



电源网
DianYuan.com

推荐用书

开关电源

磁性元件理论及设计

周洁敏 赵修科 陶思钰 编著

百万人气社区电源网强力推荐，短期即可提高的优秀技术用书

- 突破难点，深入浅出磁性元件知识，深度透析工程技术原理
- 求于实践，详细剖析典型应用实例，力图提升工程设计能力
- 设计宝典，依托作者深厚行业经验，解读工程应用设计难点



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

014013280

TN86
158

开关电源磁性元件 理论及设计

周洁敏 赵修科 陶思钰 编著



北京航空航天大学出版社

TN86/158



北航

C1700538

088810310

内 容 简 介

本书系统介绍磁的基本理论知识,磁性材料的种类、特点及其选择方法和在开关电源中的应用与设计等。内容包括磁的基本理论与磁元件、磁性材料的基本参数及磁特性测量、开关电源中常用的磁性材料、线圈、磁芯的工作状态、高频变压器设计的基本问题、电感设计、特殊磁元件设计、平面磁元件、磁集成技术和磁性元件的温升、绝缘及电气特性测试。在本书的最后还附有磁元件设计数据,以方便读者学习使用。

本书可供从事开关电源研发设计人员,以及从事电气工程自动化的设备制造与维修的工程技术人员和工程管理人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源磁性元件理论及设计 / 周洁敏, 赵修科,
陶思钰编著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社,
2014. 1

ISBN 978-7-5124-1314-6

I. ①开… II. ①周… ②赵… ③陶… III. ①开关电源—磁性器件—设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 274706 号

版权所有,侵权必究。

开关电源磁性元件理论及设计

周洁敏 赵修科 陶思钰 编著

责任编辑 张军香 吴青珍

宋显民 朱红芳

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1000 1/16 印张:28.75 字数:613千字

2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-1314-6 定价:69.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:010-82317024

序 言

随着电力电子技术的高速发展,电力电子设备与人们工作、生活的关系日益密切,而几乎所有电力电子设备都离不开可靠的电源。然而,几乎所有电源电路中,都离不开磁性元器件,磁性元件是电力电子技术最重要的组成部分之一。

开关电源磁性元件是一门理论和实践要求都比较高的技术,但是,长期以来我们的大学教育并没有专门开设开关电源专业。近几年有的学校在这方面有所加强,并在研究生阶段开设了这个研究方向,但是从人才培养上来说还是远远不能满足产业需求的。

《开关电源磁性元件理论及设计》重点研究高频开关电源的磁性元件的设计,在高频开关电源设计过程中需要解决的一个关键问题,就是热的问题;而热主要来源是磁性元件,如何解决磁性元件的损耗及发热问题,减小磁性元件的尺寸也成为该课题的一个关键问题。所以,磁性元器件的设计自然成为整个设计关节中相当重要的一环。

电源网从2002年开设电源技术论坛以来,现已成为中国最大的电源技术在线交流平台。很多年轻一代的电源工程师都是伴随着网站的成长而成长的,本书的出现为他们建立了一个系统、深入、完整的学习磁性元件知识的构架。

自从电源网论坛(bbs.dianyuan.com)公布了本书的大纲后,引起了网友们的热议。网友们普遍反映本书中提到的技术要点非常贴近实际,大家也都非常期待这本书的出版。

本书需要我们仔细地研读,对书中的一些技术问题也欢迎大家去电源网的BBS论坛讨论,我们也会请周老师定期去论坛和大家交流。

在这里我们祝愿大家学习愉快。

电源网(www.dianyuan.com)总经理兰波

2014年1月于天津

前 言

只要用电的地方都有电源存在。水力发电、火力发电、光伏发电、风能发电、核电等各种发电形式构成的电网所能提供的电能是不能直接供给电子设备上的电子元件的,因为电子元器件的技术要求与电网提供的技术指标不同。电网上的电也称为“粗电”,用电设备所需要的电是根据具体设备要求提出的,也称为“精电”。将电网“粗电”转换成电子设备所需的“精电”的变换装置常称为二次电源或直流变换装置或直接称为电源。几乎所有的电源电路都离不开磁性元件——变压器或电感,现在用得最多的开关电源也是如此。

