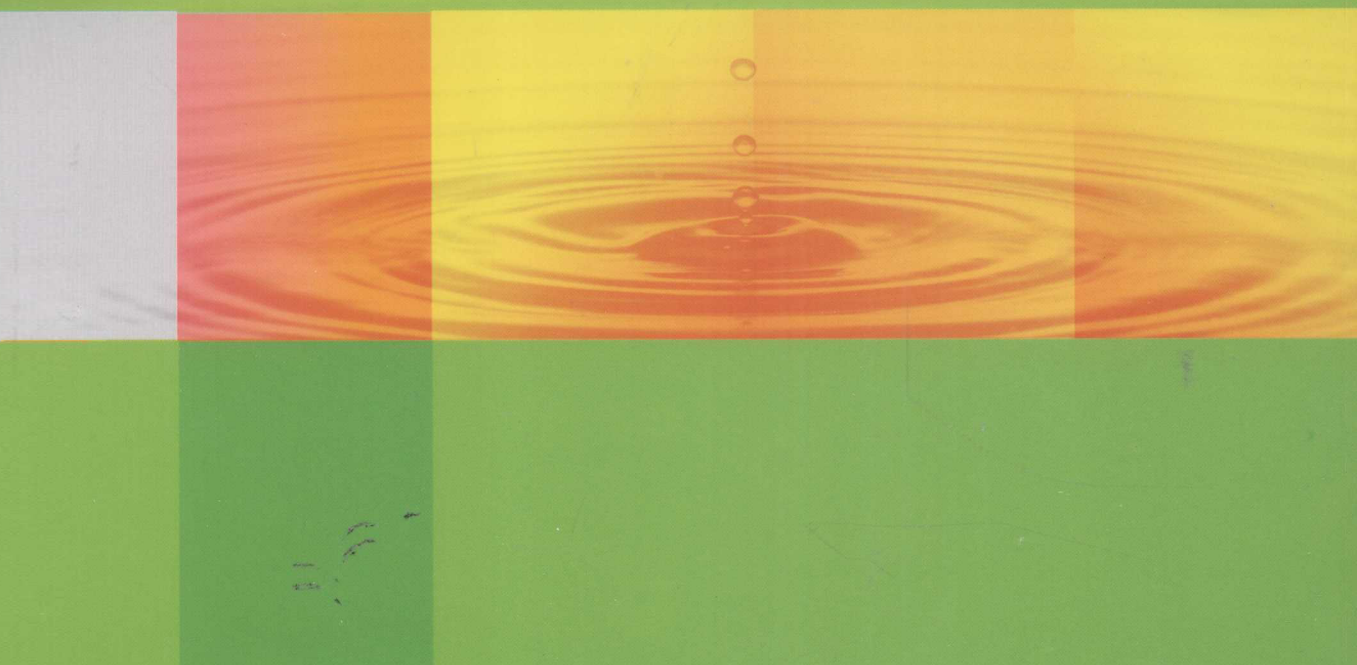




功率变压器

贝冠祺 王全保 编著



○ ISBN 978-7-111-33530-6

○ 策划编辑：徐明煜

○ 封面设计：赵颖喆

地址：北京市百万庄大街22号

电话服务

社服务中心：(010)88361066

销售一部：(010)68326294

销售二部：(010)88379649

读者服务部：(010)68993821

邮政编码：100037

网络服务

门户网：<http://www.cmpbook.com>

教材网：<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

定价：59.80元

ISBN 978-7-111-33530-6



9 787111 335306 >

小功率变压器

贝冠祺 编著
王全保



机械工业出版社

本书专门介绍小功率变压器的基本理论、基本原理、基础知识和基本计算,并结合实际介绍了 EI 型和 C 型铁心电源变压器的设计。另外,也为业余爱好者提供了简易设计方法,详细介绍了热熔断体和以铝代铜的计算。本书还介绍了环型变压器、R 型变压器、小功率三相电源变压器和稳压变压器的实用设计。

本书注重基础、阐明概念、联系实际,可用作培训教材,对专业人员、实验室人员和无线电爱好者以及电器维修人员来说是很实用的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

小功率变压器/贝冠祺,王全保编著. —北京:机械工业出版社, 2011.4

ISBN 978-7-111-33530-6

I. ①小… II. ①贝…②王… III. ①变压器 - 基本知识 IV. ① TM4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 028827 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:徐明煜 责任编辑:王欢

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.25 印张 · 499 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-33530-6

定价:59.80 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

小功率变压器广泛应用于各类电子设备和家用电器中。本书系统地介绍了其基本理论、基本原理、基础知识和基本计算，介绍了 EI 型和 C 型铁心电源变压器设计方法。为适应新情况和读者的需要，编写了以铝代铜方面的第 4 章，按最新标准编写了热熔断体（俗称温度保险丝）部分内容，还编写了为非专业人员提供新的简易设计的第 7 章。本书前八章由贝冠祺同志撰稿，并采纳了王全保同志和其他经验丰富的同志的许多意见；后四章内容包括环型变压器、R 型变压器、小功率三相电源变压器和稳压变压器的实用设计，原计划由徐士佐同志撰稿，但因久病不愈，抱憾而去。为此，由王全保同志撰稿。本书既可用作培训教材，也可用作实用参考书。

目前，我国已是电子变压器生产和输出的大国，电子变压器生产和加工企业达几千家，但自主研发能力薄弱，数十万从业人员的专业基础知识和理论水平不够深厚，不利于开发新产品和参与国际竞争。笔者意在为改善上述不利情况，使我国在该领域由生产大国转为制造强国贡献绵薄之力。

在本书的编撰中，得到了姜德清、张乃国、徐棱、黄永吾先生的支持和关心，也得到了广州威凯检测技术研究所、国家日用电器质量监督检验站孔睿迅副站长和广州威凯检测技术研究所、工业与日用电器行业生产力促进中心蔡军副主任的热心帮助，在此表示感谢。由于笔者水平有限，难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

