联网上的资料。

希望本书的出版对于对磁性物理和磁测量感兴趣的读者有所裨益。对于广大相关专业的学生,本书是一本相对全面、新颖的教材或参考书;对于从事磁场与磁测量相关工作的电气工程师们,本书是一本方便、实用的技术指导书;对于非相关专业的读者而言,本书是一本准确、易懂的大众科普读物。

在本书的编著过程中,清华大学电机系赵伟教授、黄松岭教授和袁建生教授给予了专业性的指导意见;上海科技大学王美玲、陶钰、汪洋等同志参与了本书的部分编辑工作;作者在撰写本书的日子里,家人给予了支持;此外,清华大学出版社积极促成了本书的出版,作者特此一并表示感谢。

本书由上海科技大学重点教材建设专项资助出版,并作为信息学院磁测量相关课程的教材/教参,对此,作者特别致谢。

本书的内容涉及面较广,在编著过程中,作者不断修改、补充相关的知识和内容,但由于水平有限,书中难免有错误和不足之处,希望广大读者不吝批评指正。

编 者

2018年5月于上海

目 录

第一部分 理 论

第 1 章 磁测量概论	3
1.1 基本概念及基本磁学量	3
1.1.1 测量的术语与定义	3
1.1.2 磁测量概述	4
1.1.3 基本磁学量	5
1.1.4 磁单位	9
1.2 磁场的基本定律和磁介质的性能方程	11
1.2.1 电场的基本定理	11
1.2.2 磁场的基本定理	12
1.2.3 电磁感应定律	14
1.2.4 电磁场的边界条件	15
1.2.5 电磁场的能量	15
1.2.6 磁介质的性能方程	16
1.3 铁磁物质的磁特性	16
1.3.1 物质按照磁性的分类	16
1.3.2 磁性材料的分类	17
1.3.3 铁磁物质的磁化特性和磁性参量	19
1.3.4 物体的磁化	23
1.3.5 居里温度	25
1.3.6 铁磁物质中的磁畴排列	26

1.4	磁测量的基准和基本方法	26
1.4.1	磁量具	26
1.4.2	磁测量的基本方法	27
第2章	磁场的产生与测量方法	28
2.1	磁场的产生	28
2.1.1	螺线管	28
2.1.2	螺绕环	33
2.1.3	亥姆霍兹线圈	34
2.1.4	具有尾端补偿的线圈	35
2.1.5	永磁体	37
2.1.6	电磁铁	42
2.1.7	大功率直流螺线管	46
2.1.8	超导磁体	48
2.1.9	脉冲强磁场	50
2.2	霍尔元件磁场测量原理与特性	53
2.2.1	霍尔效应	53
2.2.2	霍尔效应的副效应	54
2.2.3	副效应引起的系统误差的消除	55
2.2.4	霍尔传感器	55
2.3	电磁感应法	56
2.3.1	电磁感应磁场测量原理	56
2.3.2	电磁感应磁场测量方法	60
2.4	磁电阻效应法	65
2.4.1	半导体磁阻元件	65
2.4.2	磁敏二极管	67
2.4.3	强磁性金属薄膜磁阻元件	69
2.5	磁共振法	70
2.5.1	核磁共振法	70
2.5.2	电子顺磁共振法	81
2.5.3	光泵共振法	82
2.6	弱连接超导效应法	83
2.6.1	约瑟夫逊效应	83
2.6.2	外磁场对临界电流的影响	84
2.6.3	超导量子磁强计	84
2.7	磁光法	87
2.7.1	法拉第磁光效应传感器	87
2.7.2	磁致伸缩型传感器	88