电源中要用到许多磁性材料。磁性材料是非线性且会饱和的,磁导率也不是无穷大。磁性元件周围总有漏磁存在,电路中到处存在寄生的电感和电容,工作频率改变时其性能参数会立即发生变化,因此磁性元件在设计时总是要经过多次校验和优化才行。磁性元件不易集成,磁集成技术也只是相对而言,无法进行标准化、机器化流水线生产,因此磁性元件的生产是劳动力相对密集的产业。

在构成开关电源的诸多元器件中,其他元件随着集成度的提高,体积进一步缩小,质量进一步减轻,外围电路设计进一步简化。而磁性元件则不然,它无法直接从市场上买到,且其分析和设计要比电路设计复杂得多,即使在设计时进行多次校验,也还要在电路中进行试验来验证设计是否正确合理。

磁性元件的分析和设计很难一步得到唯一的答案,其涉及很多因素,因此设计结果绝不是唯一的。即使是工作条件完全相同的磁元件,因其成本,磁性材料的生产批次、体积、质量、效率、工艺等因掺杂较多的主观因素而结果不同,且重复性差。

尽管磁性元件的设计结果不完全一致,但设计时应尽量合理,不合理的设计会导致开关电源设计的失败。研制的开关电源必须经过充分的调试,调试过程中电路原理相对易得到正确的理解 and 设计,但磁性元件就未必,经常使电源无法正常工作的元件就是变压器和电感,有时会出现功率开关管直接上电损坏,有时直流滤波电感及变压器温升很高,而且似乎找不到错误发生在什么地方,令人无从下手。

开关电源还受到用电设备技术发展的激励,例如 CPU 的频率高了,电源设计也须进行相应的改变;用电设备体积小了,如超薄电视、笔记本、掌上产品的出现,电源问题的解决起着关键作用,而磁性元件的安装高度经常制约着超薄开关电源的发展。

电源的可靠性和生命力应摆在首位,一个系统如果没有正常电源,就无法工作,即使是最优秀的设计也无法展现。

国内的开关电源经历 30 多年的发展,有相当的成就。而且行业内每年需要大量研究开关电源的人才,遗憾的是高等学校根本没有开设关于“开关电源磁性元件理论和设计”这方面课程,使得开关电源的新手们见到磁性元件无从下手,非常困惑。

作为电源工程师的培训教学用书,本书紧密围绕磁性元件在开关电源中的应用、磁性材料的特点、高频下磁性元件的分布参数、磁性元件的损耗和温升等,以讲解磁性元件设计的原理和磁芯的选用方法为主,并通过大量的例题,详尽地介绍开关电源磁元件的设计步骤和方法,使读者通过学习可自行设计磁性元件。由于篇幅和作者能力有限,不可能穷尽所有磁性元件的各种类型,作者试图培养读者“渔”的能力,而不是赠予“鱼”。书中的分析例子选自常用磁性元件来说明工作原理和设计方法,以期着力培养读者举一反三和融会贯通的能力。

考虑到读者已经具备本学科工科的数理基础,并已具备电路分析基础、数字电路、模拟电路、自动控制原理、电器原理、磁场理论、电力电子技术等基础和专业基础知识,涉及的有关定理和公式推导与证明不再详述,只对物理概念作简略讲述。在编著体系和叙述方法上除考虑教学要求外,还顾及到自学的需要,竭力提供完善的磁性元件设计参数,尽快地把读者带入能自行设计磁性元件的行列。

书中所选的内容适合科研和生产部门的开关电源技术人员及相关科技人员参考,也可作为电源技术专业、电力电子专业、电气自动化专业的本科生和研究生的专业课教学参考书。

书中涉及的一些电气和电子方面的名词术语、计量单位力求与国际计量委员会、国家技术监督局颁发的文件相符。

本书部分内容是作者教学和科研工作的总结,书中有些资料来自期刊上公开发表的论文、各种相关的博士和硕士学位论文。在编著过程中,作者的研究生房岩、赵晶晶、吴雄林等进行了详细的文字校对与编排,作者的同事曹力、张勇、吴再桂、潘文平、郑罡、吴红兰、曾庆喜、陈宁宁给予了各方面的关心和帮助。南京航空航天大学严仰光教授为全书审稿,并提出非常宝贵的建设性意见,在本书的编著过程中还不断地给予作者鼓励和支持。