仅以此书纪念徐士佐同志。

作 者

目 录

前言

第1章 变压器原理和一些参数计算 1

- 1.1 变压器原理 1
 - 1.1.1 理想变压器原理 1
 - 1.1.2 磁化曲线和磁滞回线 3
 - 1.1.3 磁畴、磁滞和居里温度 5
 - 1.1.4 磁滞损耗、磁致伸缩、涡流损耗、剩余损耗和附加损耗 7
 - 1.1.5 空载与满载时有关参数的关系 12
 - 1.1.6 实际变压器 13
- 1.2 铜损和铁损的计算 14
 - 1.2.1 铜损计算 15
 - 1.2.2 铁损计算 15
 - 1.2.3 一种近似计算铁损的方法 17
- 1.3 计算中需要用到的系数和部分公式 19
 - 1.3.1 电流密度与漆包线的选取 19
 - 1.3.2 (裸)导线占空系数 21
 - 1.3.3 铁心叠装系数 21
 - 1.3.4 铁心功率和换算伏安 22
 - 1.3.5 交流电路中的功率、电压和电流 24
 - 1.3.6 铁心计算公式 26

第2章 变压器材料和变压器绝缘及变

压器结构 28

- 2.1 铁心和铁心材料及铁心型号 28
 - 2.1.1 铁心的种类和特点 28
 - 2.1.2 铁心材料 30
 - 2.1.3 铁心片和铁心系列 34
- 2.2 导线材料 37
- 2.3 变压器绝缘和绝缘材料 38
 - 2.3.1 变压器的绝缘系统 38
 - 2.3.2 绝缘材料 38
 - 2.3.3 线包(圈)的绝缘设计 40
 - 2.3.4 对变压器绝缘的安全要求 47
- 2.4 骨架 54
- 2.5 变压器结构及同名端判别 54
 - 2.5.1 低压变压器线包结构 54

- 2.5.2 同名端及其判别 57

第3章 技术要求和有关计算 60

- 3.1 电性能要求 60
 - 3.1.1 电压调整率和电压比 60
 - 3.1.2 变压器温升和分界功率 66
 - 3.1.3 变压器效率 77
 - 3.1.4 空载电流、空载损耗和满载损耗 78
 - 3.1.5 噪声及其抑制 83
 - 3.1.6 合闸电流 85
 - 3.1.7 杂散磁场(漏磁场) 87
 - 3.1.8 功率因数 87
- 3.2 经济要求 88
- 3.3 可靠性 88
- 3.4 变压器各参数综合分析 88
 - 3.4.1 各主要参数之间的关系 89
 - 3.4.2 磁化电流和磁化功率的计算 89
 - 3.4.3 一次电流分析 90
 - 3.4.4 影响磁感应强度的三个因素及有关计算 91

第4章 对Z式的分析和以铝代铜 93

- 4.1 Z式的导出和Z式中各参数应有值及其作用 93
 - 4.1.1 Z式的导出 93
 - 4.1.2 Z式中各参数应有值 94
 - 4.1.3 Z式中各参数对 P_2 、 ΔU 和 $\Delta \tau_m$ 的影响 95
- 4.2 铝耗因子和对铜铝均适用的公式 98
 - 4.2.1 铝耗因子 98
 - 4.2.2 有Z式的对铜铝均适用的公式 98
 - 4.2.3 无Z式的对铜铝均适用的公式 99
 - 4.2.4 关于取 $S_{m1} \approx 0.5S_m$ 可行取 $S_{m2} \approx 0.5S_m$ 不可行的问题 99
 - 4.2.5 铜包铝线和铝线 100

第5章 变压器设计的类型和数据运算

规则 105

- 5.1 变压器设计如何满足经济要求 105

5.2 典型设计、正常设计和简易设计	105	6.4.2 例2	139
5.2.1 三种设计方法的特点	105	6.4.3 例3	144
5.2.2 正常设计和简易设计的思路	106	6.5 结合参数表的简易设计	152
5.3 正常设计和简易设计中电参数 J 和 磁参数 B_0 的选取	107	第7章 简易设计	154
5.3.1 P_2 小于分界功率时 J 和 B_0 的 选取	108	7.1 $S_e S_0 = KP_2/B_0$ 与表 2-1 和表 7-2 或 表 7-3 相结合的简易设计	154
5.3.2 P_2 大于分界功率时 J 和 B_0 的 选取	112	7.1.1 方法导出	154
5.3.3 其他因素对 J 和 B_0 选取的影 响	112	7.1.2 $S_e S_0 = KP_2/B_0$ 与表 2-1 结合的 简易设计	156
5.4 数据运算规则	113	7.1.3 $S_e S_0 = KP_2/B_0$ 与表 2-1 及表 7-3 结合的简易设计	157
5.5 变压器计算中的数字运算	115	7.1.4 $S_e S_0 = KP_2/B_0$ 与表 7-2 结合的 简易设计	159
第6章 正常设计	117	7.1.5 讨论	159
6.1 设计技术条件	117	7.2 其他简易设计方法	160
6.2 设计步骤	119	第8章 热熔断体和 PTC 元件应用	162
6.2.1 变压器换算伏安	119	8.1 热熔断体 (俗称温度保险丝)	162
6.2.2 选择铁心确定电磁参量和绝 缘等级	119	8.1.1 简单介绍	162
6.2.3 一、二次绕组匝数	120	8.1.2 主要技术指标	167
6.2.4 一次电流和功率因数	120	8.1.3 对标准中有关问题的理解	169
6.2.5 一、二次导线截面积和选择 漆包线	121	8.1.4 产品介绍	170
6.2.6 (各绕组间及绕组对铁心的) 试验电压	122	8.1.5 热熔断体选用和举例	173
6.2.7 线包 (圈) 结构设计和绕组 参数计算	122	8.2 PTC 元件	176
6.2.8 电压调整率和电压比核算及 修正	129	第9章 环型变压器设计	177
6.2.9 空载电流和空载损耗	130	9.1 环型变压器的特点和用途	177
6.2.10 温升	131	9.1.1 环型变压器的特点	177
6.2.11 变压器效率	131	9.1.2 环型变压器的主要用途	177
6.2.12 过载计算	131	9.2 环型铁心材料和尺寸系列	178
6.3 ΔU 、 B_0 和 $\Delta\tau_m$ 与参数表中的值不 同时的计算	132	9.2.1 环型铁心材料	178
6.3.1 ΔU 与参数表中的值不同时的 计算	132	9.2.2 环型铁心尺寸系列	179
6.3.2 B_0 与参数表中的值不同时的 计算	133	9.3 工频环型电源变压器设计	182
6.3.3 $\Delta\tau_m$ 与参数表中的值不同时的 计算	134	9.3.1 设计单相环型电源变压器所需 的技术参数	182
6.4 举例	135	9.3.2 铁心材料和磁感应强度的选择	182
6.4.1 例1	135	9.3.3 确定铁心尺寸	183
		9.3.4 线圈匝数计算	187
		9.3.5 空载电流计算	188
		9.3.6 一次电流计算	189
		9.3.7 确定导线直径	189
		9.3.8 结构计算	192
		9.3.9 电压、电流计算	194
		9.3.10 温升计算	195