2.7.3 力学型传感器	88
2.8 非均匀磁场的测量	89
第3章 磁性材料本征磁特性的测量	91
3.1 饱和磁化强度的测量	91
3.1.1 冲击电流计法	91
3.1.2 磁称法	92
3.2 磁各向异性常数的测量	97
3.2.1 磁各向异性	97
3.2.2 由单晶磁化曲线确定磁晶各向异性常数	98
3.2.3 由多晶磁化曲线确定磁晶各向异性常数	99
3.2.4 转矩磁强计	99
3.2.5 晶奇点检测法	102
3.3 磁致伸缩系数的测量	103
3.3.1 磁致伸缩系数	103
3.3.2 光学杠杆法	103
3.3.3 干涉仪法	104
3.3.4 形变电阻法	105
3.3.5 三端电容法	106
3.4 旋转样品的测量	107
3.4.1 测量原理	107
3.4.2 应用旋转样品磁强计的磁性测量	108
3.5 居里温度或抵消温度的测量	109
3.6 应用铁磁共振技术测量磁参数	113
3.6.1 铁磁共振原理	113
3.6.2 饱和磁化强度的测定	114
3.6.3 磁晶各向异性等效场的测定	115
3.6.4 磁致伸缩常数的测量	115
第4章 磁性材料静态磁特性测量	116
4.1 磁性材料在直流磁场中的静态磁特性	116
4.2 样品的磁化与退磁	117
4.2.1 样品的磁化	117
4.2.2 样品的退磁	118
4.3 样品中磁场和磁通密度的测量	119
4.3.1 内磁场的测量	119
4.3.2 磁通密度的测量	121
4.4 用冲击法测量静态磁特性	121

4.4.1	冲击检流计工作原理	121
4.4.2	冲击检流计的使用	122
4.4.3	用冲击检流计测量磁通	123
4.4.4	用冲击法测量静态磁特性	123
第5章	磁性材料动态磁特性测量	124
5.1	磁性材料在交流磁场中的动态磁特性	124
5.1.1	动态磁特性与静态磁特性的比较	124
5.1.2	磁化场波形对磁特性的影响	126
5.2	铁损的测量	127
5.2.1	概述	127
5.2.2	功率表法	128
5.2.3	电桥法	130
5.2.4	硅钢带损耗的连续自动测量	131
第6章	磁测量最新进展与前沿技术	132
6.1	瞬态磁场测量	132
6.1.1	电磁感应法	133
6.1.2	霍尔效应法	133
6.1.3	磁光法	134
6.2	磁阻效应的研究与应用	134
6.2.1	巨磁阻效应	134
6.2.2	超巨磁阻效应	136
6.2.3	隧道磁阻效应传感器	136
6.2.4	非均匀性导致的磁阻效应	137
6.3	弱磁测量	138
6.3.1	磁通门磁力仪	138
6.3.2	质子旋进(核旋)磁力仪	139
6.3.3	光泵磁力仪	139
6.3.4	超导弱磁测量仪器	140
6.4	准静态磁场研究及应用	140
6.5	磁性元件与铁氧体材料标准	141

第二部分 实 验

实验1	霍尔效应及其应用	145
实验2	用冲击法测定样品的静态磁特性参数	149

实验 3	电磁材料动态磁化参数测量	152
实验 4	功率表法磁损耗测量	155
实验 5	交流桥测量居里温度	158
实验 6	电磁屏蔽测试	160
实验 7	永磁材料测量与失磁试验	167
实验 8	电磁环境测量	171
实验 9	输电线路电磁干扰测试	175
实验 10	环探头磁场测量及其应用	177
附录	常用电磁学单位	179
参考文献		180

第一部分 理 论

1.1 基本概念及基本磁学量

1.1.1 测量的术语与定义

测量是指人们借助专门的技术工具,采用实验方法找出物理量的数值的过程,它是人们认识事物时不可缺少的过程。从原理上,测量可分为直接测量和间接测量,前者是直接从实验数据中找出物理量未知数的测量,而后者则是根据未知量和直接测量的量之间的已知关系,找出未知量。磁学量的测量几乎都属于间接测量。从方法上,测量又可分为绝对测量和相对测量,在磁测量技术中,这两种方法都经常使用。绝对测量是基于一个或数个基本量的直接测量或利用物理常数值所进行的测量;相对测量则是为了得到被测量的量与作为标准的同名量之间的比例关系的一种测量。

