

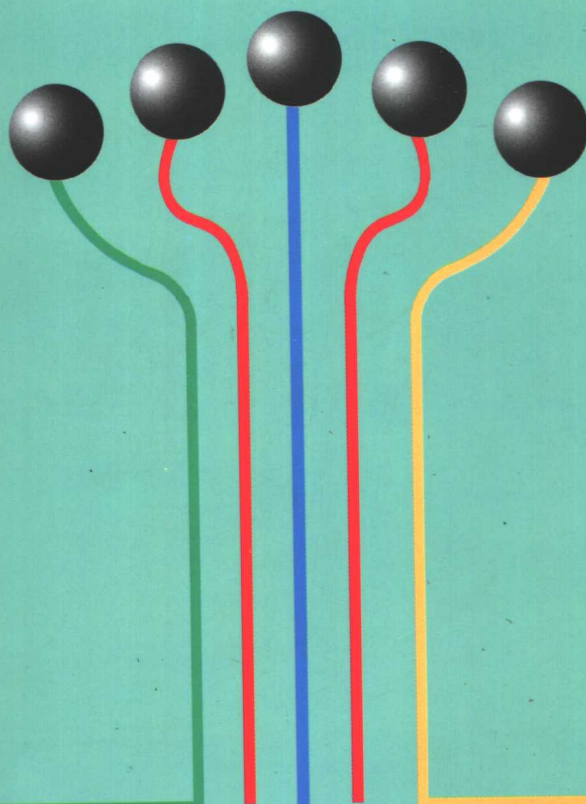
CIXINGYUANQIJIANSHOUCE

实用电源技术手册

SHIYONGDIANYUAN
JISHUSHOUCE

磁性元器件分册

分册主编 / 赵修科



辽宁科学技术出版社

实用电源技术手册

磁性元器件分册

分册主编 赵修科

辽宁科学技术出版社
·沈阳·

图书在版编目(CIP)数据

实用电源技术手册.磁性元器件分册 / 赵修科主编.

沈阳:辽宁科学技术出版社,2002·8

ISBN 7-5381-3604-5

I.实… II.赵… III.①电源-技术手册②开关

电源-磁性器件-技术手册 IV.TN86-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 004785 号

出 版 者: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮编:110003)

印 刷 者: 沈阳市第三印刷厂

发 行 者: 各地新华书店

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 275 千字

印 张: 12.75

印 数: 1~4000

出版时间: 2002 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2002 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 枫 岚

封面设计: 庄庆芳

版式设计: 于 浪

定 价: 24.00 元

联系电话: 024-23284360

邮购咨询电话: 024-23284502

E-mail: lkzsb@mail.inpgc.com.cn

<http://www.lnkj.com.cn>

《实用电源技术手册》编辑委员会

主任委员兼总主编 丁道宏

副主任委员兼副总主编 叶治政 李允武

委员 (按姓氏笔画排列)

丁道宏 马凤兰 王其英 史平君 叶治政

李允武 李占师 刘选忠 张乃国 倪本来

《磁性元器件分册》

主编 赵修科

主审 丁道宏

编者 (按姓氏笔画排列)

邢 岩 赵修科 詹晓东

内 容 简 介

开关电源设计大部分工作是磁性元件设计,调试中遇到的问题常常与磁元件有关。本书首先从工程应用出发,介绍了磁的基本概念、电路中电磁关系和磁性材料特性等基础知识。然后详细介绍了开关电源中磁性元件基本工作模式和对磁性元件的要求;着重分析了高频线圈的集肤效应、邻近效应和寄生参数的原理与磁性元件设计要注意的有关问题;给出了开关电源变压器设计和电感不同工作模式设计方法,同时给出了电流互感器、磁放大器和尖峰抑制器的原理和设计;并有选择地提供了磁元件设计的相关资料和国内外磁元件标准号,以便读者查阅。