9.4 工频环型变压器设计举例	196	计举例	247
9.4.1 例题1(按表9-9的参数表设计)	196	11.4.1 技术要求	247
9.4.2 例题2(按方法2设计)	200	11.4.2 计算步骤	247
9.5 电源频率为400Hz的环型变压器计算	206	11.5 小容量三相插片铁心变压器设计 及例题	251
9.5.1 技术参数	207	11.5.1 尺寸系列	251
9.5.2 计算步骤	207	11.5.2 变压器计算参数表	252
第10章 R型变压器设计	214	11.5.3 设计举例	253
10.1 R型变压器的特点和应用	214	第12章 稳压变压器设计	258
10.1.1 R型变压器的特点	214	12.1 稳压变压器的特点和工作原理	258
10.1.2 R型变压器的应用	215	12.1.1 稳压变压器的特点	258
10.2 小功率R型变压器、R型铁心及 配件尺寸系列	216	12.1.2 稳压变压器的工作原理简介	258
10.2.1 R型铁心	216	12.1.3 稳压变压器的特性简介	259
10.2.2 骨架	217	12.2 WCD型稳压变压器	260
10.2.3 R型变压器外形和安装尺寸	219	12.2.1 WCD型整流用稳压变压器的 主要性能指标	260
10.3 输出功率在1000W以下的R型 变压器计算	220	12.2.2 WCD型稳压变压器的主要优、 缺点	260
10.3.1 计算参数表	220	12.2.3 WCD型稳压变压器计算	261
10.3.2 计算例题1——一次绕组串联、 二次绕组并联	220	12.3 双CD型稳压变压器	264
10.3.3 计算例题2——一次绕组并联、 二次绕组串联	222	12.3.1 结构特点	264
10.4 输出功率1.5~10kVA的R型变 压器计算	223	12.3.2 双CD型稳压变压器计算	264
10.4.1 铁心尺寸和材料	223	12.4 WED型稳压变压器	267
10.4.2 变压器计算参数表	224	12.4.1 WED型稳压变压器的结构	267
10.4.3 设计举例	224	12.4.2 设计举例	267
10.5 三相SR型铁心和变压器计算	225	12.4.3 输出波形接近正弦波的稳压变 压器	269
10.5.1 铁心	226	12.5 采用插片铁心的稳压变压器	269
10.5.2 变压器计算参数表	226	12.5.1 铁心结构	269
10.5.3 计算例题	227	12.5.2 基本计算公式和设计要点	270
第11章 小容量三相电源变压器 设计	230	12.5.3 计算例题	272
11.1 三相变压器绕组电压和电流计算	230	12.6 稳压变压器的调整与参数测量	275
11.2 三相变压器的联结方式	231	12.6.1 稳压变压器的调整	275
11.3 工频三相E型铁心变压器的计算	232	12.6.2 稳压变压器参数测量	276
11.3.1 三相E型铁心	233	附图 附表	278
11.3.2 计算所需技术参数	235	附图1.2.2-1 50Hz、60Hz EI型铁 心(黑片)磁化曲线 (50W1300)	278
11.3.3 计算步骤	235	附图1.2.2-2 50Hz C型铁心磁化 曲线	278
11.4 工频三相E型铁心电源变压器设 计	247	附图1.2.2-3 50Hz C型铁心铁损 曲线	279
		附表2.2 常用导线规格及参数表	279

附表 5.2.1-1 EI 型铁心电源变压器计算 参数表 (参见 1.2.3 小节 说明) 50W1300 220V 50Hz (附王字型骨架尺寸图 表)	282	压器计算参数表 (Ⅱ、 Ⅲ级品铁心)	292
附表 5.2.1-1 的附表 附图 王字型骨 架	285	附表 5.2.1-4a XCD 型铁心 50Hz 电源 变压器计算参数表 (Ⅰ 级品铁心)	294
附表 5.2.1-1 附图	285	附表 5.2.1-4b XCD 型铁心 50Hz 电源 变压器计算参数表 (Ⅱ、 Ⅲ级品铁心)	296
附表 5.2.1-2a CD 型铁心 50Hz 电源变 压器计算参数表 (Ⅰ级 品铁心)	286	附表 5.2.1-5a XED 型铁心 50Hz 电源 变压器计算参数表 (Ⅰ 级品铁心)	298
附表 5.2.1-2b CD 型铁心 50Hz 电源变 压器计算参数表 (Ⅱ、 Ⅲ级品铁心)	288	附表 5.2.1-5b XED 型铁心 50Hz 电源 变压器计算参数表 (Ⅱ、 Ⅲ级品铁心)	300
附表 5.2.1-3a ED 型铁心 50Hz 电源变 压器计算参数表 (Ⅰ级 品铁心)	290	本书主要参数符号与单位	302
附表 5.2.1-3b ED 型铁心 50Hz 电源变		公式汇总 (第 1~8 章)	306
		主要参考文献	315

第 1 章 变压器原理和一些参数计算

1.1 变压器原理

1.1.1 理想变压器原理

变压器是以互感现象为基础的电磁装置。其原理性结构如图 1-1 所示。它由绕在同一个铁心上的两个绕组组成，与交流电源连接的绕组称为一次绕组匝数为 N_1 （单位为匝）；连接负载的绕组称为二次绕组匝数为 N_2 （单位为匝）。