测量技术所追求的目标是,用实验的方法找出与物理量的真值尽可能接近的测量值。由于人们对物理现象认识的局限性和技术上的原因,真值总是不可能得到的。测量结果与被测量真值之间的偏差,称为测量误差。误差自始至终存在于一切科学实验的过程中,这就是所谓的误差公理。

对于一种测量,我们常常使用精确度(或精密度)、准确度和正确度来表示它的好坏程度,这是三个不同的概念。

测量的精密度:反映随机误差大小的程度,是使用仪器测量所得到的最可靠的最小值,与仪器的最小读数有关。

测量的准确度:反映随机误差与系统误差合成的大小程度,指的是使用某种仪器作多次测量所得平均结果的可靠程度,即与真值的符合程度。一般可用相对误差的倒数来表示。

测量的正确度:反映系统误差大小的程度。不能排除系统误差的测量,便无正确度可言。

精密度高的测量,正确度不一定高,两者并不一致。而准确度高的测量则精密度和正确度都高,所以我们应以准确度的高低来衡量一个仪器、一个测量方法的质量。具有同样精密度的两台仪器,它们的准确度不一定相同;精密度高的仪器,准确度不一定高。因此任何一台仪器在测量之前必须用标准量值进行校准。

一般而言,测量包括以下4个要素:

(1) 测量的客体

测量的客体即测量对象,主要包括长度、面积、形状、高程、角度、时间、电流、磁场以及机械作用力等。由于测量对象种类繁多,因此对于它们的特性、被测参数的定义以及标准等都必须加以研究和熟悉,以便进行测量。

(2) 计量单位

《中华人民共和国计量法》第三条中规定:“国际单位制计量单位和国家选定的其他计量单位,为国家法定计量单位。”例如长度的单位为米(m),质量单位是千克(kg),电流单位是安培(A),等等。

(3) 测量方法

测量方法指在进行测量时所用的一组操作逻辑次序。

(4) 测量结果

测量结果指测量到的反映真实值的数据。由于任何测量过程总不可避免地会出现测量误差,所以测量结果都是对真实值的某种近似。

1.1.2 磁测量概述

磁学是研究各种物质的磁性起源并掌握其中的磁性物理规律的一门学科,在社会的各个方面拥有广泛应用。磁学是一门既古老又年轻的学科。说它古老,是因为关于磁现象的发现和应用的历史悠久;说它年轻,是因为磁的应用目前越来越广泛,已形成了许多与磁学有关的边缘学科,例如磁流体力学、原子核磁学、基本粒子磁学、磁化学、地球磁学、天体磁学、生物磁学、自旋电子学等。磁学基础研究与应用的需求相互促进,在国防和国民经济中起着重要作用。

磁测量是建立在电磁理论和电工技术基础上的一门技术性学科。磁测量的方法也与传统的各种测量方法有显著不同,为了获得准确的测量结果,不仅要了解常见的测量仪器、测量方法,还要对测量的物理过程有深刻的认识。在研究磁测量技术之前,必须掌握磁学的基本知识、基本规律及物质的磁性等内容。

磁测量包括对空间磁参量的测量和对磁性材料性质的测量(即磁性测量)。空间磁参量测量的主要对象是空间磁场的磁通量 Φ 、磁场强度 H 、磁通密度(又称磁感应强度) B 等,在均匀各向同性介质中, B 和 H 有线性关系。

磁性测量的主要任务是揭示材料在外磁场作用下所表现出的宏观磁特性。测量对象除了 H 、 B 外,还包括磁性材料在不同激磁情况下的磁导率和不同频率下的损耗等。它们常是设计和制造电机、电器、仪表以及自动控制和电子通信等领域所用磁性原件的重要依据。在磁性材料中, B 和 H 间的关系比较复杂,线性关系和单值关系不复存在。