本书可作为高等院校电气技术、电力电子专业大学生、研究生参考书,也可供科研单位、高新技术产业等专门从事电力电子、电源研发工作的广大科技工作者和工程技术人员使用。

总 前 言

《实用电源技术手册》,这里的“电源技术”,是指采用功率电子技术,将一种(直流或交流)电源,变换成另一种或另一规格大小的电源技术。这种经过变换的电源,将能更好地适用于各种用电设备的不同要求。电能(源)经过功率电子技术处理,又能获得良好的节能效果。国外发达国家作为电源的电能,已有 80% 经过这种技术处理,节能效果达 15%~40%。预计到 2000 年经过处理再应用的电能将达到 95%。

近 20 年来,电源技术经过了迅速而又长足地发展。作为电源技术的关键元件——大功率半导体器件,从半控型的晶闸管,发展到可关断晶闸管(GTO)以及全控制型功率晶体管(GTR),绝缘栅双极型晶体管(IGBT),功率场效应晶体管。电源变换技术,也从开始采用线性变换发展到开关电源、高频开关电源;并且还有“硬开关”、“软开关”技术。功率等级也从几十瓦,发展到几十千瓦(伏安)或几百千瓦(伏安)。应用则涉及到计算机、通信、工业自动化、电子或电工仪器和家用电器等,几乎包括科学技术的各个领域和社会生活的各个方面。应用范围如此之广,一方面已形成了庞大的专业技术队伍,全国具有技术职称的专业人员,大约不少于 8 万人。这里包括研究、设计、生产、维修人员,其中中等或中等以上专业技术人员占多数。另一方面,也形成了广大的电源用户队伍。

《实用电源技术手册》的出版,正是面对当前这样的形势。《手册》将介绍不同种类电源的基本工作原理、单元的组成、性能与主要技术指标、典型产品的剖析介绍;电源的使用与维护、性能的测试要求与测试方法;不同类型电源的优缺点与适用场合、使用中应注意的问题,等等。对于某些电源,还介绍了一些基本的设计计算方法。这些内容,对于用户如何从型号繁多的各种电源中正确地选用电源,如何正确地使用与维护电源,无疑是会有很大帮助的。对于广大的维修人员也将是一本重要的可以直接借鉴的参考书。对于设计与研究人员,在电源技术的工程实现方面,包括:电源电路的方案选择、主要元件选用与基本计算和确定、加工与调试等,本书也希望能成为一本不可缺少的工具书。

《实用电源技术手册》采用按电源种类或专题,以《分册》形式陆续出版。第一批四个分册,现已确定的《分册》有:《电源元器件分册》,这是考虑到元器件是各种不同电源的基础;还有《模块式电源分册》、《交流稳定电源分册》、《不间断电源分册》等。将从 1998 年陆续出版。

本书的读者对象为具有电类中专以上水平,并有一定电源实际工作经验的工程技术人员,对于大专院校师生、业余电子爱好者都有参考价值。

由电源行业组织编写系统而又完整的《实用电源技术手册》,对于我们是初次尝试,限于水平,错漏难免,欢迎读者不吝赐教,批评指正。

《实用电源技术手册》总主编 丁道宏

1998.4

分 册 前 言

几乎所有电源电路中，都离不开磁性元件——电感器或变压器。例如在输入和输出端采用电感滤除开关波形的谐波；在谐振变换器中用电感与电容产生谐振以获得正弦波的电压和电流；在缓冲电路中，用电感限制功率器件电流变化率；在升压式变换器中，储能和传输能量；有时还用电感限制电路的瞬态电流等。而变压器用来将两个系统之间电气隔离，电压或阻抗变换，或产生相位移(三相 Δ -Y变换)，存储和传输能量(反激变压器)，以及电压和电流检测(电压和电流互感器)。可以说磁性元件是电力电子技术最重要的组成部分之一。

磁性元件——电感器和变压器与其他电气元件不同，使用者很难采购到符合自己要求的电感和变压器。对于工业产品，应当有一个在规定范围内通用的规范化的参数，这对磁性元件来说是非常困难的。而表征磁性元件的大多数参数(电感量、电压、电流、处理能量、频率、匝比、漏感、损耗)对制造商是无所适从的。相反，具体设计一个磁性元件可综合考虑成本、体积、重量和制造的困难程度，在一定的条件下可获得较满意的结果。