对变压器原理的讨论先从理想变压器入手，然后讨论非理想情况中的一些主要问题，并在设计时予以考虑，这样就会概念清楚，层次分明。

理想变压器的条件：通过两个绕组的磁通量 Φ 在每匝都相同，即没有漏磁；两个绕组导线电阻（铜电阻）等于零，没有铜电阻产生的损耗（简称铜损、铜耗），即忽略绕组中导线的焦耳损耗；没有铁心产生的损耗（简称铁损、铁耗），即忽略铁心中的磁滞损耗和涡流损耗；一次绕组为一个有近于无限大自感系数的电感线圈，即交流阻抗无限大，故空载（不接负载）电流 i_0 可以忽略。

当二次绕组开路，在一次绕组上加交变电压 u_1 时，铁心中就有交变磁通量 Φ_0 （称主磁通量）产生。

根据电磁感应原理，绕组内的磁通量发生变化时，会在绕组两端产生感应电动势 e ， e 的大小与绕组匝数及磁通量变化速率的负值成正比，即 $e = -N(d\Phi/dt)$ 。对于一次绕组，磁通量 Φ_0 在自身的绕组内产生了自感电动势 e_1 ，于是有

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} \quad (1-1)$$

假设一次绕组是一个没有电阻的纯电感，则其上的自感电动势 e_1 与外加电压 u_1 大小相等、方向相反，并保持平衡状态，即

$$u_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} \quad (1-2)$$

假设一次绕组是一个具有近于无限大自感系数的电感，其上的电流为零。根据楞次定律，由 e_1 引起的电流也为零。实际上这是不可能的，无论如何在一次绕组中还是有励磁电流 i_{Φ_0} ，因为它与满载（即负载加够）时的电流相比小得很多，在理想变压器中可以忽略。 i_{Φ_0} 是空载电流 i_0 的主要成分，所以往往将 i_0 称为励磁电流，但在计算时应将两者区分开来。

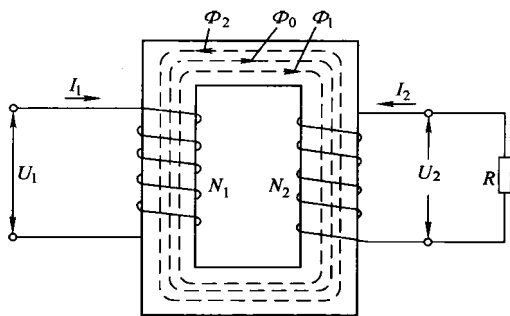


图 1-1 变压器原理图

假设无漏磁，一次绕组产生的磁通量通过铁心全部耦合于二次绕组上，在二次绕组两端就产生互感电动势 e_2 ，于是有

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_0}{dt} \quad (1-3)$$

当二次绕组接通负载时，在 e_2 作用下产生的感生电流 i_2 就流过负载，在负载上产生电压降 u_2 ，且与 e_2 方向相反。因假设二次绕组导线电阻为零，故有 $u_2 = -e_2$ ，即

$$u_2 = -e_2 = N_2 \frac{d\Phi_0}{dt} \quad (1-4)$$

互感电动势 e_2 在二次侧产生电流 i_2 ，根据楞次定律，它产生的磁通 Φ_2 对抗主磁通 Φ_0 的变化，故 Φ_2 与 Φ_0 方向相反，使 Φ_0 减小，一次自感电动势 e_1 下降，导致 $u_1 > e_1$ 。因 u_1 不变，为保持 $u_1 = -e_1$ 的平衡状态，必须保持 Φ_0 不变，电源必须加大电流。这部分加大的电流设为 i'_2 ，此时的一次电流为 $i_{in} = i_0 + i'_2$ ，使得由 i'_2 新产生的磁通量 Φ_1 （与 Φ_0 同相）刚好抵消 Φ_2 ，此时一、二次绕组的磁动势相等，即

$$N_1 i_{in} = N_2 i_2 \quad (1-5)$$

这时， e_1 又恢复到与 u_1 大小相等、方向相反的新的平衡状态，铁心内部只有 Φ_0 存在。由此可见，不论二次绕组是开路还是接通负载，在铁心内的磁通量始终是 Φ_0 ，这就是在理想变压器中的主磁通不变原理。另外， i_{in} 中的 i'_2 分量随 i_2 的存在而存在，随 i_2 的消失而消失，犹如镜面上反射光与入射光的关系，故称 i'_2 为 i_2 的反射电流。在实际应用中， i'_2 是由 i_2 通过折算得到的，故又称折算电流，其有效值为 I'_2 。

比较式 (1-2) 和式 (1-4) 得 $u_1/u_2 = N_1/N_2$ ，工程上只取有效值计算，故有

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 说明一、二次电压比等于一、二次匝数比。当 $N_1 > N_2$ 时就是降压变压器；当 $N_1 < N_2$ 时为升压变压器； $N_1 = N_2$ 时为隔离变压器。在实际变压器中，二次侧往往有多个绕组，可以同时有升压和降压。但是，在实际变压器中，因一、二次绕组上有铜电阻存在，式 (1-6) 左右是不等的，正确的电压与匝数比应是式 (1-15)，式 (1-6) 只能作近似式使用。

在实际应用中，人们还关心电流的有效值与匝数的关系，故式 (1-5) 又可写为

$$\frac{I_{in}}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1-7)$$

式中 I_{in} 为 i_{in} 的有效值。

按式 (1-7) 就可以折算出二次电流。因 i'_2 远大于 i_0 ，所以有 $i_{in} \approx i'_2$ ，取有效值有 $I_{in} \approx I'_2$ ，代入式 (1-7) 得

$$\left. \begin{aligned} \frac{I'_2}{I_2} &\approx \frac{N_2}{N_1} = n \\ \text{或} \quad I'_2 &\approx \frac{N_2}{N_1} I_2 = n I_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-7a)$$

由式 (3-38) 得 $I_{in}^2 = (I'_2 + I_c)^2 + I_\phi^2$ ，知只有视 $I_c = I_\phi \rightarrow 0$ 时上式成立。