在本课程长期的教学实践中,学员们所提出的问题,都是引起我思考的动力。书稿在编写过程中参考的国内外磁性材料生产厂家提供的原始资料,除了从公司网站收集以外,大部分由江西大有、MAGNETICS、菲利普、深圳兴宝亨、上海鹰峰电子等单位友好提供。

作者在此一并向他们表示衷心感谢。

本书内容适用教学学时数为50~60学时,如果有条件可以开设相应的实验和观摩实验,以缩小书本理论学习与工程应用实践方面的差距。

由于经验和水平的局限,书中难免有不足或错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2013年5月

目 录

第 1 章 磁的基础理论与磁元件	1
1.1 磁场的发现和产生	1
1.2 磁的单位和电磁基本定律	4
1.2.1 磁感应强度	4
1.2.2 磁通	4
1.2.3 磁导率和磁场强度	5
1.2.4 安培环路定律	7
1.2.5 电磁感应定律	8
1.2.6 电磁能量关系	10
1.3 电路中的磁性元件	11
1.3.1 自感	11
1.3.2 互感	13
1.3.3 变压器	21
1.4 磁元件的磁路分析	26
1.4.1 磁路的欧姆定律	27
1.4.2 带有气隙的串联磁路分析	31
1.4.3 并联磁路分析	32
1.4.4 变压器的等效磁路模型	33
1.5 典型磁元件的磁势分析	33
1.5.1 环形磁芯的漏磁分析	34
1.5.2 E 形磁芯磁场和等效磁路	37
本章小结	39
第 2 章 磁性材料的基本参数及磁特性测量	41
2.1 磁性材料的基本特性	41
2.2 磁性材料的基本参数	43
2.2.1 与磁化特性曲线相关的参数	43
2.2.2 磁导率	44
2.2.3 与磁芯损耗相关的参数	51
2.2.4 居里温度和磁导率的比温度系数	53
2.2.5 磁导率的时间减落因数	53



2.2.6	功率损耗密度	54
2.3	磁芯损耗	55
2.3.1	磁化能量和磁滞损耗	55
2.3.2	涡流损耗	56
2.3.3	剩余损耗	59
2.3.4	磁芯损耗的计算	59
2.3.5	利用磁性材料性能图表进行损耗计算	61
2.4	磁化曲线的测量和显示	62
2.4.1	测试原理和电路	62
2.4.2	测量误差分析	63
2.4.3	磁化曲线的显示	64
2.5	动态磁化	65
2.5.1	动态磁化过程	65
2.5.2	高频下的磁化曲线	65
	本章小结	67
	第3章 开关电源中常用的磁性材料	69
3.1	软磁材料的重要指标	69
3.2	软磁铁氧体材料	70
3.2.1	铁氧体的组成和基本特性	70
3.2.2	铁氧体应用参数	71
3.3	合金磁材料	76
3.3.1	概述	76
3.3.2	硅钢片	77
3.3.3	坡莫合金磁性材料	80
3.3.4	非晶合金和微晶合金	82
3.4	金属磁粉芯磁性材料	86
3.4.1	概述	86
3.4.2	磁粉芯类别	91
3.4.3	使用无机物粘结剂金属粉芯材料	94
	本章小结	96
	第4章 线圈	97
4.1	集肤效应	97
4.1.1	高频电流引起的集肤效应	97
4.1.2	集肤效应的定量分析	98
4.1.3	交直流电阻比与线径和频率的关系	100
4.1.4	矩形波电流产生的集肤效应	102