在工业和科研测试中,磁测量所依据的原理主要有:

(1) 磁场间的机械力效应(如磁强计)。

(2) 电磁感应定律。

(3) 物质的磁效应,如磁电阻效应、核磁谐振、磁光效应(法拉第效应)、半导体对磁场的敏感效应等。

1.1.3 基本磁学量

基本磁学量是表征某一空间或物体内部磁性现象的基本量值。

电流之间或运动电荷之间的相互作用是磁现象的物理基础,例如电流或运动电荷可以在其周围空间里产生磁场。从广义的角度来说,可以将产生磁场的“源”都称为磁体。从这种概念出发,磁体既可以是任何电流回路,也可以是原子中带电粒子的轨道运动或自旋运动,或者是它们的任意组合。磁体的最小单位是磁偶极子,它就是一个可以用无限小的电流回路来代替的小磁体。如果把观察点移到距离远大于磁体尺寸的远源区,对该区域所有点上的磁场而言,此磁体就是一个可以用平面电流回路来代替的磁偶极子。

1. 磁感应强度 B

在电学中,静止电荷之间的相互作用力是通过电场来传递的,而电场的基本特征之一,是它能对任何置于其中的电荷施加作用力。同样,磁极与磁极、磁极与电流、电流与电流之间也有力的相互作用。为表征这些相互作用,我们引用物质存在的另一种形态——磁场。也就是说,磁极和电流周围空间存在磁场,磁场的基本特征之一,是它对于置于其中的磁极或电流能施加作用力。

为了定量地描述磁场,我们引入一个基本磁学量——磁感应强度 B 。根据安培分子环流假说:组成磁铁的最小单元(磁分子)是环形电流。这些分子环流定向地排列起来,在宏观上就显示出北(N)极、南(S)极。这样看来,无论是导线中的电流还是磁铁,它们的本源都是电荷的运动。一切磁力现象都归结为运动着的电荷(即电流)之间的相互作用,其相互关系由安培定律表示为

$$d\mathbf{F} = Id\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1-1-1)$$

式中, $Id\mathbf{l}$ 为电流元; $\mathbf{B}$ 为除 $Id\mathbf{l}$ 以外其他电流元在 $d\mathbf{l}$ 处所产生的总磁感应强度矢量; $d\mathbf{F}$ 为电流元在磁场中受的力。由上式可见,置于磁场中某处的电流元或运动电荷所受的力,与电流元的取向有关。当 $Id\mathbf{l}$ 与 $\mathbf{B}$ 平行时,受力为零;当 $Id\mathbf{l}$ 与 $\mathbf{B}$ 正交时,受力最大。

在国际单位制中 $\mathbf{B}$ 的单位为 T(特斯拉),即

$$[B] = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \text{T} \quad (1-1-2)$$

在电磁单位制中, $\mathbf{B}$ 的单位为 Gs(高斯),其关系为 $1\text{T} = 10^4 \text{Gs}$ 。

磁场与电流是不可分割的,在考虑直流磁场时,电流和磁场之间的相互关系由毕奥-萨伐尔定律所确定:在无限大真空中,电流元 $Id\mathbf{l}$ 在某点 P 所产生的磁感应强度 $d\mathbf{B}$,与电流元成正比,与电流元到该点的距离平方成反比,即

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{r^2} \quad (1-1-3)$$

式中, $\mathbf{r}^0$ 为电流元指向 P 点的单位矢量; μ_0 表征真空磁特性的常数,称为真空磁导率,在国际单位制中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。另一个常用的公式是安培环路定律:

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I \quad (1-1-4)$$

该式说明真空中,磁感应强度 $\mathbf{B}$ 沿任何闭合轮廓的线积分,等于该轮廓所交链的电流的代数和乘以磁导率。所谓交链,就是电流穿过轮廓的界定面。当电流参考方向与轮廓的绕行