由式 (3-5) 得 $U_2 \approx N_2 U_1 (1 - \Delta U) / N_1$ ，两边各乘 I_2 得 $U_2 I_2 \approx N_2 U_1 I_2 (1 - \Delta U) / N_1$ 。将式 (1-7a) 代入上式得 $U_2 I_2 \approx U_1 I'_2 (1 - \Delta U)$ 。对式 (1-29) 取 $\cos \varphi_2 \approx 1$ 得 $P_2 \approx U_2 I_2$ ，代入上式得

$$I'_2 \approx \frac{P_2}{U_1(1 - \Delta U)} \quad (1-7b)$$

此式涉及多个近似式，正负误差均有，难以判定误差的大小。

式(1-7)、式(1-7a)和式(1-7b)适用于负载为纯电阻、桥式和倍压整流电路，否则按式(6-8)计算。式中， $n = N_2/N_1$ 为匝数比； ΔU 为电压调整率。

一般情况下，变压器负载为一个阻抗 z_2 ，称为变压器输出阻抗，于是有

$$u_2 = i_2 z_2 \quad (1-8)$$

对交流电源而言，变压器的一次侧是它的负载，称为变压器输入阻抗 z_1 ，于是有

$$u_1 = i_{in} z_1 \quad (1-9)$$

用式(1-8)除式(1-9)并取其有效值得

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_{in}}{I_2} \frac{Z_1}{Z_2} \quad (1-10)$$

将式(1-6)和式(1-7)代入式(1-10)有

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \left(\frac{1}{n} \right)^2 \quad (1-11)$$

变压器一、二次绕组的阻抗 Z_1 和 Z_2 就可通过式(1-11)进行阻抗变换。

式(1-6)、式(1-7)和式(1-11)表示的就是变压器可以实施的变电压、变电流和变电阻(或变阻抗)功能。利用这三个功能就能做成不同用途的变压器。通过铁心的电磁耦合，变压器还具有功率传递功能，一次绕组提供给二次绕组的功率由增大的一次电流 I'_2 提供。

本书是介绍小容量变压器的，除了对变压器三个功能的讨论外，着重讨论功率传递问题。铁心传递功率的能力以式(1-40)或式(1-41)表示。

下面介绍一些铁磁体方面的知识。

1.1.2 磁化曲线和磁滞回线

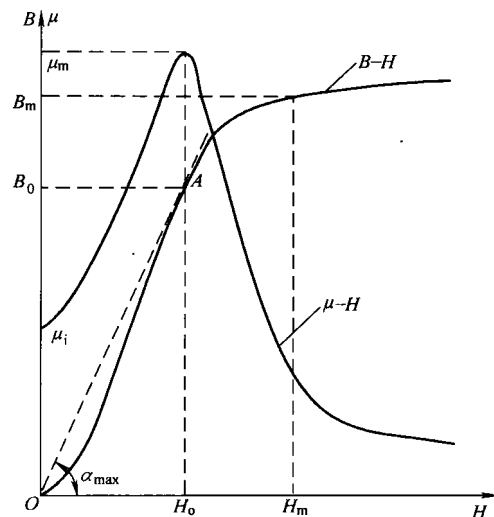
本书中所用的磁性材料是硅钢。磁性材料有软、硬之分，硅钢属于软磁材料。软磁材料在外磁场的作用下具有磁性，外磁场消失后磁性随之消失(有少量剩磁)。硬磁材料又称为永磁材料，本身带有磁性。

设铁心有效截面积为 S_c (单位为 cm^2)，是其真正能起导磁作用的面积。 B 为磁通密度(也称为磁感应强度)，单位为 T 。有关系式 $B = \Phi/S_c$ 。铁心的磁导率为 μ ，磁场强度为 H (单位为 A/cm)，则有 $B = \mu H$ 。设铁心平均磁路长度为 l_c (单位为 cm)，则称 Hl_c 为磁动势，它等于一次绕组匝数 N_1 和流过一次绕组的磁化电流 I_ϕ (单位为 A)的乘积，即 $Hl_c = N_1 I_\phi$ ， I_ϕ 是一次电流中的无功分量。

因铁心仅是磁的良好导体，对磁通 Φ (单位为 Wb) (由励磁电流 I_ϕ 产生)存在阻力，称 Hl_c/Φ 为磁阻。由上面的关系式可以得到 $Hl_c/\Phi = l_c/(\mu S_c)$ 。铁心是由硅钢片叠积或卷绕而成的，存在接缝和空气间隙，因而铁心内部各处的磁导率 μ 是不同的，或者说磁阻不同，特别是在空气间隙中的 μ 很小，磁阻很大。

描述铁心导磁能力的磁导率 μ 是 H 的函数，而 B 也是 H 的函数，有关系式 $\mu = B/H$ 。此

式看似直线关系,但由于铁心磁性能的非线性特性, B 与 H 不是线性关系,因此 μ 也不是一个常数。在 $B-H$ 曲线上某点的 μ 值就是 B 与 H 的比,或者说是从原点到该点连线的斜率,即 $\mu = k \tan \alpha$ 。式中, k 为系数; α 是连线与 x 轴夹角。图1-2^①所示的 $B-H$ 和 $\mu-H$ 曲线反映了这个关系。将两条曲线画在一张图上能清楚看出 H 、 B 和 μ 三者的相互关系。在动态(交流)磁化条件下,称 μ_i 为起始磁导率。最大值 μ_m 对应的夹角为 $\alpha_{\max}$,出现在 $B-H$ 曲线的拐点(A点)上。这个点正好是 B 值即将进入饱和区的点。空载磁感应强度 B_0 是选择在这个点附近的。在该点附近的 μ 值均很大。因此当电网电压超过220V,例如上升了12%,因 $B-H$ 曲线在此处很为陡峭, H 上升的幅度很小,从而磁化电流上升也很小,不易进入饱和区。

图1-2 $B-H$ 和 $\mu-H$ 曲线

铁心被磁化后另一个重要特性是具有图1-3所示的磁滞回线。

先从直流入手讨论。当加在绕组上的电压慢慢上升, B 随着 H 的增加而增加, B 的值由0上升到 S 点对应值。此时的磁感应强度升到饱和值 B_m 。若电压再增加, B 的值几乎不再增加,而 H 却快速增加,说明需要很大的磁化电流。而后随着电压反向和正向变化, B 按图中的曲线箭头变化($B_r \rightarrow H_c \rightarrow S' \rightarrow -B_r \rightarrow H_c \rightarrow S$),完成了—个周期变化。当 $H = -H_c$ 或 H_c 时,铁心才完全失去磁性($B = 0$),称 $-H_c$ 和 H_c 为矫顽力,是使剩余磁感应强度 B_r 或 $-B_r$ 变为零的磁场强度;当 $H = 0$ 时,铁心内尚有剩余磁感应强度 B_r 或 $-B_r$,这个现象反映出铁心内的 B 值总是滞后于 H 的变化,此种现象称为铁心的磁性滞后,简称磁滞。由曲线1和2围成的封闭曲线称静态磁滞回线, $B = 0$ 到 S 的曲线为静态磁化曲线。