4.2	邻近效应	104
4.2.1	邻近效应产生的原理	104
4.2.2	相邻导体间存储的能量	105
4.2.3	邻近效应在线圈导体中产生的涡流及损耗	106
4.2.4	邻近效应对变压器多层绕组相邻层间的影响	109
4.2.5	由邻近效应产生的交直流电阻比求解	112
4.2.6	邻近效应对线圈并联的影响	117
4.2.7	邻近效应引起的被动损耗	119
4.3	漏磁分析	122
4.4	电流计算	125
4.4.1	线圈电流有效值计算	125
4.4.2	PWM 激励时变压器绕组电流波形分析	127
4.5	线圈间电容和端部电容	128
4.5.1	线圈间电容和屏蔽	128
4.5.2	端部之间电容	129
4.6	窗口填充系数	130
4.7	线圈并联	131
	本章小结	133
第 5 章	磁芯的工作状态	135
5.1	I 类工作状态	135
5.1.1	Buck 变换器滤波电感磁芯	135
5.1.2	连续工作模式磁芯的选择	137
5.1.3	反激变换器磁芯的工作模式	138
5.1.4	磁芯工作状态的特点	142
5.2	II 类工作状态	143
5.2.1	正激变压器磁芯工作状态	143
5.2.2	基本关系	144
5.2.3	正激类变换器对磁芯的要求	146
5.3	III 类工作状态	148
5.3.1	推挽类双象限磁芯工作状态	148
5.3.2	交流输出中的磁芯	151
5.3.3	不对称半桥工作磁芯	155
5.3.4	SPWM 交流输出滤波电感磁芯	157
	本章小结	158
第 6 章	高频变压器设计的基本问题	160
6.1	磁芯几何形状和最大磁通密度的选取	160



6.1.1	几种常见的磁芯材料结构	160
6.1.2	最大磁通密度的选择	164
6.1.3	高频变压器设计方法(AP法)公式推导	165
6.2	常用拓扑磁芯的 AP 值公式	167
6.2.1	正激变换器拓扑磁芯的 AP 值	167
6.2.2	推挽变换器输出功率公式推导	170
6.2.3	半桥拓扑和全桥拓扑输出功率公式推导	172
6.2.4	磁芯的初选方法	174
6.3	直流偏磁	175
6.3.1	直流磁化	175
6.3.2	直流脉冲对磁芯的磁化	176
6.3.3	交变磁化	177
6.3.4	高频开关电源的直流偏磁问题	179
6.4	线圈的匝比与匝数取整	182
6.4.1	匝数的取整	182
6.4.2	分数匝	182
6.5	占空比的选取	186
6.6	变压器的寄生参数及其影响	187
6.7	温升和损耗	188
6.8	高频功率变压器设计举例	191
6.8.1	高频变压器设计步骤	191
6.8.2	正激变换器变压器的设计举例	192
6.8.3	推挽变压器的设计举例	199
	本章小结	204
	第7章 电感设计	205
7.1	直流滤波电感设计	205
7.1.1	直流滤波电感的限制条件	205
7.1.2	电感计算方法	208
7.1.3	AP法初选电感磁芯	209
7.1.4	几何常数法选择磁芯	213
7.2	电感磁芯	214
7.2.1	磁芯气隙	214
7.2.2	散磁引起的损耗	216
7.2.3	磁芯材料和形状	217
7.2.4	损耗和温升	217
7.3	电感设计举例	218

7.3.1	气隙电感设计	218
7.3.2	磁粉芯材料电感设计	224
7.4	反激变换器变压器设计	233
7.4.1	反激变换器的工作原理	233
7.4.2	连续模式反激变压器设计	234
7.4.3	断续模式反激变压器设计	242
7.5	Boost 电感设计	250
7.5.1	Boost 电路的工作原理	250
7.5.2	Boost 功率因数校正电感设计	252
7.6	共模电感	259
7.6.1	常模噪声和共模噪声定义	259
7.6.2	共模电感设计	260
7.6.3	共模电感设计举例	266
7.7	耦合滤波电感	270
7.7.1	工作原理	270
7.7.2	交叉调节效应	271
7.7.3	动态交叉调节	271
7.7.4	减小交叉调节的方法	272
本章小结		273
第 8 章 特殊磁元件设计		275
8.1	尖峰噪声的抑制	275
8.1.1	矩形磁性材料的基本特性	275
8.1.2	尖峰噪声的产生	276
8.1.3	抑制尖峰原理	276
8.1.4	铁氧体磁珠	280
8.2	磁放大器	284
8.2.1	磁放大器原理	284
8.2.2	电压控制型半波磁放大器	285
8.2.3	利用磁放大器的正激式多路输出变换器	287
8.3	电流互感器	300
8.3.1	交流互感器	300
8.3.2	脉冲直流互感器	306
本章小结		311
第 9 章 平面磁元件		312
9.1	平面磁芯	312
9.1.1	平面磁芯命名	312