由于很难从市场上购得标准的磁性元件，开关电源设计工作的大部分就是磁性元件的设计。有经验的开关电源设计者深知，开关电源设计的成败在很大程度上取决于磁性元件的正确设计和制作。高频变压器和电感固有的寄生参数，引起电路中各色各样的问题，例如高损耗、必须用缓冲或箝位电路处理的高电压尖峰、多路输出之间交叉调节性能差、输出或输入噪声耦合和占空度范围限制等等，对初步进入开关电源领域的工程师往往感到手足无措。

磁性元件的分析和设计比电路设计复杂得多，要直接得到惟一的答案是困难的。因为要涉及到许多因素，因此设计结果绝不是惟一合理的。例如，不允许超过某一定体积，有几个用不同材料的设计可以满足要求，但如果进一步要求成本最低，则限制了设计的选择范围。因此最优问题是多目标的，相对的。或许是最小的体积，最低成本；或是最高效率等等。最终的解决方案与主观因素、设计者经验和市场供应情况有关。另一方面，正确的设计不只是一般电路设计意义上的参数计算，还应当包含结构、工艺和散热等设计，而且是更重要的设计。高频开关电源的很多麻烦是由于磁性元件工艺、结构和制造不合理引起的。

尽管磁性元件设计结果是相对的，不是惟一的；但至少设计结果应当是合理的。因此，开关电源设计者应当有比较好的磁学基础。遗憾的是在现今中等专业学校和高等院校的授课中磁的讲解偏少，尤其是应用于开关电源的实际磁的概念更少涉及。为此，本书试图在讲清工程电磁的最基本概念的基础上，介绍磁性材料性能和选用以及高频条件下磁性元件工作的特殊问题、磁性元件设计的一般方法和工艺结构。愿本书

能给初学者提供理论依据和经验数据，为进入“黑色艺术殿堂”打下必要的基础，并通过自己的不断实践，逐步成为开关电源磁性元件的专家。

本书由丁道宏教授主审，并提出了不少宝贵的意见。詹晓东、邢岩副教授提供不少有益的资料，徐泽玮先生也给予很大帮助，南京新康达磁业有限公司给予了一定的物质支持，在此一并表示衷心的感谢。

编著者

2001 年 10 月

目 录

第 1 章 磁的基本概念	1
1.1 磁的基本现象	1
1.2 电流与磁场	2
1.3 磁的单位和电磁基本定律	3
1.3.1 磁感应强度 (B -磁通密度)	3
1.3.2 磁通 Φ	3
1.3.3 磁导率 (μ) 和磁场强度 (H)	4
1.3.4 安培环路定律	5
1.3.5 电磁感应定律	7
1.3.6 电磁能量关系	7
本章要点	8
第 2 章 电路中的磁性元件	10
2.1 自感	10
2.2 互感	11
2.2.1 线圈之间的互感	11
2.2.2 互感系数	11
2.2.3 互感电动势	12
2.2.4 互感电路和变压器	12
2.3 变压器	15
2.3.1 变压器空载	16
2.3.2 变压器负载状态	16
2.3.3 变压器等效电路	17
本章要点	19
第 3 章 磁路和电感计算	20
3.1 磁路的概念	20
3.2 磁路的欧姆定律	20
3.3 磁芯磁场和磁路	23
3.3.1 无气隙磁芯磁场	23
3.3.2 E 型磁芯磁场和等效磁路	25
3.3.3 气隙磁导的计算	27
3.4 电感计算	32
3.4.1 导线和无磁芯线圈的电感计算——经验公式	33
3.4.2 磁芯电感	38
本章要点	40
第 4 章 软磁材料	41
4.1 磁性材料的磁化	41