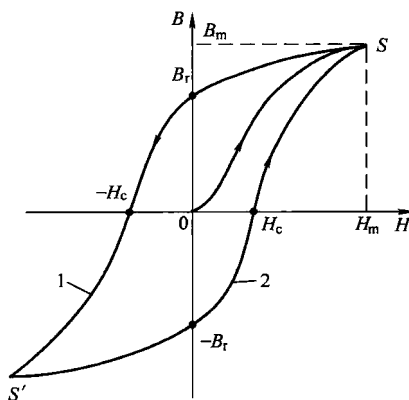


图1-3 磁滞回线示意图

现在讨论交流时的情况,就是加入频率因素。在一个周期内其变化与直流情况(电压变化很慢)一样,具有差不多的磁滞回线形状,但不同频率的磁滞回线形状不同,如图1-4^[10]所示,即有“胖”“瘦”的差别。图中dc(直流)磁滞回线仍称为静态磁滞回线,为了便于比较也画入。50Hz或以上的称为动态磁滞回线。在以后的叙述中均指交流状态,往往会省去“动态”两字。

① 交流和直流的 $\mu-H$ 与 $B-H$ 曲线均有此形状。交流时 B 和 H 是随时间而变的,故应用微分式 $\mu = dB/dH$ 。这是一个瞬时值,最大磁导率 μ_m 出现在 $B-H$ 曲线的拐点上。实际使用时是取一个周期的平均值, μ_m 出现在 $B-H$ 曲线的拐点上,就像图中表示的那样。图中的 H_m 是制作磁化曲线时定下的上限,超过它即被认为是进入饱和区了。

读者可仿照图 1-4 画出其他频率时的磁滞回线。显然,对同一个铁心,60Hz 的磁滞回线比 50Hz 的磁滞回线要“胖”一些。如果将磁化曲线也画上去,则直流和交流不同频率时的交流磁化曲线是不同的,因为它们也反映了不同损耗的情况。

交流磁化曲线也称为动态磁化曲线或基本磁化曲线。同上理由,均简称为磁化曲线。

实际应用的磁化曲线是如何绘制出来的呢?由某一材料做成的某一尺寸的铁心绕制的双绕组变压器,在某一频率下,随着电压的增加,就会形成从小到大无数个磁滞回线。从原点开始,连接各磁滞回线顶端的曲线就是磁化曲线,如图 1-5 所示。图中只取三个磁滞回线,它们顶端与原点的虚线形象地表示了得到的磁化曲线。

在实用上,只取 B 和 H 的正值,故磁化曲线只取右上角的一条,反方向的那一条不用。如果取 $H = H_m$,此时的磁滞回线称为饱和磁滞回线,它以 50Hz 的频率回转,其他两个磁滞回线也是如此。在两个小一些的不饱和磁滞回线也有自己的 B_r 和 H_c ,只是没有在图中标出而已。

对于 50Hz 时使用的磁化曲线,是针对某种材料(如 50W470),对具有代表性工艺制造的铁心(如 EI41)和具有代表性工艺绕制的变压器(一般为双绕组),进行实际测试。测若个点(如 10 个),得到 10 组 U_{20} 和 I_0 ,通过计算,将得到的 10 组 B 、 H 值标于坐标纸上,连接这 10 个点就得到 B - H 曲线。这个曲线反映了成品铁心的特性,是实用的磁化曲线。显然,只有接近磁饱和点附近几组数据最有用,不妨多测几个点,并略去靠近原点的线段,只取有用的部分,如同附图 1.2.2-1 那样。

实用的磁化曲线针对性很强,用牌号不同的硅钢片做成不同尺寸的铁心的 B - H 曲线有好有坏。对同一牌号的硅钢片做成的铁心,尺寸大者的 B - H 曲线好;对于同样的铁心,无固定孔的 B - H 曲线比有固定孔的要好;黑片(经退火处理后,表面发黑)的 B - H 曲线比白片(未经退火处理,表面发白)的要好;对同一个铁心,50Hz 的 B - H 曲线比 60Hz 的要好。对于铁损也有上述规律。