9.1.2	平面变压器的外形	313
9.1.3	平面变压器的绕制	314
9.2	设计	316
9.2.1	平面变压器的设计步骤	316
9.2.2	平面变压器设计举例 1	320
9.2.3	平面变压器设计举例 2	326
	本章小结	331
	第 10 章 磁集成技术	332
10.1	概 述	332
10.1.1	磁元件对变换器的影响	332
10.1.2	磁集成技术发展历史	333
10.2	磁元件建模方法	333
10.2.1	源转移等效变换法	334
10.2.2	磁元件电路模型的建立方法	335
10.3	磁元件集成方式	337
10.3.1	不改变磁芯结构的集成	337
10.3.2	改变磁芯结构的磁集成	347
10.4	磁集成的典型应用举例	348
10.4.1	有源箝位正激变换器的磁集成	348
10.4.2	移相全桥 DC/DC 变换器的磁元件集成	356
	本章小结	363
	第 11 章 温升、绝缘及电气特性测试	364
11.1	温 升	364
11.1.1	温升计算	365
11.1.2	温升测试	367
11.2	绝 缘	370
11.2.1	绝缘等级	371
11.2.2	绝缘电阻	371
11.2.3	绝缘强度	372
11.2.4	绝缘电晕放电	375
11.2.5	爬电与飞弧	378
11.3	常规电气特性测试	380
11.3.1	开关电源磁元件测试标准	380
11.3.2	测试项目	380
	本章小结	384
	附录 A 导线及铜带规格	385

A.1	导线规格	385
A.2	铜带规格	387
附录 B	磁 芯	389
B.1	磁性材料	389
B.1.1	铁氧体磁性材料	389
B.1.2	铁氧体尺寸规格	396
B.2	磁芯热阻与损耗	408
B.3	平面磁芯	411
B.4	集成电感	414
B.5	磁粉芯	416
B.6	矩形磁滞回线磁芯	430
B.6.1	非晶合金	430
B.6.2	噪声抑制器件	432
B.6.3	矩形磁滞回线铁氧体磁芯	433
B.7	各种磁性材料的性能比较	434
附录 C	拓扑、频率、磁芯牌号与输出功率	437
附录 D	主要变量名符号注释表	440
参考文献	443
后 记	445

第 1 章

磁的基础理论与磁元件

自然界的某些物质具有磁性,从发明指南针起,就开始了对磁的研究,18~19 世纪的科学家库伦、亨利、法拉第、安培、高斯和赫兹等人进行了很多有关电磁现象的实验,提出了许多描述电磁场的定律,后来麦克斯韦、楞次、法拉第和安培等科学家对这些定律做了归纳总结和理论抽象,进而发展成为一套非常简洁的描述宏观电磁现象的基本规律的方程组,这就是麦克斯韦方程组,从而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。工程上主要应用电磁的两个基本定律——全电流定律和电磁感应定律。

电磁计量存在两种不同的计量单位制。国际单位制,即 SI 或称有理化单位制或 MKS,即米-千克-秒(单位制),它有利于国际学术交流。磁的应用在 19 世纪开始,力学单位已经成熟,先定义真空的磁导率为 1,便出现磁场强度的单位为奥斯特,与真空的磁感应强度数值相等,且磁感应强度的单位为高斯,也即真空磁导率 $\mu_0 = 1 \text{ Gs}/1 \text{ Oe}$,这是非合理化单位的由来。

在工程实践中常用实用单位制,或称非有理化单位制或 CGS,即厘米-克-秒(单位制)。实用单位制使用较为便利,在工程上大多采用实用单位制。

英美国家通常应用 CGS,而我国使用 MKS。

1.1 磁场的发现和产生

使自然界中的一类物质,如铁、镍、钴和钼等具有磁性的过程称为磁化。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。

物质磁性最直观的表现是两个磁体之间的吸引或排斥,磁体中受引力或排斥力最大的区域称为磁体的极,简称磁极。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,称为磁场。磁场表现出同性相斥和异性相吸的特性,磁场与物体的万有引力场及电荷的电场一样,都具有一定的能量。磁场还具有本身的特性:

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

如图 1.1.1 所示为永久磁铁的磁场的形象化描述。如果把一些小磁针放在磁铁附近,在磁场力的作用下,小磁针排列成图 1.1.1(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,如图 1.1.1(b)所示,或称磁感