4.2 磁材料的磁化曲线	42
4.2.1 磁性物质磁化过程和初始磁化曲线	42
4.2.2 饱和磁滞回线和基本参数	43
4.3 磁芯损耗	44
4.3.1 磁化能量和磁滞损耗 P_h	44
4.3.2 涡流损耗 P_e	45
4.3.3 剩余损耗 P_c	47
4.4 磁化曲线的测量	47
4.4.1 测试原理和电路	48
4.4.2 高频下的磁化曲线	49
4.5 相对磁导率 μ_r	49
4.5.1 最大磁导率 μ_m	49
4.5.2 初始磁导率 μ_i	49
4.5.3 增量磁导率 μ_Δ	50
4.5.4 有效磁导率 μ_e	50
4.5.5 幅值磁导率 μ_a	51
4.6 常用软磁材料	51
4.6.1 对软磁材料的要求	51
4.6.2 合金磁材料	52
4.6.3 磁粉芯	58
4.6.4 软磁铁氧体材料	59
4.7 软磁材料的选用原则	63
本章要点	63
第5章 变换器中磁芯的工作要求	65
5.1 I类工作状态——Buck变换器滤波电感磁芯	65
5.2 II类工作状态——正激变换器变压器	68
5.3 III类工作状态——推挽型变换器中变压器	70
5.3.1 输出交流时逆变器中的变压器	71
5.3.2 SPWM交流输出滤波电感	74
5.3.3 直流输出时变压器的工作状态	75
5.4 II-III类工作状态——磁放大器磁芯工作状态	76
5.4.1 磁放大器原理	77
5.4.2 实际应用举例	79
本章要点	79
第6章 线圈	80
6.1 集肤效应	80
6.2 线圈磁场和邻近效应	83
6.3 变压器线圈的漏感	84
6.3.1 典型变压器磁芯的漏感分析	84
6.3.2 其他结构的漏磁	86
6.3.3 减少漏磁的主要方法——线圈交错绕	86

6.4 邻近效应对多层线圈影响	87
6.4.1 多层线圈	87
6.4.2 线圈的并联	89
6.4.3 无源损耗	91
6.5 线圈结构	92
6.5.1 绝缘、热阻和电流密度	93
6.5.2 计算有效值电流	95
6.5.3 窗口充填系数 k_w	97
6.5.4 电路拓扑	98
6.6 线圈间电容和端部电容	98
本章要点	100
第7章 功率变压器设计	102
7.1 变压器设计一般问题	102
7.1.1 变压器功能	102
7.1.2 变压器的寄生参数及其影响	102
7.1.3 温升和损耗	103
7.1.4 充填系数	104
7.1.5 电路拓扑	105
7.1.6 频率	105
7.1.7 占空度	105
7.1.8 匝数和匝比选取	106
7.1.9 磁通偏移	110
7.1.10 磁芯选择	111
7.2 变压器设计基本步骤	116
本章要点	119
第8章 电感和反激变压器设计	121
8.1 应用场合	121
8.1.1 输出滤波电感 (Buck)	122
8.1.2 Boost 和 Boost/Buck 电感	123
8.1.3 反激变压器	124
8.1.4 耦合滤波电感	125
8.2 损耗和温升	128
8.3 磁芯	128
8.3.1 磁芯气隙	128
8.3.2 散磁引起的损耗	129
8.3.3 扩大电感磁通摆幅	130
8.3.4 磁芯材料和形状	131
8.3.5 决定磁芯尺寸	131
8.4 电感计算	133
8.4.1 气隙磁芯电感	133
8.4.2 磁粉芯和恒导磁芯电感	134
8.4.3 利用电感系数 A_L 计算电感	134