方向符合右手螺旋定则时,该电流为正,反之为负。

2. 磁场强度 H

人类最早发现磁现象是从天然磁铁开始的,磁铁有 N、S 两极,同号磁极相斥,异号磁极相吸。这一点与正、负电荷有很大的相似性。因此,人们仿照电学,认为磁极上有一种叫“磁荷”的东西,N 极上的磁荷叫正磁荷,S 极上的磁荷叫负磁荷,当磁极本身的几何尺寸比它们之间的距离小很多时,就把磁荷看成为点磁荷。例如,一根细长磁针两端的磁荷就可看作为点磁荷。

正如电荷之间相互作用的基本规律是库仑定律一样,磁荷之间相互作用的基本规律是磁的库仑规律。在得到点电荷之间相互作用的规律之前,库仑就通过实验的方法,得到了两个磁荷之间相互作用的规律,即两个点磁荷 q_{m1} 及 q_{m2} 之间的相互作用力的大小和 q_{m1} 及 q_{m2} 的乘积成正比,和它们之间的距离 r 的平方成反比,作用力的方向沿着它们的连线。这个规律叫磁的库仑定律。其表达式与电的库仑规律相似,为

$$\mathbf{F} = \frac{q_{m1} q_{m2}}{4\pi\mu_0 r^2} \mathbf{r}^0 \quad (1-1-5)$$

式中, μ_0 为真空磁导率; $\mathbf{r}^0$ 代表由点磁荷引出的单位矢量。当两磁荷同号时 $\mathbf{F} > 0$, 表示斥力; 当两磁荷异号时 $\mathbf{F} < 0$, 表示引力。

把上式改写为

$$\mathbf{F} = q_{m2} \mathbf{H} \quad (1-1-6)$$

式中引入一个新的矢量 $\mathbf{H}$:

$$\mathbf{H} = \frac{q_{m1}}{4\pi\mu_0 r^2} \mathbf{r}^0 \quad (1-1-7)$$

$\mathbf{H}$ 与点电荷产生的电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 相仿,因此, $\mathbf{H}$ 称为磁极 1 在磁极 2 处产生的磁场强度矢量。

按磁荷观点,描述磁场性质的基本磁学量是磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 。仿照电场强度矢量,规定磁场强度是这样一个矢量,其大小等于单位点磁荷在该处所受磁场力的大小,其方向与正磁荷在该处所受磁场力的方向一致。假设试探点磁极的磁荷为 q_m ,它在磁场中某处受的力为 $\mathbf{F}$,由上述定义,该处磁场强度矢量为

$$\mathbf{H} = \mathbf{F}/q_m \quad (1-1-8)$$

在国际单位制中, $\mathbf{H}$ 的单位为 A/m(安/米); 在电磁单位制中, $\mathbf{H}$ 的单位为 Oe(奥斯特)。其关系为

$$1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3} \text{Oe} \quad (1-1-9)$$

磁的库仑定律和电的库仑定律形式相似,磁场强度矢量的定义式也和电场强度矢量的定义式相仿。按照类比的方法,只要作如下代替: 电荷 $q \rightarrow$ 磁荷 q_m , 电场强度矢量 $\mathbf{E} \rightarrow$ 磁场强度矢量 $\mathbf{H}$, 介电常数 $\epsilon \rightarrow$ 磁导率 μ , 则所有电场的公式,可以全部移植到磁场中。

3. 磁通 Φ

电场的分布是用电力线来描述的。同样,磁场的分布也可借助磁力线来描述。磁力线是一些有方向的曲线,线条的密度表示磁感应强度的大小,线上任一点的切线方向表示该点磁感应强度的方向。因此,磁力线又称为磁感应线。磁感应线与电力线不同,它是一些连续的互不相交的闭合曲线。