应线,或磁通线。把 N 极指向 S 极的方向定义为磁力线的正方向。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。磁力线总是走磁导率最大的路径,磁力线通常是直线或曲线,不存在直角拐弯的磁力线。任意两条磁力线之间相互排斥,因此不存在相交的磁力线。磁力线的多少代表磁场的强弱,如图 1.1.1(c)所示,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。

磁场中并不真正存在这些实际的线条,也没有什么物理量在这些线条中流动,只是在概念上形象地说明磁现象。

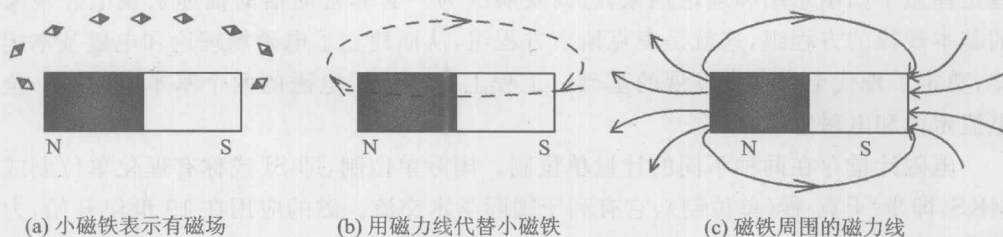


图 1.1.1 永久磁铁的磁场

图 1.1.2 所示为分子磁化的示意图。原子的结构是电子围绕原子核做旋转、运动,这种运动与通常的电流闭合回路比较,在磁性上是等效的。因此,原子中电子的轨道运动同无限小尺寸的电流闭合回路一样,电子旋转所形成的电流称为分子电流,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,形成一个个微小的磁区域称为磁畴或磁偶极子。磁性材料就是由成千上万的磁畴分子组成。如图 1.1.2(a)所示,当磁性材料没有被磁化时,对外不显示出磁性。如图 1.1.2(b)所示,当磁性材料被磁化时,带磁性的磁畴分子排列整齐趋向向外磁场的方向。

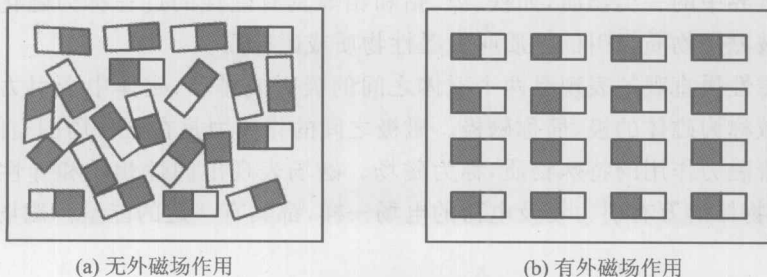


图 1.1.2 分子的磁化示意图

在原子中,电子绕原子核做轨道运动。电子在原子壳层中的轨道运动是稳定的,因而,这种运动与通常的电流闭合回路比较,在磁性上是等效的。因此,原子中电子的轨道运动,同无限小尺寸的电流闭合回路一样,视为磁畴或磁偶极子。

将载流导体或运动电荷放在磁场中,载流导体就要受到磁场的作用力,这说明电流产生了磁场。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。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。

运动电荷或载流导体产生磁场,根据实验归纳为安培定则,即右手定则:右手握住导线,拇指指向电流方向,其余四指所指方向即为电流产生的磁场方向,如图 1.1.3(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 1.1.3(b)所示。

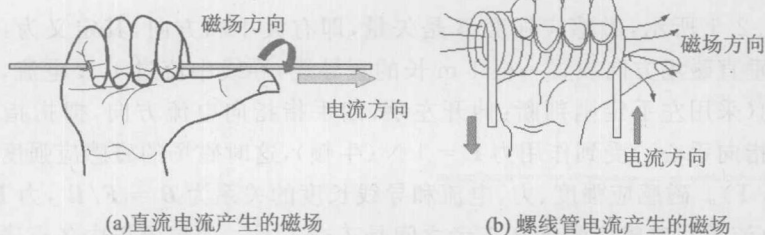


图 1.1.3 磁场方向的判断(右手定则)

图 1.1.4 所示为一对连接电源与负载之间的导线等磁位面的截面图。其中,每根导体流过大小相等且方向相反的电流,实线代表磁通,虚线代表磁位。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弱。两个磁场叠加在一起,在导线之间区域相互加强。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减弱,且近乎相等而趋向抵消。