磁滞回线和磁化曲线反映了铁心的磁特性,在宏观上代表了铁磁体在外磁场作用下的基本特征。下面进一步分析它们的内在含义和机理。

1.1.3 磁畴、磁滞和居里温度

1. 磁畴和磁滞

构成铁心的硅钢片是一种铁磁体,具有自发磁化性质而产生磁畴结构。“磁性材料内部

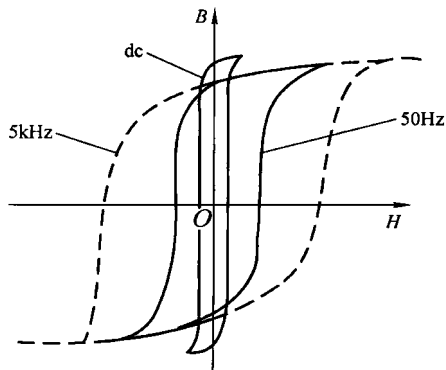


图 1-4 不同频率时的磁滞回线

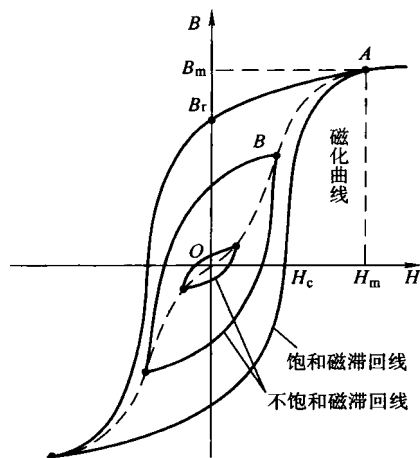


图 1-5 (动态)磁滞回线和
(动态)磁化曲线

自发磁化的大小和方向基本上是均匀一致的区域称为磁畴，这一区域通常是很微小的”^[13]。

(1) 形成磁畴的大致机理如下

物质由原子组成，原子又由原子核和围绕其转动的电子组成。一个靠近原子核转动的电子形成大约相当于 38A 的环形电流，这个环形电流就会因产生某一方向的磁场而具有磁矩。对于一个原子来说，在它外围各电子产生的磁矩总和不为零，即该原子具有某一个磁矩（原子核本身的磁矩很小，可以忽略）。对于铁心这样一个铁磁体，其内部各电子除了绕原子核转动外还有自旋运动，因各电子自旋轴之间的相对取向的关系，相邻原子的电子之间有能量交换，使得一个小区域内的所有原子磁矩都按一个方向排列，即出现了自发磁化现象，这时也可以说材料具有铁磁性。这个小区域就是磁畴。它具有磁矩而显示出磁性。用金相显微镜能观察到磁畴的形状、大小及它们之间的搭配方式，统称为磁畴结构。每个磁畴约含百万亿（ 10^{15} ）个原子，其体积大小不等，约为 10^{-15} m^3 数量级。

各磁畴的磁矩杂乱无章而互相抵消，从宏观上看，铁心总磁矩为零。当在变压器一次侧加上交流电时，铁心内就有外加磁场，以磁场强度 H 表示。具有与主磁通方向即外磁场方向相接近的磁矩的磁畴，扩大自己的边界，并将磁矩转向外磁场方向，此现象称为磁畴取向。在偏离主磁通方向较多的磁矩的磁畴，则缩小自己的边界，同时也使自己的磁矩转向外磁场方向，于是从整体来说，铁磁体被磁化了，并显示出磁性。当反映外磁场强弱的磁场强度 $H = H_m$ 时，绝大多数磁畴的磁矩都转向外磁场方向而处于饱和状态，此时可以取向的磁畴所剩不多，而且磁矩因与外磁场方向偏离均很大而难以取向。上述磁畴取向随磁场强度 H 的增加，开始时比较容易，随后就越来越难。反映在 $\mu-H$ 曲线上就是 μ 由小增加到最大，然后下降到小于 μ_i 而逐渐接近真空时的磁导率 μ_0 。反映在 $B-H$ 曲线上就是 B 开始上升很快，而后上升越来越慢，当 $H = H_m$ 时， H 再增加， B 增加很慢，进入饱和区。此时，要用很大的 I_0 才能使 B 稍有增加，这也是这时候空载电流很大的原因。

(2) 磁滞和磁滞回线形成的机理如下

晶格结构的各向异性和杂质，使铁心材料的晶格有歪斜、缺陷和内应力，导致磁畴磁化困难而存在阻滞。当 H 由 H_m 减小时，磁畴边界的变化和磁矩的取向成为不可逆的。也就是说，铁心由 0 到 S （见图 1-3）磁化后，外磁场再向减小方向变化时，不能按原来的变化规律逆向进行，出现了 $H=0$ 时 $B \neq 0$ 而为 $B = B_r$ 。只有当 $H = -H_c$ 时，铁心的磁性才为零（ $B=0$ ）。铁心的磁性总是落后于外磁场。对于由 S' 开始经 $-B_r$ 、 H_c 至 S 的曲线也与上述情况一样。于是就产生了图 1-3 所示的磁滞回线。

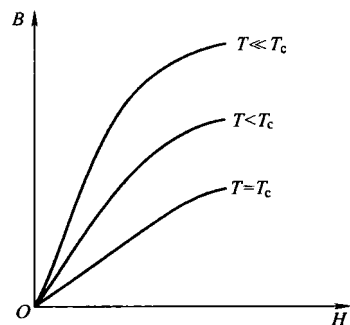


图 1-6 不同温度下的磁化曲线

2. 居里温度

居里温度是指某一个温度，在低于此温度时，材料呈铁磁性或亚铁磁性；高于此温度时，材料呈顺磁性^[13]。硅钢片与其他铁磁体一样，有一个居里温度（ T_c ）或称居里点。对于热轧和冷轧硅钢片（标准中称之为“电工钢带（片）”），居里温度约为 700°C ，对于坡莫合金为 400°C ，对于铁氧体为 $100 \sim 600^\circ\text{C}$ 。铁心温度升高时，原子运动加剧，自发磁化强度降低，磁畴结构劣化，铁磁性质变坏。反映在磁滞回线上则是变胖，在磁化曲线上则是倾斜度变大，水平部分下降。当铁心温度达到居里点时，自发磁化能力消失，磁畴结构破坏，失

去了铁磁性而转变为顺磁性质。这两种不同磁性能的转变温度就是居里温度，也称铁磁居里温度。上述性质在磁化曲线上的反映如图 1-6 所示，图中 T 为铁心的温度。

变压器的磁化曲线一般是在室温下进行实测的。在较低的绝缘等级下，磁化曲线水平部分下降不明显，一般不用考虑温度的影响，但在高温时，选取的 B_0 值可能进入饱和区，出现不正常温升以致烧毁变压器。这种情况在 H 级绝缘（最高工作温度 180℃）时较为明显。在 250℃、500℃ 以至更高耐热等级绝缘时，问题就会很严重。这时应根据变压器实际工作温度下实测磁化曲线作为设计的依据才是正确的。

1.1.4 磁滞损耗、磁致伸缩、涡流损耗、剩余损耗和附加损耗

这几种损耗总称为总磁损耗，习惯上称为铁损。

铁心在磁化过程中会产生各种损耗，主要是磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗。附加损耗中有一部分属于磁滞损耗，一部分属于涡流损耗。磁致伸缩也消耗能量，是磁滞损耗的一个组成部分。剩余损耗在低频电源变压器中的数值很小，一般不予考虑。下面对上述各种损耗的机理作一分析。

1. 磁滞损耗

铁心在磁化的过程中，因为存在晶格缺陷等原因而出现磁滞，并形成磁滞回线。磁滞回线面积的大小反映了磁畴取向的难易程度。在磁畴取向的过程中需要消耗能量，从分子的角度来看，由于不断地改变自己的状态而加剧振动，最终以铁心发热的形式表现出来。