8.5 电感设计	134
8.5.1 设计步骤	134
8.5.2 举例——Buck 输出滤波电感	136
8.5.3 反激变压器电感设计	139
本章要点	148
第9章 特殊磁性元件	149
9.1 电流互感器	149
9.1.1 交流互感器	149
9.1.2 脉冲直流互感器	152
9.2 磁调节器和尖峰抑制器设计	156
9.2.1 矩形磁芯基本特性	156
9.2.2 磁放大器设计	157
9.2.3 噪声抑制磁芯	159
本章要点	161
第10章 基础资料	163
10.1 单位制和转换关系	163
10.2 导线数据	164
10.2.1 漆包线规格、绝缘和耐压	164
10.2.2 英制导线规格及公制转换	166
10.2.3 铜带 GB2059-1989	167
10.3 铁氧体	167
10.3.1 国产铁氧体材料特性	167
10.3.2 铁氧体尺寸规格	167
10.3.3 国内外铁氧体材料对照	169
10.4 磁粉芯	179
10.4.1 磁粉芯的主要性能和规格	179
10.4.2 磁粉芯电感估算	179
10.4.3 国内外磁粉芯规格	179
10.5 矩形磁滞回线磁芯	181
10.5.1 非晶合金	181
10.5.2 噪声抑制器	182
10.5.3 矩形磁滞回线铁氧体磁芯	182
10.6 绝缘	183
10.6.1 线圈端部处理	183
10.6.2 内层绝缘(线圈骨架到磁芯)、绕组间绝缘	183
10.6.3 线圈的裹覆、端封和灌注方式的选择	184
10.6.4 出头绝缘距离	185
10.6.5 工艺	185
10.7 磁性元件相关标准	185
10.7.1 国家标准	185
10.7.2 部分国际标准	188
参考文献	191

第 1 章 磁的基本概念

磁性是某些物质的特殊的物理性能，中国人最早利用这一性质发明了指南针。从 19 世纪到 20 世纪初，麦克司韦、楞次、法拉第和安培等科学家建立了电磁场理论和电磁基本定律，奠定了现代电磁科学发展的基础。在工程上，主要是应用电磁的两个基本定律——全电流定律和电磁感应定律。

由于推演方法的不同，电磁计量存在两种不同的单位制——国际单位制（SI 制或 MKS 制）和实用单位制（CGS）。英美通常应用 CGS 制，而我国则采用 MKS 制。

1.1 磁的基本现象

自然界中有一类物质，如铁、镍和钴，在一定的情况下能相互吸引，这种性质我们称它们具有磁性。使它们具有磁性的过程称之为磁化。能够被磁化或能被磁性物质吸引的物质叫做磁性物质或磁介质。

能保持磁性的磁性物质称为永久磁铁。磁铁两端磁性最强的区域称为磁极。将棒状磁铁悬挂起来，磁铁的一端会指向南方，另一端则指向北方。指向南方的一端叫做南极 S，指向北方的一端叫做北极 N。如果将一个磁铁一分为二，则生成两个各自具有南极和北极的新的磁铁。南极或北极不能单独存在。

如果将两个磁极靠近，在两个磁极之间产生作用力——同性相斥和异性相吸。磁极之间的作用力是在磁极周围空间传递的，这里存在着磁力作用的特殊物质，我们称之为磁场。磁场与物体的万有引力场、电荷的电场一样，都是有一定的能量。但磁场还具有本身的特性：

- ① 磁场对载流导体或运动电荷表现作用力；
- ② 载流导体在磁场中运动时要做功。

为形象化描述磁场，把小磁针放在磁铁附近，在磁力的作用下，小磁针排列成图 1-1 (a) 所示的形状。从磁铁的 N 极到 S 极小磁针排成一条光滑的曲线，此曲线称为磁力线（图 1-1 (b)），或称为磁感应线，或磁通线。我们把 N 极指向 S 极方向定义为磁力线方向。磁力线在磁铁的外部 and 内部都是连续的，是一个闭合曲线。曲线每一点的切线方向就是磁场方向。在磁铁内部是 S 极指向 N 极。以下用磁力线方向代表磁场正方向。磁力线的多少代表磁场的强弱，例如在磁极的附近，磁力线密集，就表示这里磁场很强；在两个磁极的中心面附近磁力线很稀疏，表示这里磁场很弱（图 1-1 (c)）。但是，应当注意，磁场中并不真正存在这些实在的线条，也没有什么物理量在这些线条