图 1.1.5 所示为空心线圈磁场。其中,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,磁场是发散的。虽然存储的能量密度在线圈内很高,由于空间体积可以扩展到无限大,在线圈以外的弱磁场中,还存储相当大的能量。

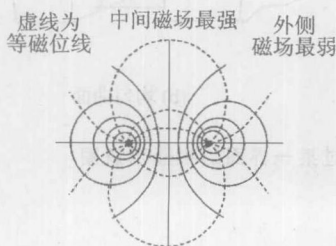


图 1.1.4 围绕双导体的场

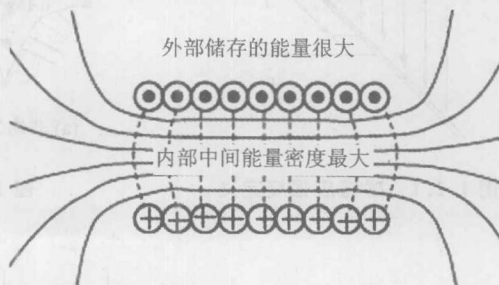


图 1.1.5 空心线圈的磁场

磁场不能被“绝缘”物体与其周围隔离开来,即磁“绝缘”是不存在的。但是磁场可以被短路,如果将图 1.1.5 的线圈放到一个铁盒子中去,铁盒子提供磁通返回的路径,铁盒子外的磁场将大幅度减弱。



1.2 磁的单位和电磁基本定律

在进行磁性器件的磁路分析之前,先要给出描述磁场的几个物理量。

1.2.1 磁感应强度

描述磁的基本单位是磁感应强度,也叫磁通密度(flux density),用 B 表示,国际单位制(MKS)中计量单位是特[斯拉](T),是一个矢量。在实用单位制(CGS)中,计量单位是高斯(Gs),与 MKS 关系为 $1\text{ T}=1\times 10^4\text{ Gs}$ 。

如图 1.2.1 所示,磁感应强度 B 是矢量,即有大小和方向,其定义为:在一个均匀磁场中,垂直磁场方向放置一根 1 m 长的直导线,导线中流过 1 A 电流,导线在磁场垂直方向(采用左手定则判断: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。)受到作用力 $F=1\text{ N}$ (牛顿),这时磁场的磁感应强度 B 大小为 $1\text{ 特斯拉}(1\text{ T})$ 。磁感应强度、力、电流和导线长度的关系为 $B=F/I$,力 F 在导线 l 内流通的电流 I 和磁感应强度 B 三者之间是正交关系。如果磁场中各点磁感应强度相同且方向相同,则此磁场是均匀磁场。

1.2.2 磁通

图 1.2.2 所示为穿过某一界面的磁通示意图,把垂直通过一个截面的磁力线总量称为该截面的磁通量(flux),简称磁通 Φ 。通常磁场方向和大小在一个截面上并不一定相同,如图 1.2.2(a)所示,则通过该截面积 A 的磁通 Φ 用对该截面的积分求得,为:

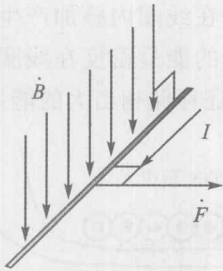


图 1.2.1 磁感应强度定义

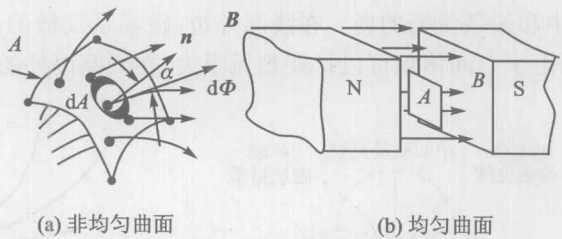


图 1.2.2 穿过某一界面的磁通示意图

$$\Phi = \int_A d\Phi = \int_A B \cos\alpha dA \quad (1.2.1)$$

或

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} d\mathbf{A}$$

式中: $d\Phi$ 为通过单元 dA 截面积的磁通; α 为截面的法线 n 与磁力线切线的夹角。

在变压器和电感中,给定结构磁芯截面上,或端面积相等的等气隙端面间的磁场