在 GB/T 9637—2001《电工术语 磁性材料与元件》中对磁滞和磁滞损耗的定义分别为“在铁磁性或亚铁磁性物质中，磁感应强度或磁化强度随磁场的变化而发生的，且与其变化率无关的不完全可逆的变化”和“由磁滞引起的被材料吸收的功率”。定义中“与变化率无关”是指交直流情况下，磁滞损耗都是一样的。早已证明，磁滞损耗等于图 1-3 所示的静态磁滞回线的面积。那么图 1-4 所示的交流磁滞回线面积为何比直流情况下的大呢，而且频率越高大得越多。这是因为在交流情况下还有涡流损耗，频率越高，涡流损耗越大。这个比直流磁滞回线大出的面积就反映了涡流损耗的大小。在大出的面积中还有可以忽略的剩余损耗。为了区分交直流时不同的磁损耗，称交流的磁损耗为铁损。它不仅包含了交直流均存在的磁滞损耗，还包含了交流时才有的涡流损耗和可以忽略的剩余损耗。在理论上早已证明，磁滞损耗等于静态磁滞回线的面积 $\oint HdB$ 。在交流情况下，总磁损耗（铁损）等于 $\oint HdB$ 乘频率 f ，即 $f\oint HdB$ 。有意思的是，因为 B 与 H 之间是复杂的非线性关系， $\oint HdB$ 竟无法计算。人们更关心的是有指导意义的公式，而且最好将磁滞损耗和涡流损耗分开来。通过实践，得到了在交流情况下的磁滞损耗公式为

$$P_{\text{磁滞}} = KfV_c B_m^a$$

式中， $P_{\text{磁滞}}$ 为磁滞损耗功率（W）； K 为系数，取决于材料和单位； f 为电源频率（Hz）； V_c 为铁心体积（ cm^3 ）； B_m 为磁感应强度最大值（T）； a 为指数，当 $B_m < 1\text{T}$ 时 $a = 1.6$ ， $B_m > 1\text{T}$ 时 $a = 2.0$ 。

2. 磁致伸缩

磁致伸缩是材料或物体在磁化过程中出现的弹性变形^[13]。铁磁体在外磁场作用下被磁

化时，其长度和体积均发生变化，分别称为线磁致伸缩和体磁致伸缩。由于后者只在过饱和状态时才出现，电源变压器不工作在这个区域，所以本书所称磁致伸缩均指线磁致伸缩。磁致伸缩的量非常小，相对变化量仅为百万分之一，难以测量。但它使铁心产生振动而碰撞，成为变压器产生噪声的一个重要原因。参考文献[4]中指出，硅钢片的表面涂层对磁致伸缩影响很大，如冷轧取向硅钢片的表面有良好的无机绝缘涂层时，磁致伸缩将明显减小。后面将会详细介绍含硅量对磁致伸缩的影响也很大。

磁致伸缩机理大致如下。

自发磁化使在磁畴这样一个小范围内的原子矩排列成一个方向，使原子之间在不同方向上互相作用的力有所不同，影响了原子间的距离（晶格亦相应发生了变动）。对硅钢片来说，顺原子矩方向的原子距离就变长，于是磁畴在其磁矩方向上也变长，整个物体变长。当外加交流磁场时，迫使磁畴来回取向，整个物体就显示出在尺寸上周期性地伸长、缩短。

既然磁致伸缩是由于材料内部磁化状态的改变而引起的长度变化，反过来，如果对材料施加一个压力或张力（拉力），使材料的长度发生变化，则材料内部的磁化状态亦随之变化。这是磁致伸缩的逆效应，通常称为压磁效应。过大的压力或张力将会使铁磁特性变差。压磁效应又称为磁弹性效应，其定义是由于应力或应变而引起磁性材料的磁性变化^[13]。

磁致伸缩使铁心在尺寸上发生变化，互相碰撞而产生噪声。对插片式铁心，只要铁心片插得不太松，噪声不是很明显。对C型铁心，两对切割端面的距离非常小，会因尺寸变化互相碰撞而产生噪声。给C型铁心加以适当的纵向夹紧力，可使噪声减小。由于晶粒取向硅钢片对应力十分敏感，夹紧力太大时就会产生明显的压磁效应而使铁磁性质变差，空载电流明显增大，即磁滞损耗和涡流损耗明显增大。参考文献[1]中推荐的夹紧力为 $98 \sim 118 \text{ N/cm}^2$ （即 $10 \sim 12 \text{ kgf/cm}^2$ ）。

磁致伸缩消耗的功率是磁滞损耗的一个组成部分，其能量由一次电流的有功分量提供，反映在磁滞回线上是使回线变“胖”。

3. 涡流损耗和减小涡流损耗的措施

(1) 涡流损耗

涡流损耗是“由涡流引起的被材料吸收的功率”。涡流的产生如图1-7所示。在图1-7a中一整块铁心外的线圈上通以交流电流*i*，在铁心中就有交变磁场。在铁心内部会产生感应电动势，设其有效值为*E*。该电动势会在铁心中产生涡流，其大小取决于施加电流频率的高低和磁感应强度的大小以及铁心片的电阻率和厚度。由涡流产生的磁通企图削弱主磁通的变化，故涡流有去磁作用，频率越高，去磁作用越明显。反映在磁滞回线上是使回线变“胖”，故在高频时采用铁磁质粉末压制的铁心（铁氧体），使涡流限制在铁磁体的小微粒中，以降低其损耗和去磁作用。

因铁心有电阻*R*存在，涡流就会在此电阻上产生焦耳损耗，以热量形式散发，称为涡

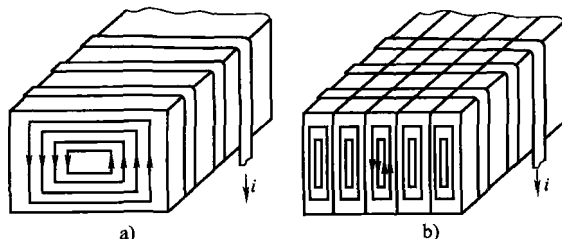


图1-7 涡流

a) 整块铁心涡流 b) 片状铁心涡流