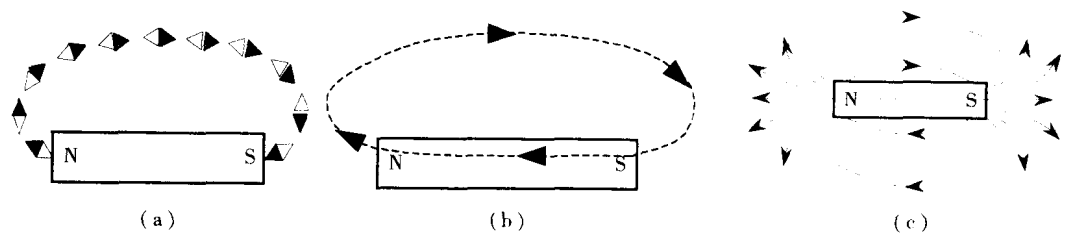


图 1-1 永久磁铁的磁场

中流动，这里只是在概念上形象地说明磁现象。

1.2 电流与磁场

将载导体或运动电荷放在磁场中，载导体就要受到磁场的作用力，这说明了电流产生了磁场。由此产生的磁场和磁体一样受到磁场的作用力。现代物理研究表明，物质的磁性也是电流产生的。永久磁铁的磁性就是分子电流产生的。所谓分子电流是磁性材料原子内的电子围绕原子核旋转和自转所形成的。电子运动形成一个个小的磁体，这些小磁体在晶格中排列在一个方向，形成一个个小的磁区域——磁畴。可见电流和磁场是不可分割的，即磁场是电流产生的，而电流总是被磁场所包围。

运动电荷或载导体产生磁场。根据实验归纳为安培定则，即右手定则，如图 1-2 所示。右手握住导线，拇指指向电流流通方向，其余四指所指方向即为电流产生的磁场方向，如图 1-2 (a) 所示；如果是螺管线圈，则右手握住螺管，四指指向电流方向，则拇指指向就是磁场方向，如图 1-2 (b) 所示。

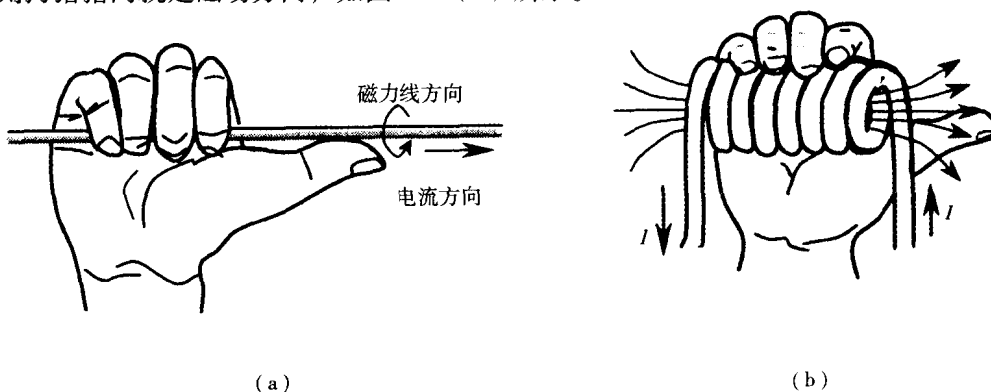


图 1-2 右手定则

图 1-3 示出了围绕两根平行载导体的磁场，每根导体流过相等的电流但方向相反，即一对连接电源到负载的导线。实线代表磁通，而虚线代表磁场等位面（以后说明）的截面图。每根导线有独立的磁场，磁场是对称的，并从导线中心向外径向辐射开来，磁场的强度随着离导体的距离增加反比减少。因为产生场的电流方向相反，两个场数值是相等的，但极性相反。两个场叠加在一起，在导线之间区域相互加强，能量最大。而在导线周围的其他地方，特别是远离两导线的外侧磁场强度相反，且近乎相等而

趋向抵消。

图 1-4 示出了空心线圈磁场。每根导线单个的场在线圈内叠加产生高度集中和线条流畅的场。在线圈外边，场是发散的，并且很弱。虽然存储的能量密度在线圈内很高，在线圈以外的弱磁场中，还存储相当大的能量，因为体积扩展到无限大。

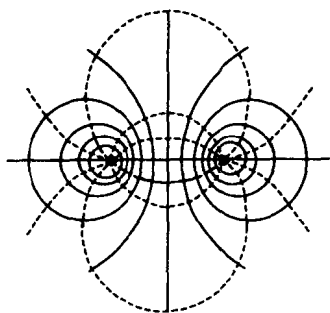


图 1-3 围绕双导体反向电流磁场

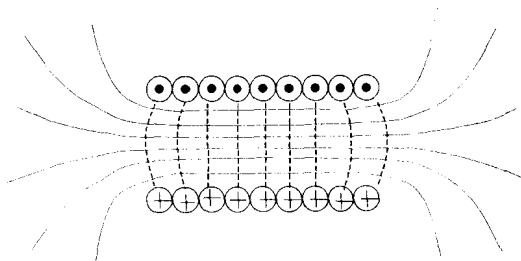


图 1-4 空心线圈

磁场不能被“绝缘”物体与它的周围隔离开来——磁“绝缘”是不存在的。但是，磁场可以被短路——将图 1-4 的线圈放到一个铁盒子中去，盒子提供磁通返回的路径，盒子将线圈与外边屏蔽开来。

1.3 磁的单位和电磁基本定律

磁场可用以下几个物理量来表示。

1.3.1 磁感应强度 (B - 磁通密度)

为了测量磁场的强弱，可通过电磁之间作用力来定义。用单位长度的导线，放在均匀的磁场中，通过单位电流所受到的力的大小 ($B=F/I$) 表示磁场的强弱——磁感应强度 (B)。它表示磁场内某点磁场的强度和方向的物理量。 B 是一个矢量。力 F ，电流 I (在导线 l 内流通) 和磁感应强度 B 三者是正交关系，通常用左手定则确定：伸开左手，四手指指向电流方向，拇指指向力的方向，则磁场指向手心。如果磁场中各点的强度是相同的且方向相同，则此磁场是均匀磁场。

B 的单位在国际单位制 (SI) 中是特斯拉 (Tesla)，简称特，代号为 T。在电磁单位制 (CGS) 中为高斯，简称高，代号为 Gs。两者的关系为 $1\text{T}=10^4\text{Gs}$ 。

1.3.2 磁通 (Φ)

垂直通过一个截面的磁力线总量称为该截面的磁通量，简称磁通。用 Φ 表示。通常磁场方向和大小在一个截面上并不一定相同如图 1-5 (a) 所示，则通过该截面积 A

的磁通用面积分求得

$$\Phi = \int_A d\Phi = \int B \cos \alpha dA$$

或

$$\Phi = \int_A B dA$$

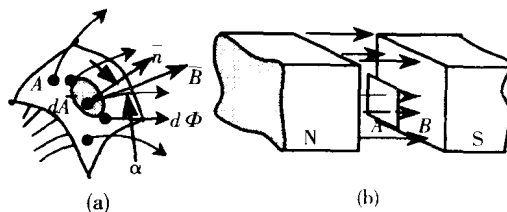


图 1-5 穿过某一截面的磁通

式中 $d\Phi$ ——通过单元 dA 截面积的磁通；

α ——截面的法线与 B 的夹角。在一般铁芯变压器和电感中，在给定结构截面上，或端面积相等的气隙端面间的磁场 B 基本上是均匀的如图 1-5 (b) 所示，则磁通可表示为

$$\Phi = BA \quad (1-1)$$

磁通是一个标量。它的单位在 SI 制中为韦伯，简称韦，代号为 Wb，可由 B 和 A 的单位导出

$$1 (\text{Wb}) = 1 (\text{T}) \times 1 (\text{m}^2)$$

在 CGS 单位制中磁通单位为麦克斯韦，简称麦，代号为 Mx 。而

$$1 \text{Mx} = 1 \text{Gs} \times 1 \text{cm}^2$$

因为 $1 \text{T} = 10^4 \text{Gs}$, $1 \text{m}^2 = 10^4 \text{cm}^2$, 则

$$1 \text{Mx} = 10^{-8} \text{Wb}$$

在均匀磁场中，磁感应强度可以表示为单位面积上的磁通，由式 (1-1) 可得

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1-2)$$

所以磁感应强度也可以称为磁通密度。因此磁通密度的单位特斯拉也可用韦 / 米²，可见

$$1 \text{Gs} = 10^{-4} \text{Wb/m}^2 = 10^{-8} \text{Wb/cm}^2$$

因为磁力线是无头无尾的闭合线，因此对于磁场内任意闭合曲面，进入该曲面的磁力线应当和穿出该曲面的力线数相等，所以穿过闭合曲面磁通总和为零，称为高斯定理。

1.3.3 磁导率 (μ) 和磁场强度 (H)

1. 磁介质的磁导率 (μ)

电流产生磁场，但电流在不同的介质中产生的磁感应强度是不同的。例如，在相同条件下，铁磁介质中所产生的磁感应强度比空气介质中大得多。为了表征这种特性，将不同的磁介质用一个系数 μ 来考虑， μ 称为介质磁导率，表征物质的导磁能力。在介质中， μ 越大，介质中磁感应强度 B 就越大。

真空中的磁导率一般用 μ_0 表示。空气、铜、铝和绝缘材料等非磁材料的磁导率和真空磁导率大致相同。而铁、镍、钴等铁磁材料及其合金的磁导率都比 μ_0 大 $10 \sim 10^5$

倍。 μ 比 μ_0 大的倍数称为材料的相对磁导率 μ_r 。

2. 磁场强度 (H)

用磁导率表征介质对磁场的影响后,磁感应 B 与 μ 的比值只与产生磁场的电流有关。即在任何介质中,磁场中某点的 B 与该点的 μ 的比值定义为该点的磁场强度 H ,即

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

H 也是矢量,其方向与 B 相同。

相似于磁力线描述磁场,磁场强度也可用磁场强度线表示。但与磁力线不同,因为它不一定是无头无尾的连续曲线,同时在不同的介质中,由于磁导率 μ 不一样, H 在边界处发生突变。

应当指出的是所谓某点磁场强度大小,并不代表该点磁场的强弱,代表磁场强弱是磁感应强度 B 。比较确切地说,矢量 H 应当是外加的磁化强度。引入 H 主要是为了便于磁场的分析计算。

1.3.4 安培环路定律

安培发现在电流产生的磁场中,矢量 H 沿任意闭合曲线的积分等于此闭合曲线所包围的所有电流的代数和 (图 1-6), 即

$$\oint H dl = \oint H \cos \alpha dl = \sum I \quad (1-4)$$

式中 H ——磁场中某点 A 处的磁场强度;

dl ——磁场中 A 点附近沿曲线微距离矢量;

α —— H 与 dl 之间的夹角。

$\sum I$ ——闭合曲线所包围的电流代数和。电流方向和磁场方向的关系符合右螺旋定则。如果闭合曲线方向与电流产生的磁场方向相同,则为正。反之为负。式 (1-4) 称为安培环路定律,或称为全电流定律。

图 1-6 (a) 环路包围只有 I , 所以 $\sum I = I$, 而图 1-6 (b) 环路包围的是正的 I_1 和负的 I_2 , 尽管图中有 I_3 存在, 但它不包含在环路之内, 所以 $\sum I = I_1 - I_2$ 。

以环形线圈为例 (图 1-7) 来说明安培定律的应用。环内的介质是均匀的, 线圈匝数为 N , 取磁力线方向作为闭合回线方向, 沿着以 r 为半径的圆周闭合路径 l , 根据式 (1-4) 的左边可得到

$$\oint H dl = Hl = 2\pi r \times H \quad (1-5)$$

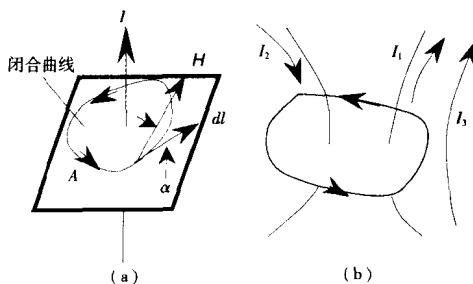


图 1-6 安培环路定律